

**Національна академія наук України
Інститут технічної теплофізики**

**Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»**

**Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису**

Абдулін Михайло Загретдинович

УДК 621.43056.632.15

ДИСЕРТАЦІЯ

**РОЗРОБЛЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ЗАСАД ТЕХНОЛОГІЙ
СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВ З ЗАСТОСУВАННЯМ СТРУМЕНЕВО-
НІШОВИХ СИСТЕМ**

05.14.06 «Технічна теплофізика і промислова теплоенергетика»

Подається на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук
Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



Абдулін М.З.

Науковий консультант — **Фіалко Наталія Михайлівна**, доктор технічних
наук, професор, член-кореспондент НАН України



Київ 2019

Анотація

Абдулін М.З. РОЗРОБКА ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ОСНОВ ТЕХНОЛОГІЙ СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВА ТА ВИКОРИСТАННЯ СТРУМЕНЕВО-НІШОВИХ СИСТЕМ □кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – «Технічна теплофізика і промислова теплоенергетика».

Ключові слова: спалювання, вогнетехнічний об'єкт, технологія спалювання, мікрофакельні пальники, струменево-нішова система, модуль, охолодження.

Задачі підвищення рівня теплової і екологічної ефективності теплоенергетичного обладнання в наш час стають все більш актуальними у зв'язку з постійним зростанням цін на паливо і вимоги, пов'язані зі станом оточуючого середовища, стають більш жорсткими.

Одним із основних напрямків підвищення теплової ефективності даного обладнання є використання нових прогресивних технологій спалювання палива. Серед таких технологій особливо вирізняються технології, основані на використанні струменево-нішових систем. Дані технології і відповідні пальникові пристрої володіють цілим рядом переваг, таких як широкий діапазон стійкого горіння, низький гідравлічний опір по тракту окисника та ін. Розвиток указаних технологій та їх широке впровадження вимагає великого об'єму знань про закономірності протікання теплофізичних і явищ, що за ними слідують, при реалізації даних технологій спалювання. У зв'язку з цим, актуальним є розробка теплофізичних основ технологій спалювання палива з використанням струменево-нішових систем.

Для реалізації поставленої цілі:

1) проведено комплекс експериментальних досліджень для встановлення закономірностей протікання робочих процесів в одиничних пальникових

модулях різних типів: струменевих модулях (модулі з виступом і модулі з приторцевій нішою); струменево-нішових модулях з прямокутною нішою – модулі зручного обтікання і модулі з торцевою нішою; струменево-нішових модулях з трапецієвидними нішами при наявності та відсутності структураторів потоку;

2) проведені дослідження гідравлічних втрат при горінні природного газу в каналі з прямокутною нішовою порожниною в залежності від основних визначальних параметрів процесу;

3) для струменево-нішових пальникових модулів з нішовими порожнинами різної форми (прямокутними і трапецієвидними) виявлені закономірності займання і зриву горіння при спалюванні різних газів в широкому діапазоні змін режимних і конструктивних факторів;

4) обґрунтована концепція модульного принципуконструювання пальникових пристроїв на основі струменево-нішових систем за результатами дослідження робочих процесів системи пальникових модулів;

5) на основі CFD моделювання досліджені характеристики течії та теплообміну в системах охолодження пальникових пристроїв, що розробляються, з обдуванням внутрішніх торцевих поверхонь стабілізаторів полум'я плоскими та круглими імпаکتними струменями при використанні дефлекторних конструкцій різної конфігурації;

6) проведені порівняльні аналізи основних характеристик робочих процесів запропонованих і традиційних пальникових пристроїв у складі різних вогнетехнічних об'єктів та встановлено енергетичну ефективність заміни штатних пальників на пальники на основі струменево-нішових систем.

Вперше в широкому діапазоні змін визначальних параметрів отримані дані експериментальних досліджень процесів течії, сумішоутворення, теплопереносу, стабілізації полум'я та вигорання палива для одиничних струменевих і струменево-нішових пальникових модулів з прямокутними і трапецієвидними нішовими порожнинами при наявності та відсутності структураторів потоку.

Вперше виконано порівняльний аналіз характеристик займання та зриву

горіння для струменево-нішових пальникових модулів з нішовими порожнинами різної форми та розмірів; виявлена роль структураторів потоку в підвищенні стабілізуючих властивостей модулів з трапецієвидними нішами; визначені характеристики пускових режимів для струменево-нішової системи з прямокутною нішою; за результатами аналізу ефектів впливу геометричних параметрів розподілу палива на режимі «бідного» зриву модуля з прямокутною нішою встановлені діапазони раціональних значень цих параметрів для умов спалювання різних газів.

Вперше виявлені основні закономірності протікання робочих процесів систем, які складаються з кількох струменево-нішових модулів; показано, що в даних системах має місце значне скорочення довжини факела у порівнянні з автономним модулем; встановлено факт практичної ідентичності робочих процесів в окремих модулях системи, що обумовлює правомірність використання модульного підходу до конструювання пальникових пристроїв типу, що розглядається.

Вперше для струменево-стабілізаторних пальникових пристроїв з трапецієвидними нішовими порожнинами встановлені закономірності теплообміну та аеродинаміки в спеціальних системах їх охолодження, котрі характеризуються тим, що в них в якості охолоджуючого агента застосовується природний газ перед його поступанням на спалювання; проведений аналіз теплового стану даних пристроїв і виконана загальна оцінка ефективності їх систем охолодження.

Виконано співставлення основних характеристик робочих процесів, запропонованих пальникових пристроїв на основі струменево-нішових систем і традиційних пальників у складі вогнетехнічних об'єктів комунальної і промислової енергетики; отримані залежності приросту к.к.д. даних об'єктів (обумовленого заміною штатних пальників на розроблені) від їх потужності та теплового навантаження.

Для модуля з приторцевою нішою отримані дані про характеристики сумішоутворення в закормовій області модуля в залежності від

гідродинамічного параметра \bar{q} , згідно яким в широкому діапазоні зміни \bar{q} (от 2,0 до 12,0) має місце практична постійність складу паливної суміші, що знаходиться в концентраційних межах займання; дана інтерпретація факту перебагачення паливної суміші при $0,2 < \bar{q} < 2,0$ на основі ефекту Коанда; встановлені закономірності впливу на процес сумішоутворення таких факторів, як відносний крок розташування отворів, їх діаметр та ін.; б) для струменево-нішових модулів с прямокутною нішою - модуля зручного обтікання і модуля з приторцевою нішою, отримані дані про структуру течії, особливостях сумішоутворення, стабілізації полум'я и вигорання палива. При цьому для модуля з приструменевою нішою: виконаний аналіз впливу величини гідродинамічного параметра \bar{q} на структуру потоку в нішової порожнині; за результатами дослідження полів концентрацій метану в розглянутому модулі виявлено, що видима границя факела, що розповсюджується від газоподаючих отворів, розташовується під віссю струменів паливного газу; показано, що має місце значне розширення діапазону стійкого горіння в бік «бідного» зриву для струменево-нішового модуля у порівнянні зі струменевим за рахунок стабілізуючих властивостей приструменевої нішової порожнини (так, для ніші 40x10 мм при $W_b = 20$ м/с значення коефіцієнта надлишку повітря «бідного» зриву збільшується з 70 до 110); встановлено, що інтенсивність вигорання палива в струменево-нішових модулях являється суттєво більш високою, ніж в струменево-нішовій системі на гладкій поверхні; в досліджуваному діапазоні зміни визначальних параметрів процесу в струменево-нішовому модулі довжина факела скорочується в 1,5...2,0 рази; в) для струменево-нішових модулів з трапецієвидною нішою при наявності та відсутності структураторів потоку виконаний аналіз впливу геометричних характеристик нішової порожнини і структураторів потоку на характеристики течії і сумішоутворення палива та окисника: за результатами візуалізації обтікання нішової порожнини повітряним потоком за допомогою сажо-гасової суміші встановлено, що в ніші з трапецієвидною формою у порівнянні з прямокутною нішою спостерігається

погіршення умов вихроутворення, так що при кутах нахилу бічних стінок ніші більше 60° основний нішовий вихор практично зникає. При встановленні ж на передній кромці ніші структуратора потоку безпосередньо під ним формується вихор досить великих розмірів; у широкому діапазоні зміни числа Рейнольдса $Re_T (2 \cdot 10^3 \dots 5 \cdot 10^4)$ виконаний порівняльний аналіз гідравлічних втрат при обтіканні ніш різної конфігурації збоку газового тракту; показано, що для трапецієвидних ніш з кутом нахилу бічних поверхонь 45° вказані втрати зменшуються приблизно на 20% у порівнянні з відповідними втратами для прямокутної ніші; на основі співставлення закономірностей сумішоутворення в трапецієвидних нішах зі структуратором потоку і нішах прямокутної форми показано, що у вказаних трапецієвидних нішах діапазон зміни відносних кроків S/d розташування газоподаючих отворів, при яких забезпечується концентраційні межі займання, зміщаються в область більш низьких значень S/d у порівнянні з прямокутною нішою.

Отримані експериментальні залежності відносних гідравлічних втрат при горінні в каналі з прямокутною нішою від гідравлічного параметра \bar{q} і коефіцієнта надлишку повітря α_2 в широкому діапазоні зміни швидкості повітря (4,0...18,8 м/с). Показано, що дані втрати являються порівняно невеликими.

Виконані комплексні дослідження характеристик займання та зриву горіння в струменево-нішових пальникових модулях різної конфігурації. В тому числі: запропонований експериментально-розрахунковий підхід до визначення характеристик «бідного» зриву полум'я в струменево-нішовій системі з прямокутною нішою, що ґрунтується на використанні рівняння теплового балансу для цієї системи і даних про масообмін в нішовій порожнині; отримані дані досліджень границь стійкості і займання для струменево-нішового модуля з прямокутною нішою в широкому діапазоні змін геометричних параметрів нішової порожнини при спалюванні природного газу і пропан-бутану; встановлено, що для досліджуваних паливних газів різниця витрат палива на режимах запалювання та «бідного» зриву тим більше, чим менша швидкість повітря. Ця різниця знижується зі зменшенням розмірів нішової порожнини і

виявляється дещо більшою для пропан-бутану у порівнянні з природним газом; показано, що конфігурація нішової порожнини має суттєвий вплив на межі займання і «бідного» зриву. Для прямокутної ніші ці границі являються значно ширшими, ніж для трапецієвидної нішової області; у випадку останньої умови запалювання і «бідного» зриву помітно погіршуються зі збільшенням кута нахилу бічних стінок ніші, так що при куті 60° загорання реалізується лише при досить високих швидкостях повітря (більше 15 м/с); збільшення об'єму ніші приводить до погіршення її стабілізаційних характеристик; встановлено, що застосування структуратора потоку забезпечує надійну стабілізацію полум'я в нішах трапецієвидної форми в широкому діапазоні зміни швидкості повітря. При цьому при довжині структуратора 2,5 мм границі «бідного» зриву виявляються дещо ширшими, ніж при його довжині 5 мм. На основі метода планування експерименту виконаний аналіз впливу геометричних параметрів паливорозподілу на характеристики «бідного» зриву для струменево-нішового модуля з прямокутною нішою і визначені області рекомендованих значень цих параметрів при спалюванні природного газу і пропан-бутану.

Отримані результати експериментальних досліджень робочих процесів системи з кількох струменево-нішових модулів: встановлений факт значного скорочення довжини факела в системі модулів з прямокутною нішою у порівнянні з одиничним модулем. Показано, що інтенсивність вигорання для системи струменево-нішових модулів суттєво вище, ніж для системи струменевих модулів на початковій стадії розвитку факела; дослідження, проведені в широкому практично важливому діапазоні змін коефіцієнта надлишку повітря ($\alpha = 1 \dots 100$) і його швидкості ($W_B = 16 \dots 25$ м/с), показали, що форма і геометричні характеристики факела полум'я являються практично однаковими за обома модулями з прямокутною нішою і визначаються, таким чином, коефіцієнтом надлишку повітря при незначній залежності від його швидкості. Зроблено висновок про те, що ідентичність характеристик процесів горіння за окремими модульними системами являється основою для реалізації модульного принципу конструювання пальникових пристроїв зі струменево-

нішовими системами; для системи модулів зручної форми обтікання виконані дослідження характеристик вигорання палива в широкому діапазоні змін коефіцієнта загромождження прохідного перерізу каналу (k_f).

На основі CFD моделювання для розроблених пальникових пристроїв виконаний комплекс досліджень теплообміну та аеродинаміки у спеціальних системах їх охолодження; проведений аналіз теплового стану даних пристроїв і виконана загальна оцінка ефективності вказаних систем охолодження: встановлені закономірності течії та теплообміну в системах охолодження з обдувом внутрішньої торцевої поверхні стабілізатора полум'я круглими імпульсними струменями або плоским імпульсним струменем при використанні дефлекторних конструкцій різної конфігурації; виявлені закономірності впливу навантаження котлоагрегату на характеристики систем охолодження розглянутих пальникових пристроїв.

За результатами виконаних досліджень розроблені технічні рішення і ефективні конструкції пальникових пристроїв на основі струменево-нішових систем для котельних агрегатів, промислових пічок, сушок та ін.

Проведені дослідження розроблених пальникових пристроїв у складі різних вогнетехнічних об'єктів. В тому числі: на основі порівняльного аналізу характеристик розроблених і традиційних пальників у складі котлоагрегату ДКВР-10/13 показано, що розпал пальникового пристрою на базі струменево-нішової системи здійснюється при тисках газу, рівних кільком міліметрам водяного стовпа і витратах, що складають кілька відсотків від номінальної витрати. Для традиційних пальників ГА-100 і ГМГ-5 і тиски рівні 60 и 150-160 мм вод.ст. відповідно при витратах газу, що складає приблизно 20% від номінальної витрати. Тиск газу перед пальником на основі струменево-нішових систем виявляється нижче у співставленні пальником ГА більш ніж удвічі, а перед пальником ГМГ більш ніж у 3 рази у всьому діапазоні змін навантаження котлоагрегата; встановлено, що заміна традиційних пальникових пристроїв пальниками на основі струменево-нішових систем забезпечує суттєве підвищення к.к.д. котла (від 3 до 15%). При цьому чим менша потужність

котлоагрегату, тим більше вказане підвищення. Дане підвищення суттєво залежить від навантаження котлоагрегата і виявляється найменшим в номінальному режимі його роботи і суттєво підвищується по мірі відхилення від даного режиму.

На основі проведених досліджень розроблені рекомендації щодо вибору режимних і конструкторських параметрів палинкових пристроїв на основі струменево-нішових систем при застосуванні у різних умовах їх експлуатації.

Результати роботи впроваджені більш ніж на 1000 вогнетехнічних об'єктах в Україні, Білорусі, Росії, Польщі, Казахстані. Сертифіковано більше 100 типів і моделей розроблених палинкових пристроїв в ДП «Сертифікаційний дослідницький центр». Отримано право встановлення розроблених палинкових пристроїв на котлах Монастирищенського, Бійського, Дорогобужського та ін. котельних заводів.

Рішенням науково-технічної ради № 16 от 26.10.2010р. Міністерства житлово-комунального господарства України рекомендовано впровадження енергозберігаючої струменево-нішової технології на об'єктах комунального господарства України.

Основні наукові положення, які повністю розкривають зміст і основні результати дисертації, викладені в 54 друкованих працях, зокрема: у 1 монографії; 2 статтях, що входять до наукометричної бази Scopus; 14 статтях, що входять до інших наукометричних баз; 2 статтях у закордонних виданнях; 15 статтях у спеціалізованих фахових виданнях; 11 статтях в інших виданнях; 2 публікаціях в матеріалах міжнародних конференцій в Україні і за кордоном; 3 патентах на винаходи і 4 патентах на корисну модель.

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1) **Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В., Алешко С.А, Меранова Н.О., Абдулин М.З.** Системы охлаждения микрофакельных горелочных устройств с плоскими стабилизаторами пламени. Киев: «София-А».

2016. 200 с. *Внесок здобувача: участь у постановці завдань, проведенні експериментальних досліджень та аналізі їх результатів.*

2) **Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Майсон Н.В., Меранова Н.О., Бутовский Л.С., Абдулин М.З., Полозенко Н.П., Клищ А.В., Стрижеус С.Н., Тимощенко А.Б.** Математическое моделирование процессов течения и смесеобразования в цилиндрическом стабилизаторном горелочном устройстве. Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2014. Т.3. №8/69. С.40-44. (н.б. *Scopus*). *Внесок здобувача: участь у постановці завдань та аналізі результатів досліджень.*

3) **Abdulin M., Siryi O., Zhuchenko A., Abdulin A.** Improve men to fre liability off ireen gineerin gequipment basedon a jet-niche technology. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018.V2. № 8(92). С.12-19. (н.б. *Scopus*). *Внесок здобувача: постановка завдань досліджень, участь у проведенні експериментів, аналіз одержаних результатів.*

4) **Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Майсон Н.В., Меранова Н.О., Бутовский Л.С., Абдулин М.З., Полозенко Н.П., Клищ А.В., Стрижеус С.Н., Тимощенко А.Б.** Интенсификация процессов переноса в горелочном устройстве с цилиндрическим стабилизатором пламени. Науковий вісник НЛТУ України. 2014. № 24.5. С. 136-142. (н.б. *IndexCopernicus*). *Внесок здобувача: участь у постановці завдань, аналізі результатів досліджень та формулюванні висновків по роботі.*

5) **Фіалко Н.М., Майсон М.В., Абдулін М.З., Ганжа М.В., Рокитько К.В., Озеров А.А., Хміль Д.П.** Закономірності течії в прямокутних кільцевих нішах циліндричних стабілізаторних пальників різної потужності. Науковий вісник НУБіП України. 2016. № 240. С. 69-76. (н.б. *IndexCopernicus*). *Внесок здобувача: участь у постановці завдань, аналізі результатів досліджень та формулюванні висновків по роботі.*

6) **Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Прокопов В.Г., Полозенко Н.П., Меранова Н.О., Алешко С.А., Милко Е.И., Озеров А.А., Кутняк О.Н., Швецова Л.А., Абдулин М.З.** Влияние на характеристики течения степени

загромадження ешелонированими стабилизаторами каналов горелочных устройств. Науковий вісник НУБіП України. 2015. №209.Ч2. С.45-53.(н.б. *IndexCopernicus*). *Внесок здобувача: участь у постановці завдань та аналізі результатів досліджень.*

7) **Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Майсон Н.В., Меранова Н.О., Абдулин М.З., Бутовский Л.С., Полозенко Н.П., Клищ А.В., Стрижеус С.Н., Тимощенко А.Б.** Влияние пластинчатых турбулизаторов потока на характеристики течения и смесеобразования топлива и окислителя в цилиндрическом стабилизаторном горелочном устройстве. Науковий вісник НЛТУ України. 2014. № 24.6. С.114-121. (н.б. *IndexCopernicus*).*Внесок здобувача: участь у постановці завдань та аналізі результатів досліджень.*

8) **Абдулін М.З., Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Меранова Н.О., Бутовський Л.С., Тимощенко О.Б., Юрчук В.Л., Іваненко Г.В., Клищ А.В.** Структура течії у системі турбулізатор – нішова порожнина. Науковий вісник НЛТУ України. 2017. Т. 27. №3. С.131-135. (н.б. *IndexCopernicus*).*Внесок здобувача: участь у постановці завдань, проведенні експериментів, аналізі результатів досліджень та формулюванні висновків по роботі.*

9) **Абдулін М.З., Фіалко Н.М., Тимощенко О.Б., Сірий О.А., Шеренковський Ю.В., Мілко Є.І., Озеров А.А., Клищ А.В., Ольховська Н.М., Швецова Л.Я.** Температурні режими зон зворотних токів у ближньому сліді циліндричних стабілізаторів полум'я. Науковий вісник НЛТУ України 2018. Т.28. №3. С.97-100. (н.б. *IndexCopernicus*).*Внесок здобувача: участь у постановці завдань, проведенні експериментів, аналізі результатів досліджень та формулюванні висновків по роботі.*

10) **Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В., Алешко С.А., Полозенко Н.П., Бутовский Л.С., Абдулин М.З., Клищ А.В., Новицкий В.С., Евтушенко А.А.** Закономерности смесеобразования в эшелонированных решетках плоских стабилизаторов пламени. Науковий вісник НЛТУ України. 2014. №24.7. С.187-191. (н.б. *IndexCopernicus*).*Внесок здобувача: участь у постановці завдань, та аналізі результатів досліджень.*

11) **Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Майсон М.В., Шеренковський Ю.В., Іваненко Г.В., Абдулін М.З., Ольховська Н.М., Швецова Л.А., Дончак М.І., Бутовський Л.С.** Особливості течії та сумішоутворення в мікрофакельних циліндричних пальникових пристроях різної потужності. Науковий вісник НУБіП України. Серія «Техніка та енергетика АПК». 2014. №194/3. С.94-101.(н.б. *IndexCopernicus*).*Внесок здобувача: участь у постановці завдань, тааналізі результатів досліджень.*

12) **Фіалко Н.М., Майсон М.В., Тимощенко О. Б., Меранова Н.О., Іваненко Г.В., Юрчук В.Л, Ганжа М.В., Дончак М.І., Абдулін М.З.** Особливості аеродинаміки пальникових пристроїв з циліндричними стабілізаторами полум'я за наявності турбулізаторів потоку на їхніх зривних кромках. Науковий вісник НУБіП України. Серія «Техніка та енергетика АПК». 2016. №252. С.52-61.(н.б. *IndexCopernicus*).*Внесок здобувача: участь у постановці завдань, тааналізі результатів досліджень.*

13) **Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковський Ю.В., Альошко С.О., Іваненко Г.В., Абдулін М.З., Кутняк О.М., Озеров А.А., Бутовський Л.С.** Структура течії в мікрофакельних пальниках з ешелонованими решітками стабілізаторів полум'я. Науковий вісник НУБіП України. Серія «Техніка та енергетика АПК». 2014. №194/3. С.107-113. (н.б. *IndexCopernicus*). *Внесок здобувача: участь у постановці завдань, тааналізі результатів досліджень.*

14) **Абдулін М.З., Сірий О.А.** Принципи організації робочого процесу камер згоряння. Авіаційно-космічна техніка та технологія. 2014. № 8/115. С.73-78. (н.б. *IndexCopernicus*).*Внесок здобувача: постановка завдань досліджень, участь у проведенні експериментів та аналізі результатів досліджень.*

15) **Абдулін М.З., Баранюк О.В., Сірий О.А.** Дослідження гідродинаміки потоку повітря в струменево-нішовій системі спалювання палива. Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2016. № 9/1181. С. 94-100. (н.б. *IndexCopernicus*).*Внесок здобувача: постановка завдань досліджень та участь в аналізі одержаних даних.*

16) **Абдулін М.З., Сірий О.А.** Дослідження енергетичних показників струменево-нішової системи спалювання палива. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2018. № 12/1288. С.89-94. (н.б. *IndexCopernicus*). *Внесок здобувача: постановка завдань, участь у проведенні експериментів та аналізі результатів.*

17) **Абдулін М.З., Сірий О.А.** Ізотермічні дослідження модулів ПП на основі струменево-нішових систем. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2013. № 13/987. С.81-88. (н.б. *Ulrich'sPeriodicalDirectory*). *Внесок здобувача: участь в постановці завдань, проведенні досліджень та аналізі отриманих даних.*

18) **Абдулін М.З., Джамал І.** Критичні режими та конструктивні параметри мікродифузійного пальникового пристрою. Экотехнологии и ресурсосбережение. 1997. №2. С.70-71. *Внесок здобувача: постановка завдань досліджень, участь у проведенні експериментів та аналізі результатів досліджень.*

19) **Абдулин М.З.** Технологии сжигания топлива – основы создания эффективных камер сгорания. Авиационно-космическая техника и технология. 2009. №4/61. С. 40-42.

20) **Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Алешко С.А., Полозенко Н.П., Тимошенко А.Б., Абдулин М.З., Малецкая О.Е., Ночовный А.В.** Анализ влияния геометрической формы нишевой полости на аэродинамическое сопротивление канала. Промышленная теплотехника. 2012. №1. С.72-76. *Внесок здобувача: постановка завдань досліджень, участь аналізі їх результатів.*

21) **Абдулін М.З., Джамал І.** Дослідження пальникового пристрою з поперечною подачею струменів палива. Экотехнологии и ресурсосбережение. 1997. №2. С.68-69. *Внесок здобувача: постановка завдань досліджень, участь у проведенні експериментальних досліджень та аналізі їх результатів.*

22) **Абдулин М.З.** Применение струйно-нишевой технологии сжигания топлива в энергетических установках. «Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование», Вісник НТУ «ХПІ». 2005. №6. С.130-144.

23) **Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В., Алешко С.А., Мерадова Н.О., Абдулин М.З., Бутовский Л.С., Полозенко Н.П., Мартюк О.В.** Исследование эффективности систем охлаждения микрофакельных горелочных устройств. Промышленная теплотехника. 2013. №1. С.36-41. *Внесок здобувача: участь у постановці завдань та аналізі результатів досліджень.*

24) **Абдулін М.З., Сірій О.А.** Дослідження сталості горіння в струменево-нішовій системі при обмеженні далекобійності паливних струменів. К: Енергетика: економіка, технології, екологія. 2014. № 3/37. С.22-29. *Внесок здобувача: постановка завдань досліджень, участь у проведенні експериментів та аналізі результатів.*

25) **Фиалко Н.М., Абдулин М.З., Шеренковский Ю.В., Майсон Н.В.** Характеристики циркуляционных течений в ближнем следе цилиндрических стабилизаторов пламени. Промышленная теплотехника. 2015. №3. С.47-53. *Внесок здобувача: участь у постановці завдань досліджень, проведенні експериментів та аналізі результатів.*

26) **Фиалко Н.М., Майсон Н.В., Шеренковский Ю.В., Ганжа М.В. Абдулин М.З., Варич А.В., Войтенко А.Ю.** Сравнительный анализ закономерностей течения и смесеобразования при использовании в качестве стабилизаторов пламени плоских и цилиндрических тел. Промышленная теплотехника. 2015. №7. С.181-186. *Внесок здобувача: участь у постановці завдань та аналізі результатів досліджень.*

27) **Томаш М.А., Изотов Б.В., Турбаба А.Е., Абдулин М.З., Дворцин Г.Р., Гребинная М.В.** Модернизация горелочного оборудования зажигательных горнов агломерационных машин. Журнал «Металл и литье Украины». 2017. №1. С.16-19. *Внесок здобувача: участь у розробленні рекомендацій щодо застосування пальникових пристроїв на основі струменево-нішових систем в агломераційних печах.*

28) **Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Алешко С.А., Шеренковский Ю.В., Мерадова Н.О., Абдулин М.З., Бутовский Л.С., Коханенко П.С.,**

Полозенко Н.П. Математическое моделирование динамики течения и смесеобразования при сжигании топлива в горелочных устройствах струйно-нишевого типа. Промышленная теплотехника. 2009. №7. С.24. *Внесок здобувача: участь у постановці завдань та аналізі результатів.*

29) **Абдулин М.З., Жученко А.М., Дворцин Г.Р., Кулешов Ю.А., Абдулин А.М.** Модернизация огнетехнического оборудования. Энергонадзор. 2014. №4. С.27-29. *Внесок здобувача: аналіз сучасних технологій спалювання газу.*

30) **Абдулин М.З., Дворцин Г.Р., Жученко А.М.** Технология сжигания – определяющий фактор эффективности огнетехнических объектов. Новости теплоснабжения. 2009. №11. 8 с. *Внесок здобувача: аналіз результатів досліджень енергетичної ефективності пальникових пристроїв на основі струменево-нішових систем.*

31) **Abdulin M.Z., Siryi O.A.** Research of hydro dynamic flame stabilizer with cross fuel feed characteristics. Scientific Journal of Riga Technical University. Series: Power and Electrical Engineering. 2014. №32. P.12-18. *Внесок здобувача: постановка завдань досліджень, участь у проведенні експериментів та аналізі одержаних даних.*

32) **Абдулин М.З., Овсиенко И.П., Дворцин Г.Р., Жученко А.М., Кулешов Ю.А.** Оптимизация топочного процесса - путь к повышению эффективности, экологической безопасности и надежности работы котлов. Новости теплоснабжения. 2008. №4. С. 31-34. *Внесок здобувача: постановка завдань досліджень та аналіз результатів.*

33) **Абдулин М.З.** Энергоэффективная струйная нишевая технология сжигания газа на объектах малой и средней энергетики. Праці ІЕД НАНУ. 2006. С.83-87.

34) **Polupan G., Abdulin M., Real Ramirez C. A., Tolentino Eslava G., Lopez Ramirez S.,** Desarrollo e Investigacion Computacional de Quemadores Rectangulares con Combustion Tipo Microdifusa. 8 Congreso Nacional de Ingenieria Electromecanica y de Sistemas. Mexico. 2004. С. 312-317. *Внесок здобувача:*

участь у постановці завдань досліджень та аналізі результатів.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

35) **Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Майсон Н.В., Шеренковский Ю.В., Иваненко Г.В., Абдулин М.З., Бутовский Л.С., Ольховская Н.Н., Швецова Л.А., Дончак М.И.** Закономерности течения и смесеобразования топлива и окислителя в микрофакельных цилиндрических горелочных устройствах различной мощности. Тези II міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК». (15 – 16 жовтня 2014). Київ. С.117-118

36) **Абдулин М.З. Фиалко Н.М. Меранова Н.О. Дворцин Г.Р. Жученко А.М.** Научно-технический опыт апробации струйно-нишевой технологии сжигания топлива на объектах промышленной и коммунальной энергетики. Материалы V Международной конференции «Проблемы промышленной теплотехники». (22-26 мая 2007). Киев. 2007. С. 108.

37) **Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В, Алешко С.А., Меранова Н.М., Полозенко Н.П., Бутовский Л.С., Абдулин М.З., Мельник П.М.** Характеристики течения в лестнично эшелонированной решетке стабилизаторов пламени. Сборник трудов «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики». Институт промышленной экологии. Киев: ИПЦ АЛКОН НАН Украины. 2014. С.93-97.

38) **Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Майсон М.В., Абдулін. М.З., Бутовський Л.С., Полозенко Н.П., Стрижеус С.М., Єніна А.О., Тимощенко О.Б.** Математичне моделювання процесів сумішоутворення в пальниковому пристрої з циліндричним стабілізатором полум'я. Сборник трудов «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики». Институт промышленной экологии. Киев: ИПЦ АЛКОН НАН Украины. 2014. С. 114-117.

39) **Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковський Ю.В., Альошко С.О., Абдулін М.З., Бутовський Л.С., Озеров А.А.** Комп'ютерне моделювання течії та теплообміну в системах охолодження мікрофакельних пальникових

пристроїв. Сборник трудов «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики». Институт промышленной экологии. Киев: ИПЦ АЛКОН НАН Украины. 2014. С. 117-122.

40) **Фіалко Н.М., Шеренковський Ю.В., Майсон М.В., Абдулін М.З., Хомук С.В., Єніна А.О., Новицький В.С., Тимощенко О.Б.** Підвищення інтенсивності процесів переносу в циліндричному стабілізаторному пальнику шляхом застосування прямокутних кільцевих ніш. Сборник трудов «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики». Институт промышленной экологии. Киев: ИПЦ АЛКОН НАН Украины. 2014. С. 122-125.

41) **Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В., Алешко С.А., Меранова Н.М., Полозенко Н.П., Абдулин М.З., Бутовский Л.С., Мельник П.М.** Влияние количества стабилизаторов пламени на особенности течения в эшелонированных стабилизаторных решетках. Сборник трудов «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики». Институт промышленной экологии. Киев: ИПЦ АЛКОН НАН Украины. 2014. С. 125-128.

42) **Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В., Алешко С.А., Полозенко Н.П., Бутовский Л.С., Абдулин М.З., Иваненко Г.В., Варич А.В., Мартюк О.В.** Влияние шага смещения стабилизаторов пламени на характеристики смесеобразования топлива и окислителя. Сборник трудов «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики». Институт промышленной экологии. Киев: ИПЦ АЛКОН НАН Украины. 2015. С. 107-109.

43) **Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковский Ю.В., Алешко С.А., Полозенко Н.П., Меранова Н.О., Бутовский Л.С., Абдулин М.З.** Закономерности формирования температурных полей продуктов горения. Сборник трудов «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики». Институт промышленной экологии. Киев: ИПЦ АЛКОН НАН Украины. 2015. С. 110-113.

44) **Фиалко Н.М., Абдулин М.З., Шеренковский Ю.В., Майсон Н.В., Серый А.А., Рокитько К.В.** Особенности течения и температурных режимов циркуляционных зон в ближнем следе цилиндрических стабилизаторов пламени.

Сборник трудов «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики». Институт промышленной экологии. Киев: ИПЦ АЛКОН НАН Украины. 2015. С. 113-120.

45) **Фиалко Н.М., Майсон М.В., Меранова Н.О., Иваненко Г.В., Юрчук В.Л., Абдулин М.З., Ганжа М.В., Дончак М.И.** Закономерности течения в цилиндрических горелочных устройствах с турбулизаторами потока на их затупленных задних кромках. Сборник трудов «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики». Институт промышленной экологии. Киев: ИПЦ АЛКОН НАН Украины. 2016. С. 117-120.

46) **Абдулин М.З., Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Меранова Н.О., Тимошенко А.Б., Юрчук В.Л., Иваненко Г.В., Клищ А.В.** Характеристики течения в горелочном устройстве с угловыми турбулизаторами потока. Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики. Институт промышленной экологии. Киев: ИПЦ АЛКОН НАН Украины. 2017. С. 99-101.

47) **Абдулін М.З., Фіалко Н.М., Тимошенко О.Б., Сірій О.А., Шеренковський Ю.В., Мілко Є.І., Озеров А.А., Клищ А.В., Ольховська Н.М., Швецова Л.Я.** Температурні режими зон зворотних токів у ближньому сліді циліндричних стабілізаторів полум'я. Сборник трудов «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики». Институт промышленной экологии. Киев: ИПЦ АЛКОН НАН Украины. 2018. С.79-82.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

Патенти:

48) Патент на винахід №51844, Україна. Спосіб спалювання природного газу у потоці повітря, що набігає. Дворцин Г.Р., Абдулін М.З. // опубл. 16.12.2002.

49) Патент на винахід № 54616, Україна. Пристрій для спалювання газу. Дворцин Г.Р., Абдулін М.З. // опубл. 17.03.2003.

50) Патент на винахід № 005471, Евразия. Способ сжигания природного

газа в набегающем потоке воздуха. Абдулин М.З., Дворцин Г.Р // опубл. 24.02.2005.

51) Патент на корисну модель № 35108, Україна. Пристрій для спалювання газу. Жученко А.М., Дворцин Г.Р., Абдулін М.З. // опубл. 26.08.2008.

52) Патент на корисну модель № 49938, Україна. Пальниковий пристрій. Абдулін М.З., Долінський А.А., Дворцин Г.Р., Жученко А.М., Кулешов Ю.О., Мілко Є.І., Фіалко Н.М. // опубл. 07.04.2010.

53) Патент на корисну модель № 83358, Україна. Газовий пальник. Фіалко Н.М., Бутовський Л.С., Абдулін М.З., Дворцин Г.Р., Грановська О.О., Меранова Н.О. // опубл. 10.09.2013.

54) Патент на корисну модель №82967, Україна. Пальник газовий. Фіалко Н.М., Абдулін М.З., Бутовський Л.С., Дворцин Г.Р. // опубл. 27.08.2013.

Основні результати у публікаціях відображені повно.

Summary

Abdulin M.Z. DEVELOPMENT OF THERMAL PHYSICAL BASES OF FUEL BURNING TECHNOLOGIES AND USE OF LOW-FLOW SYSTEMS – Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Thesis for a Doctor of Science Degree. Specialty 05.14.06 - Technical Thermophysics and Industrial Heat Power Engineering.

Keywords: combustion, refractory, combustion technology, micro-torch burners, jet-niche system, module, cooling.

The challenges of improving the thermal and environmental performance of thermal power equipment are becoming more urgent nowadays due to the steady rise in fuel prices and environmental requirements are becoming more stringent.

One of the main areas for improving the thermal efficiency of this equipment is the use of new advanced fuel combustion technologies. Such technologies are particularly distinguished by technologies based on the use of jet-niche systems. These

technologies and the corresponding burner devices have a number of advantages, such as a wide range of stable combustion, low hydraulic resistance along the oxidant path, and others. The development of these technologies and their widespread adoption requires a great deal of knowledge about the laws of the flow of thermophysical and the phenomena that follow them in the implementation of these combustion technologies. In this regard, the development of thermophysical fundamentals of fuel combustion technologies using jet-niche systems is relevant.

In order to realize this gO.A.l: 1) a complex of experimental researches was carried out for establishing regularities of workflows in single burner modules of different types: jet modules (modules with protrusion and modules with socket niche); rectangular recessed niche modules - Convenient flow modules and end niche modules; jet-niche modules with trapezoidal niches in the presence and absence of flow structurers; 2) studies of hydraulic losses during combustion of natural gas in a channel with a rectangular niche cavity, depending on the main determining parameters of the process; 3) patterns of ignition and niche burner modules with niche cavities of different shapes (rectangular and trapezoidal) revealed patterns of ignition and failure of combustion during the combustion of different gases in a wide range of changes in mode and design factors; 4) the substantiated concept of the modular principle of designing burner devices based on jet-niche systems based on the results of the study of the working processes of the burner module system; 5) CFD modeling investigates the characteristics of flow and heat exchange in the systems of cooling of developing burners with blowing the inner face surfaces of flame stabilizers with flat and circular impact jets using deflector designs of different configuration; 6) comparative analyzes of the main characteristics of the workflows of the proposed and traditional burner devices in the composition of different fire objects and the energy efficiency of replacement of regular burners for burners based on jet-niche systems.

For the first time in a wide range of changes in determining parameters, data are obtained from experimental studies of flow processes, mixture formation, heat transfer, flame stabilization and fuel burnout for single jet and jet niche burner modules with rectangular and trapezoidal niche cavities.

For the first time, a comparative analysis of the characteristics of ignition and combustion failure for jet-niche burner modules with niche cavities of various shapes and sizes was performed; revealed the role of flow structurers in enhancing the stabilizing properties of modules with trapezoidal niches; an approach to determining the characteristics of the starting modes for a rectangular niche jet system is developed; the results of the analysis of the effects of the influence of geometric parameters of fuel distribution on the mode of "poor" failure of the module with a rectangular niche set ranges of rational values of these parameters for the conditions of combustion of different gases.

Basic patterns of workflow of systems consisting of several jet-niche modules were first discovered; it is shown that these systems have a significant reduction in torch length compared to the standalone module; the fact of practical identity of work processes in separate modules of the system is established, which determines the legitimacy of using the modular approach to the design of the burners of the type under consideration.

For the first time, for jet-stabilizing burner devices with trapezoidal niche cavities, regularities of heat exchange and aerodynamics have been established in special cooling systems, which are characterized by the fact that natural gas is used as a cooling agent before it enters combustion; an analysis of the thermal state of these devices was performed and a general evaluation of the efficiency of their cooling systems was made.

Comparison of the main characteristics of the workflows, proposed burners based on jet-niche systems and traditional burners in the composition of the refractory objects of municipal and industrial energy; obtained dependences of increase of efficiency these objects (due to the replacement of regular burners for developed ones) from their capacity and heat load.

For the module with a niche data on the characteristics of the mixture formation in the outermost region of the module, depending on the hydrodynamic parameter q , according to which in the wide range of changes q (from 2.0 to 12.0), there is a practical constancy of the composition of the fuel mixture, which is in the

concentration limits of ignition; given an interpretation of the fact that the fuel mixture is enriched at $0.2 \ll 2.0$ based on the CO₂ effect; established patterns of influence on the process of mixture formation of such factors as the relative pitch of the pitch of the holes, their diameter, etc.; b) for the rectangular niche modules - the convenient flow and the niche module, the data on flow structure, blend characteristics, flame stabilization and fuel burnout are obtained. At the same time for the module with a bay niche: analysis of the influence of the value of the hydrodynamic parameter on the flow structure in the niche cavity; it is shown that when the value is greater than 5, the position of the center of the main niche vortex is shifted towards the main stream by the level of the niche cavity slice; results of the study of the fields of concentration of methane in the considered module revealed that the visible boundary of the torch propagating from the gas holes is located under the axis of the jets of fuel gas; it is shown that there is a significant expansion of the range of steady combustion towards the "poor" breakdown for the jet-niche module in comparison with the jet due to the stabilizing properties of the jet niche cavity (yes, for a niche of 40x10 mm at $W = 20$ m / s the coefficient of the excess coefficient "Poor" disruption increases from 70 to 110); found that the intensity of combustion in the jet-niche modules is significantly higher than in the jet-niche system on a smooth surface; in the studied range of change of determining parameters of the process in the jet-niche module the length of the torch is reduced by 1.5... 2.0 times; c) for jet-niche modules with trapezoidal niche in the presence and absence of flow structurers, the influence of geometric characteristics of the niche cavity and flow structurers on the characteristics of the flow and the formation of the fuel and oxidizer was performed: by the results of visualization of the flow of the niche cavity by air that in a niche with a trapezoidal shape compared to a rectangular niche there is a deterioration of the conditions of vortex formation, so that at the angles of inclination of the lateral niche walls more than 60° the main niche vortex is virtually disappearing. When the niches of the flow structuration are mounted on the leading edge of the stream directly below it, a vortex of sufficiently large sizes is formed; a wide range of changes in the Reynolds number $Re_g (2 \cdot 10^3 \dots 5 \cdot 10^4)$ performed a

comparative analysis of hydraulic losses in the flow of niches of different side configuration of the gas path; it is shown that for trapezoidal niches with an angle of inclination of lateral surfaces of 45° these losses are reduced by about 20% compared with the corresponding losses for a rectangular niche; on the basis of the comparison of the patterns of mixture formation in trapezoidal niches with the flow structuration and rectangular niches, it is shown that in these trapezoidal niches the range of change of the relative steps S / d of the location of the gas flow openings, in which the concentration limits of the ignition are shifted to the region of lower d values compared to a rectangular niche.

The experimental dependences of the relative hydraulic losses during combustion in a channel with a rectangular niche on the hydraulic parameter and the coefficient of excess air $\alpha\Sigma$ over a wide range of changes in air velocity (4.0... 18.8 m / s) were obtained. It is shown that these losses are relatively small and in the considered conditions do not exceed 1.6.

Complex investigations of combustion characteristics and combustion failure in jet-niche burner modules of different configuration were performed. Including: a proposed computational and experimental approach to determine the characteristics of a "poor" flame breakdown in a rectangular niche jet system based on the use of the heat balance equation for this system and the mass cavity data in the niche cavity; obtained data of studies of the boundaries of stability and ignition for a jet-niche module with a rectangular niche in a wide range of changes in the geometric parameters of the niche cavity during the combustion of natural gas and propane-butane; it was found that for the investigated fuel gases, the difference between the fuel consumption in the ignition and the "poor" breakdown modes is greater than the lower air velocity. This difference decreases with decreasing niche size and is slightly larger for propane-butane compared to natural gas; it is shown that the configuration of the niche cavity has a significant impact on the limits of ignition and "poor" breakdown. For a rectangular niche, these boundaries are much wider than for a trapezoidal niche area; in the case of the last condition of ignition and "poor" breakdown significantly worsen with an increase in the angle of inclination of the side

walls of the niche, so that at an angle of 60° the ignition is realized only at sufficiently high speeds of the air (more than 10 m / s); increasing the volume of the niche leads to a deterioration of its stabilization characteristics; it has been found that the use of a flow structure provides reliable flame stabilization in trapezoidal niches over a wide range of air velocity variations. At the same time, at the length of the 2.5 mm constructor, the boundaries of the “poor” breakdown are slightly wider than at its length of 5 mm; the influence of the geometric parameters of the fuel distribution on the characteristics of the "poor" breakdown for the jet-niche module with a rectangular niche was performed on the basis of the experimental design method, and the areas of recommended values of these parameters for the combustion of natural gas and propane-butane were determined.

The results of experimental studies of the workflows of a system of several jet-niche modules were obtained: the fact of a significant reduction of the torch length in a system of modules with a rectangular niche compared to a single module was established. It is shown that the intensity of burnout for the system of jet-niche modules is significantly higher than for the system of jet modules at the initial stage of torch development; studies conducted in a wide, practically important range of changes in the coefficient of excess air ($\alpha = 1 \dots 100$) and its velocity ($W_v = 16 \dots 25$ m / s), showed that the shape and geometric characteristics of the flame torch are almost identical in both modules with a rectangular niche and thus determined by the coefficient of excess air with little dependence on its velocity. It is concluded that the identity of the characteristics of combustion processes for individual modular systems is the basis for the implementation of the modular principle of designing burner devices with jet-niche systems; for the system of modules of the convenient form of flow the researches of the characteristics of combustion of fuel in a wide range of changes of the coefficient of blockage of the through passage of the channel (k_f) were performed.

On the basis of CFD modeling for the developed burner devices complex of researches of heat exchange and aerodynamics in special systems of their cooling is made; analysis of the thermal state of these devices and the overall assessment of the

efficiency of these cooling systems: regularities of flow and heat exchange in cooling systems with blowing the inner face surface of the flame stabilizer with circular impact jets or flat impact jets using deflector designs of different configurations; regularities of influence of boiler IO.A.d on characteristics of cooling systems of the considered burner devices are revealed.

According to the results of the researches, technical solutions and efficient designs of burner devices were developed on the basis of jet-niche systems for boiler units, industrial furnaces, dryers, etc.

The researches of the developed burner devices in the composition of different fire objects are carried out. Including: on the basis of a comparative analysis of the characteristics of developed and traditional burners in the composition of the boiler DKVR-10/13, it is shown that the ignition of the burner device on the basis of the jet-niche system is carried out at gas pressures equal to several millimeters of water column and costs, which are several percent from the nominal cost. For traditional burners GA-100 and GMG-5 and pressures equal to 60 and 150-160 mm of water, respectively, at a gas flow rate of approximately 20% of the nominal flow rate. The gas pressure in front of the burner on the basis of jet-niche systems is lower in comparison with the burner GA more than twice, and before the burner GMG more than 3 times in the whole range of changes in the IO.A.d of the boiler; found that the replacement of traditional burner devices with burners based on jet-niche systems provides a significant increase in efficiency. boiler (3 to 15%). The lower the power of the boiler, the higher the specified increase. This increase is significantly dependent on the IO.A.d of the boiler and is the smallest in the nominal mode of its operation and significantly increases as the deviation from this mode.

On the basis of the conducted researches the recommendations on the choice of mode and design parameters of burner devices on the basis of jet-niche systems at application in different operating conditions have been developed.

The results of the work have been implemented at more than 1,000 fire-fighting facilities in Ukraine, Belarus, Russia, Poland, Kazakhstan. More than 100 types and models of designed burners have been certified at the GP Certification

Research Center. The right of installation of the developed burner devices on the boilers of Monastyrshchensky, Biysky, Dorohobuzhsky and other was obtained. boiler plants.

Ministry of Housing and Communal Services of Ukraine by the decision of the Scientific and Technical Council № 16 of 26.10.2010. It is recommended that energy-saving jet-niche technology be implemented at utilities in Ukraine.

The main scientific provisions that fully reveal the content and main results of the dissertation, outlined in one monograph, 62 printed works, including 38 articles in specialized publishers of Ukraine, of which 16 in journals included in cytometric databases, and 11 copyright certificates and patents of Ukraine. The results of the work were reported at 20 international scientific and technical conferences and seminars.

Scientific works in which the main scientific results of the dissertation are published:

1) Fialko N.M., Prokopov V.G., Sherenkovsky YV, Aleshko SA, Meranova NO, Abdulin M.Z. Cooling systems for micro-torch burners with flat flame stabilizers. Kiev: Sofia-A. 2016. 200 p. Applicant's contribution: participation in setting tasks, conducting experimental studies and analyzing their results.

2) Fialko N.M., Sherenkovsky Yu.V., Myson NV, Meranova NO, Butovsky LS, Abdulin M.Z., Polozenko NP, Klishch AV, Strizheus SN, Tymoshenko AB Mathematical modeling of flow and mixture formation processes in a cylindrical stabilizer burner device. Eastern European Journal of Advanced Technology. 2014. Vol.3. №8 / 69. Pp. 40-44. (n.d. Scopus). Applicant's contribution: Participation in task setting and analysis of research findings.

3) Abdulin M., Siryi O., Zhuchenko A., Abdulin A. Improvement of reliability of fire engineering equipment based on jet-niche technology. Eastern European Journal of Enterprise Technologies. 2018. V2. No. 8 (92). P.12-19. (n.d. Scopus). Applicant's contribution: setting research gO.A.ls, participating in experiments, analyzing the results obtained.

4) Fialko N.M., Sherenkovsky Yu.V., Myson NV, Meranova NO, Butovsky

LS, Abdulin M.Z., Polozenko NP, Klishch AV, Strizheus SN, Tymoshenko AB Intensification of transfer processes in a burner device with a cylindrical flame stabilizer. Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine. 2014. № 24.5. Pp. 136-142. (nb. Index Copernicus). Applicant's contribution: participation in setting tasks, analyzing research results and formulating work conclusions.

5) Fialko N.M., Mason M.V., Abdulin M.Z., Ganza M.V., Rokitko KV, Ozerov AA, Khmil DP Patterns of flow in rectangular annular niches of cylindrical stabilizer burners of different power. Scientific Bulletin of NULES of Ukraine. 2016. No. 240. P. 69-76. (nb. Index Copernicus). Applicant's contribution: participation in setting tasks, analyzing research results and formulating work conclusions.

6) Fialko N.M., Sherenkovsky Yu.V., Prokopov V.G., Polozenko NP, Meranova NO, Aleshko SA, Milko EI, Ozerov AA, Kutnyak ON, Shvetsova LA, Abdulin M.Z. Influence on the flow characteristics of the degree of congestion by echeloned stabilizers of channels of burner devices. Scientific Bulletin of NULES of Ukraine. 2015. №209.Ч2. P.45-53. (N.b. Index Copernicus). Applicant's contribution: Participation in task setting and analysis of research finding.

7) Fialko N.M., Sherenkovsky Yu.V., Myson NV, Meranova NO, Abdulin M.Z., Butovsky LS, Polozenko NP, Klishch AV, Strizheus SN, Tymoshenko AB Influence of lamellar flow turbulators on the characteristics of flow and mixture formation of fuel and oxidizer in a cylindrical stabilizer burner device. Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine. 2014. No. 24.6. P.114-121. (nb. Index Copernicus). Applicant's contribution: Participation in task setting and analysis of research findings.

8) Abdulin M.Z., Fialko N.M., Sherenkovsky YV, Meranova NO, Butovsky LS, Tymoshenko OB, Yurchuk VL, Ivanenko GV, Mite AV The structure of the flow in the turbulizer system is a niche cavity. Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine. 2017. T. 27. №3. P.131-135. (nb. Index Copernicus). Applicant's contribution: participation in setting tasks, conducting experiments, analyzing research results, and formulating work conclusions.

9) Abdulin M.Z., Fialko N.M., Tymoshenko OB, SiryiO.A., Sherenkovsky YV, Milko EI, Ozerov AA, Klishch AV, Olkhovska N.M., Shvetsova L.Ya.

Temperature regimes of the reverse current zones in the near trace of cylindrical flame stabilizers. Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine 2018. Vol. 28. №3. P.97-100. (nb. Index Copernicus). Applicant's contribution: participation in setting tasks, conducting experiments, analyzing research results, and formulating work conclusions.

10) Fialko N.M., Prokopov V.G., Sherenkovsky Yu.V., Aleshko SA, Polozenko NP, Butovsky LS, Abdulin M.Z., Klishch AV, Novitsky VS, Evtushenko AA Patterns of mixture formation in echelons of flat flame stabilizers. Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine. 2014. №24.7. P.187-191. (nb. Index Copernicus). Applicant's contribution: participation in task setting and analysis of research results.

11) Fialko N.M., Prokopov V.G., Myson M.V., Sherenkovsky YV, Ivanenko GV, Abdulin M.Z., Olkhovskaya N.M., Shvetsova LA, Donchak M .I., Butovsky LS Features of flow and mixture formation in micro-torch cylindrical burners of different power. Scientific Bulletin of NULES of Ukraine. APK Engineering and Energy series. 2014. №194 / 3. P.94-101. (nb. Index Copernicus). Applicant's contribution: participation in setting tasks and analyzing research results.

12) Fialko N.M., Mayson M.V., Tymoshenko OB, Meranova NO, Ivanenko GV, Yurchuk VL, Ganzha M.V., Donchak MI, Abdulin M.S. Features of the aerodynamics of burners with cylindrical flame stabilizers in the presence of flow turbulators at their breaking edges. Scientific Bulletin of NULES of Ukraine. APK Engineering and Energy series. 2016. №252. P.52-61. (nb. Index Copernicus). Applicant's contribution: participation in setting tasks and analyzing research results.

13) Fialko N.M., Prokopov V.G., Sherenkovsky YV, Alyoshko SO, Ivanenko GV, Abdulin M.Z., Kutnyak OM, Ozerov AA, Butovsky LS Flow structure in micro-torch burners with split flame stabilizer arrays. Scientific Bulletin of NULES of Ukraine. APK Engineering and Energy series. 2014. №194 / 3. P.107-113. (nb. Index Copernicus). Applicant's contribution: participation in setting tasks and analyzing research results.

14) Abdulin M.Z., SiryiO.A. Principles of organization of workflow of combustion chambers. Aerospace Engineering and Technology. 2014. No. 8/115. P.73-78. (nb. Index Copernicus). Applicant's contribution: setting research gO.A.ls,

participating in experiments, and analyzing research results.

15) Abdulin M.Z., Baranyuk OV, SiryiO.A. Investigation of the hydrodynamics of air flow in a jet-niche fuel combustion system. Bulletin of NTU "KPI". Series: Energy and Thermal Engineering Processes and Equipment. 2016. № 9/1181. Pp. 94-100. (nb. Index Copernicus). Applicant's contribution: setting research objectives and participating in the analysis of the data obtained.

16) Abdulin M.S., Siryi O.A. Investigation of energy performance of jet-niche fuel combustion system. Bulletin of NTU "KPI". Series: Energy and Thermal Engineering Processes and Equipment. 2018. № 12/1288. P.89-94. (nb. Index Copernicus). Applicant contribution: setting tasks, participating in experiments, and analyzing results.

17) Abdulin M.Z., SiryiO.A. Isothermal studies of PP modules based on jet-niche systems. Bulletin of NTU "KPI". Series: Energy and Thermal Engineering Processes and Equipment. 2013. № 13/987. P.81-88. (nb. Ulrich's Periodical Directory). Applicant's contribution: Participation in task setting, research, and analysis of data obtained.

18) Abdulin M.Z., Jamal I. Critical modes and design parameters of a microdiffusion burner device. Ecotechnology and resource conservation. 1997. №2. Pp. 70-71. Applicant's contribution: setting research gO.A.ls, participating in experiments, and analyzing research results.

19) Abdulin M.S. Fuel combustion technologies are the foundations of creating efficient combustion chambers. Aerospace Engineering and Technology. 2009. №4 / 61. Pp. 40-42.

20) Fialko N.M., Prokopov V.G., Aleshko SA, Polozenko NP, Tymoshenko AB, Abdulin M.Z., Maletskaya OE, Nochevny AV Analysis of the influence of the geometric shape of the niche cavity on the aerodynamic resistance of the channel. Industrial heat engineering. 2012. №1. P.72-76. Applicant's contribution: setting of research tasks, participation of analysis of their results.

21) Abdulin M.Z., Jamal I. Investigation of burner device with cross flow of fuel jets. Ecotechnology and resource conservation. 1997. №2. P.68-69. Applicant's

contribution: setting research gO.A.ls, participating in experimental research and analyzing their results.

22) Abdulin M.S. Application of jet-niche technology of combustion of fuel in power plants. "Energy and Thermal Engineering Processes and Equipment", Bulletin of NTU "KPI". 2005. №6. P.130-144.

23) N.M., Prokopov V.G., Sherenkovsky Yu.V., Aleshko SA, Meranova NO, Abdulin M.Z., Butovsky LS, Polozenko NP, Martyuk OV Investigation of the efficiency of cooling systems of micro-torch burners. Industrial heat engineering. 2013. №1. C.36-41. Applicant's contribution: Participation in task setting and analysis of research findings.

24) Abdulin M.Z., Siryi O.A. Investigation of the constancy of combustion in the jet-niche system while limiting the range of fuel jets. K: Energy: Economics, Technologies, Ecology. 2014. № 3/37. P.22-29. Applicant contribution: setting research gO.A.ls, participating in experiments, and analyzing results.

25) Fialko N.M., Abdulin M.Z., Sherenkovsky Yu.V., Myson NV Characteristics of circulating currents in the near track of cylindrical flame stabilizers. Industrial heat engineering. 2015. №3. P.47-53. Applicant Contribution: Participation in research objectives, experiments, and results analysis.

26) Fialko N.M., Myson NV, Sherenkovsky Yu.V., Ganza M.V. Abdulin M.Z., Varich AV, Voitenko A.Yu. Comparative analysis of flow patterns and mixtures when using flat and cylindrical bodies as flame stabilizers. Industrial heat engineering. 2015. №7. P.181-186. Applicant's contribution: Participation in task setting and analysis of research findings.

27) Tomash MA, Izotov BV, Turbaba AE, Abdulin M.Z., Dvortsin GR, Grebinaya M.V. Modernization of the burner equipment of the ignition barns of sintering machines. Metal and Casting Ukraine magazine. 2017. №1. P.16-19. Applicant's contribution: Participation in the development of recommendations for the use of burner devices based on jet-niche systems in sinter furnaces.

28) Fialko N.M., Prokopov V.G., Aleshko SA, Sherenkovsky Yu.V., Meranova NO, Abdulin M.Z., Butovsky LS, Kohanenko PS, Polozenko NP

Mathematical modeling of the dynamics of flow and mixture formation during combustion of fuel in burners of jet-niche type. Industrial heat engineering. 2009. №7. P.24. Applicant contribution: Participation in task setting and outcome analysis.

29) Abdulin M.Z., Zhuchenko AM, Dvortsin GR, Kuleshov YA, Abdulin AM Modernization of fire-fighting equipment. Energy Supervision. 2014. №4. P.27-29. Extractor contribution: An analysis of current gas combustion technologies.

30) Abdulin M.Z., Dvortsin GR, Zhuchenko AM Combustion technology is a determining factor in the effectiveness of fire-fighting facilities. News of heat supply. 2009. №11. 8 sec. Applicant's contribution: analysis of the results of energy efficiency studies of burner devices based on jet-niche systems.

31) Abdulin M.Z., Siryi O.A. Research of hydro dynamic flame stabilizer with cross fuelfeed characteristics. Scientific Journal of Riga Technical University. Series: Power and Electrical Engineering. 2014. №32. P.12-18. Applicant's contribution: setting research objectives, participating in experiments, and analyzing the data obtained.

32) Abdulin M.Z., Ovsienko IP, Dvortsin GR, Zhuchenko AM, Kuleshov Yu.A. Optimization of the furnace process is the way to increase the efficiency, environmental safety and reliability of the boilers. News of heat supply. 2008. №4. Pp. 31-34. Applicant contribution: setting research objectives and analyzing results.

33) Abdulin M.S. Energy efficient jet niche gas combustion technology for small and medium-sized energy facilities. Against the IED of NAS. 2006. P.83-87.

34) Polupan G., Abdulin M., Real Ramirez C.A., Tolentino Eslava G., Lopez Ramirez S., Desarrollo e Investigacion Computacional de Quemadores Rectangulares con Combustion Tipo Microdifusa. 8 Congreso Nacional de Ingenieria Electromecanica y de Sistemas. Mexico. 2004. C. 312-317. Applicant's contribution: Participation in the setting of research objectives and analysis of results.

Scientific works certifying the approbation of the dissertation materials:

35) Fialko N.M., Prokopov V.G., Myson NV, Sherenkovsky Yu. V., Ivanenko GV, Abdulin M.Z., Butovsky LS, Olkhovskaya NN, Shvetsova L.A., Donchak M.I. Patterns of flow and mixture formation of fuel and oxidizer in microflare cylindrical burner devices of different power. Abstracts of the II International Scientific-Practical Conference "Problems and Prospects of Development of Energy, Electrotechnology and Automation in AIC". (October 15 - 16, 2014). Kiev. P.117-118

36) Abdulin M.S. Fialko N.M. Meranova NO Dvortsin G.R. Zhuchenko AM Scientific and technical experience of testing of jet-niche technology of combustion of fuel at the objects of industrial and municipal energy. Proceedings of the 5th International Conference "Problems of Industrial Heat Engineering". (May 22-26, 2007). Kiev. 2007. P. 108.

37) Fialko N.M., Prokopov V.G., Sherenkovsky Yu. V., Aleshko SA, Meranova N.M., Polozenko NP, Butovsky LS, Abdulin M.Z., Melnik P.M. Flow characteristics in a ladder-lattice flame stabilizer grating. Collection of works "Problems of ecology and exploitation of energy objects". Institute of Industrial Ecology. Kiev: CPI ALCON NAS of Ukraine. 2014. P.93-97.

38) Fialko N.M., Sherenkovsky YV, Myson M.V., Abdulin. M.Z., Butovsky LS, Polozenko NP, Strizheus SM, Enina AO, Tymoshenko OB Mathematical modeling of blending processes in a burner with a cylindrical flame stabilizer. Collection of works "Problems of ecology and exploitation of energy objects". Institute of Industrial Ecology. Kiev: CPI ALCON NAS of Ukraine. 2014, pp. 114-117.

39) Fialko N.M., Prokopov V.G., Sherenkovsky YV, Aleshko SO, Abdulin M.Z., Butovsky LS, Ozerov AA Computer simulation of flow and heat transfer in cooling systems of micro-torch burners. Collection of works "Problems of ecology and exploitation of energy objects". Institute of Industrial Ecology. Kiev: CPI ALCON NAS of Ukraine. 2014, pp. 117-122.

40) Fialko N.M., Sherenkovsky Yu.V., Myson M.V., Abdulin M.Z., Khomuk

SV, Enina AO, Novitsky VS, Tymoshenko OB Increasing the intensity of transfer processes in a cylindrical stabilizer burner by using rectangular annular niches. Collection of works "Problems of ecology and exploitation of energy objects". Institute of Industrial Ecology. Kiev: CPI ALCON NAS of Ukraine. 2014, pp. 122-125.

41) Fialko N.M., Prokopov V.G., Sherenkovsky Yu. V., Aleshko SA, Meranova N.M., Polozenko NP, Abdulin M.Z., Butovsky LS, Melnik P.M. Influence of the number of flame stabilizers on the flow characteristics in echelons of stabilized lattices. Collection of works "Problems of ecology and exploitation of energy objects". Institute of Industrial Ecology. Kiev: CPI ALCON NAS of Ukraine. 2014, pp. 125-128.

42) Fialko N.M., Prokopov V.G., Sherenkovsky Yu.V., Aleshko SA, Polozenko NP, Butovsky LS, Abdulin M.Z., Ivanenko GV, Varich AV, Martyuk OV Influence of the flame stabilizer displacement step on the characteristics of the mixture of fuel and oxidant formation. Collection of works "Problems of ecology and exploitation of energy objects". Institute of Industrial Ecology. Kiev: CPI ALCON NAS of Ukraine. 2015. P. 107-109.

43) Fialko N.M., Prokopov V.G., Sherenkovsky Yu.V., Aleshko SA, Polozenko NP, Meranova NO, Butovsky LS, Abdulin M.Z. Patterns of formation of temperature fields of combustion products. Collection of works "Problems of ecology and exploitation of energy objects". Institute of Industrial Ecology. Kiev: CPI ALCON NAS of Ukraine. 2015. P. 110-113.

44) Fialko N.M., Abdulin M.Z., Sherenkovsky Yu.V., Myson NV, Seriy AA, Rokitko KV Features of flow and temperature regimes of circulating zones in the near track of cylindrical flame stabilizers. Collection of works "Problems of ecology and exploitation of energy objects". Institute of Industrial Ecology. Kiev: CPI ALCON NAS of Ukraine. 2015, pp. 113-120.

45) Fialko N.M., Myson M.V., Meranova NO, Ivanenko GV, Yurchuk VL, Abdulin M.Z., Ganza M.V., Donchak MI Flow patterns in cylindrical burner devices with flow turbulators on their blunt rear edges. Collection of works "Problems of

ecology and exploitation of energy objects". Institute of Industrial Ecology. Kiev: CPI ALCON NAS of Ukraine. 2016, pp. 117-120.

46) Abdulin M.Z., Fialko N.M., Sherenkovsky Yu.V., Meranova NO, Tymoshenko AB, Yurchuk VL, Ivanenko GV, Klishch AV Flow characteristics in a burner device with angular flow turbulators. Problems of ecology and operation of energy objects. Institute of Industrial Ecology. Kiev: CPI ALCON NAS of Ukraine. 2017, pp. 99-101.

47) Abdulin M.Z., Fialko N.M., Tymoshenko OB, SiryiO.A., Sherenkovsky YV,. Milko EI, Ozerov AA, Klishch AV, Olkhovska N.M., Shvetsova L.Ya. The temperature regimes of the reverse current zones in the near trace of cylindrical flame stabilizers. Collection of works "Problems of ecology and exploitation of energy objects". Institute of Industrial Ecology. Kiev: CPI ALCON NAS of Ukraine. 2018. P.79-82.

Scientific works which additionally reflect the scientific results of the dissertation:

Patents:

48) Patent for Invention No. 51844, Ukraine. A method of burning natural gas in a flowing air stream. Dvortsin G.R., Abdulin M.Z. // publ. 12/16/2002

49) Patent for Invention No. 54616, Ukraine. Device for burning gas. Dvortsin G.R., Abdulin M.Z. // publ. 17.03.2003.

50) Patent for Invention No. 005471, Eurasia. The method of combustion of natural gas in the incoming air stream. Abdulin M.Z., Dvortsin GR // Publ. 02/24/2005

51) Utility Model Patent No. 35108, Ukraine. Device for burning gas. Zhuchenko AM, Dvortsin GR, Abulin M.Z. // publ. 2008/08/26

52) Patent for utility model No. 49938, Ukraine. Burner device. Abdulin M.Z., Dolinsky AA, Dvortsin GR, Zhuchenko AM, Kuleshov YO, Milko EI, Fialko N.M. // publ. 07.04.2010.

53) Patent for utility model No. 83358, Ukraine. Candle. Fialko N.M., Butovsky LS, Abdulin M.Z., Dvortsin GR, Granovskaya OO, Meranova NO // publ. 10.09.2013.

54) Patent for utility model No. 82967, Ukraine. Gas burner. Fialko N.M., Abdulin M.Z., Butovsky LS, Dvortsin GR // publ. 2013/08/27

The main results in the publications are reflected in full.

Зміст

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	44
ВСТУП.....	45
РОЗДІЛ № 1 СТАН ПРОБЛЕМИ ОРГАНІЗАЦІЇ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ПАЛЬНИКОВИХ ПРИСТРОЇВ.....	51
1.1 Характеристики робочих процесів ПП.....	51
1.1.1 Організація робочих процесів ПП.....	51
1.1.2 Механізми горіння	56
1.1.3 Засоби стабілізації процесів горіння.....	60
1.2 Аналіз існуючих і розробка нових підходів до створення високоефективних технологій спалювання.....	67
1.2.1 Формування основних вимог до пальникових пристроїв	67
1.2.2 Огляд найбільш поширених газових та газомазутних ПП і досвід їх експлуатації.	72
1.2.3 Узагальнююча класифікація пальникових пристроїв, згідно газодинамічної системи подачі палива і окиснювача.....	92
1.2.4 Розробка принципів створення нових технологій спалювання палива і формулювання загальних положень відносно умов реалізації цих технологій.....	98
1.3 Висновки за розділом.	104
1.4 Список використаних джерел.	105
РОЗДІЛ 2 : МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ ПАЛЬНИКОВИХ ПРИСТРОЇВ СТРУМЕНЕВО-НІШОВОГО ТИПУ	112
2.1 Особливості методики дослідження робочих процесів.....	112
2.2 Експериментальні методики дослідження характеристик робочого процесу струменево-нішових ПП.....	113
2.2.1 Методика та експериментальні стенди для дослідження структури течів ізотермічних умовах.....	115
2.2.2 Оцінка похибки вимірювання.....	116
2.2.3 Методики та принципові схеми експериментального стенду для дослідження робочого процесу струменево-нішевого модуля.....	117
2.2.3.1 Опис експериментального стенда.....	117

2.2.3.2	Методика дослідження зривних характеристик факела.....	118
2.2.3.3	Методика проведення експериментальних досліджень структури факела двох струменево-нішових модулів.....	121
2.2.3.4	Методика дослідження сумішоутворення в струменево-нішовому модулі.	126
2.3	Методика дослідження температури.....	127
2.3.1	Дослідження температури факела.....	127
2.3.2	Дослідження температури елементів струменево-нішевих модулів.....	128
2.3.3	Дослідження температури газу.....	128
2.3.4	Похибка визначення температури.....	128
2.4	Методики оцінки рівномірності температурного поля в топковому просторі.....	129
2.4.1	Методики вимірювання температури за допомогою пірометра.....	128
2.4.2	Методика вимірювання температури за допомогою тепловізору.....	129
2.5	Методики дослідження еколого-теплотехнічних характеристик струменево-нішових модулів.....	130
2.6	Особливості методики математичного моделювання робочих процесів пальників струменево-нішового типу.....	131
2.7	Висновки за розділом.	131
2.8	Список використаних джерел.	132
 РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ АВТОНОМНИХ СТРУМЕНЕВИХ ТА СТРУМЕНЕВО – НІШОВИХ ПАЛЬНИКОВИХ МОДУЛІВ З НІШОВИМИ ПОРОЖНИНАМИ РІЗНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ...		
3.1	Струменево-нішові модулі з прямокутними нішовими порожнинами.....	134
3.1.1	Особливості течії палива і окиснювача в струменево-нішовому модулі	135
3.1.2	Дослідження зони циркуляції в умовах газорозподілу на плоскій стінці та уступі в ізотермічних умовах.....	137
3.1.3	Аналіз результатів досліджень дальnobійності струменів в потоці що зносить.....	138
3.1.4	Дослідження особливостей процесу паливорозподілу в струменево-нішевій системі розташованій на модулі.....	140
		142

3.1.5	Визначення робочих меж параметрів паливорозподілу в струменево-нішевій системі.	143
3.1.6	Дослідження циркуляційної зони в ближньому сліді за системою струменів.	147
3.1.6.1	Дослідження температурних полів в зоні стабілізації факела.....	147
3.1.6.2.	Дослідження розміру циркуляційної зони при горінні ..	149
3.1.7	Дослідження термічного стану робочих поверхонь струменево-нішових модулів.....	150
3.1.8	Визначення меж сталості горіння в СНС..	151
3.2	Визначення характеристик пальникового модуля на основі СНС з приструменевою та торцевою нішею.....	153
3.3	Дослідження гідродинаміки потоку при обтіканні не прямокутних нішових порожнин.....	156
3.3.1	Дослідження гідродинаміки потоку в СНС за допомогою методів термоанемометрії	159
3.3.2	Моделювання процесу сумішоутворення в СНС не прямокутного типу	161
3.3.3	Моделювання температури продуктів згорання в умовах СНС.....	163
3.4	Висновки за розділом.	165
3.5	Список використаних джерел.	167
РОЗДІЛ 4 : АНАЛІЗ ДАНИХ КОМПЛЕКСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЙМАННЯ ТА ЗРИВУ ПОЛУМ'Я У СТРУМЕНЕВО-НІШОВИХ ПАЛЬНИКОВИХ МОДУЛЯХ.....		168
4.1	Вимоги до стабілізаторів полум'я та дослідження масообмінних процесів в умовах струменево-нішових систем.....	168
4.2	Визначення характеристик бідного зриву при стабілізації полум'я з застосуванням нішових порожнин.....	173
4.2.1	Побудова залежності для визначення параметрів бідного зриву на основі рівняння теплового балансу.	173
4.2.2	Закономірності масообміну в струменево – нішовій системі.....	176
4.3	Результати дослідження меж стійкості і запалення для струменево- нішового модуля з нішами різної конфігурації.	178
4.3.1	Характеристики меж стійкості і запалення для різних паливних газів....	180
4.3.2	Зіставлення параметрів стійкості полум'я при застосуванні прямокутних і трапецієподібних ніш.....	183
4.3.3	Аналіз робочого процесу струменево-нішових систем	

при застосуванні плоского структуратора.....	183
4.4 Процес стабілізації полум'я в умовах СНС на номінальних витратах палива	184
4.5 Аналіз впливу геометричних параметрів паливорозподілення на характеристики запалення і бідного зриву для струменево – нішового модуля з прямокутними нішами.....	187
4.6 Визначення гідравлічного опору системи з нішею струменево-нішових систем	189
4.7 Визначення впливу основних геометричних параметрів паливо розподілу на граничні режими роботи СНС..	194
4.8 Визначення області рекомендованих значень параметрів паливорозподілення пальників на основі струменево-нішевої технології.	201
4.9 Висновки за розділом.	202
4.10 Список використаних джерел.	204
 РОЗДІЛ 5 : РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ВПЛИВУ ВИЗНАЧАЛЬНИХ ФАКТОРІВ НА РОБОЧИЙ ПРОЦЕС СИСТЕМ СТРУМЕНЕВО-НІШОВИХ МОДУЛІВ.....	
5.1 Порівняльний аналіз характеристик факелу і процесів вигорання для системи струменево-нішових модулів та їх автономних аналогів.	207
5.1.1 Основні особливості робочого процесу одного модуля з прямокутною нішевою порожниною.....	207
5.1.2 Фізична модель аеродинаміки та сумішоутворення в струменево-нішовій системі.	211
5.1.3 Дослідження розвитку факелу в ПП з двома модулями....	213
5.1.4 Дослідження вигорання паливної суміші для системи струменево-нішових модулів з торцевими та приструменевими нішами.....	215
5.1.5 Вплив коефіцієнта захарачення прохідного перерізу каналу на характеристики вигорання палива.	219
5.2 Дослідження структури факелу за струменево-нішовим модулем.....	220
5.3 Принципи проектування пальникових пристроїв зі струменево – нішовими системами.	222
5.3.1 Проектування пальникових пристроїв на основі струменево-нішових модулів.....	222
5.3.1 Пристрій розпалу ПП на основі СНТ.....	222

5.4 Висновки за розділом.	223
5.5 Список використаних джерел.	224
РОЗДІЛ 6 : АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ ПАЛЬНИКОВИХ ПРИСТРОЇВ СТРУМЕНЕВО-НІШОВОГО ТИПУ	
6.1 Особливості методики математичного моделювання робочого процесу в пальникових пристроях на основі струменево- нішових систем.....	226
6.1.1 Математична модель дослідження процесів в системі стабілізації полум'я.....	226
6.1.2 Верифікація моделей турбулентного перенесення.....	230
6.1.3 Методика поетапного моделювання..	231
6.1.4 Оцінка достовірності чисельних рішень.....	233
6.2 Принципові схемні рішення систем охолодження стабілізаторів пальників і визначення ефективності таких систем..	235
6.2.1 Системи охолодження пальникових пристроїв.	236
6.2.2 Аналіз ефективності охолодження пальників по системі з струменевим обдувом торцевої поверхні стабілізаторів.	238
6.2.3 Схема охолодження з обдувом плоским імпактним струменем.....	239
6.2.4 Схема охолодження з обдувом круглими імпактнимиструменями.....	241
6.3 Дослідження характеристик систем охолодження з плоским імпактним струменем при використанні дефлекторів різної конфігурації.....	244
6.4 Залежність ефективності охолодження пальникового пристрою від відстані між вихідним перетином газоподаючого каналу і внутрішньою торцевою поверхнею стінки стабілізатора.....	251
6.5 Вплив ширини стабілізатора на аеродинамічні та теплові характеристики системи охолодження.	256
6.6 Висновки за розділом.	259
6.7 Список використаних джерел.	262
РОЗДІЛ 7 : РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ХАРАКТЕРИСТИК РОЗРОБЛЕНИХ ПАЛЬНИКІВ НА ОСНОВІ СТРУМЕНЕВО-НІШОВИХ СИСТЕМ В ПРОМИСЛОВИХ УМОВАХ	
7.1 Дослідження робочого процесу пальникового пристрою	267

СНТ-22 на основі струменево-нішових систем у контактних водопідігрівачах.....	268
7.1.1 Результати досліджень теплотехнічних характеристик.....	270
7.1.2 Дослідження екологічних характеристик	270
7.1.3 Дослідження питомого тепловиділення в топковий простір.....	273
7.2 Дослідження характеристик роботи котла НИИСТУ-5 модернізованого на основі СНТ.....	273
7.3 Дослідження характеристик роботи котла ДКВР-10/13 з пальниками СНТ-44.....	274
7.3.1 Робота котла в вентиляторному режимі.....	277
7.3.2 Робота котла в безвентиляторному режимі.....	278
7.3.3 Результати порівняльних випробувань.....	280
7.3.4.1 Дослідження екологічних характеристик котла.....	285
7.3.4.2 Розрахунок валових викидів шкідливих речовин при спалюванні природного газу.....	287
7.3.5 Дослідження температури елементів ПП та паливного газу.....	287
7.3.6 Випробування стійкості горіння.....	288
7.4. Дослідження характеристики роботи котла КВГМ-20 з пальником СНТ-45.....	288
7.5 Дослідження характеристик роботи котла ДЕ-25-14 з пальниками СНТ-55	290
7.6 Дослідження рівномірності температури у топковому просторі для сталеливарного ковша.....	291
7.6.1 Дослідження температури лазерним пірометром.....	291
7.6.2 Дослідження рівномірностей розігріву поверхні сталеплавильних ковшів.....	295
7.7 Досвід широкомасштабного впровадження струменево-нішової технології спалювання на вогнетехнічних об'єктах.....	296
7.7.1.1 Результати модернізації котлів малої потужності.....	298
7.7.1.2 Досвід модернізації котлів типу ТВГ та КВГ з палиниковими пристроями СНТ.....	301
7.7.1.3 Вплив робочого процесу струменево-нішових ПП на характеристики котлів КВГМ та ПТВМ	305
7.7.1.4 Результати модернізації парових котлів.....	307

7.7.2 Результати тестових випробувань підігрівачів з ПП на основі струменево-нішової технології.....	312
7.7.3 Досвід експлуатації підігрівачів з ПП на основі струменево-нішової технології.....	316
7.7.3.1 Результати експлуатації підігрівачів газу.....	316
7.7.3.2 Досвід експлуатації контактних водонагрівачів.....	317
7.7.4 Досвід експлуатації печей з пальниковими пристроями на основі струменево-нішової технології спалювання.....	317
7.7.4.1 Результати модернізації агломераційних машин.....	317
7.7.4.2 Результати модернізації пічного господарства ОАО «Запоріжсталь».....	320
7.7.4.3 Впровадження СНТ на постах сушки та розігріву сталеливарних ковшів.....	322
7.7.4.4 Результати модернізації обертових печей.....	323
7.7.5 Підвищення рівня ефективності процесів сушки і обпалу вогнетривких матеріалів на основі струменево-нішових технологій.....	323
7.7.6 Впровадження струменево-нішевої технології при процесах сушки.	325
7.7.6.1 Результати модернізації зерносушарок.....	325
7.7.6.2 Результати модернізації жомосушарок.....	326
7.7.7 Можливості СНТ спалювання при термічному знешкодженні шкідливих викидів.....	327
7.8 Висновки за розділом.....	328
7.9 Список використаних джерел.....	331
Загальні висновки.....	334
Додаток 1 Засоби вимірювальної техніки для дослідження ПП.....	339
Додаток 2 «Режимна карта» роботи водогрійного котла ДКВР-10 ст.№3 при роботі з ПП ГА-110.....	240
Додаток 3 Результати порівняльних випробувань котла ДКВР-10М №3 рег. №762 з пальниками ГА та СНП.....	342
Додаток 4 Вихідні дані для розрахунку валових викидів шкідливих речовин в атмосферу при спалюванні газу.....	344
Додаток 5 Розрахунок валових викидів шкідливих речовин для	

котла ДКВР-10/13 з ПП ГА- 110.....	345
Додаток 6 Дозвільна документація на пальникові пристрої.....	347
Додаток 7 Дозвільна документація заводів виробників котлів на впровадження пальникових пристроїв.....	353
Додаток 8 Акти впровадження пальникових пристроїв.....	354
Додаток 9 Рішення науково-технічної ради Міністерства ЖКХ України.....	390

Перелік умовних позначень

B – ширина модуля; $\bar{B} = B/d$;

d – діаметр газоподавальних отворів;

H – глибина ніші;

H_K – висота каналу;

k_f – коефіцієнт загромадження прохідного перерізу каналу;

L – довжина ніші;

L_1 – відстань від зривної кромки модуля до газоподавальних отворів;

L_3 – довжина закрилка;

N – відносне навантаження котлоагрегату, $N = N_P/N_{\text{ном}} \cdot 100\%$;

$N_P, N_{\text{ном}}$ – реальне і номінальне значення теплової потужності котлоагрегату;

\bar{q} – гідродинамічний параметр;

S – крок розташування газоподавальних отворів, $\bar{S} = S/d$;

t – температура;

T – абсолютна температура;

$t_c, t_{\text{доп}}$ – температура зовнішньої поверхні стінки модуля та її допустиме значення; $W_{\text{П}}$ – швидкість повітря на вході в канал;

W_{Γ} – середня швидкість газу в газоподавальних отворах;

W, W' – швидкість і пульсації швидкості;

x, y, z – координати;

α, α_{Σ} – локальне і сумарне значення коефіцієнта надлишку повітря; α_T – коефіцієнт тепловіддачі;

γ – координата, що відраховується від передньої кромки ніші вздовж внутрішньої поверхні модуля; $\bar{\gamma} = \gamma/d$;

ζ – відносні гідравлічні втрати в каналі зі струменево-нішовою системою;

η_z – повнота згоряння палива; $\theta_c = t_c/t_{\text{доп}}$;

ζ – відносні гідравлічні втрати в каналі зі струменево-нішовою системою,

$\zeta = 2\Delta P/\rho_{\text{П}} W_{\text{П}}^2$, де ΔP – втрати тиску в каналі,

$\rho_{\text{П}}$ – густина повітря на вході в канал;

ξ, ξ_0 – коефіцієнт гідравлічних втрат при внутрішньому обтіканні трапецієвидної і прямокутної ніші, $\xi = 2\Delta P_{\Gamma} / \rho_{\Gamma} W_{\Gamma}^2$, де ΔP_{Γ} – втрати тиску по тракту паливного газу, ρ_{Γ} – густина газу на вході;

$$\text{Nu} = \frac{\alpha_{\Gamma} \cdot d}{\lambda_{\Gamma}}, \text{ де } \lambda_{\Gamma} \text{ – коефіцієнт теплопровідності газу на вході;}$$

$$\text{Re}_{\Gamma} = \frac{2W_{\Gamma} \cdot h}{\nu_{\Gamma}}, \text{ де } h \text{ – відстань між нижньою площиною ніші і}$$

газоподавальним каналом;

ν_{Γ} – кінематична в'язкість паливного газу на вході.

Вступ

Обґрунтування вибору теми.

Завдання підвищення теплової та екологічної ефективності теплоенергетичного устаткування в даний час стають усе більш актуальними у зв'язку з неухильним подорожчанням палива і підвищенням вимог, що стосуються стану довкілля. Одним з основних напрямів підвищення теплової ефективності даного устаткування є використання нових прогресивних технологій спалювання палива. Серед таких технологій особливо виділяються технології, засновані на використанні струменево-нішових систем.

Особливий інтерес становить розроблення пальникових пристроїв (ПП) для реалізації ефективних технологій спалювання. При цьому важливим є дослідження гідро-термо-хімічних аспектів робочого процесу таких пальникових пристроїв. Таким чином, тема дисертаційної роботи, що стосується розробки теплофізичних засад технологій спалювання палива з застосуванням струменево-нішових систем є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалась відповідно до наукових програм, планів, тем:

- на кафедрі ТЕУ Т і АЕС НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» по НДР «Підвищення ефективності та надійності функціонування устаткування ТЕС та малої енергетики в змінних режимах експлуатації» (державний реєстраційний номер 0112U001751); НДР «Розробка технології використання скидних енергоресурсів та альтернативних паливних газів на основі їх вискоефективного спалювання» (державний реєстраційний номер 0113U001773);

- у відділі теплофізики енергоефективних теплотехнологій ІТТФ НАНУ: шифр теми 1.7.1.663 «Підвищення ефективності газоспоживаючих котельних установок шляхом застосування струменево-нішової технології спалювання палива» (державний реєстраційний номер 0105U006885). В цих роботах Абдулін М.З. був виконавцем.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є науково-технічне

обґрунтування прогресивних технологій спалювання газоподібних палив на основі струменево-нішових систем та розробка на цій основі відповідних технічних рішень та рекомендацій по їх впровадженню.

Для досягнення поставленої мети вирішенню підлягали такі завдання:

1) Виконати комплекс експериментальних досліджень по встановленню закономірностей протікання робочих процесів в одиничних пальникових модулях різних типів: а) струменевих модулях – модулі з уступом та модулі з приторцевою нішею; б) струменево-нішових модулів з прямокутною нішею – зручнообтікаючих модулів та модулів з торцевою нішею; в) струменево-нішових модулів з трапецієподібними нішами при наявності та відсутності структуратора потоку.

2) Провести дослідження гідравлічних втрат при горінні природного газу в каналі з прямокутною нішовою порожниною в залежності від основних визначальних параметрів процесу.

3) Для струменево-нішових пальникових модулів з нішовими порожнинами різної форми (прямокутними та трапецієподібними) виявити закономірності займання та зриву горіння при спалюванні різних газів у широкому діапазоні зміни режимних та конструктивних факторів.

4) Обґрунтувати концепцію модульного принципу конструювання пальникових пристроїв на основі струменево-нішової системи за результатами дослідження робочих процесів системи пальникових модулів.

5) З використанням сучасного програмного продукту дослідити аеродинамічну структуру течії та особливості теплообміну в системах охолодження струменево-нішових пальників з обдуванням внутрішніх поверхонь стабілізаторів полум'я струменями газу.

6) Провести порівняльний аналіз основних характеристик робочих процесі пальників, що пропонуються та традиційних пальників у складі різних вогнетехнічних об'єктів та встановити енергетичну ефективність заміни штатних пальників пальниковими пристроями на основі струменево-нішових систем.

Об'єкт дослідження: фізико-хімічні процеси, що протікають в пальникових пристроях при спалюванні газоподібного палива.

Предмет дослідження:закономірності гідро-термо-хімічних процесів в пальникових пристроях зі струменево-нішовою системою сумішоутворення та стабілізаціїгоріння.

Методи дослідження.

Практичне значення отриманих результатів. Результати дослідження впроваджені при розробці та проектуванні ПП СНТ. Сертифіковано більше 100 типів і моделей розроблених пальникових пристроїв в ДП «Сертифікаційний випробувальний центр», отримане право установки розроблених пальникових пристроїв на котлах Монастирищенського, Бійського, Дрогобужського та ін. котельних заводів, міністерством житлово-комунального господарства України рішенням науково-технічної ради №16 від 26.10.2010р. рекомендоване впровадження енергозберігаючої струменево-нішової технології на об'єктах комунального господарства України. ПП працюють з 1994р та встановлені більш ніж на 1000 вогнетехнічних об'єктах в Україні, Білорусі, Росії, Польщі, Казахстані (котли, печі, сушарки, та ін.).

Використання результатів роботи підтверджуються відповідними актами впровадження в металургії, комунальній теплоенергетиці, будівельній, хімічній та сільськогосподарській галузях.

Наукова новизна отриманих результатів. -Вперше в широкому діапазоні зміни визначальних параметрів отримано дані експериментальних досліджень процесів течії, сумішоутворення, теплопереносу, стабілізації полум'я і вигорання палива для поодиноких струменевих і струменево-нішових модулів пальників з прямокутними та трапецієподібними нішовими порожнинами за наявності та відсутності структураторів потоку;

- вперше виконано порівняльний аналіз характеристик займання та зриву горіння для струменево-нішових модулів пальників з нішовими порожнинами різної форми та розмірів; виявлено роль структураторів потоку у підвищенні стабілізуючих властивостей модулів з трапецієподібними нішами; розроблений

підхід до визначення характеристик пускових режимів для струменево-нішової системи з прямокутною нішею; за результатами аналізу ефектів впливу геометричних параметрів розподілу палива на режимі бідного зриву модуля з прямокутною нішею встановлені діапазони раціональних значень цих параметрів для умов спалювання різних газів;

- вперше виявлено основні закономірності протікання робочих процесів систем, що складаються з декількох струменево-нішових модулів; показано, що в цих системах має місце значне скорочення довжини факела у порівнянні з автономним модулем; встановлений факт практичної ідентичності робочих процесів в окремих модулях системи, що обумовлює правомірність використання модульного підходу до конструювання пальників даного типу;

- вперше для струменево-нішових пальників з трапецієподібними нішовими порожнинами встановлені закономірності теплообміну та аеродинаміки в спеціальних системах їх охолодження, які характеризуються тим, що в них в якості охолоджувального агенту застосовується природний газ перед його вступом на спалювання; проведений аналіз теплового стану цих пристроїв і виконана загальна оцінка ефективності їх систем охолодження;

- виконано зіставлення основних характеристик робочих процесів пропонованих пристроїв пальників на основі струменево-нішових систем і традиційно використовуваних пальників у складі вогнетехнічних об'єктів комунальної та промислової енергетики; отримані залежності приросту к.к.д. цих об'єктів (обумовленого заміною штатних пальників на розроблені) від їх потужності та теплового навантаження.

Апробація результатів дисертації. Результати роботи доповідалися на конференціях (*усна доповідь*): Міжнародна науково-технічна конференція «Енергетичні та теплотехнічні процеси і устаткування» м.Харків 2005; 2013; 2018р.; Международная научно-техническая конференция «Энергоэффективность крупного промышленного оборудования» г.Донецк 2004, 2006, 2008, 2010 г.; Международная научно-техническая конференция «Промышленная теплотехника» г.Киев 2004, 2006, 2008, 2010 г.;

Международная научно-техническая конференция «UKR-POWER» г.Ялта 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013 г.; Международная научно-техническая конференция «Металлургическая теплотехника» г.Днепропетровск 2003, 2006, 2009, 2012 г.; 6^а научная Международная научно-техническая конференция «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» 2008 г., г.Алушта; Международная научно-техническая конференция «Удосконалювання турбоустановок методом математичного і фізичного моделювання» г.Харьков 2000, 2003 г.; Международная конференция «Украина – Россия – Сколково. Единое инновационное пространство» г.Киев 2013 г.; Ежегодная международная научно-практическая конференция «Повышение эффективности энергетического оборудования» г.Москва 2010 и 2013г.; Ежегодная международная конференция «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики» г.Ялта 2012г.; VI международная научно-практическая конференция «Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология» г.Москва, 15-20.10.2012г.; Всероссийская научно-практическая конференция «Повышение надежности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем» г.Москва, 1-3.06.2010 г.; Минский международный форум по тепло- и массообмену 2010; 2017г., г.Минск; Научно-практический семинар с международным участием «Экономическая безопасность и научно-технологические аспекты её обеспечения» 2011, 2015г., г.Киев; Міжнародна науково-технічна конференція «Енергоефективність -2010» м.Киев; Міжнародна науково-практична конференція «Вугільна теплоенергетика: проблеми реабілітації та розвитку» 2015, 2017 м.Київ; Міжнародний східно-європейський форум «Іноваційна економіка і наука» 2016 м.Киев; Міжнародний конгрес «Іноваційні та технічні аспекти реформування житлово-комунального господарства» 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018 р., м.Київ; Міжнародний металургічний форум «Наука та іновації» жовтень 2017р., м.Київ; III Міжнародна конференція «AdMet 2018» червень 2018, м.Львів; Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасність. Енергоефективність. Технології»

(СЕТ-2018) 2015, 2016, 2017, 2018рр., м.Ровно.

Публікації.Результати дисертаційної роботи опубліковано у 54 друкованих працях, зокрема: у 1 монографії; 2 статтях, що входять до наукометричної бази Scopus; 14 статтях, що входять до інших наукометричних баз; 2 статтях у закордонних виданнях; 15 статтях у спеціалізованих фахових виданнях; 11 статтях в інших виданнях; 2 публікаціях в матеріалах міжнародних конференцій в Україні і за кордоном; 3 патентах на винаходи і 4 патентах на корисну модель.

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, 7 розділів, висновків та 4 додатків. Основний матеріал викладено на 290 сторінках, 205 рисунках, 19 таблицях. Бібліографія містить 205 найменувань робіт на 25 сторінках. Загальний обсяг дисертації становить 390 сторінок.

РОЗДІЛ 1. СТАН ПРОБЛЕМИ ОРГАНІЗАЦІЇ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ПАЛЬНИКОВИХ ПРИСТРОЇВ

1.1 Характеристики робочих процесів пальникових пристроїв

1.1.1 Організація робочого процесу пальникового пристрою

Ефективність топкових процесів, як відомо, залежить від організації робочого процесу пальникових пристроїв, який складається з: роздачі горючого у потоці окиснювача, сумішоутворення паливної суміші, займання паливної суміші, стабілізації горіння, умов вигорання паливної суміші, формування полів швидкостей, температури та концентрації продуктів горіння у топковому просторі. Багато уваги в поточному часі приділяється удосконаленню всіх елементів робочого процесу: про це свідчить велика кількість публікацій[1-29]

В пальникових пристроях роздатковий процес паливної суміші відбувається струменями газу як вздовж так і поперек потоку окиснювача, і як малою кількістю струменів так і великою кількістю дрібних цівок. На рівномірність розподілу палива впливає кількість цівок. Від цього залежить якість сумішоутворення паливної суміші. Для інтенсифікації продуктів масообміну традиційно застосовують турбулізацію потоку решітками; тілами, що погано обтікаються і завихрювачами. Найбільш поширений спосіб інтенсифікації сумішоутворення – завихрювач потоку окиснювача. Завихрювач потоку також виконує функцію стабілізатора горіння за рахунок розрідження, яке виникло в середині вихрю і підсмоктує гарячі продукти спалювання із топкового простору. Необхідно відмітити, що при швидких обертах паливної суміші виникають значні масові відцентрові сили, які призводять до розподілу суміші у топковому просторі за густиною і це погіршує якість сумішоутворення. Підготовка паливної суміші ще до сумішоутворення — дуже важливий процес від якого залежить організація механізму горіння [30].

Основою робочого процесу паливного пристрою є:

- аеродинамічні процеси, які характеризуються структурою течії (розмір вихрових структур, інтенсивність турбулентності, полями швидкостей горючого, окиснювача і продуктів згоряння);

- процеси сумішоутворення, які характеризуються полем концентрації, протяжністю ділянок закінчення сумішоутворення (повна гомогенізація паливної суміші) та процеси хімічної кінетики (вигорання паливної суміші): координати займання і завершення вигорання паливної суміші (розташування факела), концентраційні поля компонентів, що беруть участь у горінні.

Основними характеристиками робочого процесу пального пристрою є:

повнота горіння:

$$\eta = 1 - \frac{Q_{\text{втр}}}{G_p - Q_n} \quad (1.1)$$

(де $Q_{\text{втр}}$ — втрати тепла у пальному пристрої від хімічного недопалу у навколишнє середовище), стійкість горіння (за швидкості потоку окиснювача W_B , за коефіцієнтом надлишку повітря α , за теплової потужності Q_T (яка залежить від витрат палива G_T та, таким чином, від тиску палива P_T)),

об'ємна теплонапруженість горіння:

$$q_v = \frac{Q_p^H \times G_T}{V_T} \text{ [МВт/м}^3 \times \text{год]} \quad (1.2)$$

(де Q_p^H - нижча теплота горіння одиниці палива, V_T – об'єм топкового простору), гідравлічний опір (коефіцієнт гідравлічного супротиву):

$$\varphi_{\text{гид}} = \frac{\Delta P_T}{\rho \times \frac{W_B^2}{2}} \quad (1.3)$$

ступень нерівномірності температур:

$$\delta = \frac{T_T^{\text{max}} - T_T^{\text{min}}}{T_T} \times 100\% \quad (1.4)$$

($T_T^{\text{max}}, T_T^{\text{min}}, T_T$ - максимальне, мінімальне і середньомасове значення температури потоку), температурний стан елементів пального пристрою $T_{\text{с}} < 400$ °С, емісія токсичних речовин ($\text{NO}_x, \text{CO}, \text{CO}_2$ та інші) визначається нормами для кожного виду VO_x та його енергетичними параметрами.

До робочого процесу пального пристрою пред'являють вимоги, які не

можуть бути задоволені при реалізації кінетичного і дифузійного механізмів горіння. Так, підвищення термодинамічної ефективності циклу потребує високої інтенсивності горіння, якою відрізняється кінетичне горіння (заздалегідь перемішаної) суміші. Разом з цим, для забезпечення маневреності обладнання, необхідно підтримувати високу ефективність у широких діапазонах складу суміші, що досягається за допомогою дифузійного горіння [31,32,33,34].

За турбулентною течією газу зона горіння 3 (рис 1.1, б), окрім суміші вихідного газу і продуктів горіння, містить також кисень. У зоні 4, разом з переважаючим вмістом повітря, містяться продукти горіння та газ. Фронт горіння представляє з себе не конусоподібну поверхню, а зону 5, де горіння відбувається з найбільшою інтенсивністю і спостерігається найбільш високий вміст продуктів горіння.

Співвідношення концентрації газу та повітря у зоні 5 близьке до стехіометричного. Незважаючи на це, у зоні 5 встигають прореагувати лише 65-85% горючого, решта 15-35% реагують у зоні горіння 4.

Внаслідок недостатньої однорідності суміші процес горіння у зоні 4 може не завершитися і продукти неповного горіння потраплять у низькотемпературні області факелу, для природнього газу це – 700-800 °С, де горіння стає неможливим. Така ситуація характерна при відсутності підігріву повітря, тому чисто дифузійне спалювання газових струй у відкритому факелі зазвичай супроводжується деякою втратою тепла від хімічної неповноти горіння.

Якщо пальник встановити у камеру горіння зі стінками, що не охолоджуються, то схема спалювання газу буде виглядати інакше. Уявимо найпростіший пальник у вигляді двох концентричних труб. На малу трубу подається газ, а за міжтрубним кільцем – повітря, кількість якого можна регулювати (зовнішнє змішування). Зміна співвідношення кількості газу і повітря різко міняє картину горіння (див. рис. 1.2.) . При надлишку повітря (рис 1.2. а) зона 1 має вигляд конуса, заповненого газом. Цей конус оточений зоною 2, в якій рухається суміш газу з продуктами горіння.

Повітряне ядро 6 у вигляді кільця, оточене зоною 4 – суміш повітря і

продуктів горіння, що знаходиться у русі. Інтенсивно газ горить в зоні 3, на границі між 2 і 4 зонами. Характерною особливістю горіння газу у камері є наявність рециркуляційної зони 5, де деяка частина гарячих продуктів горіння вертаються до кореня факелу, в результаті чого повітря, що вступає у реакцію з газом, попередньо прогрівається. Недостача повітря (рис. 1.2, б), що поступає через пальник, призводить до того, що зона 2, у якій знаходиться суміш газу з продуктами горіння, значно збільшується у розмірі, чим визиває невідворотній ріст неповноти горіння.

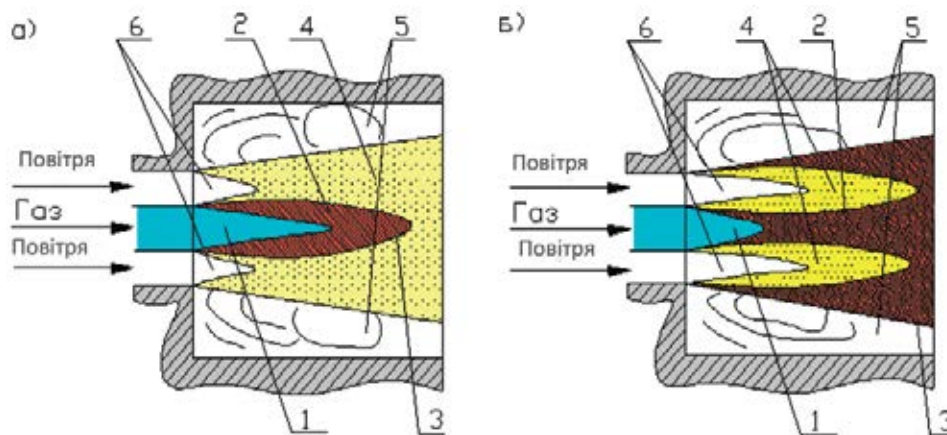


Рис. 1.1 Схема дифузійного горіння газового струменя у топковій камері, при (а) надлишку та (б) недостатці повітря

В цьому випадку інтенсифікація перемішування газу з повітрям не може призвести до зниження неповноти горіння, так як і при наявності рециркуляційної зони. Полум'я червоного окрасу з темними полосами, свідчить про виділення сажі. Сам факел стає довшим. Навпаки, при надлишку повітря факел скорочується, полум'я стає блідим, з синім відтінком. Дифузійне полум'я природного газу, що світиться відрізняється рівномірною температурою за всією довжиною зовнішньої поверхні факелу (1000-1050 °С). Внутрішня частина полум'я має більш високу температуру, що досягає - 1400 °С на відстані приблизно 2/3 довжини факелу, рахуючи від устя пальника. Внаслідок того, що факел полум'я світиться і має більшу довжину, спалювання газів за допомогою пальників зовнішнього змішування застосовують в печах, де потрібно підтримувати рівномірну температуру на значній довжині топки чи каналів печі де є великі об'єми, які дозволяють вільно розвиватися факелу, однак не завжди

потрібно світіння полум'я.

У топках котлів через велику віддачу теплоти випромінення від факела до поверхні нагріву котла, температура факелу знижується з більшою інтенсивністю, факел видовжується, і горіння може переноситися частково з топки у газоходи. У результаті виникає значна неповнота горіння, температура газів що виходять росте, ККД котла знижується. Особливо сильно ростуть втрати внаслідок неповноти горіння у тому випадку, якщо частина факела що світиться, торкається відносно холодних поверхонь нагріву, що можуть покритися шаром сажі, а при особливо несприятливих умовах навіть прогоріти. Тому у топках котлів при застосуванні дифузійних пальників створюють умови, щоб змішування газу з повітрям проходило на найкоротшому шляху розвитку факела. Найпростішим засобом, що пришвидшує перемішування є надання газу у топку у вигляді великого числа малих струменів під кутом до потоку повітря та інтенсифікація подання повітря до коренів факелів.

1.1.2 Механізми горіння

Особливості дифузійного методу спалювання детально описані у роботах [31,34,35]. На практиці газопальникові прилади які працюють за принципом вільного струменю витoku палива застосовують рідко. Для того, щоб покращити процес змішування і тим самим збільшити інтенсивність горіння, деколи використовують коаксіальну (співвісну) подачу газу і повітря, наприклад у топках ВТИ зі струменями, що співударяються.[35] Наглядно механізми спалювання можна спостерігати коли газ горить у довгій трубі (рис 1.3.). Після виходу газової суміші з газового колектору у набігаючий потік повітря, відбувається макророзмішування газу з повітрям при помітній нерівномірності їх густини. При стабілізації горіння у цій області має місце метод дифузійного горіння. При цьому час дифузії набагато більше часу хімічної реакції ($\tau_{\text{диф}} \gg \tau_{\text{х.к}}$). Далі відбувається мікродифузійне змішування і вирівнювання густини потоку. Час дифузії же приблизно рівний часу хімічного реагування ($\tau_{\text{диф}} \approx \tau_{\text{х.к}}$). На останньому етапі змішування газового палива у трубі можливе тільки за кінетичним горінням так як час хімічного реагування набагато більший, ніж час

дифузії, що прямує до нуля ($0 \approx \tau_{\text{диф}} \ll \tau_{\text{х.к}}$).

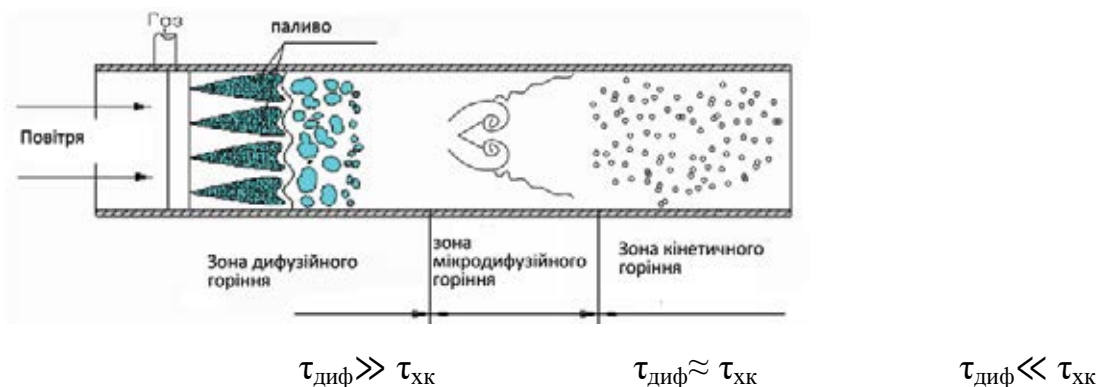


Рис.1.2 До механізму спалювання газу

Вперше поняття мікродифузійного механізму горіння ввів Д.А.Франк-Камецький [17,18]. Під мікродифузійним процесом горіння мають на увазі такий тип, коли пальне роздроблене на окремі малі об'єми, які розподілені у потоці повітря (рис 1.2). Ця особлива різновидність турбулентного горіння також представлена у роботах [19-14].

У випадку мікродифузійного горіння швидкість протікання реакції визначається процесом мікрозмішування. Час реагування горючого і окиснювача порівнянний з часом перемішування до горючих концентрацій. Визначальну роль грає масштаб дроблення (δ), тобто середній розмір тих об'ємів, на які роздроблене горюче в окиснювачі. Структура течії утворюється з комірок горючого і окиснювача, які роздроблені пульсаціями турбулентної течії. Полум'я переміщується за поверхнею даних комірок. Таким чином, для організації мікродифузійного горіння необхідно мати можливість варіювати співвідношення швидкості дифузійного змішування і швидкості хімічних реакцій. Змінюючи це співвідношення процесу горіння можна досягти таких результатів, які характерні для дифузійного чи кінетичного горіння, причому граничним випадком підвищення інтенсивності горіння є перехід у кінетичну область. Також у роботі [19] приведені дані експериментального дослідження мікродифузійного процесу горіння (рис.1.3). При коефіцієнтах надлишку повітря пального $\alpha_{\text{гор}} = 1,2$ і $1,4$ порівнювалася динаміка горіння палива при кінетичному та мікродифузійному горінні. Частка газу яка горіла у певному

проміжку визначалася розрахунковим шляхом, а також контролювалася газоаналізом.

У результаті було встановлено, що криві горіння близькі між собою у тій області, де характеристики процесу можна безпосередньо заміряти. Для бідних сумішей на початковій ділянці зони горіння інтенсивність процесу у мікродифузійному факелі вище, оскільки при коефіцієнті балансу надлишку повітря $\alpha_{гор} = 1,4$ місцевий надлишок характеризується меншим значення ширини фронту полум'я. Надалі, інтенсивність горіння при мікродифузійному механізмі трохи відстає від інтенсивності горіння при кінетичному механізмі.

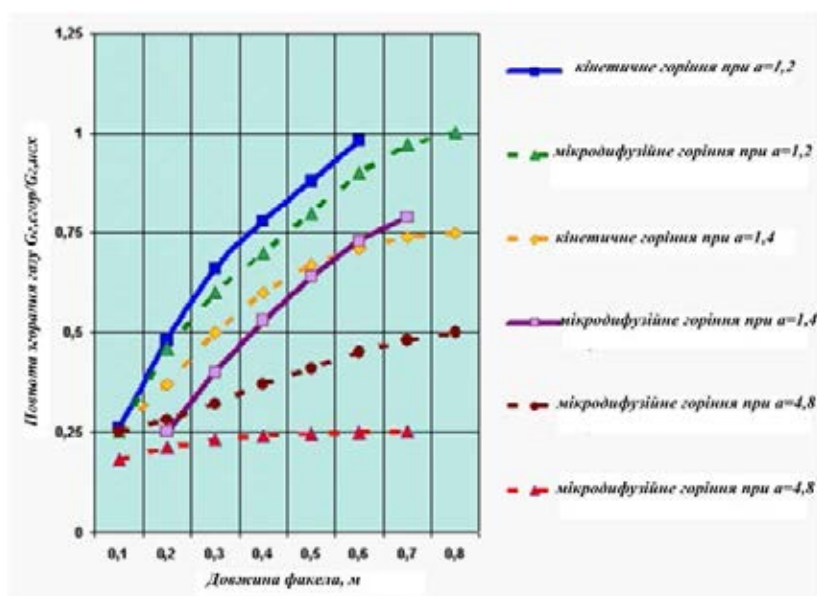


Рис. 1.3 Динаміка горіння газу

Разом з тим, мікродифузійний факел з широтою діапазону горіння за коефіцієнтом надлишку повітря пальника $\alpha_{гор}$, значно краще кінетичного. При цьому було встановлено, що у тій самій камері горіння інтенсивність мікродифузійного горіння при α , відповідному концентраційним межам поширення полум'я, близька до інтенсивності кінетичного горіння.

На основі цих даних можна зробити висновок, що проміжний мікродифузійний режим горіння вдало поєднує у собі характеристики процесів дифузійного і кінетичного горіння, найбільш сприятливі умови для забезпечення високої ефективності робочого процесу паливкового пристрою.

Таким чином для забезпечення високоінтенсивного горіння у широкому

діапазоні зміни складу суміші, необхідно організувати ефективне сумішоутворення за об'ємом потоку паливної суміші.

Для реалізації кінетичного механізму горіння у топковий простір подають повністю підготовану газоповітряну суміш, у якій є не тільки теоретично необхідна, але й надлишкова кількість повітря, яка потрібна для забезпечення повного горіння газу. Все це повітря змішується з газом до виходу у топку у спеціальних змішувачах, причому змішування частинок газу з повітрям не тільки грубе молярне, але й молекулярне. Така заздалегідь підготована газоповітряна суміш швидко вигорає з коротким факелом із слабким світінням, при обов'язковій наявності стабілізатора горіння, так як процеси змішування не лімітують загальну швидкість горіння.

При поданні у керамічний тунель газоповітряної суміші, яка містить показники близькі до стехіометричних, факел полум'я газу майже ніколи не має видимих меж, особливо на фоні розпечених вогнетривких матеріалів. Саме тому такий метод спалювання деколи називають безполуменим.

Слід відмітити, що проблемами горіння газоповітряних сумішей в умовах великомасштабних турбулентностей потоку, у різні часи, приділялася значна увага. Цій проблемі присвячений ряд теоретичних та експериментальних робіт [45-48].

В ЕНДІ на великому лабораторному пальнику проведено дослідження процесу горіння підігрітих сумішей природного газу у повітрі,[35] результати яких свідчать, що найбільші (при інших рівних умовах) об'ємні теплові напруження можна отримати при спалюванні підігрітих сумішей у пальниках з двостороннім підпалюванням газоповітряного потоку. Однак можливість початкового підігріву суміші обмежена температурними рівнями, при яких відбувається її спалахування у змішувачі, а також термічний розпад. Також вивчався вплив початкової температури на основні характеристики процесу горіння однорідної суміші у турбулентному потоці. У результаті дослідження було підтверджено існування впливу початкової температури газоповітряної суміші на швидкість розповсюдження полум'я, довжину факела й час горіння.

Слід зазначити, що пальникові пристрої, які найбільш часто застосовують у промислових вогнетехнічних об'єктів, з точки зору механізмів, що реалізуються у них, часто не можуть бути віднесені до якогось одного з трьох основних, розглянутих вище механізмів горіння, оскільки ці пальникові пристрої, як правило, являються комбінованими. Основна різниця між ними зв'язана зі ступеню підготовки газоповітряної суміші, яка рухає механізм горіння, або у дифузійну, або у кінетичну область.

1.1.3 Засоби стабілізації процесів горіння

Наявність стійкого полум'я являється дуже важливою умовою надійної та безпечної роботи вогнетехнічних об'єктів любого призначення. При нестійкому горінні, на деяких режимах полум'я може «проскочити» всередину пальника, або відірватися від нього. В обох випадках виникає загроза вибуху газоповітряної суміші при подальшому розпалюванні. Питання стабілізації процесів горіння досить ретельно розглянути у працях [36,40,48,50]

Слід зазначити, що потік суміші, який виходить з устя пальника завжди має нерівномірне поле швидкостей: чим ближче до стінок, які гальмують потік, тим менше швидкість. Максимальна осева швидкість у центрі потоку може значно перевищувати нормальну швидкість розповсюдження полум'я (яка є складовою загальної швидкості та перпендикулярна фронту горіння). У результаті форма фронту полум'я при круглому усті пальника стає конусоподібною. Друга складова швидкості розповсюдження полум'я направлена вздовж нахиленої поверхні конуса до його вершини, що полегшує гасіння полум'я. Для стійкого існування конусного полум'я доводиться постійно підпалювати газоповітряну суміш неподалік від стінок, де швидкість виходу потоку із устя – мінімальна. Стінки пальника не тільки гальмують потік суміші, але і охолоджують його. Внаслідок цього у місці згину конуса утворюються кільцева зона, де швидкості потоку і розповсюдження полум'я є рівними, тобто утворюється зона зворотних токів (на малюнках 3.3.Т.). Ця зона і слугує постійним вогнищем для підпалу решти конусної поверхні горіння.

Потужність кільцевої зони підпалення, а звідси й стійкість всього факелу

пальника значно залежить від складу суміші: чим більше у ній горючого газу, тим надійніше пояс підпалення і менша вірогідність відриву факела. За іншими рівними умовами у випадку, коли з устя виходить тільки газ, найбільшу стійкість має дифузійний факел.

При зростанні теплової потужності пальника і досягненні швидкості потоку якоїсь межі, запалювальної дії зони стає замало тоді спостерігається відрив полум'я. Відрив може бути частковим, коли горіння відбувається на деякій відстані від устя пальника і повним, коли горіння повністю припиняється. Зменшення теплової потужності пальника веде до меншої швидкості потоку і спостерігається менша швидкість поширення полум'я. У такому випадку відбувається проскакування полум'я, в зону сумішоутворення.

При стійкому горінні частково підготовленої суміші, полум'я складається з двох конусів - зовнішнього та внутрішнього. На поверхні внутрішнього конуса вигорає частина горючого, яка забезпечена первинним повітрям яке є у суміші. У цій зоні розвивається висока температура і вона виділяється на фоні синюватого зовнішнього конуса своїм зелено-голубим кольором. Основа внутрішнього конуса розміщується від обрізу устя на відстані, яка приблизно рівна товщині зони горіння, яка утворює поверхню конуса (для суміші метану з повітрям – менше 1 мм). Решта горючого догоряє у зовнішньому конусі за рахунок повітря, що дифундує у нього з атмосфери.

Велика витрата енергії ззовні, що необхідна для розриву чотирьох зав'язків C—H у молекулі метану, визначає його низьку реакційну здібність. Це викликає великі труднощі для ефективного спалювання природного газу, у якого у складі від 70 до 98 % метану. Так, нормальна швидкість розповсюдження полум'я у суміші природного газу і повітря у співставних умовах у 6-7 раз менше, ніж у водороду. При цьому, особлива увага для надійного підпалювання та ефективного горіння приділяється забезпеченню стабілізації горіння.

Швидкість розповсюдження полум'я у різних газів неоднакова. Найбільшу номінальну швидкість розповсюдження полум'я має суміш водороду з повітрям (2,1 м/с), а найменшу – метану з повітрям (0,37 м/с). Так як метан є основою

природного газу, то природний газ має низьку реакційну здібність. Проведені нами аналізи продуктів горіння показали, що за рахунок цього на виході з топкового простору котлів іноді виявляється метан, що не згорів.

Слід звернути увагу, що вміст у продуктах горіння - 0,5% метану означає втрати тепла внаслідок хімічної неповноти горіння близько 5% при $\alpha=1$. Проведений нами енерго-аудит котелень допоміг виявити у вихідних газах котлів природний газ який не згорів. Таке явище характерне для пальникових пристроїв з інтенсивною закруткою потоку окиснювача, яка приводить до надлишку горючого в області де температура середовища нижча температури займання.

При збільшенні швидкості потоку суміші і коефіцієнту надлишку повітря відбувається перехід від ламінарної до турбулентної течії потоку, у результаті чого з'являється вихрові рухи і пульсацій, які чітко окреслений конусний фронт полум'я розмивається, його товщина росте, полум'я стає нестійким і прагне відірватися, або проникнути всередину пальника.

Кількість первинного повітря у газоповітряній суміші являється одним з основних факторів, що впливають на швидкість розповсюдження полум'я. У сумішах в яких вміст газу перевищує верхню границю його займистості (вибуховості), полум'я взагалі не поширюється. Зі збільшенням кількості первинного повітря у суміші швидкість поширення полум'я збільшується, досягаючи найбільшого значення при вмісті повітря близько 90% від теоретично необхідного. З цього випливає, що при збільшенні подання первинного повітря у пальник і наближення складу суміші до стехіометричного, підвищується небезпека проскоку полум'я всередину пальника.

У виробничому процесі неприпустимі як відрив полум'я (частковий і повний), так і його проскок всередину пальника. В першому випадку топка і газоходи, а деколи і приміщення котельні заповнюються газом який не згорів до кінця, утворюється вибухонебезпечна газоповітряна суміш, яка при наявності джерела необхідної температури може привести до вибуху. У другому випадку полум'я, як і при відриві, може згаснути і газ почне виходити у топку,

заповнюючи при цьому її газоходи. Якщо горіння буде продовжуватися у пальнику, то через різке збільшення його опору по тракту окиснювача воно буде відбуватися з великим хімічним недопалом і продукти неповного горіння газу, які заповнюють топку і газоходи, також можуть утворити вибухонебезпечні та токсичні (в основному за рахунок закису вуглецю) суміші. Внаслідок перегріву пальник може вийти з ладу. Звідси виходить, що конструкція пальника має забезпечувати стабільність полум'я без його відриву і проскоку у всьому розрахунковому діапазоні регулювання його теплової потужності.

Стійкість факелу у відношенні відриву у пальників, що видають газоповітряну суміш з $\alpha_r \geq 1$, забезпечується установкою спеціальних стабілізаторів. Конструктивно стабілізатори полум'я можуть бути: вбудовані безпосередньо у пальник (наприклад, тіла що мають поганообтічну форму, кільцеві стабілізатори), примикати до нього (керамічні тунелі, підпалюючі факели стаціонарних запальників), або розташовуватися у топці на деякій відстані від пальника (керамічні гірки, решітки, розсікачі). Схема стабілізації полум'я факелом стаціонарного запального пристрою приведена на рисунку 1.4, а. Надійність цього методу залежить, у свою чергу, від стійкості запального факелу. Найбільш поширені у печах і котлах - керамічні тунелі циліндричної, конічної, прямокутної або щілиноподібної форми. У тунель зазвичай поступає підготовлена суміш газу з повітрям з попереднім підігрівом повітря або без нього. У ряді випадків у тунель подають частково підготовану газоповітряну суміш або навіть роздільно газ і повітря, і тоді тунель окрім свого основного призначення – стабілізувати полум'я – виконує функції змішувача. У тунель можна подавати з устя пальника прямолінійний потік газоповітряної суміші, у якому всі лінії токів паралельні вісі пальника або мають невеликий кут (при конфузорному усті). Такі пальники деколи називають прямоструменевими. До них відносять, наприклад, інжекційні пальники середнього тиску. У тунель можна подавати попередньо закручений потік газоповітряної суміші. Пальники з закруткою потоку, що виходить з устя, часто називають вихровими.

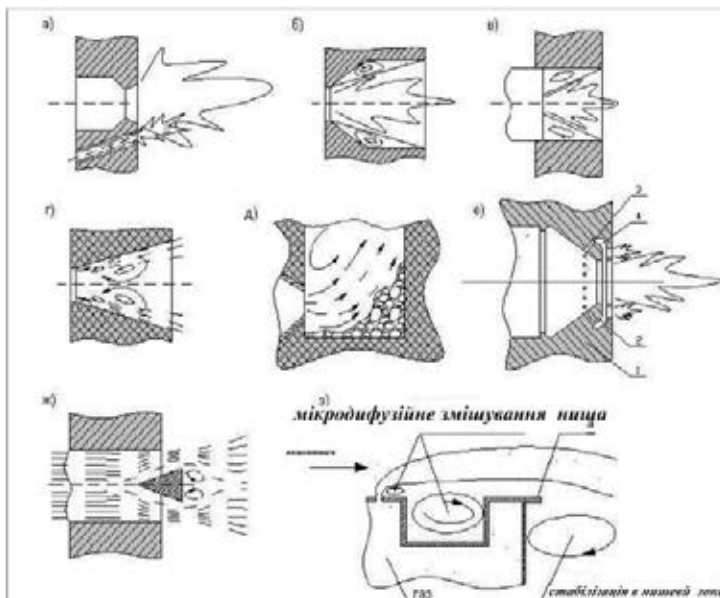


Рис.1.4 Схеми стабілізуючих пристроїв, що запобігають відриву полум'я

а) пілотний факел; б) циліндричний тунель з раптовим розширенням; в) циліндричний тунель без розширення; г) конічний тунель; д) керамічна гірка; е) кільцевий стабілізатор (1 – кільце; 2 – зовнішня поверхня вогневого насадку; 3 – бокові отвори; 4 – кільцева порожнина); ж) тіло з поганообтічною формою; з) ніша.

Пальники без закрутки потоку суміші, які мають круглу форму устя, компонуються циліндричними тунелями (рис. 1.4 б). Стабілізація полум'я у них досягається завдяки тому, що у кутовому просторі між стінками тунелю і потоком газоповітряної суміші, що розширюється, відбувається циркуляція частини продуктів горіння. Ці вихрові структури розпечених газів сприяють підігріванню і підпалюванню суміші, що виходить з пальника, у результаті чого досягається інтенсивне горіння і надійна стабілізація полум'ям. Стійкість горіння у тунелях не порушується при швидкості вильоту газоповітряної суміші з пальника, значно перевищуючій - 100 м/с. Для підігрітих газоповітряних сумішей стійкість горіння ще вище. Внутрішній діаметр циліндричного тунелю D_t приймають рівним $\approx 2,5 D_y$, де D_y – діаметр устя. При такому розмірі тунель практично не створює додаткового супротиву потоку гарячої суміші. Стабілізація у тунелі забезпечується при його довжині $L_T \geq D_t$. При $L_T \geq (2,5 - 3)$

D_T горіння газу у тунелі практично закінчується, однак виникаючі при цьому високі температури скорочують строк його служби. Тому досить часто довжину тунелю приймають у межах $L_T \approx (1,5 - 2,5) D_T$, при цьому процес догорання газу виноситься з тунелю у топку. Пальники з закруткою потоку повітря або газоповітряної суміші компонуєть з циліндричними тунелями рідше. Закрутка веде до різкого розширення кута розкриття потоку, що дозволяє застосовувати укорочені тунелі з $L_T \leq D_T$. При цьому тунелі можуть мати раптове розширення $D_T \approx 2,5 D_y$ (пальники типу ГНП Теплопроекту), $D_T = 1,5 D_y$ (пальники типу ГА Мосгазпроекту), $D_T = 2 D_y$ (пальники ГТВ Мосгазпроекту), виконуються без раптового розширення : $D_T = D_y$ (пальники для котлів ПТВМ) або мають конічну форму (газомазутні пальники всіх типів) [51].

Закручений потік суміші, що виходить у тунель за рахунок відцентрових сил відкидається до стінок тунелю, а на виході з нього на короткому шляху заповнює камеру горіння. В центральній частині кореню факела створюється зона розрідження, в яку відсмоктуються частина розпечених продуктів горіння. По мірі наближення до устя пальника ці продукти знову захоплюються основним потоком, у яких факел стабілізується у місці раптового розширення тунелю за рахунок вихрової зони, яка утворюється навкруги потоку суміші ззовні нього, у вихрових пальників стабілізація забезпечується зоною рециркуляції продуктів горіння всередині потоку газоповітряної суміші (рис. 1.4, в,г).

Прикладами щілиноподібних тунелів, виконуючих функції не тільки стабілізатора, але й змішувача, можуть слугувати тунелі поширених подових і форкамерних пальників.

У якості стабілізаторів полум'ям можуть використовуватися різного роду розпечені керамічні поверхні (гірки, розсікачі, стовбці, стінки, решітки тощо). У цьому випадку керамічна поверхня розміщається у топці так, щоб її можна було розпекти полум'ям того ж пальника, стійко працюючого при недостатності повітря. Після розігріву вогнетриву до температури достатньої для підпалювання газу, кількість повітря, яка поступає у пальник збільшується до

заданого і полум'я при відриві від устя пальника стабілізується на поверхні розпеченого до 1000-1200 °С вогнетриву (рис. 1.4, д). Стабілізатори цього типу відрізняються від інших тим, що розміщені на деякій відстані від устя пальника. Їх стабілізуюча здібність дещо менше, чим у керамічних тунелів.

У останні роки набули широкого застосування стабілізатори у вигляді тіл поганообтічної форми (рис. 1.4, ж). За тілом що має поганообтічну форму, введеним у потік газоповітряної суміші, утворюється зона загальмованого руху суміші газу. При відповідних поперечних розмірах стабілізатора у цій зоні виникають токи гарячих продуктів горіння, тобто створюється зона їх циркуляції. Шари газоповітряної суміші, розміщені на границі з зоною рециркуляції, підігріваються до температури займання і підпалюються, чим стабілізують полум'я в основному потоці. Стабілізуюча здібність тіла поганообтічної форми залежить від його форми і розмірів, наявності і розмірів зони рециркуляції, а також складу суміші (чим ближче до стехіометричної, тим надійніше стабілізація). Найбільшою стабілізуючою здібністю володіють диски і шайби. Щодо відривних характеристик, то у циліндрів і керамічних тунелів - вони близькі. Правильно сконструйований і розміщений стабілізатор у вигляді тіла поганообтічної форми може виключити відрив полум'я при достатньо високій швидкості суміші, що виходить з устя пальника. Характерним прикладом пальників, у яких використовуються циліндричні і U-подібні стабілізатори, є пальники типу ІГК. Перевагою цих стабілізаторів є простота монтажу і малі габарити пальникового пристрою, так як відпадає необхідність у тунелях, а стабілізатор, як правило, вбудовується у конструкцію пальника.

Такими ж перевагами володіють і кільцеві стабілізатори (рис. 1.4, е), у яких частина газоповітряної суміші (від 5 до 10%) відділяється від основного потоку і направляється назовні не через устя, а через бокові отвори 3. Ця частина газоповітряної суміші, виходячи з отворів, потрапляє до кільцевої порожнини 4, яка утворена зовнішньою поверхнею січення кільцевої щілини і значно більше сумарної площі отворів, тобто швидкість у ній зменшується до значення, при якому не може відбутися відрив полум'я. Стійке горіння газу біля кільця

забезпечує надійне підпалювання всієї суміші, що виходить з устя пальника з великою швидкістю. Кільцеві стабілізатори можуть компонуватися з пальниками, що видають газоповітряну суміш з $\alpha=0,2-1,1$.

До недоліків кільцевих стабілізаторів і тіл поганообтічної форми можна віднести необхідність застосування у ряді випадків водяного охолодження або жаротривкого матеріалу, а також підвищення аеродинамічного опору через великі значення коефіцієнту загромождження.

Існує також нішова система стабілізації горіння (рис. 1.4, з) [40], заснована на утворенні З.З.Т. у нішевій порожнині. Згідно принципу її роботи високо нагріті продукти горіння вертаються на початку зони горіння і підпалюють паливну суміш. Така система характеризується високою стабільністю горіння, так як має стійку зону зворотних токів у нішевій області.

1.2 Аналіз існуючих і розробка нових підходів до створення високоефективних технологій спалювання палива

1.2.1 Формування основних вимог до пальникових пристроїв

На основі аналізу теоретичних робіт і значного об'єму практичних даних з використання різних вогнетехнічних установок з пальникових пристроїв можна сформулювати до них основні вимоги, виконання яких має сприяти їх надійності, економічності і мінімально екологічно шкідливості. Перш за все, конструкція пальникового пристрою повинна забезпечувати можливість впливу на всі стадії робочого процесу (сумішоутворення пального і окиснювача, займання паливної суміші, стабілізацію процесу горіння і формування необхідної якості продуктів горіння). В даному випадку під терміном «якість продуктів горіння» мається на увазі їх поля температури, концентрації і швидкості.

Відомо, що у багатьох видів пальникових пристроїв забезпечуються не всі стадії робочого процесу. Так доволі поширені подові пальники, які функціонально являються пристроями для змішування, оскільки при їх використанні стійкість горіння забезпечується шляхом використання особливостей топкового простору – розпеченої цегляної кладки вогнетехнічного

пристрою або вихрової течії у топці. У таких випадках пальникові пристрої представляють з себе топки з подовим змішувачем і у кожному конкретному випадку доводиться налагоджувати взаємозв'язок пальникового пристрою з аеродинамікою топки.

Іншою доволі важливою характеристикою пальникового пристрою є надійність розпалювання при мінімально можливій витраті газу. Конструкція найбільш поширених пальникових пристроїв типу ГМ, ГМГ та інших забезпечує надійне займання і розпал при витратах газу, складаючих не менше 20-30% від витрат, які відповідають номінальній потужності. У дійсних вогнетехнічних об'єктах ця потужність досягає декількох МВт. Запуск вогнетехнічних об'єктів на такому рівні потужності приводить до «хлопків» та інших небезпечних явищ (термічні «удари», стрибки тиску у топці тощо). Внаслідок цих явищ доволі часто виникають нештатні ситуації: швидке розкриття або закриття шиберів на вентиляторах або димососах, що призводить до зміни швидкості потоку, витрати повітря, тобто зростання коефіцієнту надлишку повітря і в кінці-кінців - погашення факела пальникового пристрою, оскільки у подібних випадках автоматика безпеки не завжди встигає вчасно спрацювати.

Сучасні пальникові пристрої повинні забезпечувати стійке горіння і при різких коливаннях тиску і (відповідно) витратах газу. У ряді випадків пальникових пристроїв типу ГМ, ГМГ потрібно забезпечити можливість ефективної роботи у широкому діапазоні потужностей при коефіцієнті робочого регулювання $K_p > 5$ ($K_p = N_{opt}/N.M.in$) і коефіцієнті надлишку повітря $\alpha > 10$. До подібних ситуацій можна віднести: роботу котлів при змінному відпуску пари на технологічні процеси; зміну температурного режиму у печах різного призначення; забезпечення сушки футеровки вогнетехнічного об'єкта після ремонтних робіт тощо. Вище наведені конструкції пальникових пристроїв нездатні забезпечити ефективну роботу при глибокому регулюванні, і тому у випадках підтримки неперервного горіння факела К.К.Д. вогнетехнічного об'єкту падає, на 20-30%. Тому, наприклад, сучасні котли ПТВМ після перекладання футеровки сушать за допомогою спалювання деревини і цей

процес може відбуватися протягом декількох тижнів.

Для досягнення ефективного регулювання потужності вогнетехнічних об'єктів, а також при пуску інколи використовують прийом, який передбачає відключення кількох пальників. Однак такий спосіб обов'язково тягне за собою погіршення газодинаміки топки, що являється причиною неприпустимих температурних нерівномірностей у топковому просторі. При цьому для охолодження відключених пальникових пристроїв через них доводиться пропускати повітря, у зв'язку з цим збільшується як температурна нерівномірність, так і коефіцієнт надлишку повітря у топковому просторі.

Виходячи з необхідності досягнення максимальної енергетичної ефективності і екологічної безпеки щодо викидів CO, сучасні пальникові пристрої повинні забезпечувати повне спалювання паливної суміші у топковому просторі до її охолодження нижче температури займання у зоні максимальної тепловіддачі радіаційної частини, або у конвективній частині пальникового об'єкта. Для метану це значення температури знаходиться у межах 700-750 °C. У всьому діапазоні навантажень вогнетехнічного об'єкта їх пальникові пристрої повинні забезпечувати допустимий рівень емісії токсичних речовин (NO_x, CO, SO₂ тощо). Пальникові пристрої повинні забезпечувати можливість регулювання довжини і світимості факелу для досягнення необхідної інтенсивності і рівномірності розподілу теплових радіаційних потоків за топковим простором, що дуже важливо у печах різного призначення. Також пальникові пристрої повинні допускати управління аеродинамічною і концентраційною структурою течії продуктів горіння, що диктуються типом вогнетехнічного об'єкту. Так, наприклад, у мартенівських печах необхідний так званий - «жорсткий» факел, у камерах згорання газотурбінних двигунів необхідна особлива форма профіля швидкостей потоку, що набігає на лопатки турбіни. При цьому в одних вогнетехнічних об'єктах необхідно створювати окиснювальне середовище, а в інших відновлююча.

До числа важливих характеристик пальникових пристроїв можна віднести їх аеродинамічний опір: як за трактом окиснювача, так і за трактом пального. З

метою зниження витрат електроенергії на привід тягодуттьових засобів аеродинамічний опір за трактом повітря слід мінімізувати. Малий опір дає можливість забезпечити розпал пальникових пристроїв без примусового наддуву, тільки за рахунок розрідження у топковому просторі. При підсмоктуванні повітря у топковий простір через пальникову амбразуру досягається максимально можлива рівномірність його течії, що дозволяє мінімізувати витрати газу на розпал пальникового пристрою і підвищити рівень стійкості горіння на малих режимах. В той же час мінімізація опору за трактом пального дозволяє пальникові пристрої працювати при межево низьких тисках газу, що особливо актуально у теперішніх умовах. З метою підвищення ступеня автоматизації функціонування і забезпечення безпеки конструкції і організації робочого процесу пальникові пристрої повинні гарантувати простоту і надійність регулювання всіх робочих параметрів і змін режимів роботи. Багато видів пальникових пристроїв з часом у процесі експлуатації погіршують свої характеристики. Так, у подових пальниках газовий колектор деформується під дією термічних напружень, внаслідок чого порушується оптимальна геометрія повітряних каналів і рівномірність розподілу горючого у потоці окиснювача. К.К.Д. вогнетехнічного об'єкта при цьому може зменшитися на 5-20%. У пальникових пристроях типу ГМ, ГИМГ, ГА та інші з часом у процесі експлуатації обгорають повітряні реєстри, що призводить до змін аеродинаміки течії і погіршення робочих характеристик.

Доволі шкідливу дію на надійність роботи пальникових пристроїв має також наявність у їх складі керамічної футеровки, що застосовується для захисту металевих нагрівальних елементів. Внаслідок різної інтенсивності прогріву та коефіцієнтів термічного лінійного розширення металу і кераміки елементи футеровки періодично руйнуються і потребують оновлення. Подібний небажаний ефект може бути нівельований завдяки самоохолодженню пальникових пристроїв потоками пального і окисника. При цьому відбувається термічна підготовка пального, що поліпшує його реакційну здатність. У результаті поліпшуються пускові характеристики пальникових приладів і

розширюються межі стійкості горіння.

За рахунок достатньо великих значень аеродинамічного опору робота сучасних пальникових пристроїв супроводжується достатньо потужними звуковими коливаннями з широким спектром випромінювання. З метою зменшення шкідливої дії на навколишнє середовище, рівень шуму може бути знижений шляхом зменшення потужності вихорів, що є активними джерелами шуму. Крім того, вихорі підвищеної потужності провокують пульсаційні і вібраційні резонансні явища, що дуже небажані у топкових процесах.

Конструкція пальникових пристроїв повинна забезпечувати модульність, що дозволить забезпечити необхідну потужність за рахунок необхідної кількості автономних модулів. Такий підхід значно спрощує їх розрахунок і виготовлення, а також дозволяє уникнути додаткових витрат за місцем на регулювання пальникових пристроїв різної потужності. До пальникових пристроїв застосовують вимоги технологічності і простоти виготовлення, низької матеріалоемності, необхідності у дорогих і спеціальних матеріалах.

На основі вищевказаного, можна зробити висновки, що сучасні пальникові пристрої повинні забезпечувати виконання наступних основних вимог:

1. Можливість впливу на всі стадії робочого процесу (сумішоутворення пального і окиснювача, займання паливної суміші, стабілізацію процесу горіння і формування необхідної якості продуктів горіння).
2. Надійність розпалу і стійкість горіння за мінімально можливою витраті газу.
3. Відсутність перевищень дозволеного рівня емісії токсичних речовин (NO_x , CO , SO_2 тощо) у всіх діапазонах навантажень вогнетехнічного об'єкта.
4. Можливість широкого регулювання довжини і світимості факела.
5. Можливість управління аеродинамічною і концентраційною структурою течії продуктів горіння.
6. Мінімальний аеродинамічний опір як за трактом окиснювача, так і за трактом пального.
7. Простота і надійність регулювання всіх робочих параметрів і зміни

режимів роботи.

8. Самоохолодження паликових пристроїв потоками пального і окисника.
9. Низький рівень шуму, пульсацій і вібрацій.
10. Модульність, технологічність і простота виготовлення, низька металоємність, відсутність необхідності у дорогих та спеціальних матеріалах.

1.2.2 Огляд найбільш поширених газових та газо-мазутних паликових пристроїв і досвід їх експлуатації

В зв'язку з тим, що Україна успадкувала значний парк теплогенеруючого обладнання від СРСР, нижче приведений аналіз паликових пристроїв починаючи з виготовлених на пострадянському просторі, оскільки переважна їх більшість цього покоління ще знаходиться в експлуатації.

Найпростіший дифузійний палик (рис. 1.6.) – це металева труба з просвердленими в ній отворами двома рядами під кутом 60° - 90° один до одного. Стабілізація, в даному випадку, здійснюється циркуляційною течією високонагрітих продуктів горіння за (ЗЗТ) уступами.

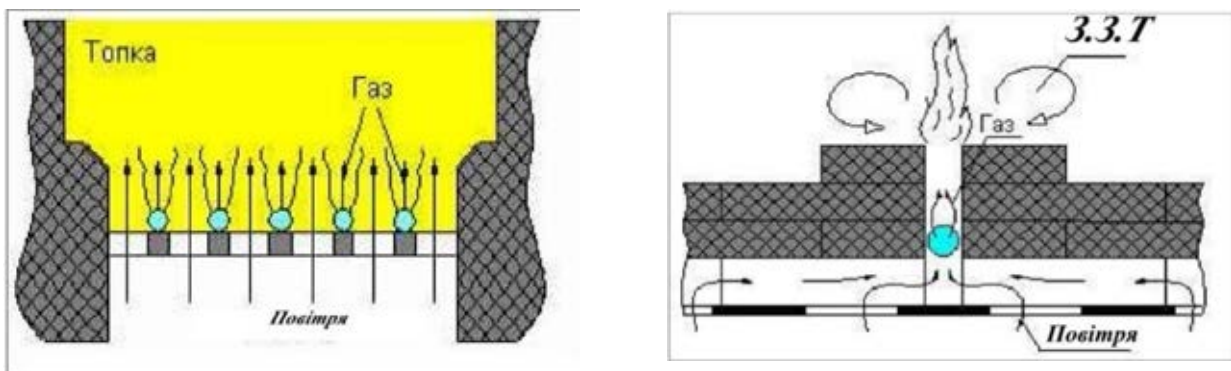


Рис. 1.5 Дифузійні палики

3.3.T. – зони зворотних течій

Перевагами таких паликів є простота у виготовленні, безшумність роботи, висока стійкість горіння. В них неможливий проскок полум'я. У порівнянні з паликами з попередньо підготованою сумішшю, довжина факела у них більша (до 1600 мм), теплові навантаження топкового об'єму низькі.

Характерною особливістю інжекційних паликів є залежність коефіцієнта витрати первинного повітря від розрідження (протитиск) у топці. Ця

залежність мінімальна при тиску газу перед соплом більше 0,04 – 0,05 МПа.

Недоліки інжекційних пальників: обмежений діапазон регулювання при $\alpha \approx 1$, високий рівень шуму при використанні середнього і високого тиску газу, залежність інжекційної здатності від ступеню розрідження у топці, складність у використанні підігрітого повітря, можливість проскоку полум'я у змішувач, необхідність водного охолодження.

Найбільш поширеними є інжекційні пальники середнього тиску «Стальпроект» (рис 1.6.), які принципово не відрізняються від конструкцій «Теплопроект», «Легіпроінжпроект», «Мосгазпроект» та інших організацій [47,51].

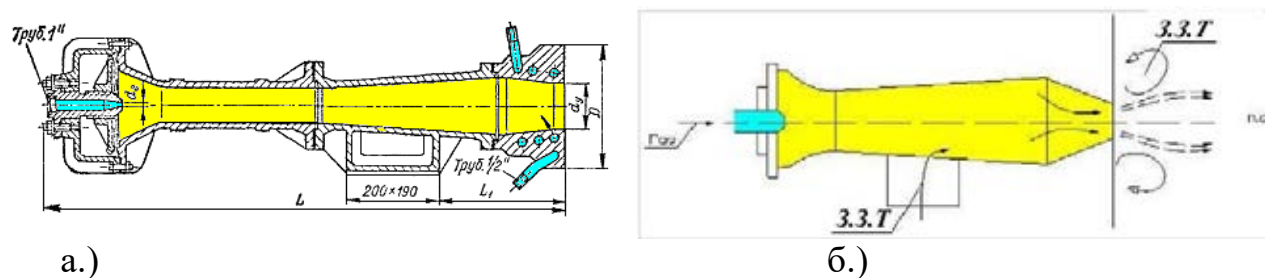


Рис. 1.6 Інжекційний пальник конструкції «Стальпроект» а) і його газодинамічна схема б)

Експлуатаційні межі роботи цих пальників скорочуються зі збільшенням їх продуктивності і вони можуть бути рекомендовані до експлуатації тільки на агрегатах з дуже малими коливаннями навантаження. Більш широке застосування мають такі пальники з номінальною витратою газу до 50м³/год.

Блочні інжекційні пальники середнього тиску (БІГ), «Променергогаз» з периферійною видачою газу призначені для котлів паропроductивністю до 10т/час. Їх досягнення – малі габаритні розміри. Пальник не тільки не виступає за кладку агрегату, але і навіть розташовується у ніші. Такі пальники мають дуже вузький діапазон регулювання потужності і потребують постійного регулювання конструктивних та режимних факторів при експлуатації. Інжекційні безполум'єві пальники (рис. 1.7.) застосовуються там, де необхідний рівномірний розігрів великих поверхонь. Їх відмінна здібність складається у

тому, що газоповітряна суміш на номінальному режимі повністю згоряє керамічній насадці 1 і розпалює її, створюючи при цьому рівномірно випромінюючу поверхню.

1 - керамічна насадка (стабілізатор горіння); 2 – змішувач.

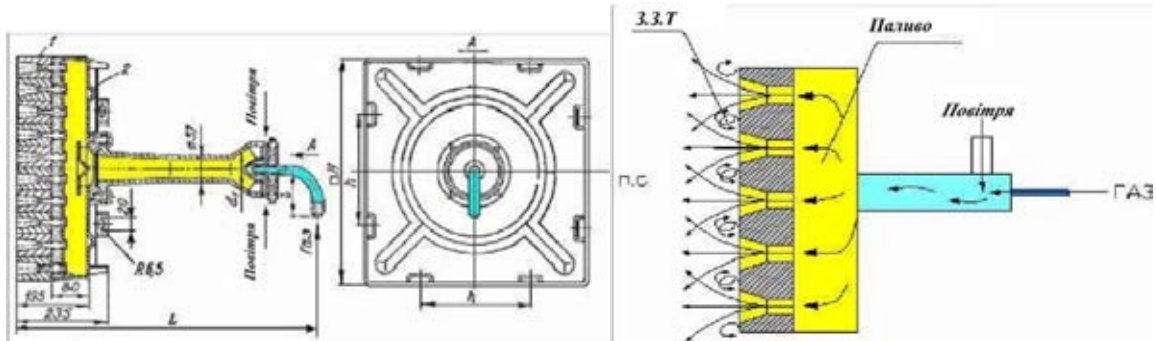


Рис. 1.7 Схема інжекційного пальника ГБПШ конструкції ВНИИ «Нефтьмаш» та його газодинамічна схема

Істотним недоліком таких пальників є частий просок полум'я (після розігріву керамічних насадок) через трубки-ніпелі у змішувач 2, що визиває короблення корпусу пальників і вихід їх з ладу. До того ж класу пальників можна віднести пальники ГВП (рис. 1.10.), у яких довжина факела регулюється ступенем закрутки потоку, що задається поворотом лопаток завихрювала.

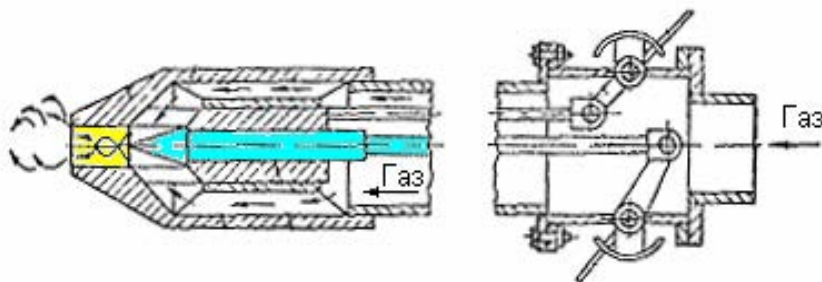


Рис. 1.8 Схема пальника ГВП

На рис. 1.9. представлений пальник пристрій для спалювання газу у скловарних печах. Особливістю таких пристроїв є висока температура повітря, що подається на горіння (500-900 °С). Тому їх конструкція максимально спрощена. Інколи для збільшення дальності факела за віссю пальника надають стиснуте повітря.

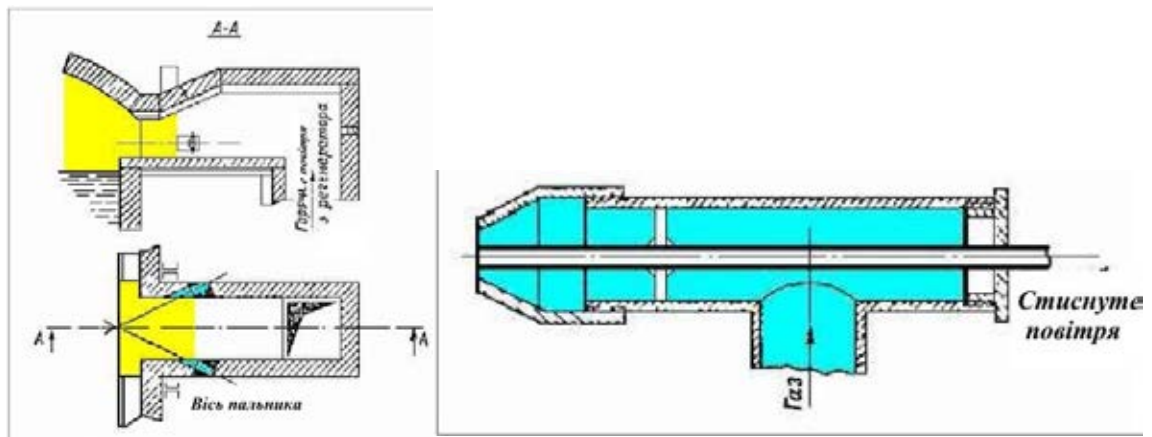


Рис. 1.9 Пальниковий пристрій для спалювання газу у скловарних печах.

У пальниках з примусовою подачею повітря (двопроводних) процеси змішування і горіння поєднуються у факелі. Ці пальники мають набагато більший діапазон можливостей регулювання характеристик робочого процесу не тільки пальникових пристроїв, а і всього вогнетехнічного об'єкта у цілому. Крім того, такі пальники дозволяють значно підвищувати надійність роботи.

Найбільш простими з них є пальники типу «труба у трубі» ДВС і ДВВ, розроблені інститутом «Стальпроект» (рис. 1.10)

Пальники призначені для нагрівальних печей, у яких потрібен довгий факел з можливістю регулювання. Пальники працюють з $\alpha=1,05$, в діапазоні витрати газу від 40 до 2280 м³/год і потребують тиску газу близько 600 мм вод. ст.

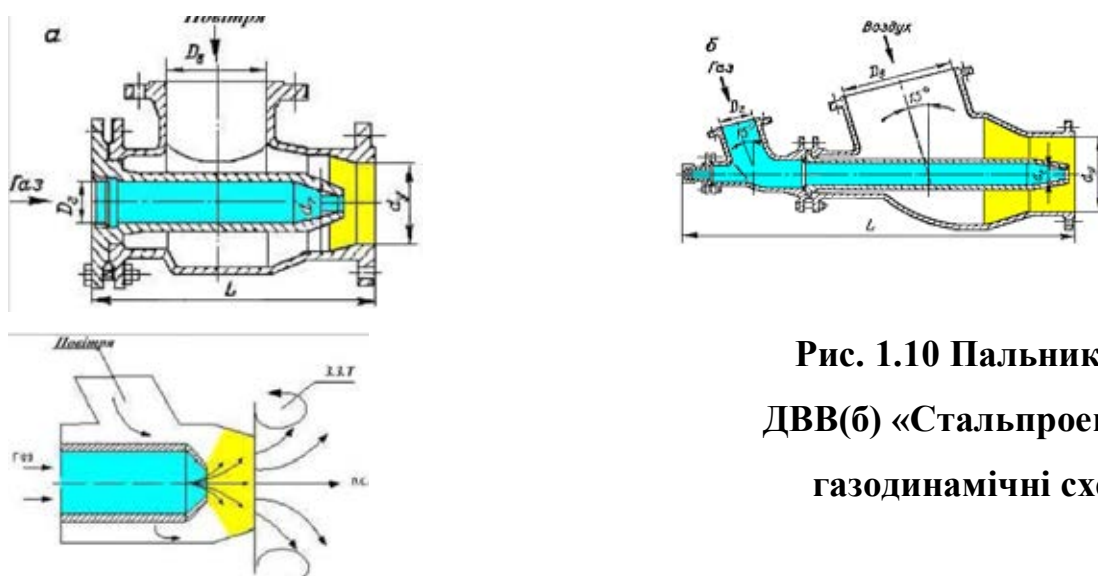
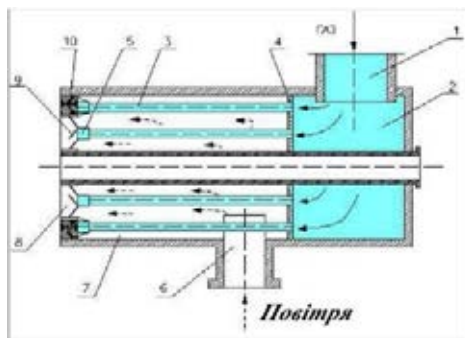


Рис. 1.10 Пальники ДВС(а) і ДВВ(б) «Стальпроект» і їх газодинамічні схеми

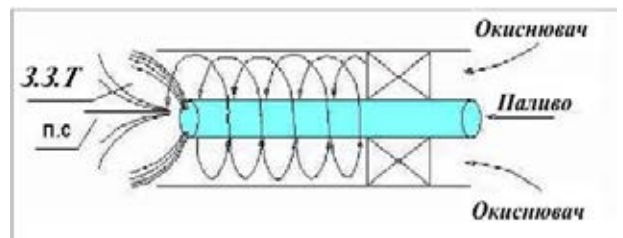
Пальники з примусовою подачею повітря і попередньою підготовкою суміші найбільш поширені у топковій техніці. Вони перекривають діапазон витрат від часток до десятків тисяч м³ газу у годину. Підготовка суміші у них забезпечується подачею газу через ряд отворів або щілин під різним кутом до потоку повітря. Якщо газ надається від центру до периферії пальника, то така роздача називається центральною. При наданні газу від периферії до центру пальника роздача називається периферійною. Потік повітря у більшості випадків закручується за допомогою лопаток, або корпусу равликоподібної форми, або шляхом тангенціального надання повітря у циліндричний корпус. Ступінь змішування палива з окиснювачем у пальниках різний. Підготовка паливної суміші може починатися тільки у пальнику, а закінчуватися разом з процесом горіння. Деколи суміш повністю готується у пальнику. Змішувальні камери, як правило, мають невеликий об'єм, а швидкість витікання суміші з устя пальника складає 10...50 м/с.

Пальник ГНП конструкції «Теплопроекту» відрізняється від інших пальників типу «труба у трубі» наявністю завихрювача і багатошаровим наданням газу. Пальники ГА конструкції «Мосгазпроекту» (рис. 1.11) призначені для спалювання газу низького та середнього тиску. Потужність пальника набирається кількістю паливоподаючих елементів 3. Кожен елемент являється самостійним приладом, в якому відбувається змішування струй газу, що виходять з кінцевого елемента під кутом до повздовжньої вісі, з закрученим потоком повітря [51]. Цими пальниками оснащені котельні установки більшості енергетичних і великих промислових підприємств колишнього СРСР. Такі типи пальникових пристроїв зустрічаються всюди і зокрема на території України.

Відмінною особливістю пальників ГА є дрібність факелу на 12-18 маленьких закручених факелів зі структурою течії, аналогічною течії у газомазутному пальнику (ГМП) і наявністю футеровки – керамічного тунелю з раптовим розширенням, який оберігає торець пальника від перегріву і коли він розпечений, то поліпшує стабілізацію горіння. Передня частина пальника між елементами футерується шамотом або жаротривким бетоном.



а.)

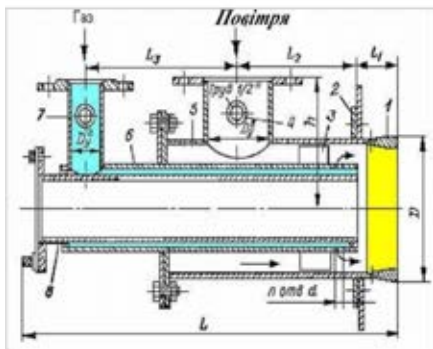


б.)

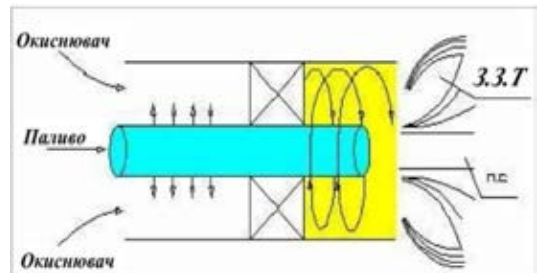
Рис. 1.11 Пальник ГА конструкції «Мосгазпроекту» а.) і його газодинамічна схема б.)

1 – вхідний патрубков; 2 – газорозподільна камера; 3 – трубки подачі газу; 4 – трубна дошка; 5 – газові сопла; 6- патрубков для повітря; 7 – циліндрична камера; 8 – амбразура; 9 – лопаті для закрутки повітряного потоку; 10 – футеровка вогнетривкою масою. — — — — — потік газу - - - - - потік повітря.

Пальники ГА достатньо складні у виготовленні і мають велику масу. Крім того погано охолоджуються елементи пальникового пристрою між соплами. Хоча ці пальникові пристрої забезпечують високий рівень повноти згорання їх стали замінити пальниками ПГВ (рис. 1.12).



а.)



б.)

Рис. 1.12 Пальник ПГВ конструкції «Мосгазпроекту» а.) і його газодинамічна схема б.)

1 – керамічний тунель (вогневий насадок) для стабілізації горіння; 2 – кріплення; 3 – лопатки; 4 – отвір для подачі повітря; 5 – змішувач; 6 – отвори в газовому колекторі; 7 – отвори для подачі газу.

Газ через отвори у газовому колекторі 6 поступає перпендикулярно потоку

повітря у змішувач 5. Повітря закручується лопатками 3 встановленими під кутом 45° . Стабілізатором горіння слугує керамічний тунель з раптовим розширювачем. Підвищенню стійкості сприяє режим потоку за допомогою вогневого насадку 1. Необхідно відмітити, що стабілізація горіння за допомогою керамічних насадок приводить до частого їх виходу з ладу.

Плоскополумеві пальники ППП конструкції «Теплопроекту» і Інституту газу НАН України (рис. 1.13.) відносяться до класу вихрових пальникових пристроїв, у яких реалізується ефект Коанда, який полягає у безвідривному обтіканні ультрадифузорного пальникового тунелю і спряженої з ним поверхні футеровки. При цьому у пічному просторі створюється складна течія з двома основними зонами: пристінковою і об'ємною [51].

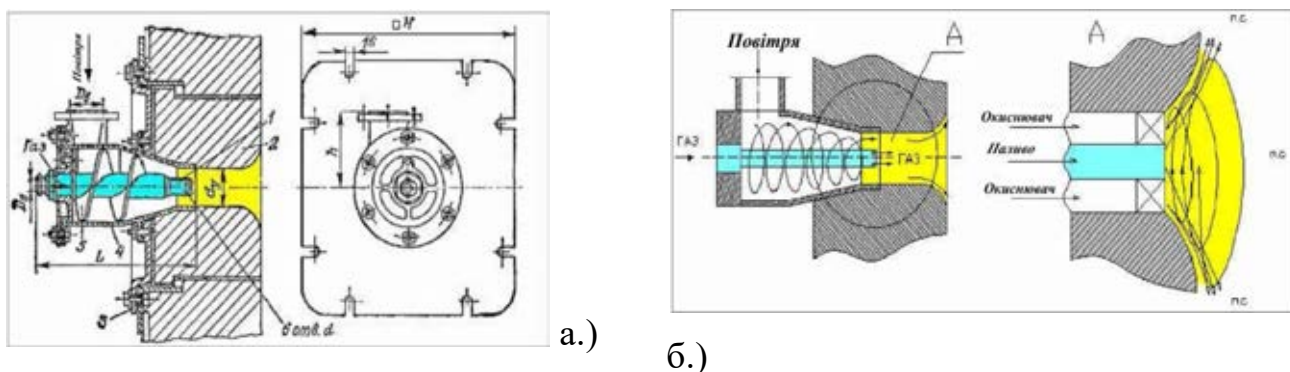


Рис. 1.13 Пальник ППП конструкції «Теплопроекту» і Інституту газу НАН України а.) і його газодинамічна схема б.)

Закрутка потоку повітря забезпечується гвинтом 5. Газ із внутрішньої порожнини гвинта через отвір у соплі 1 поступає перпендикулярно у потік повітря. Підпалена пристінна зона факелу розігріває поверхню стіни робочої камери у плоскому розімкненому факелі течії високонагрітих газів з топки. Пальники потребують високого тиску газу до 10000 мм вод. ст. Такі пальники відрізняються великою масою футеровки і потребою у частому ремонті.

Наступний клас пальникових пристроїв – комбіновані газомазутні, що представляють з себе комплекс з газового пальника і мазутної форсунки. Вони призначені для роздільного або спільного спалювання газового і рідкого палива.

Найбільше поширення в котельних установках України отримали короткофакельні газомазутні пальники ГМГ, ГМГм, ГМГА, ГМГБ, що були

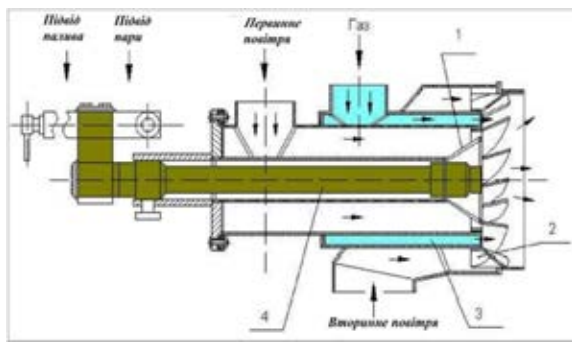
розроблені у ЦКТІ і виготовляються на заводі «Ільмарін». Часто їх використовують при спалюванні природного газу у котлах ДКВР, ДКВ, ДЕ, що розміщені у великих містах пострадянського простору. Їх доля на цьому ринку складає 60%, частка газомазутних пальникових пристроїв інших конструкцій не перевищує 5%; доля газових дугтьових пальників МО ЦКТІ, «Мосгазпроекту», «Укрпромгаз» складає біля 25%, а решта представлена інжекційними пальниковими пристроями.

У конструкції пальників ГМГА; ГМГБ-5,6; ГМ-10 присутній кільцевий периферійний газороздавальний колектор із якого газ під кутом 90° поступає у поперечний потік повітря, закручений лопатковим завихрювачем. При роботі на чистому газі стабілізатор мазутного полум'я забирається за межі лопаткового завихрювача. Стабілізація газового полум'я забезпечується керамічним тунелем і зворотною течією високотемпературних газів із топки.

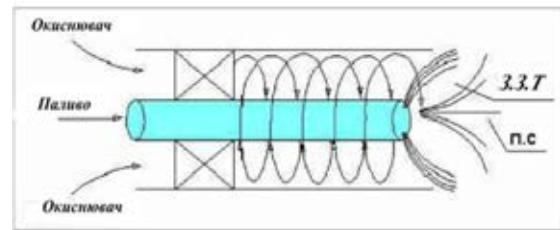
Пальники цього типу мають деякі відмінності. Так у ГМГА застосовується багаторядковий розподіл газу. У ГМГБ-5,6 є повітрянаправляючий пристрій, виконаний у вигляді тангенціального лопаткового апарату, що дозволяє міняти ступінь закрутки потоку у залежності від виду палива та навантаження, і тим самим забезпечує спалювання газу у короткому факелі. У ГМ-10 порівняно новим елементом є застосування комбінованих амбразур, які складаються з кінцевої і циліндричною частин.

Конструктивно схоже рішення мають газомазутні пальники «Оргенергогазу» і «Ленінпроінжпроекту». До цього ж класу пальників відносяться пальники типу Г-1,0, Г-0,4 конструкції МО ЦКТІ з рухомим кільцевим реєстром і плоскими направляючими лопатками.

У газомазутних пальниках ГМПм (рис 1.14) первинне повітря закручується за допомогою лопаткового апарату з прямими лопатками, встановленими під кутом 45° (2). Вторинне повітря закручується лопатками (1). Права або ліва закрутка повітря вибирається у залежності від компонування пальників. Газ розподіляється попутно у закручений потік через колектор, що має отвори по колу.



а.)



б.)

Рис. 1.14 Принципова схема газового пальника типу ГМП(м) ЦКТІ а.) і його аеродинамічна схема б.)

де: 1 – завихрювач вторинного повітря; 2 - завихрювач первинного повітря; 3 - підвід газу; 4 - підвід мазуту.

Незважаючи на тривалу експлуатацію пальникових пристроїв що були наведені вище, процес їх вдосконалення продовжується. Однак при цьому характеристики пальників що були заявлені, не завжди підтверджуються в експлуатаційних умовах. Так, наприклад, досвід використання найпоширеніших пальників типу ГМГ показує, що для повного спалювання газу вони потребують коефіцієнт надлишку повітря у розмірі 1,15...1,25, що значно знижує ефективність роботи котла. Крім того, проблемою є температурні нерівномірності у топках котлів. За даним [52] для котлів ДКВР нараховують багато причин аварійних зупинок, які можна навести відповідно рейтингу: перепал труб фронтального екрану - 45%, деформація і розрив бокових екранів – 37%, перепал пароперегрівників – 7%, вібрації котлів -7%, пошкодження футеровки, обмурування, обшивки – 4%.

Із цього випливає, що більше 80% аварійних зупинок котлів зв'язані з перегрівом екранних труб. Причина таких перегрівів у високому рівні локальних теплових потоків від факела (див. рис.1.15).

Для зменшення максимального температурного рівня факелу раніше був запропонований перехід від попереднього перемішування до здійснення дифузійного механізму горіння. Такий перехід досягається шляхом зменшення кута впровадження струменів газу у потік повітря від 90° до 0°. Застосування пальникових пристроїв з торцевим наданням газу попутно потоку повітря

дозволило зменшити максимальні теплові потоки на бокові екрани у 1,25... 1,3 рази, завдяки цьому число аварій котлів через перепал екранних труб значно зменшився.

Однак застосування такої схеми газорозподілу при навантаженнях, які перевищують номінальне приводить до виникнення істотного 0,9...3,5% хімнедопалу (при відсутності ретельної наладки 5,4...9,5%). Тому більша частина котлів ДКВР і ДКВ з пальниками ГМП і НГМП працюють у діапазоні навантажень 60...100% від номінальної, не дивлячись на можливість форсування цих котлів до 140...150%.

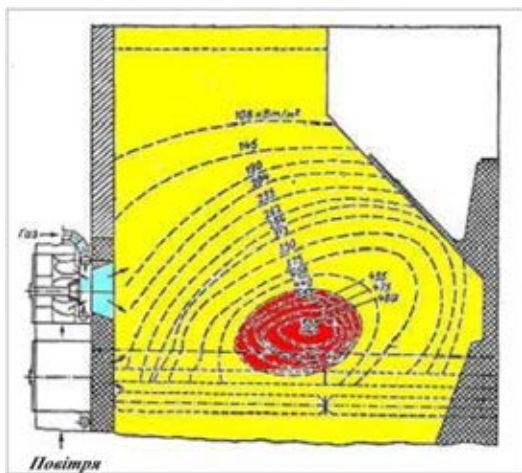
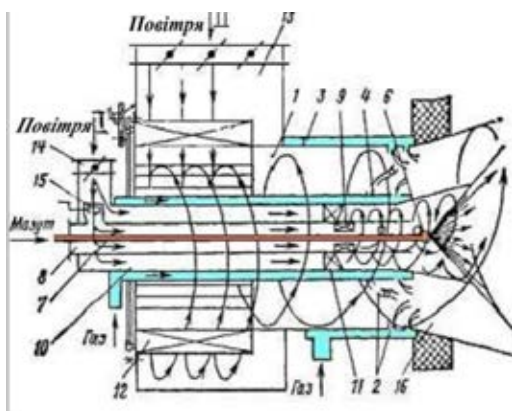


Рисунок 1.15 Розподіл теплових потоків у топці котла ДКВР-20-13 з трьома пальниками ГМГВ-5,6, що працюють на газі.

Для того, щоб вирішити задачу одночасного «пом'якшення» теплових потоків на екрани і збереження високого ступеню вигорання газу було задіяно комбіноване сумішоутворення. У цьому випадку газ надавався попутно первинному повітрю і перпендикулярно вторинному.



а.)

б.)

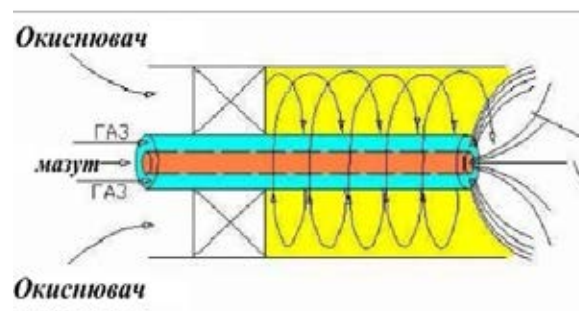


Рис. 1.16 Принципова схема пальника ХФ ЦКБ-ВТІ конструкції Харківського філіалу ВТІ а.) і його аеродинамічна схема б.)

Харківським філіалом ЦКБ «Главенергоремонту» разом з ВТІ і ТКЗ розроблений газомазутний пальник для котлів, що спалюють паливо з малим надлишком повітря (рис.1.17). Пальник має равликово-тангенціальний завихрювач вторинного повітря (13) аксіальний – первинний (11). Струменева багаторядна подача газу що здійснюється через газовипускні отвори з периферійного колектора (2), центральні труби (4) та спеціальні патрубки (5). Ступінь закрутки основного потоку повітря регулюється зміною кута нахилу рухомих лопаток тангенціального регістру (12). Розрахункова витрата газу 500...5000 м³/год. Гідравлічний опір пальника 196 Па.

В інституті газу НАН України розроблені пальникові пристрої для двоступеневого спалювання палива за межами пальника у топковому об'ємі. Конструкція пальника і показники її роботи приведені на рис 1.19. Усе повітря у пальнику розділяється на два потоки – первинний і вторинний. Первинний закручується лопатковим завихрювачем 3. Вторинний надається за віссю цього потоку коловим струменем. Закрутка первинного повітря забезпечує розрідження біля устя пальника і притік у цю частину топкових газів. Подача газу - периферійна із колектора 5. Пальник має дещо знижений гідравлічний опір за рахунок ліквідації осьового зустрічного потоку. Коефіцієнт надлишку первинного повітря підтримується у проміжках 0,8...0,9. В основному для таких пальникових пристроїв зберігаються усі особливості розглянуті для ПП ГМГ. Останнім часом увага розробників цього пальникового пристрою концентрувалася на зниженні гідравлічного опору шляхом установки аксіальних лопаток з кутом відхилення що змінюється і за рахунок зменшення швидкісної нерівномірності по перетину повітряно потоку у коліні повітропроводу перед пальником. У результаті модернізації основні експлуатаційні характеристики котлів не змінились, а емісія NO_x зменшилась на 40%.

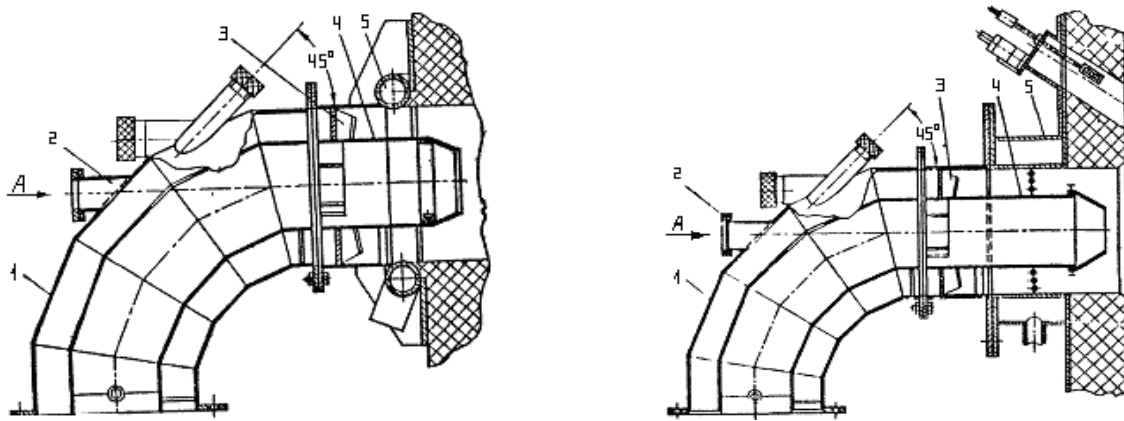


Рис. 1.17 Пальники двоступеневого спалювання

Інституту НАН України

Значним кроком у розвитку пальникового пристрою став прямоточний струменево-стабілізаційний пальник з роздільним наданням газу та повітря, що був розроблений у Київському Політехнічному Інституті під керівництвом професора В.А. Христича [33,34] по газодинамічній схемі «поганообтічне тіло» - куток який пройшов державні випробовування. Як показано на (рис.1.18) (верхній лівий), газ надається через отвори у насадці 1 і розподіляється у вигляді окремих струй вздовж кутових стабілізаторів 2. Повітря поступає у зону горіння через радіальні щілини між стабілізаторами. За кожним стабілізатором створюється газоповітряна суміш і невеликий факел палива, що горить. При цьому тут утворюються циркуляційні токи продуктів горіння, що забезпечують запалювання газу і стійку роботу пальника. Розділення сумарної зони горіння на велике число палаючих струменів газу обумовлюється інтенсифікацією процесу горіння і зменшення довжини факелу. На рис. 1.20 пальник стійко працює у широкому діапазоні змінення коефіцієнту надлишку повітря. Але при $\alpha \leq 2$ для цих пальникових пристроїв характерне погіршення вигорання, так як струмінь газу, що входить у тіньову область при великих витратах газу (тобто великих потужностях) знищує зону зворотних потоків і «перенасичує» область стабілізації горіння.

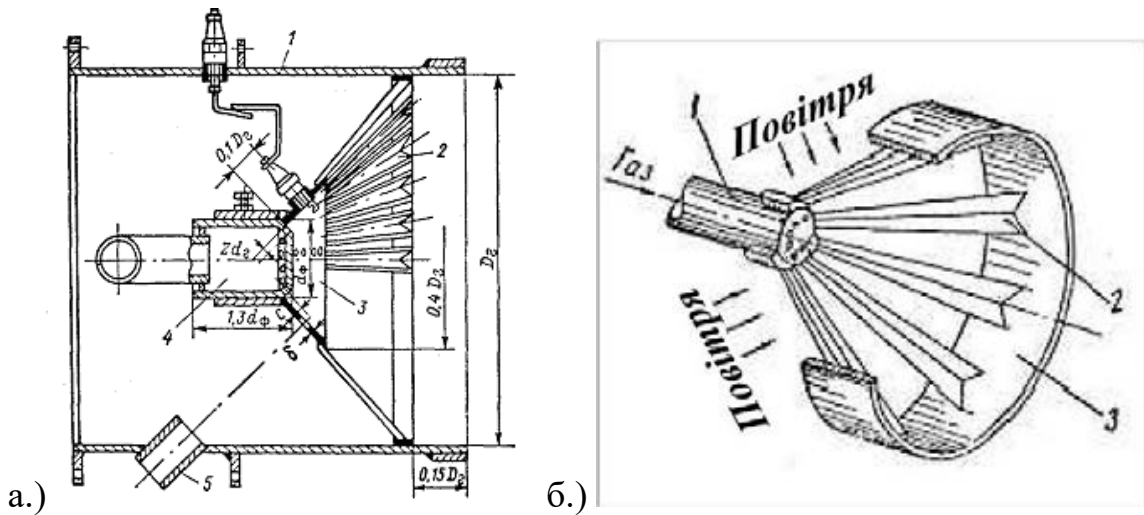


Рисунок 1.18 Струменево-стабілізаторний пальник конструкції КП а.), і його газодинамічна схема б.).

В теперішній час аеродинамічна схема з поганообтічними тілами поступово починають використовуватися і виробниками пальників з ближнього зарубіжжя. Так, наприклад молдавська фірма DAVA розробила, виготовляє та успішно впроваджує їх на вогнетехнічних об'єктах Румунії, Болгарії, Угорщини, Молдови, Росії і України з комбінованою аеродинамічною схемою «поганообтічне тіло» + «закрутка потоку окиснювача», показане на рис. 1.19. Поганообтічними тілами виступають металеві шайби, показані на (рис.1.20.)

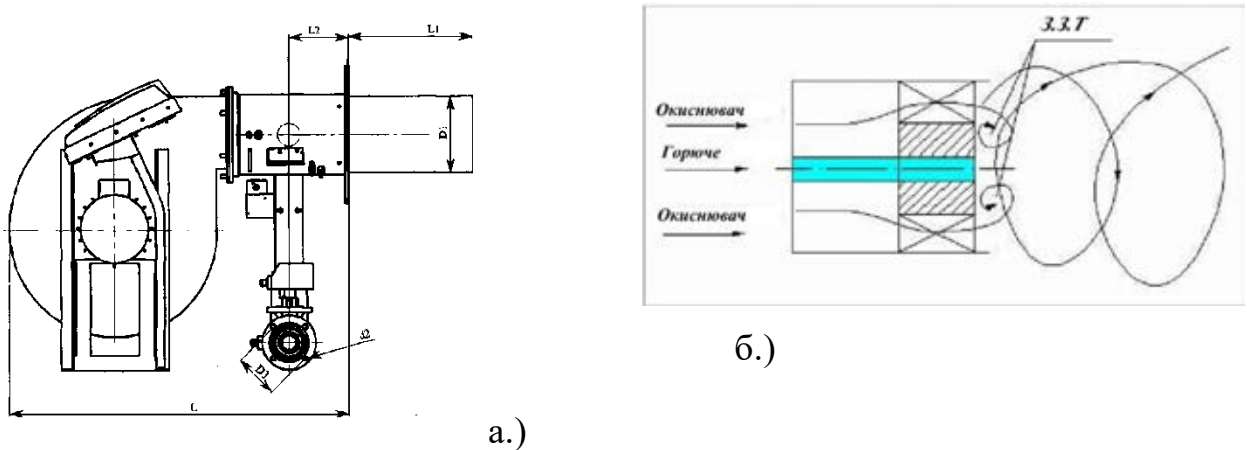


Рис.1.19 Габаритна а.) і газодинамічна б.) схеми пальника фірми DAVA

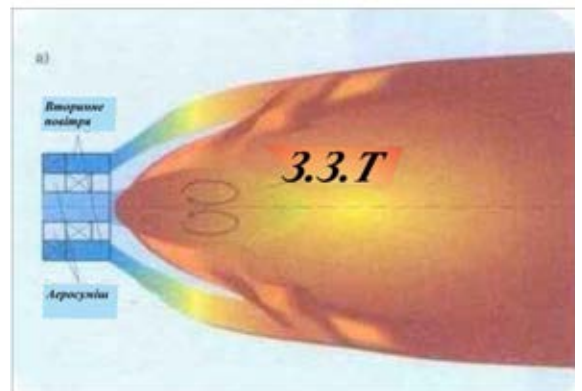


Рис 1.20 Металеві завихрювачі, що використовує фірма DAVA.

На ринку України все частіше стали з'являтися іноземні компанії,[55] це дало можливість власникам і експлуатаційникам вогнетехнічних об'єктів обирати пальникові пристрої «нового покоління» у яких закрутка потоку працює разом з поганообтічним тілом. Слід відмітити, що у переважній більшості ці пальникові пристрої мають закручений вихровий факел, що показаний на рис. 1.21.



а.)



б.)

Рис. 1.21 Фотографія а.) і схема б.) закрученого факела

Проаналізуємо найбільш поширені закордонні пальникові пристрої, що працюють на газі. Компанія Baltur S.p.A. (Італія), була заснована у 1950р. Починаючи з 1993р., Baltur поставляє на ринок країн Східної Європи широкий спектр газових, рідкопаливних і комбінованих пальників з діапазоном потужності від 11,6 до 46000 кВт. Пальники Baltur застосовують на котлах імпорного і вітчизняного виробництва, вони працюють на природному або зрідженому газі. Всі пальники мають вбудований у корпус пальника блок

управління.[36]

На український ринок поставляються наступні типи пальників Baltur: газові двоступеневі LOW NO_x, Sparkgas і BGN; газові двоступеневі (з плавним регулюванням) GI; комбіновані (газ/дизель паливо) одноступеневі minicomist, двоступеневі комбіновані (газ/дизельне паливо і газ/мазут) і з плавним регулюванням comist; комбіновані з плавним регулюванням GI MIST. Загальний вид і аеродинамічна схема типового пальника фірми Baltur представлена на (рис.1.22.)

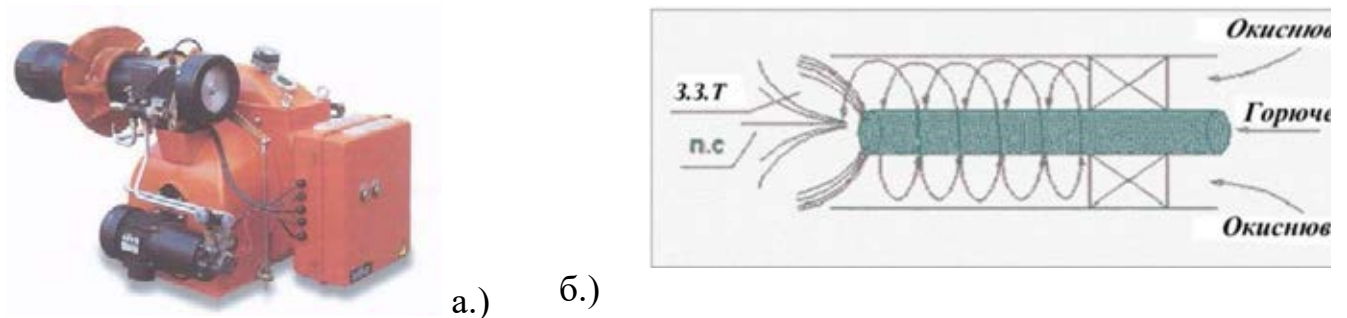
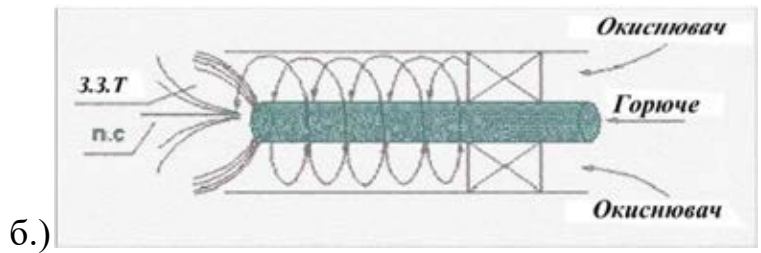


Рис. 1.22 Загальний вид а.) і газодинамічна схема б.) пальника Baltur

Bentone/Entertech AB, (Швеція) – один з найбільших виробників рідкопаливних і газових пальників в Європі заснований у 1954р. 90% продукції експортується у більш ніж 80 країн через мережу заводських представництв і дилерів. Bentone - єдина європейська компанія, що експортує пальникові пристрої у США та Канаду. У 2001 р. об'єм продаж пальників Bentone досяг 180 000 шт. Компанія Bentone виготовляє широкий асортимент вентиляторних газових пальників потужністю 7-2400 кВт. Газові пальники можуть працювати на природному і зрідженому газі, газі низького тиску, міському газі і біогазі. Загальний вид і аеродинамічна схема типового пальника фірми Bentone представлена на (рис.1.23) [57].



а.)



б.)

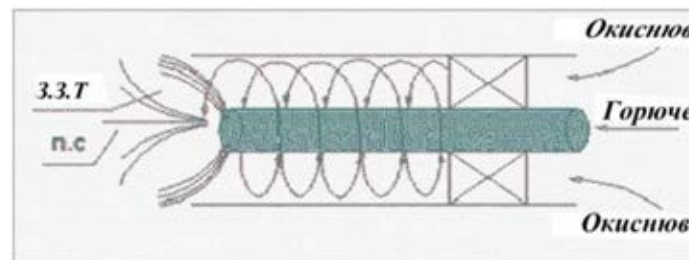
Рис. 1.23 Загальний вид а.) і газодинамічна схема

б.) пальника Ventone

DE DIETRICH THERMIQUE (Франція) – компанія заснована більше 300 років тому, в даний час виготовляє газові пальники працюючі під наддувом та атмосферні газові пальники. Компанія експортує свою продукцію більш ніж у 60 країн. Загальний вид і аеродинамічна схема типового пальника фірми DE DIETRICH THERMIQUE представлена на рис. 1.24 [58].



а.)



б.)

Рис. 1.24. Загальний вид і аеродинамічна схема пальника DE DIETRICH THERMIQUE, що працює під наддувом

У зв'язку з тим, що більшість західних фірм виготовляють однотипні пальникові пристрої – як показано вище, змінюючи лише деякі вузли, розгляд всіх пальників імпортного виробництва є недоцільним, оскільки аеродинамічна схема, що використовується у них – ідентична.

Провідні світові фірми-виробники пальникових пристроїв, такі як Baltur (Італія) [56], Bentone (Італія) [57], CIB Unigas (Італія) [59], DE DIETRICH THERMIQUE (Франція) [58], Elco Energy (Швейцарія) [60], Ecoflm (Італія) [61], Girsch (Німеччина) [62], Simmens (Німеччина) [63], Oilon Oy (Фінляндія) [64],

Olimpia Industrial (Південна Корея) [65], Riello (Італія) [66], Roca (Іспанія) [67], Weishaupt (Німеччина) [68], Wester Heating (Великобританія) [69], і тому подібні зберегли газодинамічну схему з закруткою потоку і зосередили свої зусилля в основному на тонкій автоматизації надання газу і повітря для підтримки оптимального їх співвідношення. Однак досвід експлуатації цих пальникових пристроїв показує, що без застосування нових рішень по формуванню палаючих сумішей (аеродинамічних схем) і нових технологій спалювання подальше якісне покращення техніко-економіко-екологічних показників неможливе.

Останнім часом на вітчизняному ринку з'являються нові високоефективні газові пальники оригінальних конструкцій [70]. Ряд їх характеристик дозволяє прогнозувати, що в найближчі роки такі незвичайні пальники будуть все частіше використовуватися у вітчизняних опалювальних системах.

В якості прикладу можна назвати інфрачервоний пальник Magna, виконаний з керамічних матеріалів (рис. 1.25). Пальник з повним попереднім змішуванням працює у секторі інфрачервоного випромінювання. Діапазон потужності – від 10 до 2000 кВт.



**Рис. 1.25. Інфрачервоний пальник
Magna**



Рис. 1.26. Пальник Matrix-X

Конденсаційні термоблоки Vitodens 200, що появляються на вітчизняному ринку, обладнані оригінальним пальником Matrix-X. Пальник має сітчасту півсферу на плоскій платформі. Реакція горіння відбувається у безпосередній близькості від сітчастої півсфери, яка одночасно слугує і стабілізатором (рис.1.26).

Слід відмітити, що багаточисельні натурні випробовування пальників на

котлах і промислових установках, стендові випробовування в умовах, близьких до натурних, а також довгий досвід експлуатації широкого спектру пальникових пристроїв не дозволили дотепер сформувані однозначні підходи до організації робочих процесів пальникових пристроїв. Ряд технічних питань, пов'язаних як і з аеродинамічними схемами, так і з конструкціями пальникових пристроїв, до теперішнього часу можна вважати відкритими. На питання які пальникові пристрої кращі? Вихрові або прямоточні, з центральною подачею газу чи периферійною, чи дозволяє метод багатоструменевої подачі газу отримати бажаний факел, чи є вимоги до факелу достатньо визначеними? Різних відповідей за останні 40 років на ці запитання давалося багато, рекомендації неодноразово мінялися на протилежні.

Відомий ряд безуспішних спроб поліпшення методу розрахунку багатоструменевого надання газу, запропонованого Івановим Ю.В. Разом з тим, всі ці висновки, думки і рекомендації основані на дорогих, працезатратних і довгих дослідженнях. Усі вони доступні і сенсу їх розглядати у цій роботі немає.

Існує ряд основних факторів, вплив яких на характеристики факелу для горіння різних конструкцій є визначальним. До таких можемо віднести: 1) ступінь закрутки повітря; 2) довжину ділянки попереднього змішування; 3) форму амбразури; 4) форму і розміри газових отворів; 5) число рядів газових отворів; 6) вихідну швидкість газу; 7.) теплосприйняття поверхні нагріву при факелі що світиться або не світиться.

З приводу цих факторів існують різноманітні думки. Приведемо висновки за результатами роботи ЦКТІ. [70*]

1. Для пальників з центральною і периферійною подачею газу закрутка повітря, що подається у всіх випадках інтенсифікує вигорання природного газу (а отже, інтенсифікує також процес сумішоутворення палива з повітрям), причому величина хімічного недопалу знижується, а теплове навантаження поверхні нагріву росте зі збільшенням ступеню закрутки. При цьому дальnobійність факела зменшується, а гідравлічний супротив пальника збільшується (у порівнянні з прямоточним пальником у 3-4 рази).

2. Застосування того чи іншого реєстру має впроваджуватися потребою дальнобійності факела, яка визначається співвідношенням ширини і глибини топкової камери, прийнятої схеми компоновки пальників і поверхні нагріву екранів і пароперегрівача.

3. Розвиток факела, що утворюється пальником з завихрюваем повітря, відбувається з утворенням зони зворотних токів. Роль цих зворотних токів дуже велика. Повертаючись до кореня факела, вони прогривають його і забезпечують раннє займання паливно-повітряної суміші та подальший сприятливий розвиток процесу горіння.

4. Найкращим для топкових приладів з високим об'ємним теплонапруженням є пальник з периферійною роздачою газу.

5. Конструктивними прикладами із створенням газового пальника з коротким і прозорим факелом є: 1) периферійна роздача газу 2) закрутка повітря 3) можливо більше заглиблення пальника (внутрішнє сумішоутворення).

6. Позитивний ефект від закрутки повітря і збільшення ділянки попереднього змішування тим сильніше, чим менша ідеальна конструкція пальника.

7. Поширена думка про те, що тепловіддача полум'я, яке світиться, отримано за рахунок поганого змішування газу з повітрям, і тепловіддача вища, ніж у полум'я яке не світиться - даними дослідів ця теза не підтверджується. Згідно досліджень високофорсованої камери теплове навантаження поверхні нагріву при полум'ї що не світиться у всіх випадках помітно вище.

8. Теплонапруження топкового об'єму при роботі на природному газі для сучасних котлів, яке приймається до розрахунків насправді сильно занижено. Повне випалювання природного газу навіть при роботі на холодному повітрі може бути отримане у топці з теплонапруженням у $2 \cdot 10^6$ ккал/м³/ч.

9. Для парових котлів вибір оптимального теплонапруження топки при роботі на природному газі визначається не процесом спалювання, а теплообміном і розташуванням поверхні нагріву.

10. Методика розрахунку газових пальників Іванова Ю.В. не може бути

визнана задовільною, так як вона не узгоджується з експериментальними даними, отриманими при вогнетехнічних випробовуваннях.

Результати аналізу робіт того ж часу, проведеного Харківським філіалом ЦКБ «Главенергостроймеханізація», значно відрізняються. При випробовуваннях пальникових пристроїв котлоагрегатів електростанцій різних типів найбільша увага була прикута на найважливішому факторі – величині втрат тепла з хімнедопалом. Випробовування проводилися при теплонапруженості топкового об'єму від 57000 до 160000 ккал/(м³·год). В якості основних висновків можна привести наступні:

1. Застосування газовипускних отворів різних діаметрів у газопроточній частині пальникового пристрою дозволяє отримати різну дальnobійність і таким чином поліпшити змішування газу з повітрям.

2. Застосування зміщеного кроку газовипускних отворів дозволяє здійснити розмив кожного окремого струменя газу своїм потоком повітря і отримати на виході із амбразури рівномірну газоповітряну суміш.

3. При вузьких щілинних амбразурах можлива організація глибокого проникнення газових струй у повітряний потік і повного його насичення газом. Однак газові струмені утворюють на шляху повітряних потоків газову решітку, що має більший опір, для подолання якого може бути потрібним – підвищений напір дуттьових вентиляторів.

4. Застосування при конструюванні пальників методики розрахунку, розробленої Івановим Ю.В. - ефективна; бажано розвивати її у подальшому.

5. Потрібна широка експериментальна перевірка отриманих результатів на промислових котлах, а також для визначення при розрахунках опорів пальників як із повітряній, так і із газовій стороні.

6. При конструюванні газопальникових приладів необхідно приділяти більше уваги розмірам і розміщенню газовипускних отворів, що вводять газ у потік повітря.

В наступні роки типи і конструкції пальникових пристроїв за суттю не помінялися. На основі вже отриманого досвіду увага розробників була прикута

до створення пальників для котлів великої потужності і на розробку пальників різних типів для промислових установок. Проведені до цього часу дослідження у галузі аеродинаміки процесів спалювання газу, теорії горіння і теплообміну при спалюванні газу не надали можливостей дослідникам упорядкувати накопичений досвід і розробити конкретні рекомендації з удосконалення методів проектування пальників з метою поліпшення їх техніко-економічних показників. На практиці все визначається рівнем якості доведення, наладки і експлуатації пальників.

Також не удосконалена методика розрахунку надання струменів газу у потік повітря, що зносить. Єдиного підходу у прийнятті рішень немає, без спорів, на сьогоднішній день, приймається принцип необхідності раціонального розподілу палива у потоці окиснювач.

1.2.3. Узагальнююча класифікація пальникових пристроїв, згідно газодинамічної системи надання палива і окиснювача

Дослідження основних компонентів робочого процесу пальникового пристрою (аеродинаміки палива, окиснювача, процесів теплопередачі), проведені різними авторами, зокрема у КПШ, виявили визначну роль аеродинамічних процесів. Результати цих дослідів, а також вищеперечислений аналіз пальникових пристроїв дозволили класифікувати їх типи за декількома газодинамічними схемами надання палива і окиснювача, приведених на рис. 1.27 [72,73].

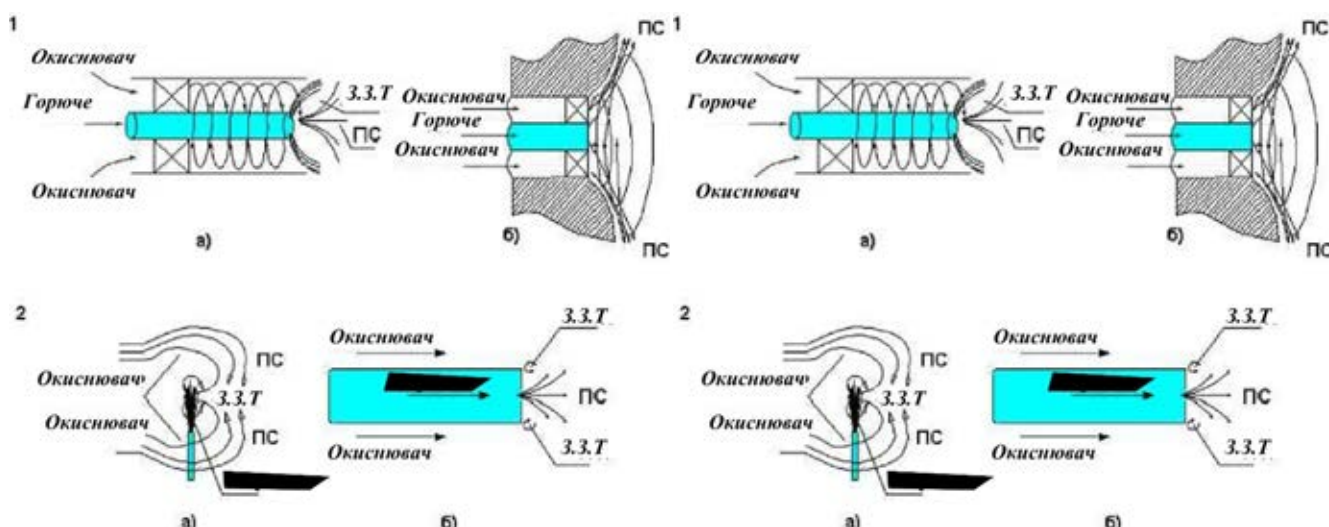


Рис. 1.27 Класифікація пальникового пристрою за газодинамічною схемою

1. Закрутка потоку окиснювача: а) вихрового пальникового пристрою; б) плоскополум'євого пальникового пристрою. 2. Зона зворотних токів (З.З.Т) за поганообтікаючими тілами : а) за кутком; б) прямоточним пальником. 3. Подові пальникові пристрої. 4. Інжекція потоку окиснювача потоком палива. 5. Щілинні пальникового пристрою.

Схеми 1 а) і б) являються найбільш поширеними у газопальниковій практиці у пальникових пристроях з наддувом (регістрові пальники), вони широко використовуються у печах, топках котлів, камерах горіння газотурбінних двигунів. Паливо з форсунок роздається супутньо або під кутом у потік окиснювача, що звихрюється лопатковим апаратом, для створення паливної суміші. Внаслідок закрутки потоку у З.З.Т виникає потужна зворотна течія високонагрітих продуктів горіння з топкового простору до устя факелу, цим і забезпечується стабілізація полум'я.

Проведений аналіз робочого процесу пальникового пристрою з закруткою потоку у лабораторних умовах, а також в умовах практичної експлуатації на вогнетехнічних об'єктах показав, що їм властиві певні недоліки, а саме: інтенсивна закрутка, яка визиває стратифікацію паливної суміші, під дією відцентрової сили, у відповідності з густиною.

Нерівномірність концентраційного поля у зоні стабілізації і вигорання паливної суміші призводить до суттєвого підвищення критичних значень коефіцієнту надлишку повітря ($\alpha_{кр}$).

Для переважної більшості пальникових пристроїв $\alpha_{кр} \geq 1,15 \dots 1,25$. Ці параметри знижують економічні показники вогнетехнічних об'єктів за витратам палива і електроенергії на привід тягодуттьових засобів.

У пальникового пристрою з закруткою потоку окиснювача конструктивно закладена нерівномірність швидкісного та концентраційного полів паливної суміші що невідворотно призводить до нерівномірності температурних полів у топковому просторі вогнетехнічного об'єкту.

Крім того, наявність концентраційної нерівномірності в об'ємі топкового простору часто призводить до пульсаційного горіння і вподальшому до змін швидкості поширення полум'я. Широкий спектр пульсацій горіння і пульсацій турбулентної течії викликаних інтенсивною закруткою, викликає потужні резонансні явища. Тому, при експлуатації багатьох вогнетехнічних об'єктів, для того щоб уникнути руйнівних вібрацій, доводиться вибирати режим роботи не на номінальному навантаженню.

Циркуляційна зона з ЗЗТ, як стійке вихроутворення, існує у певних границях швидкостей потоку окиснювача. Це відповідає потужності пального пристрою $<(0,2...0,3) N_{\text{ном}}$. Внаслідок падіння витрат, і відповідно, швидкості окиснювача ЗЗТ стає менш стійкою і не забезпечує надійну стабілізацію горіння. Таким чином, розпал вогнетехнічного об'єкта проводиться у режимах підвищених теплових навантажень, це призводить до небажаних наслідків:

- необхідність у високих тисках і, відповідно, при пуску більших швидкостях газу, що викликає небезпеку виникнення «хлопків» і навіть вибухів у топковому просторі;

- при пуску із холодного стану відбувається термічний «удар» (швидкий розігрів): волога, яка завжди існує у футеровці, швидко вскипає і порушує її цілісність;

- пуск вогнетехнічного об'єкта з декількома пальниковими пристроями треба проводити з почерговим включенням для досягнення необхідної потужності; при цьому через непрацюючі пальникові пристрої продувають повітря для їх охолодження, що призводить до порушення температурної рівномірності у топковому просторі;

- більший об'єм циркуляційної зони, що досягає декількох кубічних метрів, призводить до «накиду» факела на екранні поверхні котлів і визиває локальний перегрів;

- потужна вихрова циркуляційна зона являється джерелом акустичних коливань, які часто викликають резонансні явища у топковому просторі і значно

звужують робочий діапазон пальникового пристрою і вогнетехнічного об'єкту у цілому.

- високому рівню гідравлічних опорів за трактом окиснювача внаслідок зміни тиску потоку.

У схемі 2 реалізований принцип дії струменево-стабілізаторних пальників з більш упорядкованою структурою течії, ці пальникові пристрої мають властивість саморегулювання сумішоутворення за довжиною стабілізатора. Вони відрізняються широким діапазоном регулювання потужності і не перегріваються у процесі експлуатації. Слід відмітити, що при такій схемі значно погіршується повнота горіння при коефіцієнтах надлишку повітря, близьких до стехіометричних, внаслідок зміни структури течії зворотних токів і локального «перезбагачення» паливної суміші.

При реалізації схеми 2 зі супутньою подачею палива струмені горючого у значній ступені впливають на структуру течії за стабілізатором полум'я, що може привести до нестійкого горіння і значного подовження факелу при малих коефіцієнтах надлишку повітря.

У відповідності зі схемою 3 повітря до місця горіння поступає за рахунок розрідження у топці і частково за рахунок конвекції. Горюче подається під кутом $30-45^\circ$ до потоку повітря. Паливна суміш змішується і підпалюється у тунелі, де стабілізація горіння забезпечується розпеченим тілом. На виході з тунелю відбувається додаткова стабілізація зворотними течіями розпечених продуктів горіння (рис.1.27). В такій схемі неможливий проскок полум'я. Довжина факелу від 1600 мм, теплові напруження топкового об'єму низькі. Коефіцієнт надлишку повітря більше 1 і значно залежить від розрідження у топці. Зниження $\alpha < 1,15$ визиває сажеутворення.

Схема 4, в якій горюче інжектують необхідну кількість окиснювача, дозволяє організувати високоефективне горіння за коефіцієнтами надлишку повітря $\alpha \approx 1$, що можливо лише у дуже низькому діапазоні зміни потужності при високому тиску газу. У цих пальникових пристроях завжди існує небезпека проскоку полум'я всередину пальникових пристроїв, особливо при розігріві камери

згорання або топки.

При реалізації схеми 5 допускається, що стабілізація горіння відбувається у топковому просторі за рахунок ЗЗТ і нагріву топкового каналу.(рис. 1.28)Пальникові пристрої з такою схемою можуть бути високоефективними, але в умовах експлуатації не завжди вдається витримати жорсткі потреби до їх геометрії через перегрів елементів і пошкодження амбразур.



Рис. 1.28. Фото полум'я подового пальникового пристрою

Розглянемо робочий процес пальникового пристрою з точки зору необхідності додержання основних вимог, пред'явлених до них. В теперішній час із усього різноманіття пальникових пристроїв тільки інжекційні і струменево-стабілізаційні пальники забезпечують всі стадії робочого процесу, решта для стійкого горіння потребує наявності амбразури, або розпеченої кладки, або додаткового кожуху, які мають обмежувати вихрову течію паливної суміші.

Легкий і надійний розпал при мінімально можливій витраті газу $G_r < 0,1 G_r^{\text{ном}}$ з холодного стану можуть забезпечити струменево-стабілізаційні пальникові пристрої або пальникові пристрої, які розраховані на мінімальну потужність $N_1 < (0,5 \dots 1)$ МВт. При збільшенні потужності більше 1 МВт практично всі типи пальникових пристроїв запалюються тільки при великих витратах газу.

З усіх пальникових пристроїв пальники струменево-стабілізаційні (ССП)

мають найбільш широкий діапазоном стійкої роботи без зриву факела, при коливанні тиску газу та повітря. Що стосується регулювання потужності K_p , то жоден з розглянутих сучасних пальникових пристроїв не має необхідного широкого діапазону. Однак одним із важливих показників, що характеризують якість робочого процесу є критичний коефіцієнт надлишку повітря $\alpha_{кр}$, не нижче 1,15...1,25. Однак пальники ССП значно уступають іншим типам пальникових пристроїв за показниками $\alpha_{кр}$. Їх ефективна робота можлива тільки при $\alpha > 1,15$, що суттєво знижує спектр їх застосування, виключаючи з нього практично всі типи котлів.

Приклад ССП дуже характерний для ситуацій, що склалися на ринку пальникових пристроїв. По сукупності показників жоден з розглянутих пальникових пристроїв не задовольняє всіх необхідних вимог. Недоліки організації робочого процесу проявляються при застосуванні пальникових пристроїв у різних вогнетехнічних об'єктах. При можливості вільного розвитку факела (в умовах розпеченої кладки печі) повнота горіння палива може приближатися до 100%. При загроможденні факелу у радіаційній частині топки трубами з водою або паром температури умови горіння різко погіршуються, на виході з топки з'являються продукти хімічного недопалу, а деколи і паливо, що згоріло не до кінця. Така ситуація характерна для всіх цих типів пальникових пристроїв. Основна причина - це недостатня якість змішування пального і окиснювача. Найбільш поширені пальникові пристрої з закруткою потоку мають нерівномірне поле швидкостей у великих об'ємах З.З.Т., що відповідають за стабілізацію факела. Але при змінах витрат палива змінюється склад паливної суміші, об'єм З.З.Т. змінюється мало, виходячи деколи за концентраційні границі займання. Крім того, ЗЗТ стійко існує у вузькому діапазоні витрат (швидкостей) окиснювача $G_B > 0,36 G_B^{max}$. Для покращення якості сумішоутворення робляться спроби збільшити швидкість пального і окиснювача за рахунок збільшення аеродинамічного супротиву за трактам пального та окиснювача. При цьому швидкості не зростають, і якість суміші істотно не покращується. Можливі деякі успіхи у вузькому діапазоні біля оптимальних

навантажень, але при цьому незначне покращення в якості горіння нівелюється не виправданим зростанням споживання електроенергії на привід тягодуттєвих засобів (приблизно у 1,5-2 рази).

Рівень емісії токсичних речовин також залежить напряду від якості сумішоутворення. Тому картина змін емісії NO_x , CO , SO_2 аналогічна вищенаведеній за хімнедопалом. Причому слід відмітити, що рівень сумішоутворення не тільки сприяє повноті горіння, але і може знизити рівень NO_x (за рахунок гранично низьких α створюються умова нестачі кисню для окиснення азоту).

На основі приведенного аналізу можна зробити висновок, що можливість регулювання довжини і світимості факелу знаходиться у прямій залежності від можливості створювати стійкі керовані аеродинамічні структури з малими за об'ємом вихроутвореннями, в яких підтримуватиметься оптимальна концентрація паливної суміші. Із аналізу також виходить, що покращення елементів робочого процесу паливних пристроїв може сприяти вирішенню основної проблеми – створення високоефективної технології спалювання палива, що сукупно забезпечує покращення таких показників, як економічність, екологічна безпека і надійність.

1.2.4 Розробка підходів до створення нових технологій спалювання палива і формулювання загальних положень відносно умов реалізації цих технологій

Аналіз робочого процесу у різних паливних пристроїв, що реалізують сучасні технології спалювання палива, показав, що основними причинами недостатньої ефективності паливних пристроїв є :

- нестійкість циркуляційних зон високонагрітих продуктів горіння і паливної суміші, за рахунок яких забезпечується необхідна якість сумішоутворення, аеротермічна стабілізація факела і формування необхідних полів температури, швидкості і концентрації. Така картина характерна насамперед, для режимів, відмінних від номінальних. Так, при зменшенні потужності паливних пристроїв на 20...30% течія у ЗЗТ, як правило, стає

настільки в'ялою, що не може забезпечувати надійну стабілізацію горіння;

- порушення рівномірності розподілення горючого у потоці окиснювача. У цій ситуації сумарний коефіцієнт надлишку повітря відносно всього об'єму паливної суміші, що проходить через пальниковий пристрій, може бути оптимальною, однак при цьому мають місце локальні зони з перебагаченною, або бідною паливною сумішшю. Дане явище супроводжується нерівномірною світимістю різних областей факелу внаслідок термічного розкладання палива без доступу кисню;

- на деяких режимах, відмінних від номінальних, вихід середньої концентрації паливної суміші в області стабілізації горіння за концентраційні границі займання. Дійсно, при зміні потужності практично у всіх пальникових пристроях міняється середній рівень концентрації паливної суміші і виходить за границі діапазону займання, який для метану достатньо вузький і становить 5...15%;

- високий коефіцієнт загромождження потоку $k_f=0,6...0,8$, який призводить до підвищення опору повітряного тракту, що зумовлює значне навантаження на тягодуттєві засоби.

- великий аеродинамічний опір за трактом пального, який породжує необхідність подавати газ підвищеного тиску для стійкої роботи пальникового пристрою;

- широкий спектр пульсацій вихрів у циркуляційній зоні (як за частотою, так і за амплітудою), який може привести до небажаних резонансних явищ, що породжують вібрації вогнетехнічних об'єктів. Об'єм пульсуючих вихрових зон іноді складає декілька м³;

- недостатня ступінь самоохолодження пальникового пристрою паливом і окиснювачем.

Підхід до створення нових технологій спалювання палива, що приведений у справжній роботі є орієнтованим на розробку таких технологій, які були би вільні від вищевказаних недоліків.

Основні положення передбачуваного підходу стосуються, головним

чином, двох аспектів, а саме, механізму горіння і особливостей реалізації основних елементів робочого процесу пального пристрою (сумішоутворення, займання, стабілізації горіння, горіння паливних сумішей і формування необхідних польових характеристик продуктів горіння).

Відмічені основні положення можуть бути сформовані таким чином:

1. Забезпечення в якості домінуючого механізму горіння так названого проміжного або мікродифузійного механізму. Який поєднує в собі у більшій мірі найкращі якості кінетичного і дифузійного механізмів. А саме, у випадку проміжного механізму має місце висока інтенсивність горіння, яка властива кінетичному механізму, і можливість організації горіння у широкому діапазоні змін коефіцієнту надлишку повітря паливної суміші, що характерно для дифузійного механізму горіння.

2. Організація високоефективного сумішоутворення горючого з окиснювачем за рахунок попереднього раціонального розподілення палива у потоку окиснювача за допомогою системи поперечних струменів, які змішуються з потоком окиснювача.

3. Забезпечення стабілізації горіння за рахунок організації циркуляційних течій у нішовій порожнині, яка розміщується внизу за потоком за системою струменів. Даний спосіб призначений для забезпечення :

- надійної стабілізації горіння у широкому діапазоні навантажень;
- високої повноти горіння у широких границях потужностей пального пристрою;
- низького аеродинамічного опору пального пристрою за повітряним і газовим трактах у порівнянні з традиційними аналогами;
- зниження вірогідності виникнення вібрацій вогнетехнічного обладнання за рахунок пульсацій тисків потоків паливної суміші і продуктів горіння.

4. Забезпечення необхідної ефективності горіння палива і необхідних польових характеристик продуктів горіння за рахунок ефективної організації робочого процесу пального пристрою у широкому діапазоні зміни коефіцієнту надлишку повітря шляхом регулювання глибини проникнення

струменів газу у сформований потік окиснювача і їх взаємодії з циркуляційною течією у нішовій порожнині.

Таким чином, більшість недоліків сучасних пальникових пристроїв з закрутою потоку визначаються його газодинамічними характеристиками. Основними характеристиками є стійкість і об'єм вихрової структури ($V_{зц}$). Однак практика створення і експлуатації пальникових пристроїв на основі методики Іванов Ю.В. показала нестабільність отриманих результатів. Іванов Ю.В. вніс великий вклад у дослідження прямоточних пальникових пристроїв. Його роботи присвячені дослідженню розвитку системи струй пального у потоку окиснювача, що їх зносить, дозволили сформувавши важливий принцип організації робочого процесу пальникових пристроїв. Це - принцип раціональної роздачі пального у потоку окиснювача. Іншими словами, для того, щоб забезпечити необхідну якість сумішоутворення необхідно правильно роздати паливо в потоці окиснювача.

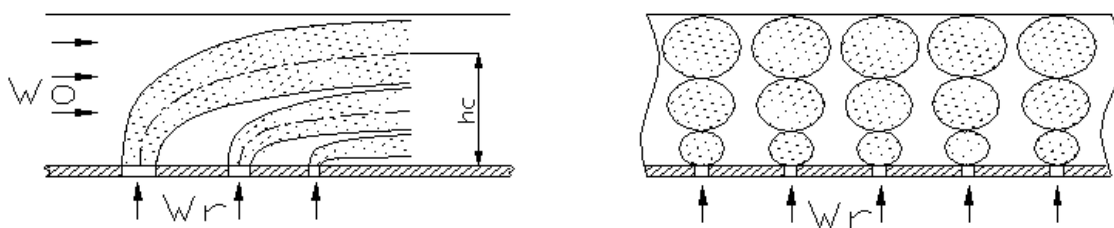


Рис. 1.29. Схема багаторядної роздачі струменів (Іванов Ю.В.)

Вибір діаметрів отворів що роздають газ, відбувається з урахуванням рівності витрат палива, варіантів надання газу. Діаметр отворів приймається з умови $d_2 \leq 0,5d_1$ для забезпечення необхідної величини дальnobійності струменів і раціонального розподілення палива у потоку окиснювача. Значення величини дальnobійності можна визначити за формулою.

На основі розрахунку дальnobійності струменів:

$$h_c = k_c \cdot \sin\beta \cdot d \cdot \sqrt{q} , \quad (1.5.)$$

де k_c – коефіцієнт, що враховує крок розміщення отворів, β – кут вводу струменів палива у повітряний потік, d – діаметр отворів що надають газ,

гідродинамічний параметр:

$$q = \frac{p_z w_z^2}{p_6 w_6^2} \quad (1.6.)$$

Відстань між рядами отворів для всіх варіантів, що розглядаються обирався із умов розвитку струменів, ззовні області гідродинамічної тіні.

На основі досліджень Іванова Ю.В. була розроблена методика розрахунку пальникових пристроїв, яка отримала назву «методика Іванова».

Розробки Христича В.А. і Любчика Г.Н. показали, що прямоточна схема позбавлена багатьох недоліків, які присутні у вихрових пальникових пристроїв за рахунок саморегуляції складу паливної суміші в області стабілізації факела. Однак такі пальникові пристрої працюють з великим коефіцієнтом загромождження потоку, великим гідравлічним опором та обмеженим за ефективністю значенням коефіцієнта надлишку повітря α :

$$\alpha = \frac{G_g}{G_z \square L_0} > 1,5, \quad (1.7)$$

де G_v і G_r – дійсні витрати повітря і газу відповідно,

L_0 – стехіометричний коефіцієнт.

Використовуючи принципи організації горіння за допомогою системи струменів палива у зносящому потоку окиснювача і закономірностями роздачі струменів за методом Іванова Ю.В. у КПІ розвивалася дослідженнями прямоочної схеми пальникових пристроїв. Роботи Бутовського Л.С.[53,54], проведені для різних способів надання палива відносно циркуляційної зони, показали можливість значного зниження гідравлічного супротиву такої схеми. Крижановський В.Н. [74] показав можливість організації високоефективного мікродифузійного механізму горіння і впливу на нього деяких конструктивних і режимних факторів.

Однак для розвитку та ефективного застосування даних прямоочних схем у пальникових пристроях необхідні комплексні дослідження з аеродинаміки і сумішоутворення у ближньому сліді за системою струменів.

Виникла необхідність забезпечення і усунення аномальних явищ, що мали місце при дослідженні стійкості горіння у широкому діапазоні зміни швидкості

окиснювача та надлишку повітря

Роботи які продовжують розвиток прямоточних пальникових пристроїв були проведені під керівництвом автора роботи.

Доведено, що перспективною, з точки зору, стійкості і компактності аеродинамічної структури є струменево-нішова система (СНС) сумішоутворення і стабілізації полум'я.

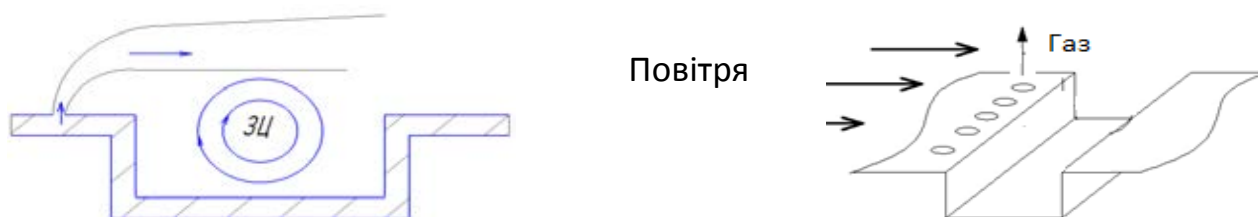


Рис. 1.30 Схема струменево-нішової системи

Горюче у даній схемі роздається однорядною системою струменів які перпендикулярні потоку окиснювача. За системою струменів за потоком розташована нішова порожнина. При цьому, ближній слід за струменями за потоком взаємодіє з течією у цій нішовій порожнині, створюючи стійку вихрову течію у широкому діапазоні швидкостей палива і окиснювача. Роботи Абдуліна М.З., Дворцина Г.Р. і Кулешова Ю.А. [75] показали, що компоновка системи струменів палива перпендикулярно потоку окиснювача і вихроутворення у виді нішової порожнини або уступа дозволяє забезпечити існування стійкої вихрової структури з автотриманням складу паливної суміші у зоні стабілізації горіння за швидкості зносячого потоку. Відмінною властивістю такої схеми являється те, що стійка вихрова структура виникає у результаті гідравлічної взаємодії вихрових течій за системою струменів у нішовій порожнині. Експериментальні дослідження показали широкий діапазон стійкості факелу за швидкості зносячого потоку та коефіцієнту надлишку повітря. Крім того струменево-нішова система має малий гідравлічний опір (рис. 1.31.). Натомість значними недоліками СНС є затягнута довжина факелу та висока температура нішової порожнини.

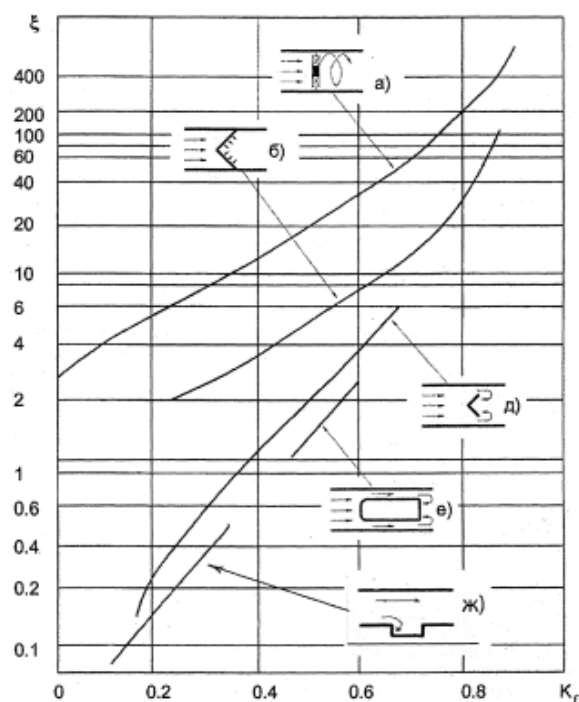


Рис. 1.31. Гідравлічний опір пальникових пристроїв у залежності від коефіцієнту захарашчення аналу окиснювача. а) регістрові ПП, б) струменево-стабілізаторні, д.) кутові, е.) пілонні, ж.) струменево-нішова система.

Висновки за розділом

Аналіз стану проблеми організації робочого процесу пальникового пристрою дозволяє сформулювати мету роботи, а також задачі дослідження. Метою роботи є науково-технічне обґрунтування прогресивних технологій спалювання газоподібних палив на основі струменево-нішових систем та розробка на цій основі відповідних технічних рішень та рекомендацій щодо їх впровадження.

1) Виконати комплекс експериментальних досліджень щодо встановлення закономірностей протікання робочих процесів в одиничних пальникових модулях різних типів: а) струменевих модулях – модулі з уступом та модулі з приторцевою нішею; б) струменево-нішових модулів з прямокутною нішею – зручнообтікаючих модулів та модулів з торцевою нішею; в) струменево-нішових модулів з трапецієподібними нішами при наявності та

відсутності структуратору потоку.

2) Провести дослідження гідравлічних втрат при горінні природного газу у каналі з прямокутною та трапецієподібною нією порожниною у залежності від основних визначальних параметрів процесу.

3) Для струменево-нішових пальникових модулів з нішовими порожнинами різної форми (прямокутними та трапецієподібними) виявити закономірності займання та зриву горіння при спалюванні різних газів у широкому діапазоні зміни режимних та конструктивних факторів.

4) Обґрунтувати концепцію модульного принципу конструювання пальникових пристроїв на основі струменево-нішової системи за результатами дослідження робочих процесів системи пальникових модулів.

5) З використанням сучасного програмного продукту дослідити аеродинамічну структуру течії та особливості теплообміну у системах охолодження струменево-нішових пальників з обдуванням внутрішніх поверхонь стабілізаторів полум'я струменями газу.

6) Провести порівняльний аналіз основних характеристик робочих процесів пальників які пропонуються та традиційних пальників у складі різних вогнетехнічних об'єктів та встановити енергетичну ефективність заміни штатних пальників пальниковими пристроями на основі струменево-нішових систем.

7) Таким чином об'єктом дослідження мають бути фізико-хімічні процеси, що протікають у пальникових пристроях із струменево-нішевою системою сумішоутворення та стабілізації горіння.

1.5. Список використаних джерел

1. Khedia K.S., Ghoniem A.F. Mechanisms of stabilization and blowoff of a premixed flame downstream of a heat-conducting perforated plate// Combustion and Flame. Elsevier 2012. Vol. 159, №3. P. 1055-1069 DOI:10.1016/j.combustflame.2011.10.014.

2. А.Ю. Крайнов, К.М. Моисеева Влияние скорости газа на

устойчивость горения метановоздушной смеси в щелевой горелке с внутренней вставкой. // Вестник томского государственного университета №1(33). 2015р. С.63-71.

3. М.А. Тайманов, М.Р. Шарипов Котел пульсирующего горения природных и пиролизных газов. 2017 р.

4. Минаев С.С., Срещенко Е.Р., Фурсенко Р.В., Фан А., Марута К. Разделяющиеся пламена в узком канале с градиентом температур в стенках// Физика горения и взрыва. 2009. №2(45).С. 12-19.

5. Крайнов А.Ю, Моисеева К.М. Режимы горения бедной метановоздушной смеси в U-образной горелке // Вестник томского государственного университета. Математика и механика. 2014.№2(28). С.69-76.

6. Крайнов А.Ю, Моисеева К.М. Колебательные режимы горения бедной метно-воздушной смеси в в U-образной горелке // XXXI Сибирский теплофизический семинар, посвященный 100-летию со дня рождения академика С.С. Кутателадзе: доклады. Новосибирска: Институт теплофизики СО РАН,2014.С. 207-210.

7. Тайманов М.А. Повышение эффективности работы энерготехнологических печей. Монография. Научное издание. Казань, КГЭУ, 2010. 108 с.

8. Kheida K.S., Ghoniem A.F. Mechanisms of stabilization and blowoff of a premixed flame downstream of a heat-conducting perforated plate // Combustion and flame. Elsevier. 2012. Vol. 159, №3.P.1055-1069. DOI: 10.1016/j.combustflame.2011.10.014.

9. Aerodynamic characteristics of transonic and supersonic flow over rectangular cavities / Dang Guo Yang, Jian Qiang Li, Zhao Lin Fan, Dan Yao // Flow, Turbulence and Combustion 2010. Pp.639-652.

10. Сигал И.Я., Смихула А.В. Выброс СО при сжигании природного газа в котлах крупных котельных и ТЭЦ // Отопление, водоснабжение, вентиляция.-2006, №1.-С.41-43.

11. Вулис Л.А., Ершин Щ.А., Ярин Л.П. Основы теории газового факелу.-

Л.: Енергія, 1968,-204 с.

12. Кнорре Г.Ф., Арефьев К.М., Блох А.Г. Теорія топкових процесів. – М. -Л.: Енергія, 1968. – 492 с.

13. Гідродинаміка і теорія потоку палива. Під ред. Б.В.Канторовича, М., 1971.- 430с.

14. Баев В.К., Головичев В.І, Ісаков В.А. Двовірні турбулентні течії реагуючих газів. Новосибірськ, 1976. – 262с.

15. Красницький В.П., Філімонов М.Л., Фрост В.А. Математичні описання тербулентного горіння. – В кн.: Питання теорії горіння. М., 1970, С. 7-17.

16. Вилунов В.Н., Дік І.Г. Про вплив турбулентності на теплообмін, структуру і хімічне реагування в полум'ї. – ФГВ, 1977. ІЗ,№3, с.359-366.

17. Зімонт В.Л. До розрахунку турбулентного горіння частково перемішаних газів.- В кн.: Горіння гетерогенних та газових систем. Чорноголовка, ОІХФ АН ССРСР, 1997, с.76-80.

18. Тюльпанов Р.С. Дифузійне турбулентне полум'я.- Л.: Ленінградський університет, 1981. – 156 с.

19. Тюльпанов Р.С., Михальчук С.А. Оптимізація параметрів при дифузійному горінні в турбулентному потоці. .- Л.: Ленінградський університет, 1981. –104-109 с.

20. Иванов Ю.В. Основи розрахунку і проектування газових пальників. – М.: Гостоптехиздат, 1963.- 360с.

21. Поляцкин М.А., Афросимова В.Н. Експерименталне дослідження роботи пальникових пристроїв на ізотермічних та гарячих моделях. – В кн.: Досвід спалювання газу та мазуту на електростанціях. М., Енергія, 1968, с.100-115.

22. Привалова К.А. Дослідження, розрахунок і примінення прямоточних периферійних газових пальників.- В кн.: Теорія та практика спалювання газу. Л., Недра, 1964, с. 490-501.

23. Седелкін В.М., Шибасєва Л.І. До розрахунку довжини і вигорання

турбулентного дифузійного факелу. – Розприділення і спалювання газу, вип. 65, Саратов, 1975, с.74-84.

24. Седелкін В.М., Шибаета Л.І., Звягинцев К.І., Синіцин А.Б. Експериментальне дослідження закономірностей розвитку організації факелу.-В кн.: Теорія та практика спалювання газу. Л., Недра, 1981, с.186-191.

25. Кацнельсон Б.Д., Шатиль А.А., Тарасов А.І., Здановський В.Г. Дослідження роботи топки котла ТП-100 з потужними пилемазутними пальниками.- Теплоенергетика, 1978, №II, с.31-36.

26. Шрадер І.Л. Шилов В.В. Вогневе моделювання топкової установи парового котла П-67. Теплоенергетика, 1981, №1, с.41-44.

27. Ахмедов Р.Б. Цирюльников Л.М. Технології спалювання газу та мазуту в парогенераторах.- Л.; Недра, 1976- 272 с.

28. Еринов А.Е., Сорока Б.С. Раціональні методи спалювання газового палива в нагрівних печах. Київ, “Техніка”, 1970р. 159с.

29. Хзмалян Д.М., Каган Я.А. Теорії горіння топковій установці.- М. “Енергія”, 1976р. 487с.

30. Иванов Ю.В. Газогорелочные устройства. – М.: Недра. - 1972. – 375с.

31. Хитрин Л.Н. Теория горения и вопросы интенсификации процессов сжигания. – В кн.: Проблемы энергетики. – М.: Изд-во АН СССР, 1959, С. 605-636.

32. Вуллис Л.А., Ярин Л.П. Аэродинамика факела. – Л.: Энергия, 1978. – 216с.

33. Вильямс Ф.А. Теория горения. – М.: Наука, 1971. -615с.

34. Арсеньев А.В. Сжигание природного газа. – М.: Metallurgy, 1965. – 480с.

35. Спейшнер В.А. Сжигание природного газа в камерах сгорания парогазовых установок. – Газовая промышленность, 1969. №8. С.24-29.

36. Померанцев В.В., К.М. Арефьев, Д.Б. Ахмедов. Основы практической теории горения: Учебное пособие для вузов. - 2-е изд., перераб. и

доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. - 312с.

37. Франк-Каменецкий Д.А. К теории микродиффузионного горения. – Труды НИИ, Оборонгиз, 1946. – С.1-9.

38. Франк-Каменецкий Д.А., Мински Е.М., Микродиффузионное турбулентное горение// Доклады АН СССР. -1950. – т.50. – С.353-354.

39. Крыжановский В.Н. Анализ и исследование модели микродиффузионного факела// Сб.науч.трудов. Теплофизика и теплотехника/ Киев.политех.инст. – 1974. Вып.27. С.110-114.

40. Абдулин М.З Струйно-нишевая система смесеобразования и стабилизации пламени: Автореферат дис. – Киев.: КПИ. - 1986. - 16с

41. Абдулін М.З., Джамал І. Критичні режими та конструктивні параметри мікродифузійного газопальникового пристрою. Екотехнологии и ресурсосбережение. Киев. №2. 1997. С. 70-71.

42. Абдулін М.З., Джамал І. Дослідження пальникового пристрою з поперечною подачею струменів палива. Екотехнологии и ресурсосбережение. Киев. №2. 1997. С. 68-69.

43. Абдулін М.З., Джамал І. Аномальні явища стійкості горіння за пілоном з поперечною подачею струменів палива. Екотехнологии и ресурсосбережение. Киев. №3. 1997. С. 68-70.

44. Абдулін М.З., Джамал І. Тепловий режим елементів мікродифузійного газогорілочного пристрою. Ювілейний збірник наукових праць, «Наукові вісті НТУУ «КПІ». Київ. 1997. С.111-113.

45. Абрамович Г.Н., Крашенников С.Ю., Секундов А.Н. Турбулентное смешение газовых струй. – М.: Наука, 1974. -272 с.

46. Теория и практика сжигания газа. – Л.: Недра. - 1958-1981, №.1-7.

47. Мурзаков В.В. Основы теории и практики сжигания газа в паровых котлах. - 2-е изд. доп. – М.: Энергия. 1969. – 460 с.

48. Равич М.Б. Газ и эффективность его использования в народном хозяйстве. – М.: Недра, 1987. - 238с.

49. Абдулин М.З. Применение струйно-нишевой технологии сжигания

топлива в энергетических установках/ Сборник научных трудов./ Вестник национального технического университета «ХПИ», Тематический выпуск «Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование» №6 – 2006г. С.59-65.

50. Пчелкин Ю.М. Камеры сгорания ГТД. МВТУ, 1984. 392 с.

51. Чепель В.М., Щур И.А. Сжигание газов в топках котлов и печей и обслуживание газового хозяйства предприятий. – 7-е изд., перераб. и доп. – Л.:Недра,1980. – 591с.

52. Поборчий В.С., Сидоров М.И., Служкин Л.А., Штейнер И.Н. Газомазутные горелки и их автоматизация. – Энергетическое машиностроение (НИИН ФОРМТЯЖМАШ), 1969, №14. 127 с.

53. Бутовский Л.С., Христич В.А. Структура зоны смешения и особенности выгорания газа за стабилизаторами пламени// в кн.: Теория и практика сжигания газа. – Л.: Недра – 1972. - С.76-82 .

54. Любчик Г.Н., Христич В.А., Бутовский Л.С., Грановская Е.А. Исследование закономерностей выгорания топлива за уголковыми и плоскими стабилизаторами пламени / – К.: Теория и практика сжигания газа. Вып VI. Л., 1975, С. 324-338

55. Библиотека АКВА-ТЕРМ Горелки

56. Сайт компании Baltur (Италия) www.baltur.it

57. Сайт компании Bentone (Швеция) www.benton.com

58. Сайт компании De Dietrich Thermique (Франция) www.dedietrich.com

59. Сайт компании CIB Unigas (Италия) www.cibunigas.it

60. Сайт компании Elco Energy (Швейцария) www.elco.de

61. Сайт компании Ecoflam (Италия) www.ecoflam.it t, www.itgaz.ru

62. Сайт компании Girsch (Германия) www.girsch.de

63. Сайт компании Simmens (Германия) www.siemens.com

64. Сайт компании Oilon Oy (Финляндия) www.oilon.com

65. Сайт компании Olimpia Industrial (Южная Корея) www.olimp.co.kr,

www.technoterm.msk.ru

66. Сайт компании Riello (Италия) www.riello.it, www.riello.ukr.net
67. Сайт компании Roca (Испания) www.maestro.ru
68. Сайт компании Weishaupt (Германия) www.novoterm.de
69. Сайт компании Wester Heating (Великобритания)
www.westertertech.com
70. Баскин С.Г. Дослідження пальникових пристроїв для природного газу на вогневих установках.- В кн.: Теорія та практика спалювання газу. Л., Недра, 1964 С. 342-372.
71. Боев А.Ф. Аналіз роботи газопальникових приладів котлів електростанцій. Л., Недра, 1964р. С. 372-388.
72. Некоторые аспекты повышения экономичности и экологической безопасности горелочных устройств//Абдулин М.З./ Энергетика, экономика, технология.2000. №4 -С.65-68
73. Абдулін М.З., Ібрагім Джамал. Дослідження пальникового пристрою з поперечною подачею струменів палива. // Екологія та ресурсозбереження, 1997, - №2, с.70-71.
74. Крыжановский В.Н. Структура и расчет турбулентного факела.// Изв. Вузов. Энергетика. 1965, - №4 С.21-24.
75. Христич В.А., Абдулин М.З., Кулешов Ю.А. Аэродинамика течения и особенности смесеобразования при диффузионном горении в нишевом стабилизаторе пламени//Рациональное использование топлива. – Л.:Недра, - 1985, С.72-74.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ ПАЛЬНИКОВИХ ПРИСТРОЇВ СТРУМЕНЕВО-НІШОВОГО ТИПУ.

2.1 Особливості методики дослідження робочих процесів.

Відповідно до завдань поставлених в роботі з використанням сучасного досвіду проведення наукових досліджень [1-7] розроблена методика дослідження складних гідротермохімічних процесів.

Дана методика передбачає дослідження аеродинаміки і сумішоутворення в ізотермічних умовах і всіх стадій робочого процесу ПП при горінні на експериментальних стендах в лабораторних умовах в достатньо широкому діапазоні змін конструктивних та режимних факторів.

При вивченні робочого процесу пального пристрою з даною газодинамічною схемою важливим є дослідження структури течії за системою струменів і в області ближнього сліду за поганообтікаємим тілом, а також їх взаємодії при цьому утворюються нові структури, що істотно впливають на робочий процес (стійкість горіння, рівномірність температурного і швидкісного поля, гідравлічний опір і т.д.). Також, особливості тепломасообміну в даній системі (саморегулювання, розмив струменів вниз по потоку і т.д.) безпосередньо залежать від аеродинаміки течії і структурних перетворень, що виникають при варіюванні режимними параметрами. Такі характеристики робочого процесу, як стійкість і повнота згорання, є проявом одночасної взаємодії структури течії, складу паливної суміші й умов теплообміну. Виходячи з цього, методика проведення досліджень повинна забезпечити всебічне (з погляду визначальних чинників) вивчення робочого процесу, забезпечивши необхідний крок зміни режимних параметрів, а також необхідні межі їхньої зміни. Тому при розробці методики використовувався багатий досвід експериментальних та аналітичних досліджень гідротермохімічних процесів лабораторії горіння НТУУ «КПІ» [8-9].

Різномісність використаних методів досліджень дозволяє контролювати достовірність отриманих результатів. Наприклад поля температур посереднім чином повторюють вихрову структуру циркуляційних зон. Концентраційні поля

газу при ізотермічних продувках дозволяють визначити дальnobійність струменів газу та інш.

Одним з найважливіших питань методики проведення досліджень є можливість перевірки отриманих результатів на діючих моделях. У нашому випадку пальникові пристрої досліджувалися як у лабораторії, так і на достатній кількості діючих вогнетехнічних об'єктів.

Для кожного з таких експериментів розроблялася локальна методика. Це пов'язано з тим, що кожний з них експериментів переслідував різні цілі. Наприклад, дослідження в лабораторії своєю ціллю мали вивчити аеродинамічну структуру течії газу і повітря, провести дослідження температурного стану ПП і стійкості горіння. А, основною ціллю дослідження пальникового пристрою було визначення його еколого-теплотехнічних характеристик. Дослідження ж проведені на котельному агрегаті були покликані показати еколого-економічну ефективність застосування даного типу пальникових пристроїв на вогнетехнічних об'єктах енергетики та дослідити тепловий стан елементів пальникового пристрою.

2.2 Експериментальні методики дослідження характеристик робочого процесу струменево-нішових пальникових пристроїв

Для реалізації експериментальних досліджень розроблені і виготовлені експериментальні стенди. На стенді для холодних продувок проводилися експерименти по дослідженню аеродинамічних характеристик і візуалізації течії. Вимірювання тиску що виходить з пілона газу по всіх отворах (у всьому діапазоні проведення дослідження) проводилося за допомогою Г-образної пневматичної трубки діаметром 0,5 мм, встановленої в кожному з отворів пілона, що роздають газ.

Тиск повітря, що набігає на пілон, вимірювався на всіх режимах роботи пальника в кожний із проміжків між отворами пілона, що роздають газ, з'єднаної з трубкою Піто-Прандтля. У результаті вимірів підтверджено, що повітря, що набігає, розподіляється рівномірно по ширині пілона.

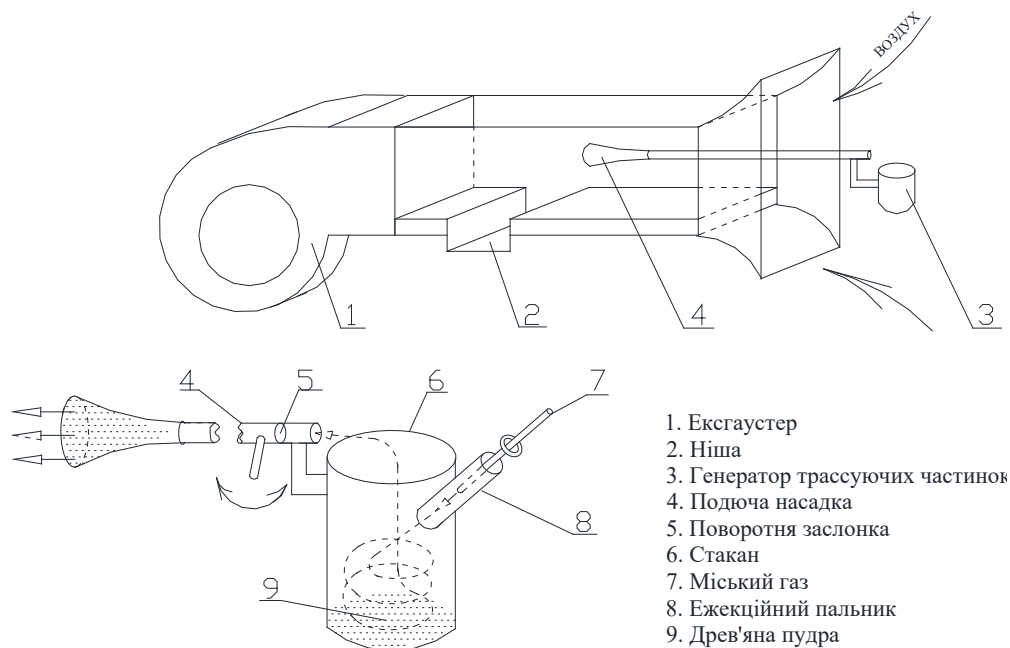


Рис. 2.1 Схема експериментального стенду для візуалізації аеродинамічної структури течії

Втрати тиску при всіх режимах дослідження з повітряного тракту не спостерігалось.

Візуалізація аеродинаміки течії в струменево-нішевій системі здійснювалась за допомогою трасуючих частинок, що світяться і за допомогою сажегасової суміші. Сажа розводилась з гасом і наносилась на металічну пластину, яка розміщувалась в області циркуляційної течії. В результаті інтенсивного обдуву течією повітря гас випаровувався і сажа на пластині відображала усереднену аеродинамічну структуру.[9] (Рис.2.1)

Для візуалізації структури течії за струменево-нішевою системою при горінні використовувалося підсвічування полум'я внесенням солей натрію в область горіння, що додають полум'ю яскраве фарбування. Коли солі потрапляли в високотемпературну область інтенсивної циркуляції, вся область набувала яскравого світіння.

Експеримент проводився в такий спосіб. При горінні металева трубочка діаметром 1,5мм, наповнена солями натрію, вносилась в факел і приближалась до його устя, коли вона потрапляла на границю області рециркуляційної течії вся зона циркуляції починала світитися (Рис 2.2.)

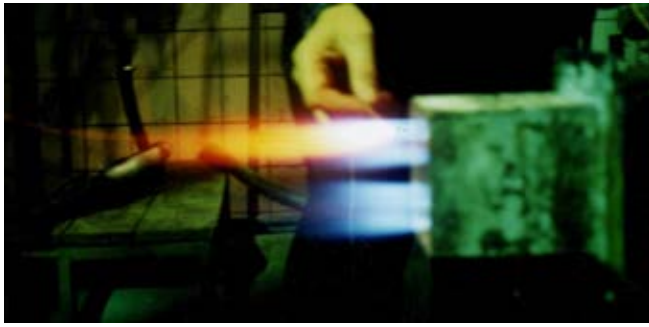


Рис. 2.2 Фотографія візуалізації зони циркуляції факела

2.2.1 Методика та експериментальні стенди для дослідження структури течії в ізотермічних умовах.

Вимірювання структури течії – профілів усереднених в часі швидкостей і їх пульсацій проводилося експериментально за допомогою термоанемометричної техніки на діючому зразку СНС пальника. В якості термоанемометричного обладнання використовувались термоанемометр DISA Eelectronics (Данія) типу 55M та термоанемометр TESTO 425. Аеродинамічний стенд з усією необхідною апаратурою, а також схема фіксації датчика наведені на рис. 2.3 Під час вимірювань датчик термоанемометру DISA 55M, розташовувався в центральному перерізі пальника і переміщувався на глибину від його центру каналу пальника до стінки ніші.



Рис. 2.3 Аеродинамічний стенд вимірювальною апаратурою

Швидкість повітряного потоку визначалася в робочій ділянці трубкою Піто-Прандтля встановленої поблизу нитки датчика. Тарувальна характеристика, як зазвичай, будувалася в лінеарезованих координатах. Приклад тарувальної характеристики термоанемометра приведений на рис.2.4.

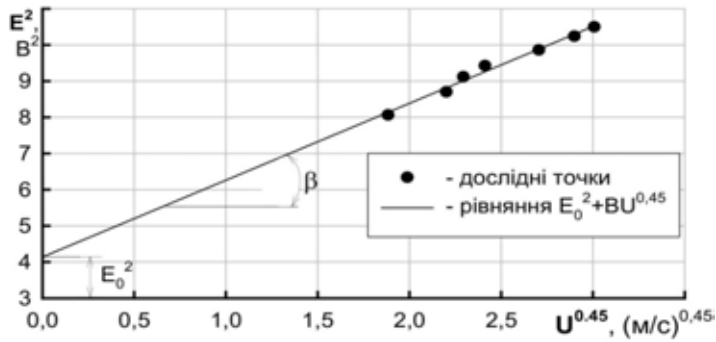


Рис.2.4 Тарувальна характеристика датчика термоанемометра

З тарувальної характеристики видно, що вона лінійна у всьому діапазоні швидкостей 2...12 м/с (максимальне відхилення не перевищує 0,01 %). В теорії конвективного теплообміну рівняння подібності для поперечно-обтікаємого повітрям циліндру визначаються в вигляді двочленної залежності

$$E^2 = E_0^2 + BU^{0,45} \quad (2.1)$$

де U – швидкість потоку, м/с; E – напруга, що знімається з діагоналі мосту (лінійно пов’язана з EW , але посилена за рахунок мостової схеми і посилювача зворотного зв’язку); E_0^2 (B_2) – квадрат фіктивної напруги, значення якого визначається при пролонгації тарувальної характеристики до $w = 0$, B_2 ; B – константа тарування; показник ступені $n = 0,45$ вибраний як оптимальний на основі експериментальних даних. З допомогою рівняння (1) проводиться расшифровка результатів вимірювань. Як безпосередньо впливає з цього рівняння, середня в часі швидкість може бути визначена, як

$$U = \left(\frac{E^2 - E_0^2}{B} \right)^{2,22} \quad (2.2)$$

Диференціювання рівняння (2.2) по змінним E та w дозволяє встановити взаємозв’язок між середньоквадратичними пульсаціями поздовжньої компоненти швидкості та напруги

$$\frac{\sqrt{u'^2}}{u} \% = \frac{0,444E}{E^2 - E_0^2} \sqrt{e'^2} \quad (2.3)$$

де $\sqrt{e'^2}$ (мВ) – середньоквадратична пульсація напруги. Ступінь турбулентності потоку визначався з сумарною відносною похибкою

$$\varepsilon_{Tu} = \sqrt{\varepsilon_B^2 + E^2 + \varepsilon_{rw}^2 + E_0^2 + \varepsilon_u^2} \quad (2.4)$$

2.2.2 Оцінка похибки вимірювання

Похибка визначення окремих величин:

а) похибки вимірювання пульсацій напруги в ϵ і напруги моста E оцінені відповідно в $\pm 0,5$ і $\pm 0,2$ %;

б) опір датчика вимірювався з абсолютною похибкою 0,05 Ом, так що максимальна відносна похибка ϵ_{rw} (для датчика з ниткою діаметром 5 мкм, $\epsilon_{rw} = 4$ Ом) складала $\pm 0,8$ %;

в) значення E20 виходило побудовою тарувальної характеристики насадки з похибкою не більш ± 2 %; г) абсолютна похибка вимірювання швидкості потоку за допомогою трубки Піто-Прандтля, необхідною для побудови тарувальної характеристики датчика, складала $\pm 0,07$ мм водяного стовпа, що при мінімальній швидкості потоку ($\sim 1,5$ мм водяного стовпа) призводить до максимальної відносної похибки $\pm 2,4$ %. Гідродинамічні характеристики потоку – число Рейнольдса і ступінь турбулентності визначалися з похибкою $\pm 2,7$ % і $\pm 3,3$ % відповідно. Таким чином, вимірювання ступеню турбулентності проводилося з похибкою $\pm 3,3$ %, а середньої швидкості $\pm 2,4$ %. Результати експериментів представлялись у вигляді розподілів середніх швидкостей і їх пульсацій в центральній частині каверни. Експеримент проводився в діапазоні чисел Рейнольдса від $23 \cdot 10^3$ до $84 \cdot 10^3$. В якості визначального розміру в числі Рейнольдса вибирався еквівалентний діаметр каналу пальника, а в якості визначальної швидкості – швидкість потоку в центрі каналу пальника.

2.2.3 Методики та принципові схеми експериментального стенду для дослідження робочого процесу струменево-нішевого модуля

2.2.3.1 Опис експериментального стенда

На рис. 2.5 представлена схема експериментального стенда і вимірювальної апаратури для проведення вогневих випробувань. Функціонує установка наступним чином. Повітря від вентилятора 1 подається до «заспокоюючої» ділянки 3, що обладнана звужуючим приладом 4, що дозволяє вимірювати витрати. Вентилятор в схемі обладнаний частотним регулятором, що дозволяє регулювати витрати повітря без застосування шибєрної заслінки.

Після «заспокоюючої ділянки» повітря підводиться до робочої ділянки 7, футерованої вогнетривким матеріалом. Для забезпечення вимірювань в факелі, робочої ділянки обладнаний дифманометром для визначення перепаду тиску в досліджуваному модулі 6. Конструкція стенда дозволяє проводити швидку заміну досліджуваних струменево-нішових модулів. Температура елементів вимірюється термопарами 8. Температура повітря вимірюється термометром 2. Газовий тракт обладнаний манометром і дифманометром для вимірювання тиску газу перед діафрагмою і перепадом тиску на діафрагмі. Для підпалювання суміші використовується електричний запальник напругою 27 В.

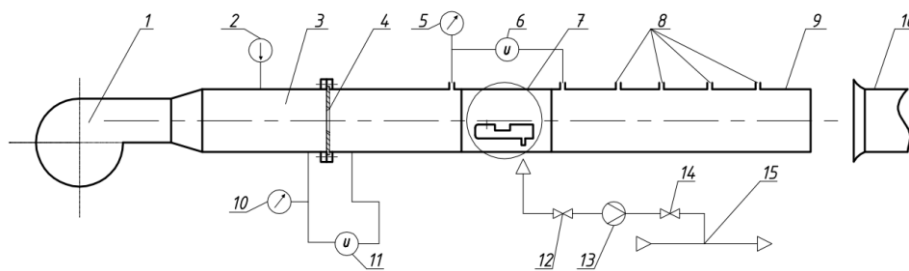


Рис. 2.5 Схема випробувального вогневого стенда

1 – вентилятор; 2- термометр для вимірювання температури повітря; 3 – початкова ділянка; 4- звужуючий прилад; 5- манометр вимірювання тиску на вході в мірну ділянку; 6- дифманометр вимірювання опору випробовуваних; 7- мірна ділянка, обладнана доступом для зондів відбору проб газового аналізу і вимірювальної апаратури а також свічкою запалювання; 8 – штуцер для відбору проб по довжині факелу; 9 – вихлопна ділянка; 10 – манометр вимірювання тиску перед діафрагмою; 11 – дифманометр зміни перепаду тиску на діафрагмі; 12- регулюючий газовий вентиль; 13- мірна діафрагма витрати газу; 14 – запірний вентиль; 15 – газова магістраль лабораторії; 16- патрубок відводу димових газів.

В ході досліджень передбачені вимірювання осьових компонентів швидкості потоку в ніші та інтенсивності турбулентних пульсацій за допомоги аерометричної апаратури типу СТБ, яка працює в режимі постійної температури. Обладнання складається з трьох блоків: термоанометричного перетворювача СТБ-1, середньоквадратичного вольтметра СТБ-2, цифрового вольтметра

постійного току СТБ-3. Для налаштування і роботи використовувався універсальний осцилограф С1-70. В якості чутливого елемента використовувалась вольфрамова нитка діаметром 8мкм і довжиною 1,5-2мм [6].

2.2.3.2 Методика дослідження зривних характеристик факела

Зривні характеристики характеризують межі стійкої роботи ПП і описуються залежністю коефіцієнта надлишку повітря від швидкості при погасанні факела: $\alpha^{\max} = f(W_B), \alpha^{\min} = f(W_B)$. Режим займання фіксувався при швидкості повітряного потоку, що встановився від запаленої запальної свічки. При цьому, збільшуються витрати газу до стійкого займання. При займанні суміші фіксувалася витрата палива $(V_{\Gamma}^H)^{\text{зап}}$. Визначення границь «бідного» зриву α^{\max} визначається наступним чином: при швидкості повітряного потоку, що встановився поступово зменшується витрати палива до моменту зриву факела і фіксується його значення V_{Γ}^{\min} . Визначення характеристик «багатого» зриву визначаються шляхом поступового збільшення витрат газу. «Багати зривом» прийнято рахувати факт виникнення пульсацій факела з відривом його від системи або ж повний «зрив» факелу. При цьому фіксується досягнута максимальна витрата газу V_{Γ}^{Max} .

При прийнятій витраті повітря характеристики запалювання факелу, «бідний» і «багатий» зрив перевіряють не менше п'яти раз. Час продувки стенду після зриву факелу – не менше 2 хвилин. Зривні характеристики будуються на режимах від мінімального до максимально можливих швидкостей повітря, що визначаються можливостями лабораторного стенду. Нижче приведений перелік залежностей по яким розраховуються коефіцієнти надлишку повітря під час «бідного» і «багатого» зриву полум'я α^{\max} та α^{\min} відповідно – і даліше визначається залежність цих коефіцієнтів від швидкості повітря в системі. По такій же методиці проводились і дослідження робочого процесу систем модулів на експериментальному стенді (рис.2.6).



Рис. 2.6 Фото експериментальної установки для проведення досліджень робочого процесу системи струменево-нішевих модулів

1.) Під час обробки результатів випробувань під нормальними умовами слід розуміти такі значення тиску і температури зовнішнього середовища :
 $P_B = 101325$ Па и $t_B = 0^\circ\text{C}$.

2.) Нижча теплота згорання палива Q_H^P кДж/м³ визначаються за допомогою калориметра або в випадку якщо відомий склад палива – по формулі:

$$Q_H^P = 126,4 \cdot \text{CO} + 107,9 \cdot \text{H}_2 + 358,8 \cdot \text{CH}_4 + 643,6 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 931,8 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + \\ + 1227,8 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10} + 1566,3 \cdot \text{C}_5\text{H}_{12} + 594,0 \cdot \text{C}_2\text{H}_4 + 876,1 \cdot \text{C}_3\text{H}_6 + \\ + 176,2 \cdot \text{C}_4\text{H}_8 + 1487,4 \cdot \text{C}_5\text{H}_{10} + 1556,7 \cdot \text{C}_6\text{H}_6 + 233,7 \cdot \text{H}_2\text{S} \quad (2.5)$$

3.) Витрата газу V_Γ , м³/с визначається по показниках газового лічильника:

$$V_\Gamma = \frac{V_{сч}}{\tau_2} \quad (2.6)$$

де $V_{сч}$ - загальна витрата газу, виміряна лічильником за час проведення випробувань, м³; τ_2 - час вимірювань, с.

4.) Витрати газу приведені V_Γ^H , м³/с до нормальних умов визначаються по формулі:

$$V_\Gamma^H = V_\Gamma \cdot \frac{273 \cdot (P_\Gamma^{сч} + P_0)}{101325 \cdot (273 + t_\Gamma^{сч})}, \text{м}^3/\text{с} \quad (2.7)$$

Де $P_\Gamma^{сч}$ – надлишковий тиск газу перед лічильником, Па; $t_\Gamma^{сч}$ – температура газу перед лічильником, °С.

5. Витрата повітря через діаграму V_B^D розраховується наступним чином :

$$V_B^D = K_D \sqrt{\frac{\Delta P_B^D}{P_B^D}} \quad (2.8)$$

Де K_D – коефіцієнт, що враховує геометричні характеристики діафрагми і визнається по результатам перевірки в відповідних метрологічних організаціях; ΔP_B^D - перепад тиску повітря на діафрагмі, Па; P_B^D - густина повітря в реальних

умовах, які визначаються по формулі :

$$P_B^D = \frac{(P_\delta + P_B^D)}{(t_B^D + 273)R_B} \quad (2.9)$$

де P_B^D - надлишковий тиск повітря перед діафрагмою, Па; t_B^D – тиск повітря перед діафрагмою, °С; R_B -281,53 Дж/(кг·К) – газова стала повітря.

6. Коефіцієнт надлишку повітря розраховується за формулою :

$$\alpha = \frac{V_B^H}{V_0 \cdot V_T^H} \quad (2.10)$$

Де V_0 – стехіометричний об'єм повітря під час горіння газу, м³/м³ розраховується наступним чином :

$$V_0 = \frac{1}{21} [0,5H_2 + 0,5CO + 2CH_4 + 3,5C_2H_6 + 5C_3H_8 + 6,5C_4H_{10} + 3C_2H_4 + 4,5C_3H_6 + 6C_4H_6 - O_2] \quad (2.11)$$

2.2.3.3 Методика проведення експериментальних досліджень структури факела двох струменево-нішових модулів

В науково-дослідній лабораторії газовикористовуючого устаткування (яка була акредитована на технічну компетентність Держстандартом України (Атестат акредитації № UA 6. 001. Т. 143 від 03.07.2001 р. були проведені попередні дослідження зразка пальникового пристрою струменево-нішового типу.

Для визначення працездатності зразка пальникового пристрою і дослідження структури факела створено пальниковий пристрій з двома струменево-нішовими модулями (Технічні умови ТУУ 31750871.001-2002). Зовнішній вигляд та схема такого ПП подані на рис.2.7. та 2.8.

Пальниковий пристрій працює на природному газі. Він складається з прямокутного, у розрізі, металевого короба - 1 розміром 92x104мм, і двох струменево-нішевих стабілізаторів шириною 23мм - 2, що розміщені з кроком 46мм у вхідній частині короба.

До пальникового пристрою приєднаний вентилятор - 3, для подачі повітря, що омиває стабілізатори з обох боків. Для регулювання витрати повітря використовується шибер, вмонтований разом із вентилятором.

Природний газ підводиться від магістралі до колектору пального пристрою - 4, далі подається у внутрішню порожнину стабілізаторів.

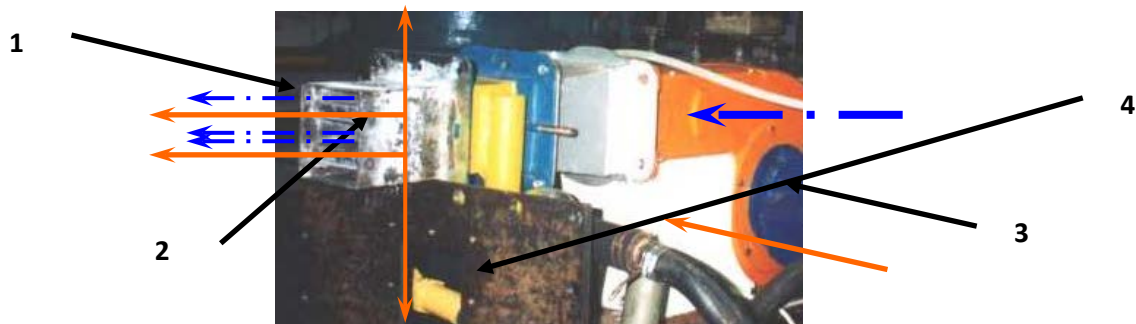


Рис. 2.7 Зовнішній вигляд зразка пального пристрою

1 - металевий короб; 2 - струменево-нішові стабілізатори; 3 - вентилятор; 4 - колектор подачі газу; - потік повітря; - потік газу

Крізь два ряди газових отворів, що розміщені з двох боків кожного стабілізатора поблизу від входної кромки, газ подається в повітряний потік, що омиває модулі-стабілізатори.

Під час роботи пального паливо-повітряна суміш, що утвориться при зустрічі палива і повітря, підпалюється від високої температури продуктів згоряння, що рециркулюють в зоні зворотних струмів за кожним колектором стабілізатором. Початкове запалювання здійснюється від додаткового запальника. Стенд для проведення досліджень (Рис 2.9) оснащений необхідним устаткуванням і ресурсами - системою живлення газом із надлишковим тиском 0,1 МПа, електроживлення - 380 В, системою відводу газів, що відходять.

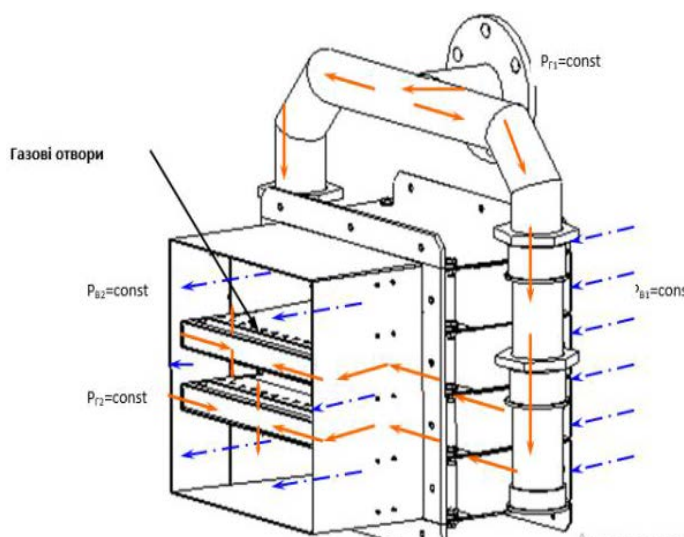


Рис.2.8 Принципова схема подачі газу і повітря в струменево-нішевому пальному пристрою

← · — – потік повітря; ← — – потік газу; $P_{Г1}$ - тиск газу на вході в пальниковий пристрій; $P_{Г2}$ - тиск газу на виході з газових отворів пілона; $P_{В1}$ - тиск повітря на вході в пальниковий пристрій; $P_{В2}$ - тиск повітря, що набігає на модулі.

При досліді використовувалися засоби вимірювальної техніки, приведені в табл.2.1.

Таблиця 2.1

Засоби вимірювальної техніки, що використовувалися при дослідженні газового пальника

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

стабілізатором				
Теплота згоряння палива	Калориметр В-08	10000-1000000 кДж/нм ³	±170 кДж/нм ³	
Швидкість повітря в пальнику	Трубка Піто-Прандтля			
Швидкість повітря в приміщенні	Анемометр АСО-3 зав.№6748 , інв.№10.2821	0-5 м/с	0,2 м/с	± (0,1+0,05V)

Для вимірювання необхідних параметрів виготовлені спеціальні зонди (Рис.2.8-2.11). Схема місць замірів температури та концентрацій в струменево-нішовій системі відображена на (рис.2.14).

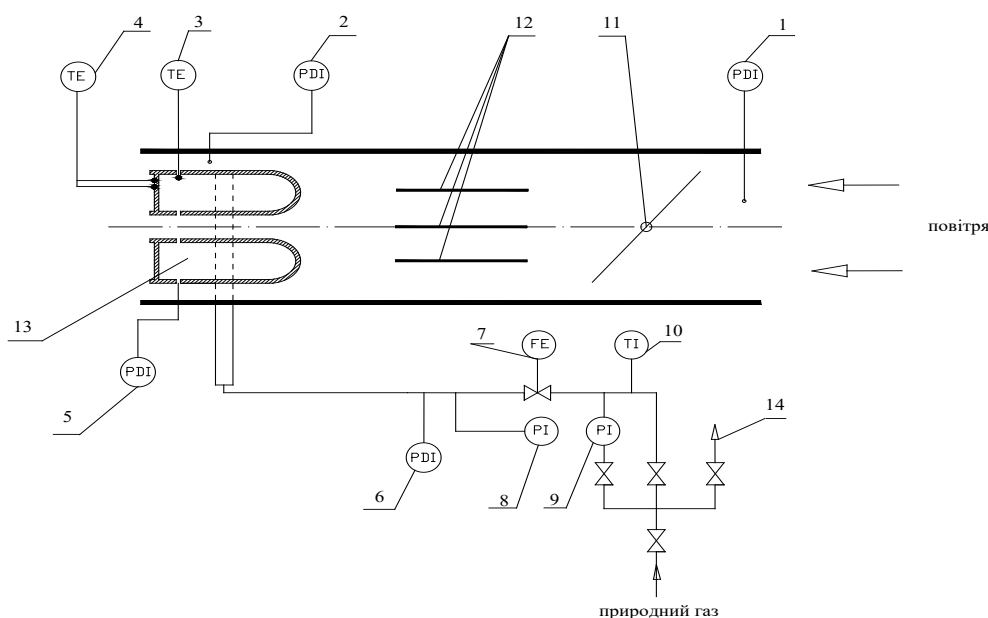


Рис. 2.9 Схема експериментальної установки для проведення досліджень пальникового пристрою на відкритому стенді

1 – трубка Піто-Прандтля ($W_{п}^{BX}$); 2 - трубка Піто-Прандтля ($W_{п}^{Пл}$); 3 – термопара потенціометр КСП-4 ($T_{газ.вих}$); 4 – термопари і потенціометри типу ПП-63 и ВР 5/20 ($T_{зовн.ст.пил.}$); 5 - трубка Піто-Прандтля ($P_{газ}^{Вих}$); 6 - трубка Піто-Прандтля, дублюючий прилад ($P_{газ}^{BX}$); 7 – газовий лічильник РЛ-20-2,0 ($G_{газ}$); 8 – манометр ($P_{газ}^{BX}$); 9 – манометр ($P_{газ}^{мрєж}$); 10 – ртутний термометр типу ТЛ-4 ($T_{газ}^{BX}$); 11 –регулююча засувка; 12 - випрямники потоку повітря; 13 – пілон; 14 – продувна свічка.

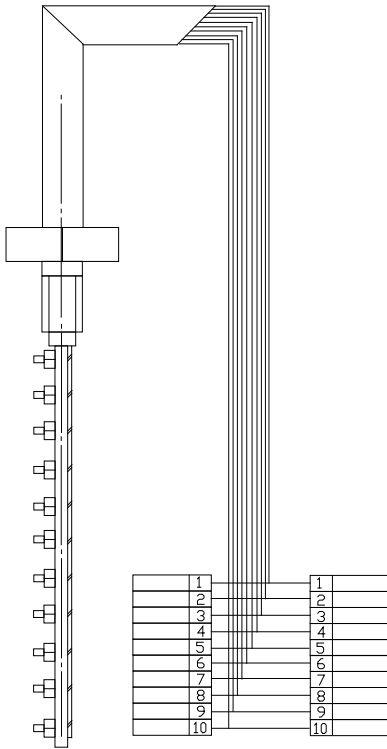


Рис.2.10 Точковий зонд вимірювання температури

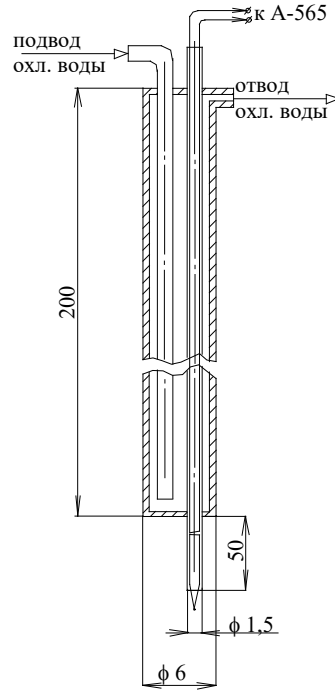


Рис.2.11 Термопарна гребінка

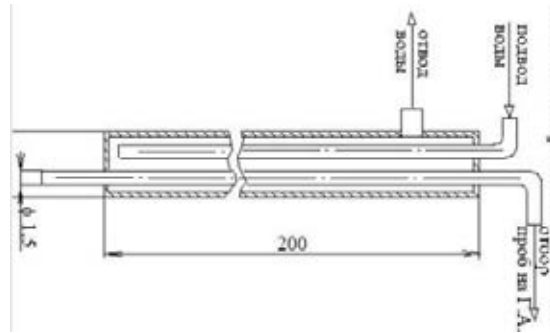


Рис.2.12 Точковий зонд відбору проб продуктів згорання

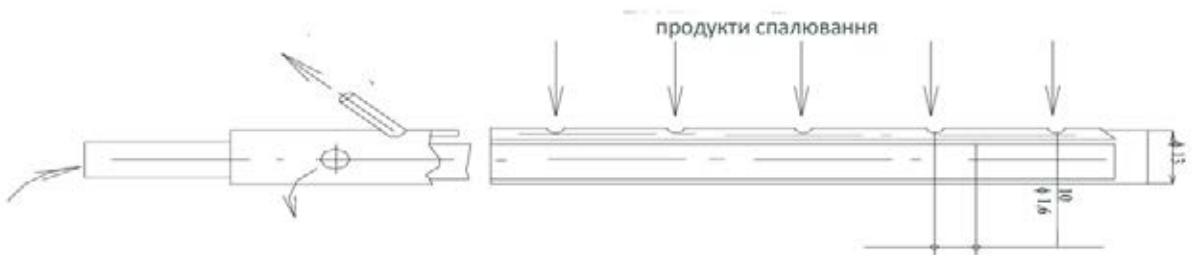


Рис. 2.13 Водохолоджуваний інтегруючий зонд відбору проб продуктів згорання

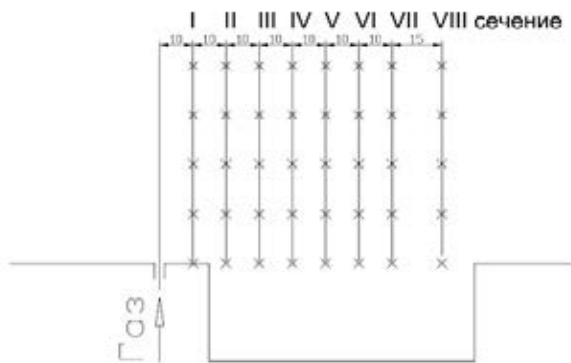


Рис. 2.14 Схема точок вимірів параметрів струменево-нішових систем.

2.2.3.4 Методика дослідження сумішоутворення в струменево-нішовому модулі

Для визначення ступеню сумішоутворення і вивчення механізму горіння за допомогою гомогенізації паливної суміші була розроблена методика і експериментальний стенд (Рис 2.15.) В основу її покладено відповідність рівномірності сумішоутворення і стійкості горіння на малих стабілізаторах полум'я рівномірно розміщених в потоці паливної суміші. Конструктивно це здійснюється наступним чином. За гомогенізатором,(1) нижче по потоку повітря, встановлювалась пластина з рівномірно розміщеними отворами(2). Якщо пластина находилась від гомогенізатора на відстані достатньому для створення однорідної паливної суміші то горіння за нею було стійким. Причому за всіма отворами спостерігались характерні однакові фронти полум'я в вигляді конусів. При зменшенні відстані між пластиною і гомогенізатором в визначений момент починала проявлятися нерівномірність складу суміші. В деяких отворах полум'я починало періодично гаснути, стійкість горіння значно порушувалась. Відстань, при якій порушувалась рівномірність розподілу факелів по перерізу потоку повітря визначалась як така, що необхідна для гомогенізації паливної суміші.

Результати експериментів співставлялись з газовим аналізом на СН в тому ж перерізі в ізотермічних умовах.

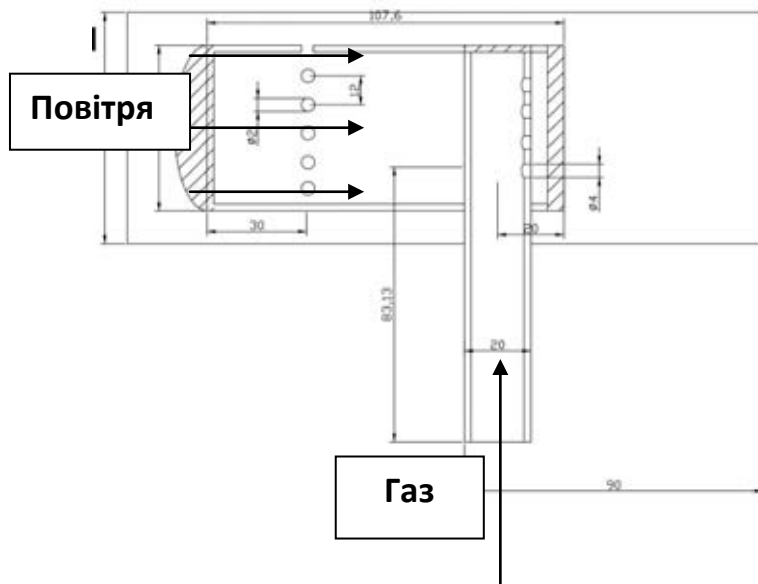


Рис.2.15 Схема експериментального стенда для дослідження механізму горіння

1- гомогенізатор; 2- пластина стабілізації полум'я.

Сумішоутворення в ізотермічних умовах досліджувалось шляхом відборів проб на метан за допомогою зонда-газоаналізатора «Газохром».

Масообмін між нішовою порожниною та потоком, що її обтікає досліджувались за допомогою методики Лефевра яка ґрунтувалась на порівнянні витрати газу в нішову порожнину при бідному зриві горіння та газу, що рівномірно розподілялося в потоці, що обтікає нішу. [12]

Вигорання паливної суміші на експериментальних стендах та на промислових об'єктах досліджувалось за допомогою газоаналізатора «testoterm-350».

2.3 Методика дослідження температури

2.3.1 Дослідження температури факела

Температури потоку за струменево-нішевою системою вимірювалося вольфрамо-ренієвою ВР 5/20 із максимальною температурою застосування 2070 °К і платино-платинородієвою термопарами з реєстрацією ЕДС переносним потенціометром типу ПП-63 і А 565, відповідно. Для обліку променистого теплообміну між термопарою і навколишніми її поверхнями без порушення аеродинамічних характеристик факела на експериментальній установці температура полум'я визначалася методом двох термопар [13].

Використовувалися здвоєні неекрановані термопари з діаметрами спаїв 0,5мм і 1,2мм. Відкриті робочі кінці термопар по черзі містилися в ту саму точку потоку. Розходження в показах термопар вказувало на різний тепловідвід від спаїв.

2.3.2 Дослідження температури елементів струменево-нішових модулів

Дослідження температурного рівня металу елементів випробуваного пальникового пристрою здійснювалося за допомогою хромель-алюмелевих термопар, кількість і схема розміщення яких визначалася шляхом виявлення найбільше теплонапружених областей. В нашому випадку - це торцеві стінки пілонів.

Гарячі спаї термопар зачеканювалися у метал за допомогою крапкового зварювання для забезпечення щільного притискання і максимальної теплопровідності. Показання термо-ЕДС термопар виводилося на дванадцятиканальний потенціометр типу КСП-4 класу точності 0,25. Середня температура стінки пілонів, за результатами дослідження, не перевищувала 250 °С. Звідси слідує, що температура торцевої стінки пальникового пристрою підтримується в необхідному, для надійної роботи, інтервалі за рахунок охолодження газом, що обтікає її внутрішню поверхню.

2.3.3 Дослідження температури газу

Для контролю температури газу, що виходить з газороздаючих отворів, в одне з них вставлялася хромель-копелева термопара з діаметром гарячого спаю 0,3мм. Як показали попередні досліді, розташування термопари всередині пілона практично не впливало на показання. Тому, виходячи з умов мінімального порушення аеродинаміки потоку, що омивають пілон, термопари вставлялися в крайні отвори і їхні гарячі спаї розташовувалися на перетині осі отвору, що роздає газ і площини симетрії пілона.

2.3.4 Похибка визначення температури

Оскільки відстань від гарячого спаю термопар до її корпусу L_t велика ($L_t/d_t > 10$), відвід тепла теплопровідністю в термоелектроди не враховувався.

Показання термопар коректувалися тільки на втрати тепла від гарячого спаю випромінюванням. Дійсна температура газового потоку обчислювалася по формулі :

$$T=T_1+C(T_2-T_1), \quad (2.12)$$

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

C_t - коефіцієнт, що враховує вплив випромінювання термопар.

Значення C_t визначається:

$$C_t = \frac{1}{1 - (d_1 / d_2)^{1-m}}, \quad (2.13)$$

де: m - коефіцієнт, що залежить від числа Рейнольдса.

В умовах проведення дослідів m складало 0,03, а поправки до температури - 60-100К.

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

$$\Delta T = 2 \cdot C + 1 + 0,3 \cdot (T_2 - T_1), \quad (2.14)$$

і складає для цього методу біля 20К.

2.4 Методики оцінки рівномірності температурного поля в топковому просторі

2.4.1 Методика вимірювання температури за допомогою пірометра

Важливою характеристикою ПП є рівномірність температурного поля яке утворюється в топковому просторі. Для цього в роботі використані реальні промислові об'єкти – пости сушки та розігріву сталеплавильних ковшів.

В робочому циклі технологічного процесу за допомогою лазерного пірометра марки «RAYTEK» (межа вимірювань 200-1800 °С) проводились заміри температури футеровки всередині ковша.

2.4.2 Методика вимірювання температури за допомогою тепловізора

За допомогою пірометра «Testo 830-71» проводились заміри температури поверхні ковша. Заміри температур пірометром контролювались термопарами (платино-платинородієвою та хромель-алюмелевою).

2.5 Методики дослідження еколого-теплотехнічних характеристик струменево-нішових модулів

Визначення теплотехнічних характеристик роботи вогнетехнічних об'єктів проводилось відповідно «Методичному посібнику по проведенню комплексних еколого-теплотехнічних випробувань котлів, працюючих на газі і мазуті» Інституту газу НАНУ, 1992 і «Вимог по ефективному використанню газу і охорони навколишнього середовища при проведенні налагоджувальних робіт на паливовикористовуючому обладнанні» Держгазпрому України 1995р, 1995р. , «Методика визначення викидів забруднюючих речовин в атмосферу від енергетичних установок» ГКД 34.02.305-2002.

Для проведення порівняльних еколого-теплотехнічних випробувань а промислових умовах розроблялися спеціальні програми (Див. Додаток).

На експериментальних стендах і в умовах промислової експлуатації також досліджувалось.

- виникнення вібраційного режиму
- рівень шуму
- вплив протитиску в топковому просторі на ефективність роботи ПП і ВО
- тепловий стан амбразури ПП
- температурний стан елементів ПП.

Особливий інтерес представляє дослідження можливостей роботи ВО з частковим або повним відключенням тягодуттьових засобів, до яких відносяться вентилятори та димовсмоктувачі.

При відключенні вентилятора, повітря надходить в топковий простір за рахунок роботи димовсмоктувача та самотяги труби. Такий режим роботи ВО називається безвентиляторним. Якщо відключити ще димовсмоктувачі то повітря буде надходити за рахунок самотяги труби. Це буде режим самотяги. Безвентиляторний та режим самотяги цікаві тим, що на часткових режимах навантаження, які зараз зустрічаються доволі часто ці режими можуть забезпечувати значну економію електро-енергії на привід тягодуттьових засобів.

Крім цього, як показують дослідження, потік повітря, що надходить на ПП за рахунок розрідження в топковому просторі має більш рівномірне поле швидкостей. При рівномірній роздачі газу по перерізу ПП цей факт забезпечує більш якісне сумішоутворення горючого та окиснювача.

Методика дослідження передбачає організацію безвентиляторного режиму на котлах ДКВР та КВГМ і режиму самотяги на котлі ПТВМ.

2.6 Особливості методики математичного моделювання робочих процесів пальників струменево-нішового типу

Для визначення границь сталого горіння за струменево-нішовим модулем в залежності від геометричних предметів паливорозподільної системи було використаною методику математичного планування експерименту. В цьому методі межею є організація повнофакторного експерименту (ПФЕ). Для адекватності математичної моделі використовувались заміри у зірковихточка плану.

Для визначення закономірностей течії і теплообміну в системах охолодження з обдувом внутрішньої торцевої поверхні стабілізатора полум'я, а також виявлення закономірностей впливу навантаження котлоагрегату на характеристики систем охолодження, виконаний комплекс досліджень теплообміну та аеродинаміки на основі CFD моделювання.

2.7 Висновки за розділом

У відповідності до приведеного матеріалу можна зробити наступні висновки.

1. Методика дослідження робочих процесів струменевих, струменево-нішових модулів та пальникових пристроїв на їх основі дозволяє на експериментальних стендах та в умовах промислової експлуатації всебічно і повно з достатньою точністю вивчити основні закономірності їх робочих процесів.

2. Широкий спектр експериментальних досліджень дозволяє взаємнопідтверджувати достовірність отриманих результатів.

3. Оцінка похибки експерименту показала, що дослідження витрати і

температур потоків палива та окисника, а також параметрів турбулентності та середньої швидкості в каналі виконано з точністю не менше 95%, при довірчій ймовірності $P=95\%$. Вимірювання концентрацій оксидів в продуктах згорання виконується з похибкою не більше 10%, а похибка непрямих вимірювань балансного коефіцієнту надлишкового повітря в системі становить не більше 13%.

4. Методики дослідження робочих процесів пального пристроїв в складі різноманітних ВО підтверджують достовірність результатів отриманих на експериментальних стендах.

2.8 Список використаних джерел

1. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ/ Пер. с англ. Г.Л. Агафонова – под ред. П.А. Власова. – М.: Физматлит, 2003. – 352с.
2. Трёмбовля В.И., Фингер Е.Д., Авдеева А.А. Теплотехнические испытания котельных установок. – М.: Энергия, 1977, - 236с.
3. Эстеркин Р.Н., Истерлин А.С., Певзнер Н.И. Методы теплотехнических измерений при сжигании газа. – Л.: Недра, 1972-376с.
4. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник/ Аметистов Е.А., Григорьев О.А., Ельцев Б.Т. и др. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 512с.
5. Абрамович И.Г., Левин В.И. Уравнение математической физики. – М.: Наука. 1964. – 288с.
6. Трёмбовля В.И., Фингер Е.Д. Теплотехнические испытания котельных установок. – М.: Госэнергоиздат, 1959
7. Вимоги до ефективного використання палива та охорони навколишнього середовища при проведенні налагоджувальних робіт на паливо використовуючому обладнанні / Держнафтогаз України, Київ, 1995р.

8. Бутовский Л.С., Христоч В.А. Структура зоны смешения и особенности выгорания газа за стабилизаторами пламени// в кн.: Теория и практика сжигания газа. – Л.: Недра – 1972.- .76-82.
9. Абдулін М.З. «Струйно нишевая система смесеобразования и стабилизации пламени» дис. канд. тех. наук. НГУУ «КПШ», 1986 р.
10. Любчик Г.Н., Христоч В.А., Бутовский Л.С., Грановская Е.А. Исследование закономерностей выгорания топлива за уголковыми и плоскими стабилизаторами пламени/- К.: Теория и практика сжигания газа. Вып VI./ Л., 1975, с.324-338.
11. Рекин А.Д. Влияние теплопроводности термэлектродов на показания термопар в высокотемпературном потоке // Теплоэнергетика – 1977, №2. – с.65-68.
12. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД / А. Лефевр. - М.: Мир, 1986. – 566 с.
13. Преображенский В. П. Теплотехнические измерения и приборы. М.: Энергия, 1978.-703 стр.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ АВТОНОМНИХ СТРУМЕНЕВО – НІШОВИХ ПАЛЬНИКОВИХ МОДУЛІВ З НІШОВИМИ ПОРОЖНИНАМИ РІЗНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ

Виходячи з особливості умов експлуатації вітчизняного вогнетехнічного обладнання (ВО), визначальною проблемою в цій галузі залишається збереження ефективності роботи ВО на змінних режимах експлуатації [1-2].

Важливою вимогою надійної та ефективної роботи ВО є можливість підтримання номінального рівня температур у топковому просторі, при цьому слід запобігати термічного «удару» та температурної нерівномірності по об'єму. В більшій мірі організація робочого процесу сучасних ПП, які працюють за принципом «закрутки» потоку палива та окисника, не дозволяє проводити пуск обладнання за мінімальних навантажень. Для більшості ПП нижня межа робочого навантаження більша 20 % номінального, що не сприяє рівномірності температурного поля робочого простору та призводить до руйнування термічно навантажених елементів ПП та ВО. Крім того, максимальне зниження витрати пального на пускових режимах розглядається необхідним з точки зору підвищення вибухобезпеки ВО при проведенні його пуску [3, 4].

Питання розширення діапазону регулювання при забезпеченні високих енергетичних та екологічних показників визначають один з векторів розвитку струменево-нішевої технології спалювання. Одним із сучасних методів дослідження є комп'ютерне моделювання процесів, а рівень розвитку комп'ютерної техніки дозволяє застосовувати найдосконаліші математичні моделі досліджуваних фізичних явищ. Результати, отримані розрахунково, з стають все більш достовірні і дозволяють враховувати все більше впливових факторів. При цьому проведення комп'ютерного експерименту, як правило, не вимагає значних грошових ресурсів.

Принцип стабілізації факелу поганообтічним тілом у вигляді перфорованої поверхні розглянуто у роботі [5], результати експерименту співставлено з результатами моделювання. Методика прямого чисельного моделювання

горіння газоподібного палива розглянута у роботі [6], однак з практичної точки зору застосування зазначеного підходу обмежено обчислювальними ресурсами. З іншої сторони, задачі вдосконалення досліджуваних пальників за допомогою комп'ютерного моделювання розглянуто у ряді робіт Інституту технічної теплофізики, в тому числі [7]. У розрахунках використано пакет програм обчислювальної газової динаміки ANSYS. Слід зазначити, що результати дозволяють поглибити розуміння основних особливостей робочого процесу пальників, а також в деяких, окремих випадках, визначити ефекти впливу режимних та геометричних параметрів. Таким чином, експериментальний шлях поки що є основним при дослідженні і оптимізації нових газопальникових пристроїв.

Важливим аспектом експлуатації високотемпературного ВО є забезпечення помірного рівня температур термічнонавантажених елементів. У роботі [8] представлено результати дослідження температурного стану елементів ВО при застосуванні мікрофакельних пальників. Отримано практичні рекомендації щодо зниження нерівномірності температурного поля продуктів згорання, та забезпечення надійності експлуатації паливовикористовуючого ВО.

У лабораторії КПІ розвивалися дослідження прямої схеми пальників з врахуванням принципів організації робочого процесу пальників за допомогою системи струменів пального у потік окисника, що набігає [9-13].

Однак для подальшого розвитку ефективного застосування даних прямотокових схем пальників не вистачало комплексних досліджень з аеродинаміки та сумішоутворення у ближньому сліді за системою струменів.

Роботи, які продовжують розвиток прямоточних пальників, були проведені під керівництвом автора роботи. Було показано, що перспективною, з точки зору стійкості і компактності аеродинамічній структури, є струменевонашева система сумішоутворення і стабілізації полум'я [14].

3.1 Струменевонашеві модулі з прямокутними нішовими порожнинами

Результати дослідження процесів сумішоутворення і стабілізації полум'я

комірки із струменево нішовими системами забезпечили фундамент для розробки струменево-нішових модулів.

На основі СНС опрацьовані різні варіанти модулів-колекторів, на яких розташовувався нішевий стабілізатор. Початковий модуль-колектор мав вигляд пустотілого пілона, добре обтічної форми, з симетрично розташованими на ньому струменево-нішовими системами (рис. 3.1а).

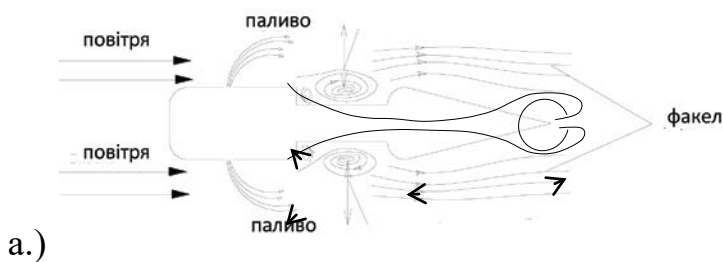


Рис. 3.1 Схема струменево-нішових модулів (а) струменево-нішові модулі (б)

Зображений на рисунку варіант передбачений для високошвидкісних потоків, що мають місце в форсажних камерах, камерах проміжного перегріву та ін. для зниження гідравлічного опору у потоці у відключеному стані.

Експериментальні дослідження струменево-нішового модуля показали значні поліпшення основних характеристик робочого процесу у порівнянні з струменево-нішевою системою на стінці каналу. Так, значно покращився тепловий стан елементів пілона. Навіть при неорганізованому

самоохолодженням паливом, температура в самих нагрітих зонах не перевищувала 450 ° С.

3.1.1 Особливості течії палива і окиснювача в струменево-нішовому модулі

З огляду на різноманіття і складності взаємодії конструктивних і режимних факторів для проведення досліджень робочий процес розділений на складові:

1. розвиток системи струменів пального в ізотермічних умовах і при горінні, а також при їх взаємодії з плинном за погано обтічними тілами тілами (уступ, ніша, тощо);

2. течія за погано обтічним тілом в ізотермічних умовах і при горінні;

3. течія пального всередині пілона.

Дослідження розвитку системи струменів в потоці, що набігає при ізотермічних умовах проводилися при витіканні струменів з однорядової системи паливорозподілу, розташованої на гладкій стінці (рис. 3.2, а). Проведено дослідження параметрів робочого процесу в умовах взаємодії струменевої подачі з циркулюючою пальною сумішшю за прямокутним уступом (рис. 3.2, б) та плоским колектором-пілоном (рис. 3.2, в).

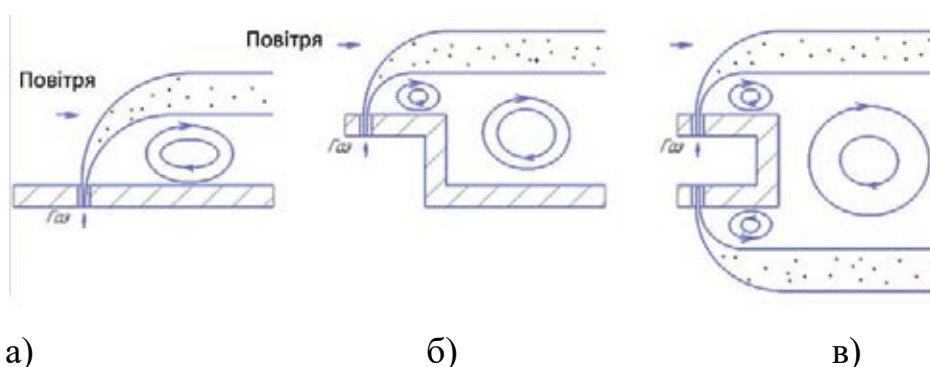


Рис. 3.2 Варіанти стабілізаторів полум'я на основі перпендикулярного паливорозподілу

Експериментальні дослідження структури течії проводилися в ізотермічних умовах для модуля з характерним розміром $B=20$ мм. Контрольні експерименти проводилися для модуля з характерним розміром 12 мм.

Відносний крок газороздавальних отворів змінювався дискретно: 4; 3,5; 3. Контрольні досліди проводилися з відносним кроком \bar{S} рівним 2. Діаметр газороздавальних отворів d був постійним і дорівнював 2 мм. Значення гідродинамічного параметра q мали фіксовані значення 20; 12 і 6 при швидкості повітря 30 м/с. Висота повітряного каналу H була постійною і дорівнювала 20 мм.

Відстань від осі отворів до кромки уступу (L_1) змінювалося в межах 6 ... 10 мм. Дослідження проводилися за допомогою Г- подібної пневмометричної трубки з внутрішнім діаметром 0,5 мм, яка встановлюється перпендикулярно до потоку повітря. Область за системою струменів траверсувати з кроком 2 ... 5 мм

3.1.2 Дослідження зони циркуляції в умовах газорозподілу на плоскій стінці та уступі в ізотермічних умовах

Вимірювання, виконані на гладкій стінці виявили за системою струменів наявність області розрядження, максимальні значення якого досягали значень 80 Па. Багаторазові вимірювання дозволили виділити область з межею 5 Па (рис.3.3, 3.4). Менші значення розрядження не фіксувалися через сильні пульсації тиску і неможливістю зафіксувати точне значення параметра.

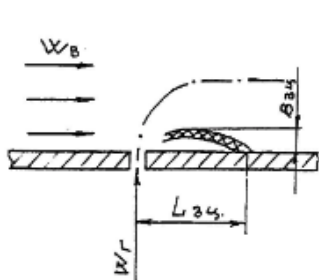


Рис. 3.3 Границя зони циркуляції за системою струменів: $d = 2$ мм, $\bar{S} = 2$,

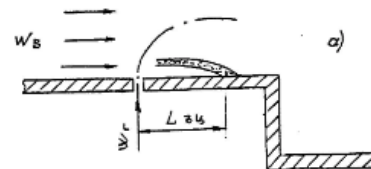
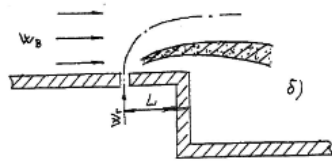


Рис. 3.4 Границя зони циркуляції при взаємодії системи струменів з уступом: $d = 2$ мм, $\bar{S} = 3$, $q = 12$, $W_{п} = 30$ м/с; а) $L > L_{кр}$,



$$q = 12, W_{\Pi} = 30 \text{ м/с}$$

$$\text{б) } L < L_{\text{кр}}$$

Область з розрідженням можна назвати областю циркуляції з довжиною ($L_{\text{з.ц.}}$). На відміну від області циркуляції за поганообтічним тілом (кутником, уступом, нішею і т.д.) течія у ближньому сліді за системою струменів відрізняється крайньою невпорядкованістю і значно більшими пульсаціями у поперечному напрямку.

Як видно з рисунка 3.4, розміри області розрідження прямо-пропорційні далекобійності системи струменів, відповідно значенню гідродинамічного параметру.

Помітного впливу відносного кроку розташування струменів у дослідженому діапазоні на рівень розрідження зони циркуляції виявити не вдалося у зв'язку з вищезгаданою нестійкістю течії. Проведення контрольних експериментів з відносним кроком $\bar{S}=2$ підтвердили вищевказані закономірності. Причому, в цьому випадку спостерігалось незначне зменшення поперечного розміру зони циркуляції ($V_{\text{цз}}$). Це явище, очевидно, пов'язано зі зменшенням дальnobійності системи струменів при зменшенні відносного кроку розташування газороздавальних отворів. Вимірювання, проведені в даному діапазоні зміни параметрів показали, що довжина зони циркуляції визначена у відповідності до показань розрідження, не перевищувала 15 ... 20 мм. Дослідження впливу параметру відстані від кромки уступу до системи струменів (L_1) на структуру течії в ізотермічних умовах були проведені при фіксованому значенні параметрів ($W_{\Pi}=30$ м/с; $\bar{q}=12$; $\bar{S}=3$). Крок зміни L_1 становив 10 ... 3 мм. Висота уступу мала два значення 15 і 20 мм. Вимірювання показали, що зменшення відстані від осей системи отворів до кромки стабілізатора не впливає на рівень розрідження в зоні циркуляції за системою струменів до певних меж. При зменшенні відстані певного критичного значення ($L_{\text{кр}}$) відбувається суттєва перебудова течії в ближньому сліді за системою струменів. Область мінімальних

тисків дещо піднімається і простягається над уступом не замикаючись на поверхні, де розташовані отвори.

Така картина пов'язана зі злиттям зони циркуляції за системою струменів з зоною циркуляції за поганообтічним тілом (уступом).

При збільшенні значення гідродинамічного параметра до 20 (і відповідно дальnobійності системи струменів) зазначені закономірності зберігаються.

Дослідження структури течії в даній системі в значно ширшому діапазоні зміни параметрів ($q=2; 2.5; 3$ мм; $\bar{S}=2...3$; $V=5...20$ мм; $H=5...50$ мм) були продовжені при горінні шляхом підсвічування полум'я шляхом внесення солей натрію в область горіння.

Ці результати показали, що злиття в загальну зону відбувається при $L_1 \leq 15$ мм. Дослідження температурних полів в області горіння за пілоном і за уступом підтвердили наявність критичної відстані $L_{кр}$ видно їх перебудову при $L < L_{кр}$. Початковим визначальним фактором структури течії за системою струменів є відносний крок розташування газороздавальних отворів \bar{S} .

Визначено, що в діапазоні $\bar{S} = 3 \dots 3,5$ (визнаного як перехідним) за системою струменів відбувається злиття слідів струменів в одну яскраво виражену область циркуляції.

Розглянуті схеми обмежені конструктивними параметрами, які реально застосовуються у газопальниковому обладнанні подібної конструкції. Тому значення критичної відстані виражається не у відносних, а в абсолютних величинах.

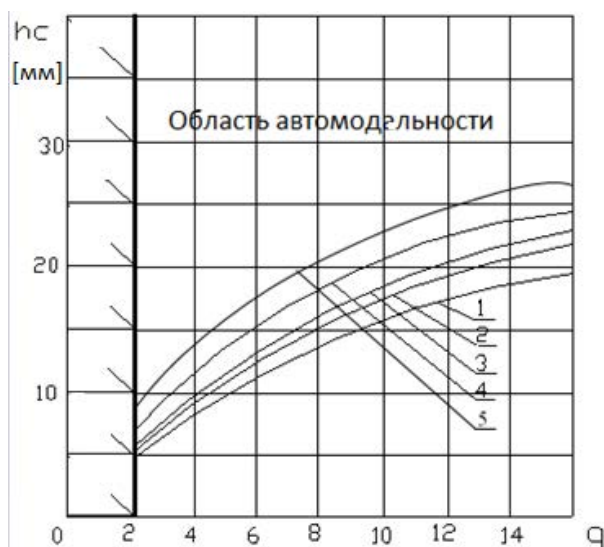
Для з'ясування впливу течії за уступом на далекобійність системи струменів проводилися порівняльні досліди з подачею палива без впливу поганообтічного тіла.

3.1.3 Аналіз результатів дослідження дальnobійності системи струменів в потоці що зносить

Глибина проникнення (далекобійність) струменя оцінювалася в залежності від концентрації метану. Для цього струмінь траверсувався пробоотборником

перпендикулярно повітряному потоку і перпендикулярно стінці на якій розташовані газо-роздавальні отвори з подальшим аналізом проби.

На рис. 3.5 показані результати проведених вимірювань. Як видно за даних умов проведення експерименту ($\bar{S} = 3,5$; $d=2$ мм; $W_3=0$ м / с; $B=10$ мм; $H=40$ мм), при взаємодії системи струменів з плинном за уступом дальнокобійність струменів помітно збільшується по порівняно з тим випадком коли уступу немає. Звертає на себе увагу прямопропорційна залежність зміни дальнокобійності від гідродинамічного параметра q .



$$B = 10..20 \text{ мм, } h_c = H/2.$$

- 1- Система струменів
- 2- Система струменів перед нішою в ізотермічних умовах;
- 3- Система струменів перед уступом;
- 4- Система струменів перед нішою в умовах горіння;
- 5- Поодинокий струмінь.

Рис. 3.5 Вплив циркуляційних течій в ближньому сліді системи струменів на їх дальнокобійність

$$d = 1...3 \text{ мм, } \bar{S} = 2...4, q = 12, B = 10..20 \text{ мм, } q = 2..20, h_c = H/2$$

З огляду на отримані закономірності були проведені контрольні експерименти з величиною уступу 20 мм в дуже обмежених межах зміни гідродинамічного параметра q .

Вимірювання показали, що наявність уступу такої величини збільшує дальнокобійність струменів до 15%. При цьому максимальне розрідження в зоні зворотних струмів зменшується з 100 до 60 Па.

Також були проведені дослідження дальнокобійності системи струменів для однорядової системи струменів в умовах струменево-нішового модуля ($\bar{S} = 3,5$; $d=2$ мм; $B=10$ мм; $H=40$ мм). Вони показали, що паливорозподіл в умовах модуля ,

у порівнянні з розвитком системи струменів уздовж гладкої стінки при порівнянних режимних і конструктивних параметрів спостерігається збільшення їх дальnobійності і зменшення розрідження в зоні зворотних струмів відповідно.

3.1.4 Дослідження особливостей процесу паливорозподілу в струменево-нішевій системі розташованій на модулі

Дослідження процесу сумішоутворення при подачі струменів у потік, що набігає (холодні продувки) виявили також вплив ефекту Коанда на далекобійність струменів і на склад суміші в циркуляційній зоні при малих значеннях гідродинамічного параметру, що відповідає режиму розпалювання ПП.

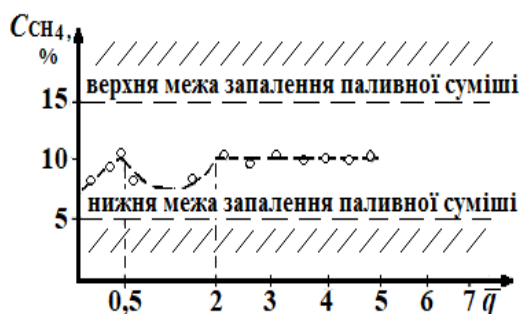


Рис. 3.6 Рівень концентрації метану у зоні зворотних струменів в залежності від гідродинамічного параметру (ізотермічні дослідження)

Внаслідок даного ефекту відбувається прилипання струменів до стінки каналу і спостерігається деяке перебагачення циркуляційної зони у концентраційних межах займання. У цьому випадку зона циркуляції має мінімальний розмір і фактично визначається розмірами нішевої порожнини.

Досить важливим стосовно визначення меж стійкої роботи даної газодинамічної схеми є вивчення залежності середнього складу паливної суміші в зоні зворотних струмів від основних визначальних факторів.

Як показали дослідження, відбір проб на CH_4 (без горіння) дає надійні результати, які задовільно корелюються з випробуваннями при горінні.

Обробка результатів випробувань за допомогою методів математичної статистики підтвердила висновок про високу інтенсивність сумішоутворення в районі зони зворотних струмів і про можливість оцінювати середній рівень складу паливної суміші за відбором проб в області геометричного центру зони зворотних струмів. На рис. 3.6. представлені результати відбору проб на метан в

ізотермічних при швидкості потоку повітря 10 м/с в діапазоні зміни гідродинамічного параметра від 2 до 25. Така далекобійність є максимальною для застосовуваних газопальникових пристроїв. Звертає на себе увагу той факт, що область значень відносного кроку, яка забезпечує склад суміші в зоні зворотних струмів у горючих межах, збігається зі значеннями \bar{S} , які забезпечують перемішування слідів за окремими струменями в загальну зону циркуляції. Як показали дослідження, середній рівень складу паливної суміші за стабілізатором практично не залежить від висоти уступу В. Це підтверджено за результатами відбору проб для В = 20 і 10 мм.

Необхідно відзначити, що дані отримані для одного значення висоти каналу. Але тим не менше, цей факт не зменшує їх практичного значення, так як навіть для пальників великих енергетичних котлів цього значення відстані цілком достатньо у разі реалізації зазначеної газодинамічної схеми.

Також необхідно зауважити, що дослідження з визначення середнього складу паливної суміші в зоні зворотних струмів стабілізатора полум'я проводилися при таких значеннях q , коли осі системи струменів мали значення далекобійності не більше ніж 60% висоти повітряного каналу. Така картина найбільш поширена у топкової практиці.

3.1.5 Визначення робочих меж параметрів паливорозподілу в СНС

Розглянуто результати дослідження «аномальних» явищ в СНС.

Цілий ряд вогнетехнічних завдань вимагає створення камер згоряння малих розмірів: ГТД, невеликі котли і тепло генератори наприклад НІСТУ-5 з витратою газу до 50 м³/год і менше. Характерний розмір колектора-стабілізатора в таких камерах не перебільшує 10 мм.

Такий варіант передбачений для високошвидкісних потоків, що мають місце у форсажних камерах, камерах промперегріву і т.д. для зниження опору високошвидкісних потоків у відключеному стані.

Для таких невеликих пальників (потреба в яких величезна) потрібне застосування мінімально можливих діаметрів. Необхідні дослідження проводилися за вищенаведеною методикою.

У зоні зворотних струмів за уступом в ізотермічних умовах відбиралися проби на метан. Діаметр газороздавальних отворів варіювалося в наступних межах $d = 0,7; 0,6; 0,5$ мм. При проведенні досліджень забезпечувалися широкі межі зміни відносного кроку розташування газороздавальних отворів $\bar{S} = 3; 5; 8; 12$. Досліди проводилися за висоти уступу $B = 20$ мм. Швидкість повітряного потоку і значення гідродинамічного параметру у ході експерименту не змінювалися і були рівні відповідно $q = 12$, $W_{\text{п}} = 10$ м/с. На рис.3.7 представлені результати експериментів.

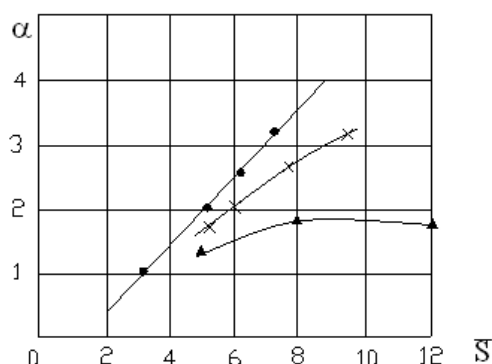


Рис. 3.7 Вплив діаметру газорозповсюджуючих отворів на сумішоутворення в ближньому сліді за системою струменів

$d = 1; 2; 3; 4; 5; 6; 8; 10$ мм; \times - 0,7 мм; \blacktriangle - 0,5 мм

Як видно, дані для діаметра 0,75 мм задовільно узгоджуються з раніше проведеними дослідженнями для значно більших діаметрів. При зменшенні значення діаметру до 0,6 і особливо 0,5 мм помітно змінюється середній рівень складу паливної суміші за стабілізатором і спостерігається значне «перезбагачення» зони зворотних струмів паливом. Причому, чим більший відносний крок розташування газороздавальних отворів, тим більше відхилення від залежності, отриманої для великих діаметрів.

Якщо для великих діаметрів теоретично підрахований і експериментально визначений склад суміші при відносному кроці газороздавальних отворів вже при значеннях більше 5 не забезпечував горючі концентраційні прибудови, то при малих діаметрах ($d = 0,5$ мм) навіть при $\bar{S} = 12$ надлишок повітря забезпечує $\alpha_{\text{зс}} < 2$ концентрацію паливної суміші в зоні зворотних струмів. Дослідження при горінні підтвердили цей факт. Горіння за пілоном спостерігалось навіть при $\bar{S} = 8$ і при $\bar{S} = 12$. Були відзначені дуже вузькі межі стійкості горіння щодо

гідродинамічного параметру. Дослідження зміни глибини проникнення при малих діаметрах і великих відносних кроках показало великий розкид даних, викликаний очевидно великими відстанями між газо-роздавальними отворами.

Проведені дослідження впливу розмірів діаметрів газороздавальних отворів на горіння в СНС дозволяють зробити наступні висновки.

Значення діаметрів газороздавальних отворів до значень 0,7 мм забезпечують автономність процесу сумішоутворення за даної газодинамічної схеми.

При зменшенні значення діаметрів до 0,6 мм автономності порушується внаслідок того, що товщина прикордонного шару струменя приблизно зберігає постійні розміри для малих діаметрів струменів і при зменшенні абсолютного відстані між ними (\bar{S}) стає більш значимою. Тому відбувається «перезбагачення» прикордонного потоку повітря паливом, яке потім потрапляє в зону зворотних струмів за уступом. Той факт, що при малих відносних кроках \bar{S} склад суміші для струменів з малим діаметром збігається зі складом суміші для великих діаметрів підтверджує це.

Порушення автономності робочого процесу за даної газодинамічної схеми спостерігається не тільки за гранично малих діаметрів газороздавальних отворів, але і при малих швидкостях витікання газу з отворів.

Визначення гранично малих швидкостей витікання газу, які б забезпечили горючі концентрації в зоні стабілізації горіння, пов'язане із завданнями розширення меж регулювання потужності пальників (для сушки котлів, забезпечення режимів холостого ходу ГТД та ін.). З цією метою при відносному кроці розташування газороздавальних отворів $\bar{S} = 3,5$ і $3,4$ для діаметрів 1 і 1,5 мм відповідно проводилися експерименти на уступі $B = 20$ мм при значеннях L_1 , які б виключали взаємодію зон циркуляційної течії за струменями з ближнім слідом за уступом.

Значення гідродинамічного параметра варіювалося в межах від 4 до 0,5 і нижче.

Відбір проб на метан в зоні зворотних струмів за стабілізатором показали, що існує критичне значення $q_{кр}$ гідродинамічного параметра нижче якого відбувається різке порушення автотельності робочого процесу. Це відображається в істотному «збагаченні» паливної суміші в зоні зворотних струмів.

Обробка багатьох варіантів показали, що автотельність зберігається до $\bar{q}_{кр} < 2$. Для розкриття суті цього явища був здійснений відбір проб на метан при переході значень гідродинамічного параметра через критичне значення. Це дозволило виявити різку зміну далекобійності системи струменів. Таке зменшення далекобійності або «прилипання» струменів до поверхні можливо пояснити ефектом Коанда. Роль криволінійної поверхні в даному випадку грає зона циркуляції за системою струменів. Різке зменшення глибини проникнення системи струменів пального у потік окиснювача при незначній зміні витрати пального призводить до збагачення шару окиснювача.

При подальшому зменшенні гідродинамічного параметра настає збіднення складу паливної суміші за уступом пов'язане з тим, що струмені втрачають свою характерну структуру і витрати пального не вистачає на підживлення зони зворотних струмів, яка зберігає постійний об'єм.

Дані дослідження дозволили встановити, що палиниковий модуль з досліджуваної газодинамічною схемою має автотельний режим робочого процесу обмежений критичним значенням гідродинамічного параметра $\bar{q}_{кр} \approx 2$. Це дозволило пояснити аномальні явища стійкості горіння.

Таким чином, автотельний режим роботи палиникового пристрою на основі модуля з СНС забезпечується в діапазоні $\bar{q}_{кр} = 2 \dots 12$.

Встановлені особливості не означають, що палиниковий пристрій не працює при менших значеннях гідродинамічного параметра, тобто менших потужностях. Досвід показав, що палиник працює і при витратах газу в десятки разів менше ніж $G_{кр} \sim \bar{q}_{кр}$, що забезпечує коефіцієнт регулювання потужності $K_p = N.M._{ax}/N.M._{in}$ більше 10. Однак даний режим роботи не розрахунковий та

ускладняється підтриманням необхідного співвідношення газ-повітря. Зміна складу паливної суміші в зоні зворотних струмів (не дивлячись на те, що концентрації метану горючі) можуть викликати при горінні деякі пульсаційні явища, а це в свою чергу може викликати акустичні резонансні явища в камері згорання.

3.1.6 Дослідження циркуляційної зони в ближньому сліді за системою струменів

3.1.6.1 Дослідження температурних полів в зоні стабілізації факелу СНС

На рис. 3.8 - 3.11 наведені типові результати вимірювання температури за однорядною системою струменів при наявності приструменевої ніші в умовах горіння з різними значеннями швидкості повітря і гідродинамічного параметра \bar{q} .

Для всіх розглянутих полів температури характерна наявність стійкої вихрової структури з високотемпературним ядром в центрі, що свідчить про наявність надмірної тепловиділення (процесу горіння). Очевидно і те, що при зміні значень параметра q (і відповідну зміну далекобійності струменів метану) змінюються як розміри, так і положення вихору. У випадках не сформованої структури струменів (що відповідає значенням параметра $\bar{q} < 2$, вихор розташовується у нішовій порожнині поблизу від газорозподільних отворів. При збільшенні далекобійності системи струменів (що відповідає значенням $\bar{q} = 5 \dots 10$) помітний вихід центру вихрової структури за рівень зрізу нишевої порожнини (рис. 3.10, 3.11). Така картина зберігалася при різних значеннях швидкості повітря (25 і 50 м/с).

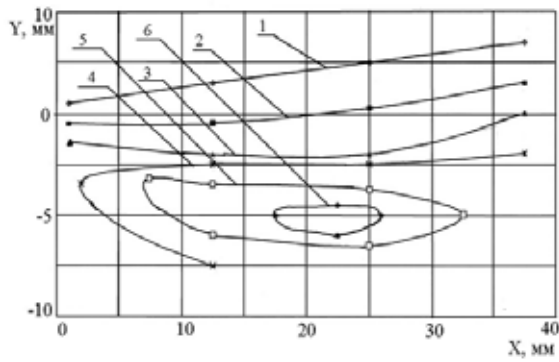


Рис. 3.8 Температурне поле за

СНС

при $W_{п} = 50$ м/с и $q = 1,4$;

1 – $T = 400^{\circ}\text{C}$; 2 – $T = 500^{\circ}\text{C}$;

3 – $T = 700^{\circ}\text{C}$; 4 – $T = 1000^{\circ}\text{C}$;

5 – $T = 1100^{\circ}\text{C}$; 6 – $T = 1200^{\circ}\text{C}$.

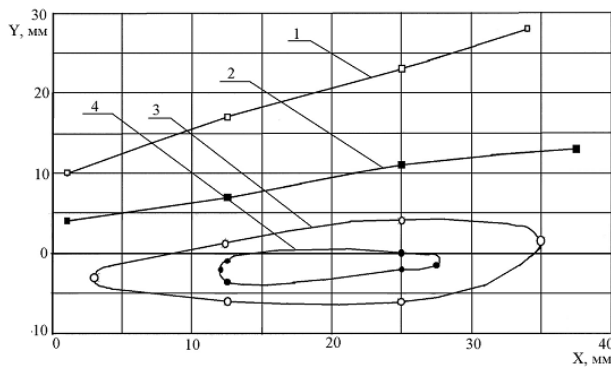


Рис. 3.9 Температурне за СНС

при $W_{п} = 50$ м/с и $q = 7$:

1 – $T = 400^{\circ}\text{C}$;

2 – $T = 800^{\circ}\text{C}$;

3 – $T = 1100^{\circ}\text{C}$;

4 – $T = 1300^{\circ}\text{C}$

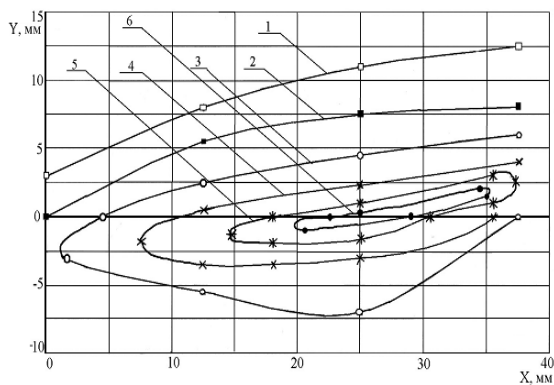


Рис. 3.10 Температурне за СНС

при $W_{п} = 25$ м/с и $q = 7$:

1 – $T = 400^{\circ}\text{C}$; 2 – $T = 600^{\circ}\text{C}$;

3 – $T = 800^{\circ}\text{C}$; 4 – $T = 1000^{\circ}\text{C}$;

5 – $T = 1100^{\circ}\text{C}$; 6 – $T = 1300^{\circ}\text{C}$.

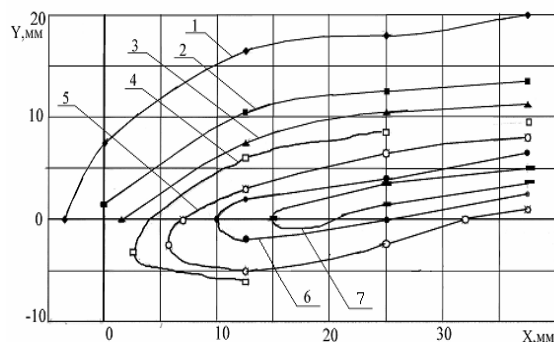


Рис. 3. 11 Температурне за

СНС

при $W_{п} = 25$ м/с и $q = 14$:

1 – $T = 400^{\circ}\text{C}$; 2 – $T = 600^{\circ}\text{C}$;

3 – $T = 800^{\circ}\text{C}$; 4 – $T = 1000^{\circ}\text{C}$;

5 – $T = 1200^{\circ}\text{C}$; 6 – $T = 1400^{\circ}\text{C}$;

7 – $T = 1450^{\circ}\text{C}$.

Експерименти з візуалізацією циркуляційних зон, результати яких

наведені на рисунках, показують наявність при $\bar{q} > 2$ структурних змін течії в СНС і існування загальної циркуляційної зони за системою струменів з різним ступенем впливу циркуляційної течії у нішовій порожнині на створення спільної зони циркуляції.

У дослідженому діапазоні конструктивних і режимних параметрів довжина загальної зони циркуляції $L_{зц}$ слабо залежала від коефіцієнта надлишку повітря в межах $1 < \alpha < 2$ і змінювалася у досить вузьких межах $1,1 < L_{зц} < 1,5$. При збільшенні швидкості газу або повітря стійкість циркуляційної зони зберігалася. Ширина циркуляційної зони однозначно визначалася далекобійністю однорядової системи струменів.

Загальна зона циркуляції, що виникала в результаті злиття всіх вихрових структур в одну, виникала при значеннях q , які відповідають робочому діапазону зміни потужності ПП ($0,3 N_{ном} < N$, де $N_{ном}$ - номінальна потужність пальника).

3.1.6.2 Дослідження розміру циркуляційної зони при горінні

При цьому також проводилася підсвічування факела солями натрію. Візуальні спостереження утворення спільної циркуляційної зони задовільно корелюються з характером температурних полів. З цих же малюнків видно як змінюється структура течії при переході через критичне значення гідродинамічного параметра ($\bar{q}_{кр}$).

Також можна зробити висновок про незначну зміну об'єму циркуляційної зони у майже всьому діапазоні зміни витрати газу і відповідно потужності ПП, який обмежений розмірами нішевої порожнини $V_{зц}^{min}$ і розмірами циркуляційної течії за системою струменів $V_{зц}^{max}$ (рис. 3.12).

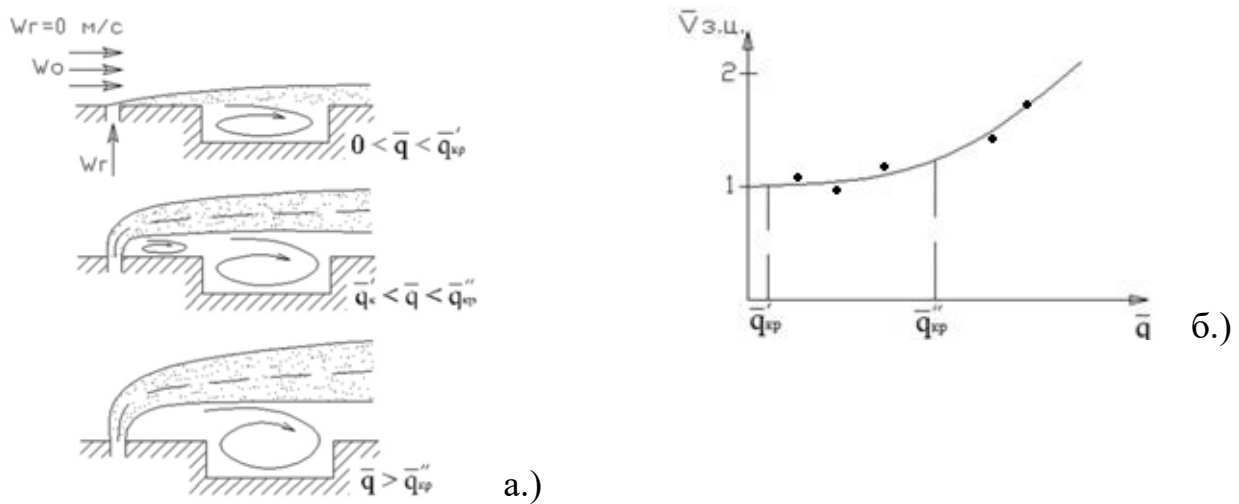


Рис. 3.12 Характеристики зміни структури течії а.) та відносній розмір циркуляційної зони б.) в залежності від гідродинамічного параметра у стабілізаторі на основі СНС

3.1.7 Дослідження термічного стану робочих поверхонь струменевонішевих модулів

Температурний стан теплонапружених елементів модуля і пальникового пристрою досліджувалося як на лабораторному стенді (рис.3.13, б), так і в умовах промислової експлуатації на котлі ДКВР-10/13 (рис.3.13, а).

Модулі виготовлені зі сталі 45 з товщиною стінки 2,5 мм. Умови випробувань були наступними: швидкість потоку повітря $W_{п} = 10$ м/с. Діаметр газо-роздавальних отворів $d=2$ мм. Відносний крок розташування газо-роздавальних отворів в один ряд $\bar{S} = S/d = 3,4$. Максимальне значення гідродинамічного параметра $\bar{q} = 12$.

У найбільш теплонапружених ділянках модулі препаровані хромель-алюмелевими термоелектричними датчиками (місця установки термопар позначені на рисунку). На рис 3.13 а) наводяться результати вимірювання температури поверхні металу при максимальній потужності пальникового пристрою, що відповідає $\bar{q} = 12$. Як і очікувалося, максимальна температура для модуля спостерігається на торцевій стінці і не перевищує 260 °С. Для повітряної перегородкою (рис.3.13 б) максимальні температури розташовуються на перегородці, яка знаходиться в зоні горіння. Хоча пластина охолоджується

потокom повітря, однак високий рівень температур в ядрі факела призводить до її перегріву і за рахунок теплопередачі – до деякого перегріву торцевої стінки в порівнянні з пілоном без пластини.

Добре проглядається відносно невисокий і постійний рівень температур торцевої стінки при значному діапазоні зміни швидкості витікання газу. І тільки при значеннях гідродинамічного параметра менших 2 (коли проявляється ефект Коанда) проявляється деяке підвищення температури, пов'язане з перезбагаченням зони зворотних струмів і підвищенням її світимості.

Температура торцевої стінки пального пристрою підтримується в необхідному інтервалі за рахунок охолоджуючого впливу газу, який з великою швидкістю обтікає її внутрішню поверхню.

Рівень підігріву газу в пілоні невисокий з точки зору протікання пірогенних процесів. Таким чином, є ще великий запас для більш глибокого охолодження пального пристрою за рахунок підігріву газу.

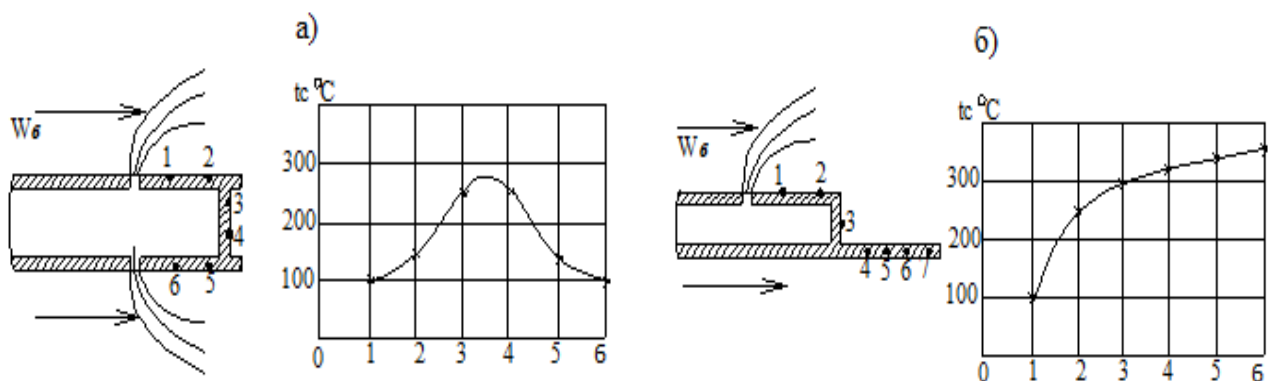


Рис. 3.13 Температурний стан модулів

3.1.8 Визначення меж сталості в струменево-нішових модулях

На рис. 3.14 представлені результати дослідження сталості горіння в струменево-нішовому модулі при зміні сумарного балансового коефіцієнта надлишку повітря, розрахованого по витраті палива і окисника. Дослідження проведені на різних фіксованих швидкостях потоку, що набігає. Верхня межа швидкості обмежена технічними можливостями стенду і становила 80 м/с.

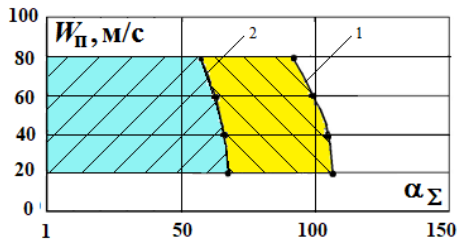


Рис. 3.14 Межі стійкої роботи СНС по загальному коефіцієнту надлишку повітря

Як показали дослідження сумішоутворення, локальний склад паливної суміші в циркуляційній зоні при зміні значень режимних факторів в широких межах практично не виходить за концентраційні межі запалення рис. 3.15, забезпечує стійке горіння. При цьому загальний коефіцієнт надлишку повітря змінюється в достатньо широкому діапазоні ($\alpha \geq 0,6 \dots 100$). Необхідно відзначити і наступний момент, характерний для даного модуля з системою ніш: відбувається розширення меж стійкого горіння в порівнянні із струменево-нішевим пілоном, які мають одну торцеву нішу. Механізм стабілізації в даному випадку добре поєднується зі структурою течії в струменево-нішевому модулі. В діапазоні зміни режимних параметрів, відповідному $0,6 < \alpha < 60$ значення гідродинамічного параметра q забезпечує створення загальної циркуляційної зони рис.3.16. з необхідною концентрацією паливної суміші, що забезпечує надійну стабілізацію процесу горіння.

Збільшення значень коефіцієнта надлишку повітря більше 60 пов'язано зі зменшенням витрат газу, і, відповідно, його швидкості. При цьому індивідуальна структура струменів вироджується і відбувається перебудова течії за системою струменів. Загальної зони циркуляції вже не існує, і полум'я може стабілізуватися тільки течією в нішевій порожнині. Стійкість течії і якість сумішоутворення в нішовій порожнині достатні для розширення меж сталого горіння до значень $\alpha = 100$ і більше.

Зазначена властивість дозволяє забезпечувати легкий і безпечний розпал даного пальника на гранично малих витратах газу, що в значній мірі знижує небезпеку загазування топкового простору і вибухонебезпеки паливної суміші. Крім того, забезпечується можливість роботи ВО на гранично малих теплових навантаженнях (в режимі сушки футеровки або підтримки теплового стану).

Можливість запуску ПП на гранично низьких теплових навантаженнях і плавного виходу на робочі параметри дозволяє також істотно збільшити ресурс роботи ВО, а відповідно збільшити тривалість міжремонтного періоду, і т.п.

При аналізі умов стабілізації горіння з точки зору теплового балансу, можна відзначити, що існує певний резерв розширення меж сталої роботи пальників за коефіцієнтом надлишку повітря за рахунок підвищення температури стінок нішевої порожнини в межах збереження міцності матеріалу з якого виготовлені пальники.

3.2 Визначення характеристик пальникового модуля на основі СНС з приструменевою та торцевою нішею

Для проведення комплексного дослідження всіх стадій робочого процесу обраний модуль з приструменевою і торцевою нішами (рис. 3.15).

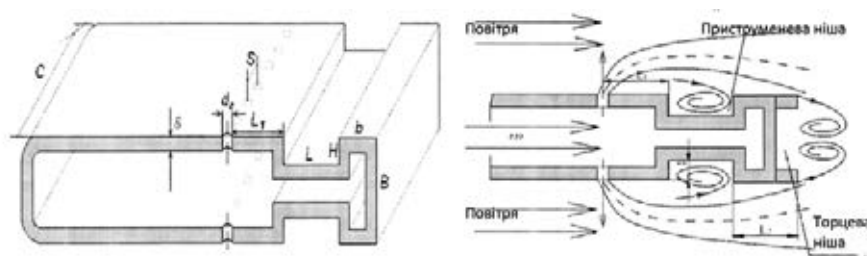


Рис. 3.15 Струменево-нішевий модуль з приструменевою і торцевою нішами

Дослідження вигорання природного газу з розміщенням СНС на колекторі показали, що в порівнянні з пристінковим розташуванням істотно інтенсифікуються масообмінні процеси, і як наслідок, скорочується довжина факела у 1,5..2 рази (рис. 3.16).

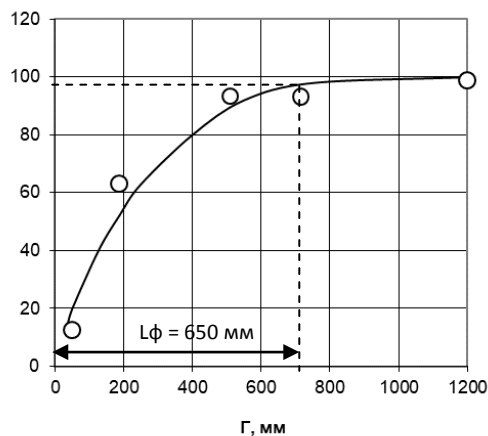


Рис. 3.16 Вигорання природного газу ($\text{CH}_4 = 98\%$) за струменево-нішевим модулем

Вигорання палива в такій системі задовільно описується формулою:

$$\eta_z = 100 \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{L}{182}\right)^{0.84}}\right) \quad 3.1$$

На основі аналізу впливу конструктивних і режимних факторів на характеристики робочого процесу, для даного модуля передбачаються наступні взаємозв'язки, представлені в таблиці 3.1

Таблиця 3.1

Взаємозв'язок режимних (а) і конструктивних (б) параметрів СНС та їх вплив на характеристики робочого процесу пального модуля:

<p>t → якість сумішоутворення</p> <p>t_1 → якість сумішеутворення; емісія CO и NO_x.</p> <p>t_2 → якість сумішоутворення; емісія CO и NO_x.</p> <p>H → B</p> <p>L → t_1, t_2</p> <p>L/H → формування зони циркуляції;</p> <p>d → $G_r; P_r^{\min}$; межі займання</p> <p>B → t_r тепловий стан; K_f; формування зони циркуляції.</p> <p>C → рівномірність розподілу пального; емісія CO и NO_x.</p> <p>S → G_r рівномірність розподілу пального; емісія CO и NO_x.</p> <p>d → G_r якість сумішеутворення; емісія CO и NO_x.</p> <p>\bar{S} → формування зони</p>	<p>$w_0 \rightarrow \alpha$</p> <p>$w_r \rightarrow G_r$</p> <p>$\bar{q} \rightarrow h_c$; формування зони циркуляції.</p> <p>$h_c \rightarrow K_f$; аеродинамічний опір.</p> <p>$l_{zy} \rightarrow$ стабілізація горіння.</p> <p>$t_r \rightarrow \eta_r$; стабілізація горіння.</p> <p>$t_b \rightarrow \eta_r$</p> <p>$t_{ст} \rightarrow$ надійність елементів ПП.</p> <p>$\alpha \rightarrow \eta_r; t_{пс}$; емісія CO и NO_x.</p>
--	--

циркуляції; склад паливної суміші в зоні стабілізації.

$\beta_1; \beta_0 \rightarrow P_r^{min}$ пульсацій ний тиск пального, тепловий стан.

$K_f \rightarrow P_0^{min}$; аеродинамічний опір.

Як видно з рис. 3.17, 3.18 склад паливної суміші в області стабілізації підтримується на стехіометричному рівні у досить широких межах подалекобійності струменів газу. Сталість складу пальної суміші підтримується на ряду зі стійкістю вихорової структури. Це забезпечує достатньо широкий діапазон регулювання ПП по потужності.

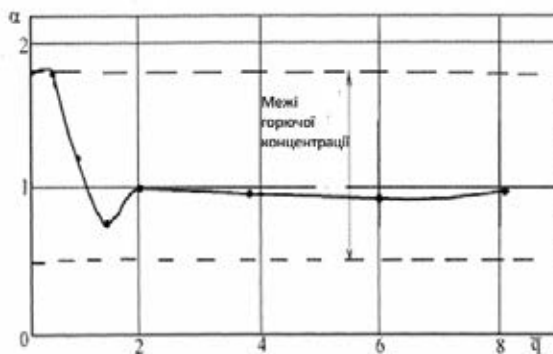


Рис. 3.17 Зміна середнього складу паливної суміші нішевій порожнині

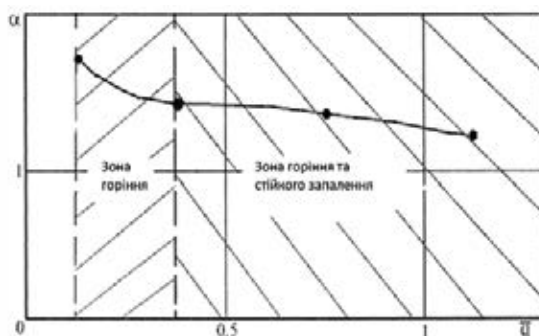


Рис. 3.18 Середній склад суміші в нішевій порожнині при зриві факела на мінімальних витратах палива

Струменево-нішевий модуль показав унікальні можливості стійкого горіння при мінімальних витратах газу. Як видно (рис.3.18) При $q \ll 2$ забезпечуються концентраційні умови для стійкої стабілізації факела течією в

нішовій порожнині. Такі можливості забезпечує запуск ПП при мінімально можливому тиску газу ($P_{г} < 5 \div 10$ Па).

3.3 Дослідження гідродинаміки потоку при обтіканні не прямокутних нішевих порожнин

При проведенні експериментів були ретельно досліджені швидкісні, температурні та концентраційні поля в умовах СНС і в системі модулів. Повітряний потік обтікає стабілізатор, що зумовлює виникнення за ним циркуляційної зони, в середині якої перебуває протитечія. Між зворотним і прямим струмом виникає пограничний шар, що має великий градієнт швидкостей, та як наслідок, значний коефіцієнт турбулентного обміну. Так, за стабілізатором знімалися поля швидкостей, по яких були отримані епюри для визначення розмірів і форми циркуляційної зони в різних перерізах. Швидкісні поля визначались при холодних продувках. Схема для визначення профілю безрозмірної надлишкової швидкості в поперечних перерізах початкової ділянки турбулентного сліду за стабілізатором показана на рис. 3.27. Отже, процес відбувається в автотельній області та значення безрозмірної швидкості, що отримали, добре розміщуються на кривій, розрахованій за формулою Шліхтинга:

$$\Delta W = (1 - \eta^{3/2})^2, \quad (3.2)$$

Де, $\Delta W = \frac{W_1 - W}{W_1 - W_2}$ - безрозмірний приріст швидкості; W_1 - початкова швидкість потоку, що набігає; W_2 - швидкість на осі рециркуляційної ділянки; W - швидкість в будь-якій точці пограничного шару; $\eta = \frac{y - y_2}{b}$ - безрозмірна координата; y - ордината, що відповідає даній точці зі швидкістю W , y_2 - ордината нижньої границі пограничного шару в даному перерізі; b - товщина пограничного шару.

З дослідів випливає, що так як течія автотельна, то відносна форма (і довжина) зони рециркуляції не залежить від характерного розміру стабілізатора ($B_{СТ}$) і швидкості потоку, що набігає.

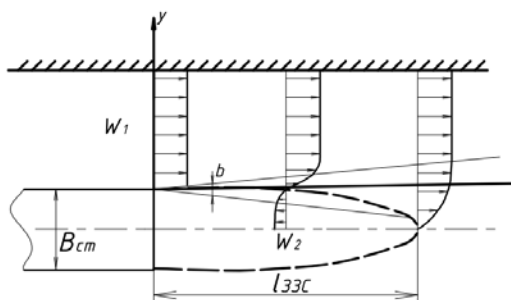


Рис. 3.19 Модель потоку за стабілізатором плоского типу

При моделюванні обтікання стабілізаторів важливим параметром є значення розміру циркуляційної течії. Коли виникає обтікання плоского модуля, значення вихрової структури за рухом потоку складає до трьох калібрів (в середньому) поперечного розміру (висоти) модуля. На рисунку 3.29. приведено порівняння результатів візуалізації у вигляді саже керосинової суміші з результатами чисельних обчислень обтікання каверни. Для експерименту обрана ніша розмірами $L/H= 80/20$, якщо каверна трапецієвидна - розміри ті ж, але кут нахилу бокових стінок приймається 45° . Плоска накладка довжиною $L_3 - 7$ мм. Так, форма вихрової структури визначається формою порожнини. В свою чергу, в розглянутих випадках, розміщення центру зони зворотних струмів визначає розташування керосинового пухиря.

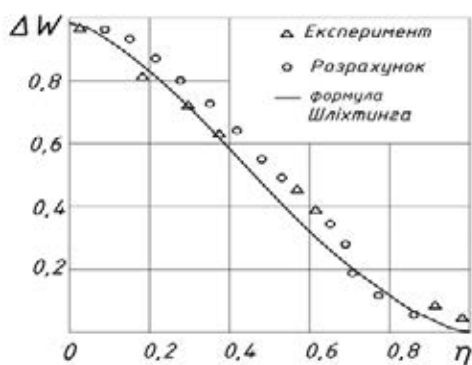


Рис. 3.20 Профіль безрозмірної швидкості в пограничному шарі зони циркуляції за стабілізатором прямокутного типу

при: $W_1=15$ м/с, за ширини стабілізатору $B_{ст}=30$ мм.

Його зміщення відбувається від передньої стінки до центру і до задньої стінки, відповідно до зміни геометрії від прямокутної до трапецієвидної, з кутами нахилу - 45° і трапецієвидної з плоским "структуратором" на передній стінці. Модель kw-sst пристосована до моделювання відривних потоків, тому й була обрана в ролі моделі турбулентності. Отже, якщо ніша прямокутна (рис.

3.20, а) результати відображають каверну закритою, тому що пограничний шар приєднується до дна ніші. При моделюванні даного процесу при нестационарному режимі отримано результати відмінні у часі, завдяки руху вихрової структури в напрямку руху основного потоку повітря (рис. 3.29).

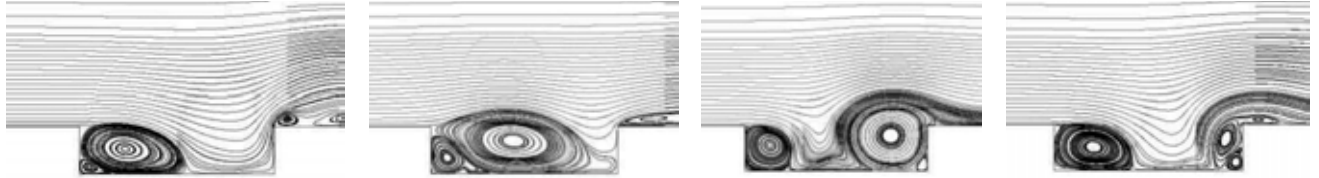


Рис. 3.31 Візуалізація утворення вихрів потоку

З літературних джерел відомо, що обмін масою між основним потоком та зоною ЗС в ніші відбувається з періодом в 3-5 обертів вихору, а його частоту обертання можна визначити швидкісним режимом системи.

Дані на рис. 3.30 були отримані в стаціонарному режимі. Видно, що порівнюючи результати для ніші зі скошеними стінками, вихрова структура розміщується в геометричному центрі ніші, займаючи весь об'єм каверни. В умовах на рис. 3.30, б в «затіненій» зоні під структуратором створюється застійна зона, а вигляд вихору змінюється, зміщаючись до задньої стінки. Отже, порівняння гідродинаміки потоку свідчить про достатню міру чисельних результатів і можливість використовувати додатковий інструмент при вивченні властивостей закручених течій в умовах СНС.



а.)



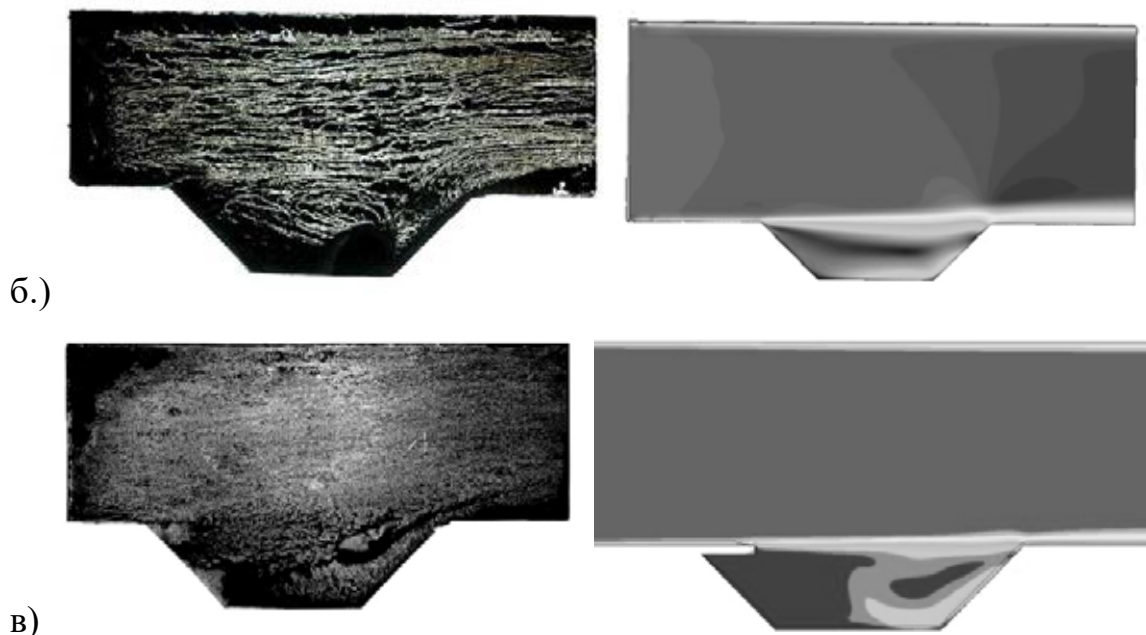


Рис. 3.22 Візуалізація обтікання нішевої порожнини при зміні її конфігурації (за допомогою саже-газової суміші)

при обтіканні її потоком повітря $W_{\text{п}}=25\text{м/с}$, $L/H=80/20$: а)-ніша прямокуного типу, б) – трапецієвидна ніша зі структуратором плоского типу на зривній кромці стабілізатору.

3.3.1 Дослідження гідродинаміки потоку повітря в СНС за допомогою методів термоанемометрії

Результати експериментів зображувались в центральній частині каверни як розподіл середніх швидкостей і їх пульсацій. Експеримент відбувався при числах Рейнольдса від $23 \cdot 10^3$ до $84 \cdot 10^3$. Еквівалентний діаметр повітряного каналу пальника був обраний в якості головного розміру в числі Рейнольдса, а в ролі визначальної швидкості виступала швидкість потоку в центрі каналу пальника.

Щоб аналізувати вплив «структура тора» на розподілення середньої швидкості потоку на рис. 3.5 показані дані залежностей $U = f(y)$ для порожнини з наявністю "структуратора" та без нього. Аналогія проводилась при рівних швидкостях потоку в перетині, який проходить крізь центр нішевої порожнини ($U = 18 \text{ м/с}$), що відноситься до числа Рейнольдса $84 \cdot 10^3$.

На рис. 3.31 приведено аналіз розподілу, який свідчить про те, що у

випадку коли немає «структура тора» у каверні розвивається звичайна відривна течія, яка має максимальну швидкість зворотного руху - 5 м/с, це становить 36 % від швидкості основного потоку, що протікає в центральному каналі пальника. При цьому профіль середніх швидкостей потоку в центрі пальника має прямокутний обрис, на це вказує залежність $U = f(y)$ для висот y в діапазоні 30 - 60 мм. Вище наведений факт дійсний також для каверни зі "структуратором" і вказує на правильність проведення градуювання датчика термометра в центрі каналу пальника прямокутного обрису. У випадку, коли «структуратор» встановлений, аналіз розподілу швидкостей для порожнини свідчить про формування складного, з гідродинамічної точки зору, зображення течії в каверні – наявність "структуратора" дає змогу розділити суцільну вихрову зону (що можна спостерігати в каверні без "структуратора") на структуру окремих вихорів, які взаємодіють між собою (про це засвідчує деформація профілю швидкості на висоті 0 - 10 мм). Інформацію, що приведена на рис. 3.32 можна доповнити використавши розподіл середньоквадратичних пульсацій швидкостей, які відносяться до середньої швидкості потоку в центрі каналу, що дорівнює 18 м/с та показані на рис. 3.6.

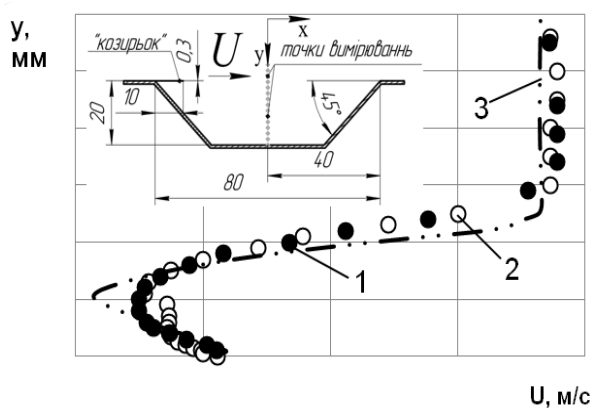


Рис. 3.23 Розподіл середньої швидкості потоку

1 – Функція $U = f(y)$ для порожнини без «структура тора»; 2 – Функція $U = f(y)$ для порожнини з наявністю «структура тора»; 3 – дані, отримані в ході чисельного експерименту при використанні трапецієподібної ніші

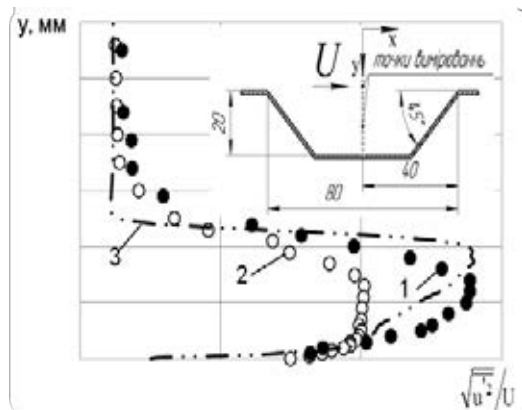


Рис.3.24 Розподіл середньоквадратичних пульсацій швидкості течії в перерізі, що проходить крізь центр каверни ніші

1, 2 – Функція $\sqrt{u^2}/U = f(y)$ для порожнини без "структуратора" та, відповідно, з наявністю «структура тора», 3 – розподіл середньоквадратичних пульсацій для трапецієподібної ніші за результатами математичного моделювання.

Проаналізувавши результати, можна зробити висновок, що наявність «структура тора» знижує загальну турбулентність потоку в порожнині на 29 % порівнюючи з випадком без наявності «структура тора». Отже, турбулентність потоку в центрі каверни складає 14 %, а в той же час в каверні з наявністю «структуратора» вона дорівнює 10 %. При цьому, необхідно засвідчити, що наявність "структуратора" змінює тип профілю пульсацій швидкості відходячи від параболічного вигляду (що характерно для порожнини без «структура тора») до спрямленого.

Дані, отримані автором при дослідженні складу потоку в плоскій прямокутній каверні, з такими самими геометричними розмірами, що і аналізувалась в даній роботі, використовуються для порівняння отриманих результатів. З рис. 3.32, видно, що залежність $\sqrt{u^2}/U = f(y)$ середньоквадратичних пульсацій швидкості в ніші прямокутного обрису має той самий характер, що і ніша без «структура тора».

3.3.2 Моделювання процесу сумішоутворення в СНС не прямокутного типу

Головним параметром при виконанні аналізу впливу геометричних характеристик на процес роботи пальників є моніторинг полів концентрацій в

місці стабілізації полум'я. Дані з роботи використовуються для порівняння експериментальних результатів з результатами числових розрахунків. В літературних джерелах показано, що в умовах струменево-нішевої системи осереднена концентрація палива по об'єму ніші фіксується напряду в її геометричному центрі.

Поля розподілу масової концентрації метану в перерізі, який проходить крізь центр нішевої порожнини (перетин вибраний подібний до схеми на рис. 3.31 і 3.32) показано на рис. 3.33. Для метану (в числових розрахунках використовується природний газ) границі масової концентрації займання паливної суміші складають $C_m=3...9\%$. З результатів, представлених нижче, видно, що в перетині наявні зони з підвищеним змістом палива, вони мають відмінну від кола форму та відповідають паливним струменям. Що стосується частини під струменями, яка забезпечує стабілізацію СНС, її можна описати як зону з достатньо високою величиною рівномірності зосередження палива в об'ємі суміші і при процесі з відносним кроком $\bar{S}=3,2$ масова концентрація в середньому дорівнює приблизно 10%, а при $\bar{S}=6,2$ – 0,77 %. Отже, за результатами моделювання діапазону роботи, зміна відносного кроку \bar{S} перебуває між значенням 3,2, та кроком значно меншим за 6,4. Аналіз чисельних результатів, отриманих в роботі, з літературними даними показано на рис. 3.34

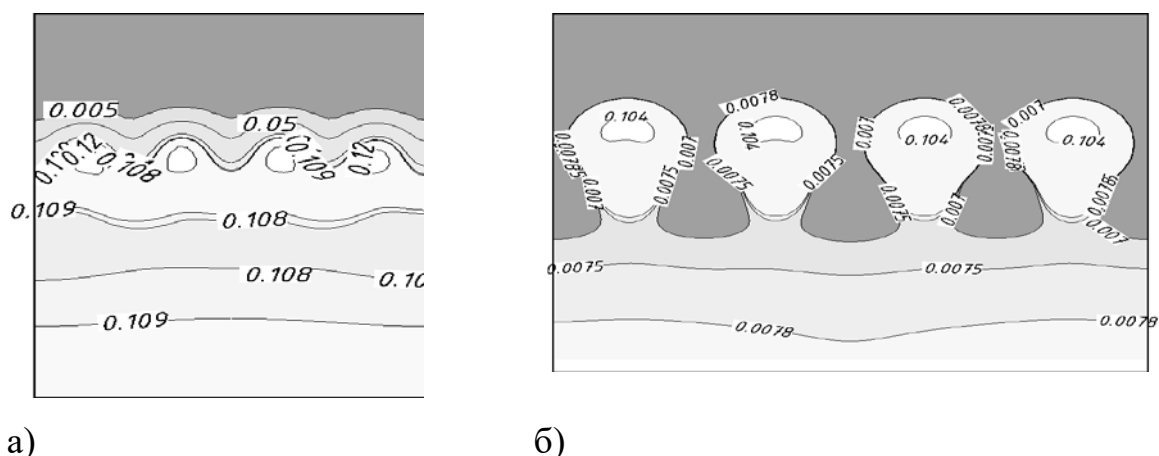


Рис. 3.25 Зосередження об'єму метану в середньому перерізі каверни ніші при різних значеннях відносного кроку розміщення отворів для палива $\bar{S}=3,2$ (а) та 6,2 (б), $L/H=40/10$, $W_n=25$ м/с, $d=2$ мм, $q=5,25$

Результати газового аналізу, виконаного в лабораторних умовах, відрізняються від результатів чисельних розрахунків і їх співпадіння найбільше показано в проміжку значень $\bar{S} = 4...5$. Для подальшого використання даної математичної моделі, що виконує аналіз впливу кроку перпендикулярних струменів на процеси сумішоутворення в прямокутних і трапецієвидних порожнинах, потрібно використовувати залежність, наведену нижче:

$$C_m = 1,9 \cdot \sqrt{\bar{C}_m}, \quad (3.3)$$

де \bar{C}_m - середньо інтегральна масова концентрація метану в об'ємі ніші, отримана за результатами моделювання. Отже, при аналізі результатів, що були отримані, можна зафіксувати задовільний збіг фізичних уявлень відносно закономірностей процесів, що досліджуються, де найважливіше - це кількісна взаємодія масової концентрації та відносного кроку розміщення отворів і висока ступінь перемішування суміші в ніші.

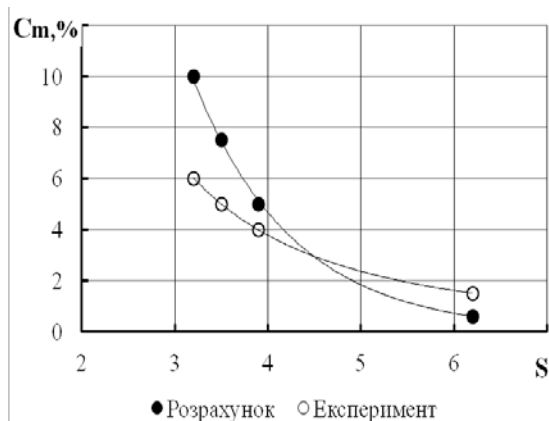


Рис. 3.26 Значення зосередження об'єму метану в геометричному центрі каверни ніші залежно від відносного кроку розміщення отворів для палива \bar{S} при: $W_{II} = 25$ м/с, $q = 5,25$, $d = 2$ мм, $L/H = 40/10$

Характерним для результатів, які були отримані, є те, що збіг експериментальних даних з розрахунковими, при $\bar{S} \approx 4,5$, отримується гідродинамічною перебудовою структури течії, що зв'язано зі зміною взаємодії системи струменів і переходу від системи струменів до самостійних струменів, які більш незалежно розвиваються в потоці. В порівнянні з експериментальними значеннями, розрахункові результати достатньо падають зі збільшенням кроку.

3.3.3 Моделювання температури продуктів згоряння в умовах СНС

На рис. 3.28. наведено порівняння результатів моделювання температур в струменево-нішевій системі. Порівняння температур наведено в двох перерізах,

один з них є геометричним центром нішевої порожнини, а другий – розташований на 75 мм від колектору розподілу палива за ходом течії. Результати математичного моделювання процесу спалювання природного газу показано на рис. 3.36, прикладом є топкова камера водогрійного котла НІИСТУ-5, що обладнаний одним пальником струменево-нішевого типу, який розташовується на передній стінці камери.

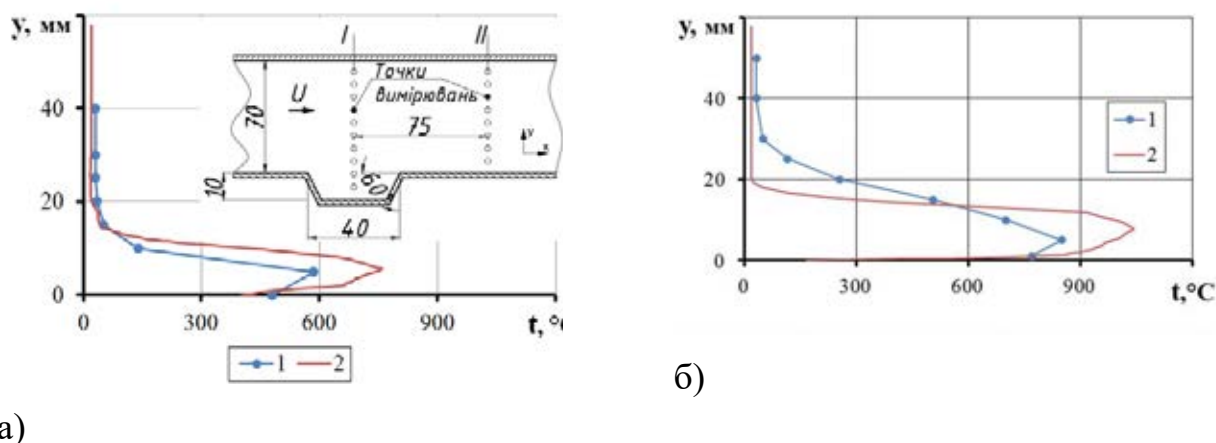


Рис. 3.27 Зіставлення температур полум'я при згорянні одного струменя пропану, що виходить з отвору діаметром 6 мм, зображено в двох перерізах

а) в перерізі, що проходить через геометричний центр ніші (I), б) переріз на відстані 75 мм від отворів для розподілу газу (II), 1 – результати моделювання, 2 – дані експерименту.

Результати, що приведені, вказують на задовільний збіг експериментальних даних та даних чисельного розрахунку: підвищення температур зафіксовано в області максимальних температур, а зниження – на границі транзитного потоку і реагуючої пальної суміші.

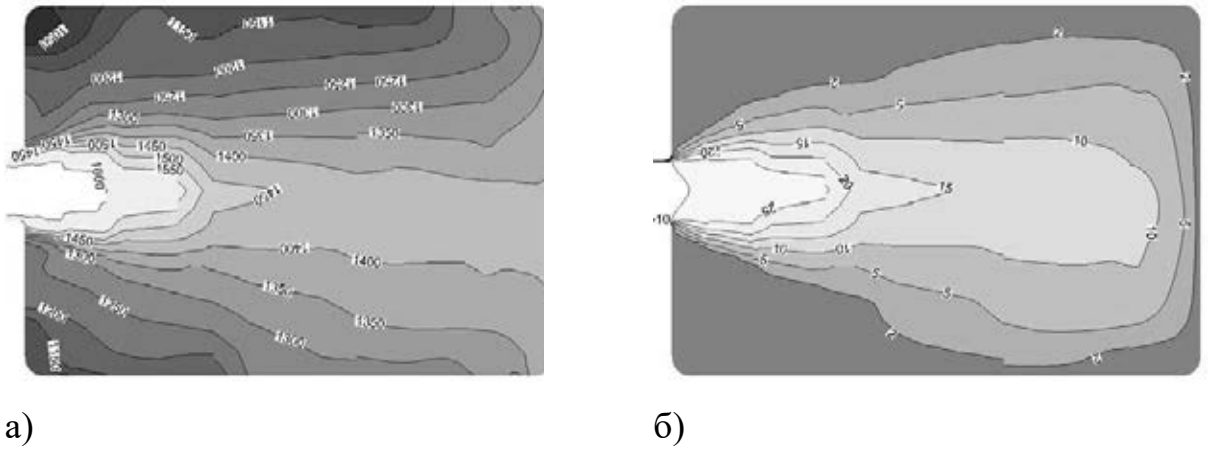


Рис. 3.28 Лінії температур, К (а) та швидкостей, м/с

(б) продуктів згоряння природного газу перерізі горизонтального напрямку, що йде крізь амбразуру топкової камери прямокутної геометрії з пальниками СНТ-11.

3.4 Висновки за розділом

Відповідно до матеріалу, що був викладений в третьому розділі, можна зробити наступні висновки.

1. Забезпечення в якості домінуючого механізму горіння так званого проміжного або мікродифузійного механізму. Останній поєднує в собі великою мірою риси кінетичного і дифузійного механізмів. А саме, в разі проміжного механізму має місце висока інтенсивність горіння, що властиво кінетичному механізму, і можливість організації горіння в досить широкому діапазоні зміни коефіцієнта надлишку повітря паливної суміші, що характерно для дифузійного механізму горіння.

2. Організація вискоєфективного сумішоутворення пального з окиснювачем за рахунок попереднього раціонального розподілу пального в потоці окиснювача за допомогою системи поперечних струменів, що вводяться у потік окиснювача.

3. Забезпечення стабілізації горіння за рахунок організації циркуляційних течій в нішевій порожнині, яка розташовується нижче за потоком за системою струменів. Даний спосіб стабілізації забезпечує:

- надійну стабілізацію горіння в широкому діапазоні навантажень;

- високу повноту згоряння в широких межах потужності ПП;
- значно менший аеродинамічний опір ПП у повітряному і газовому трактах у порівнянні з традиційними аналогами;
- зниження ймовірності виникнення вібрацій вогнетехнічного обладнання за рахунок пульсацій тиску потоків паливної суміші і продуктів згоряння.

4. Забезпечення необхідної інтенсивності згоряння палива і необхідних характеристик продуктів згоряння, перш за все за рахунок ефективної організації робочого процесу ПП в широкому діапазоні зміни коефіцієнта надлишку повітря за допомогою регулювання глибини проникнення струменів газу в сформований потік окиснювача і їх взаємодії з циркуляційною течією в нішевій порожнині.

5. Методи термоанемометрії показали, що:

- якщо замінити форму ніші з прямокутної на трапецієвидну максимальне значення турбулентності за перерізом центрального каналу та характер розподілу майже не зміниться;

- використання принішевого "структуратора" змінює характер вихрової течії, вона зміщується в сторону задньої за потоком стінки ніші, та при цьому зменшує максимальні значення турбулентності потоку (з 14 %, як для каверни без "структуратора", до 10 % для каверни з встановленим "структуратором") в геометричному центрі ніші;

- використання плоскої накладки ("структуратора") в СНС змінює вигляд вихрової структури в порожнині, та це свідчить про те, що ця накладка використовується в ролі регулятора турбулентності і може бути описана як аеродинамічний структуратор течії.

6. Наявність аеродинамічного структуратора в загалом покращує пускові параметри СНС завдяки зниженню концентрації турбулентності потоку в ніші, що дає змогу змістити процес з мікродифузійного горіння в бік більш дифузійного режиму спалювання палив.

3.5 Список використаних джерел

1. Абдулін, М.З., Сірий, О.А. (2013). *Вітчизняні енергоефективні технології – запорука енергетичної безпеки держави: колективна монографія*. Київ: НТУУ «КПІ», с. 224-233.
2. Baukal, C.E. (2003). *Industrial Burners Handbook*. London, New York, Washington D.C. CRC Press, 221 p.
3. Abdulin, M.Z., Siryi, O.A. (2014). Research of hydrodynamic flame stabilizer with cross fuel feed characteristics. *Riga Technical University*, Vol. 15, p. 32-38.
4. Абдулин, М.З., Дворцин, Г.Р., Жученко, А.М. (2008). Струйно-нишевая технология сжигания топлива – основа надежной работы огнетехнического оборудования. *Третья Международная научно-практическая конференция «Энергоэффективность крупного промышленного региона»*: сборник научных трудов, Донецк, с. 18-24.
5. Khedia, K.S., Ghoniem, A.F. (2012). Mechanisms of stabilization and blowoff of a premixed flame downstream of a heat-conducting perforated plate. *Combustion and Flame. Elsevier*. Vol. 159, no 3. p. 1055-1069.
6. Chen, J.H. (2009). Terascale direct numerical simulations of turbulent combustion using S3D. *Computational Science and Discovery. IOP Publishing*, Vol. 2., p. 1-31.
7. Фиалко, Н.М., Прокопов, В.Г., Алешко, С.А. (2011). Компьютерное моделирование процесса смесеобразования в горелочных устройствах стабилизаторного типа с подачей газа внедрением в сносящий поток воздуха. *Пром. Теплотехника, №1*, С. 51-57.
8. Chernousenko, O., Butovsky, L., Rindyuk, D. (2017). Analysis of residual operational resource of high-temperature elements in power and industrial equipment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technology*. no 1(8). p. 20-26.
9. Иванов, Ю.В. (1972). Газогорелочные устройства: Недра, 276 с.
10. Фиалко, Н.М., Шеренковский, Ю.В. Майсон, Н.В., Бутовський, Л.С. (2014). Влияние пластинчатых турбулизаторов потока на характеристики

течения и смесеобразования топлива и окислителя в цилиндрическом стабилизаторном горелочном устройстве. Науковий вісник НЛТУ України. № 24.6, С. 114-121.

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

12.Абдулін, М.З., Джамал, І. (1997). *Дослідження пальникового пристрою з поперечною подачею струменів палива*. Екотехнології та ресурсозбереження. Київ, №2, С. 68-70.

13.Абдулін М.З., Джамал І. Аномальні явища стійкості горіння за пілоном з поперечною подачею струменів палива. Экотехнологии и ресурсосбережение. Киев. №3. 1997. С. 68-70. NASPLIB, ВИНИТИ РАН, Ulrich's Periodical Directory.

14.Абдулін М.З. «Струйно нишевая система смесеобразования и стабилизации пламени» дис. канд. тех. наук. НТУУ «КПІ», 1986 р.

15.Сірий, О.А., Абдулін, М.З., Баранюк, О.В. (2016). Дослідження гідродинаміки потоку повітря в струменево-нішевій системі. Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Харків: НТУ «ХПІ», №9 С. 94–100.

16.Абдулін, М.З., Сірий, О.А. (2014). Дослідження сталості горіння в струменево-нішевій системі при обмеженні далекобійності паливних струменів. Енергетика: економіка, технології, екологія. № 64 С. 22 – 25.

17.Dang, G.Y., Jian Qiang Li, Zhao Lin Fan, Dan Yao Aerodynamic characteristics of transonic and supersonic flow over rectangular cavities // Flow, Turbulence and Combustion. 2010. pp. 639–652

РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ ДАНИХ КОМПЛЕКСНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЙМАННЯ ТА ЗРИВУ ПОЛУМ'Я У СТРУМЕНЕВО-НІШОВИХ ПАЛЬНИКОВИХ МОДУЛЯХ

4.1 Вимоги до стабілізаторів полум'я та дослідження масообмінних процесів в умовах СНС

Основні критерії стабілізації факелу розглядаються в [1-4]. В основному стабілізація здійснюється за рахунок аеротермічної взаємодії високонагрітих продуктів згорання та свіжої паливної суміші. Основну роль у цьому процесі виконує зона зворотних токів(ЗЗТ).[5-8] В ЗЗТ формується високий рівень інтенсивності турбулентних пульсацій які позитивно впливають на сумішоутворення, але при значеннях більше 15-20% погіршують сталість горіння [9,10].

Струменево-нішева система використовується в якості стабілізатора при спалюванні палива як в дифузійному, так й в кінетичному факелі. В обох ситуаціях головну роль відіграє зона циркуляції власне всередині ніші. Головним чином приймається до уваги така її характеристика, як кількість суміші (повітря), що потрапляє в цю зону з потоку, що набігає. Результати, наведені в цій главі не стосуються масообмінних параметрів загальної циркуляційної зони в зоні під паливними струменями при максимальних та номінальних витратах палива, а відносяться тільки до режимів бідного зриву полум'я в системі. Отже, процеси загасання, що досліджувались, належать тільки до пускових режимів і надалі будуть описані більш детально.

Масообмінні параметри системи досліджувались при таких умовах: типорозміри ніш L/H 5/20, 40/10, 80/20, висота повітряного каналу змінювалась в діапазоні $H_k = 72 \dots 24$ мм, швидкості потоку повітря, що набігає, $W_n = 3,5 \dots 35$ м/с, витрати палива $G_{1,2} = 0,01 \dots 3,5$ г/с (залежать від типу газорозподілу). Висновки та рекомендації з робіт Лефевра було взято за основу досліджень [12]. В роботі визначення кількості суміші, яка потрапляє в зону циркуляції, полягає на рівності концентраційних полів у зоні стабілізації факелу на границі бідного зриву полум'я при дифузійному та кінетичному режимах спалювання газу. В

якості погано обтічного стабілізатора полум'я виступає прямокутна нішова порожнина. Вищезазначена умова записується наступним чином:

$$\alpha_n = \frac{G_{II}^{pec}}{G_{\Gamma_1} \cdot L_0} = \frac{G_{II}}{G_{\Gamma_2} \cdot L_0}, \quad (4.2)$$

$$\frac{G_{\Gamma_1}}{G_{\Gamma_2}} = \frac{G_{II}^{pec}}{G_{II}}. \quad (4.3)$$

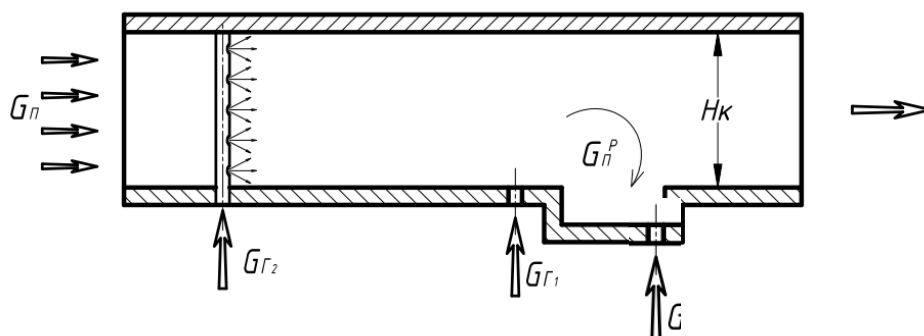


Рис. 4.1 Схема нішевого стабілізатору, що використовувався під час лабораторних експериментів, при дослідженні параметрів масообміну СНС $L/H = 20/5$; $40/10$ мм, $H_k = 72$ мм, G_{Γ_1} - витрата палива, яка вводиться у потік, щонабігає, перед нішевим стабілізатором, G_{Γ_2} - подача палива в головну течію окисника, задля спалювання суміші гомогенного типу, G_{II}^{pec} - кількість повітря, що поступає в нішу при масообміні головного потоку окисника та течії з циркуляцією, G_{II} - загальна витрата окисника.

Коли полум'я зривається в обох випадках фіксуються витрати палива, так, в межах геометрії, що досліджується відношення витрат $G_{\Gamma_1}/G_{\Gamma_2}$ є величиною, що не залежить від режиму, в якому працює установка. Таким чином, для ніші $20/5$ відношення витрат становить близько $1,1 \dots 1,5$ %, що в той же час є параметром величини масообміну зони зворотних струмів з активною течією повітря (рис. 4.2).

Після виконання досліджень на кутових стабілізаторах, було доведено, що процеси масообміну суміші, яка набігає, з циркуляційною течією потоку є автотельними. Показано, що відносна кількість повітря, яка поступає в ЗЗС \bar{G}_{II}^{pec} становить близько 6% від його витрати на стабілізатор і залежить в

основному від параметрів захаращення повітряного каналу стабілізаторами та майже не залежить від швидкості потоку повітря [13].

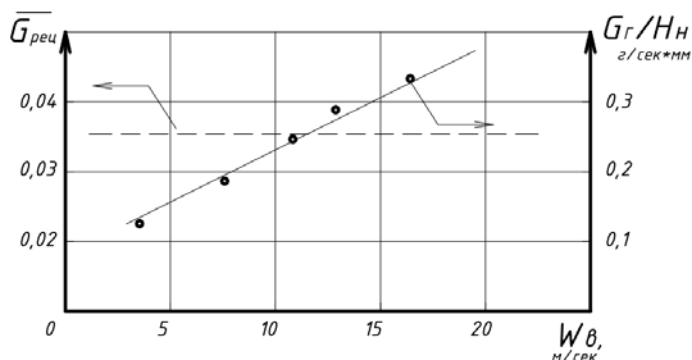


Рис. 4.2 Залежність витрати суміші у зону зворотних струмів від швидкості окисника, СНС L/H= 40/10, H_к=36 мм

Для умов СНС: L/H= 40/10 мм, H_к=36 мм, $\bar{G}_{\Pi}^{pec} = \frac{G_{\Pi}^{pec}}{G_{\Pi}}$ становить близько

3,5 % від загальної витрати повітря і, відповідно, визначається геометричними параметрами системи, такими, як L/H та H_к (рис. 4.3). Слід додати, що якщо відносна витрата повітря в ЗЗС незмінна, то абсолютна витрата підвищується відповідно підвищенню швидкості потоку окисника, що набігає.

У пальниках струменево-нішевого типу відстань між сусідніми модулями визначається характеристиками паливо розподілу і становить в середньому 30-70 мм (для природного газу). При цьому важливими стають питання впливу на пускові характеристики пальників захаращення модулями повітряного каналу. Залежність висоти повітряного каналу від абсолютної витрати потоку в ЗЗС зображено на рис. 4.3. Експеримент вказує на те, що при зменшенні висоти каналу виникає збільшення величини відносного коефіцієнта масообміну між потоком, що набігає, та ЗЗС (якщо висота каналу зменшується в діапазоні 72-24мм, масообмін збільшується майже в 3 рази, результати приведені для швидкості потоку повітря, що набігає, - 5,9 м/с).

В залежності від висоти повітряного каналу було зроблено заміри бідного згасання полум'я, для геометрії СНС, що досліджувалась (рис. 4.5). Результати вказують на те, що системі з найвищим каналом відповідають найширші межі стабільного горіння факелу. Це здійснюється завдяки «транзитному» потоку

повітря, що не приймає участі в процесі горіння.

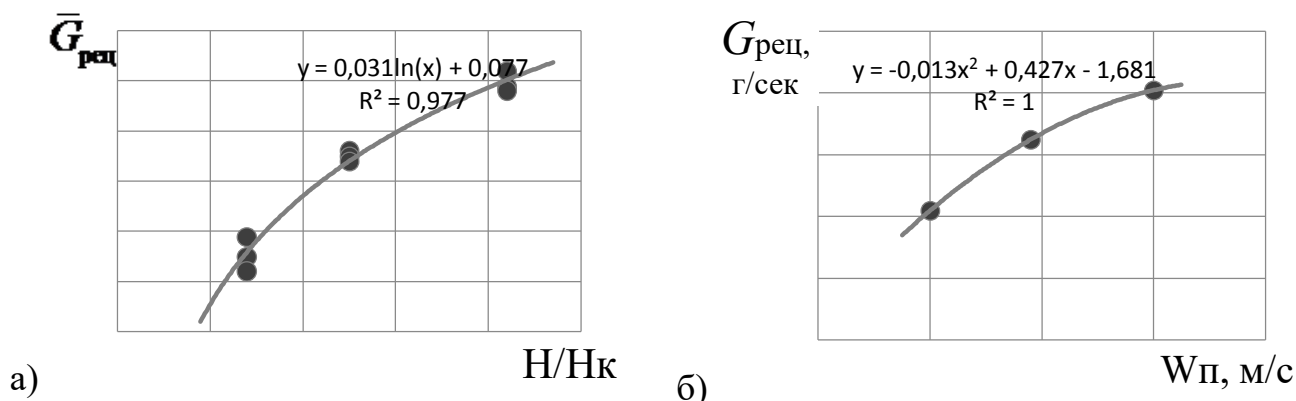


Рис. 4.3 Витрата палива та окисника в ЗЗС для пальника СНТ

$L/H=40/10$, $H_k=72, 36$ та 24 мм, а) відносна витрата \bar{G}_{II}^{pec} при $W_{п}=5$ м/с;

б) абсолютна витрата G_{II}^{pec} , г/с.

Дані, що були отримані експериментально для режимів бідного зриву і пуску вказують на те, що при збільшенні затінення перерізу відбувається збільшення відносного масового потоку повітря в нішу і в той самий час, в зоні стабілізації виникає перенасичення суміші окисником та звужуються границі сталого горіння.

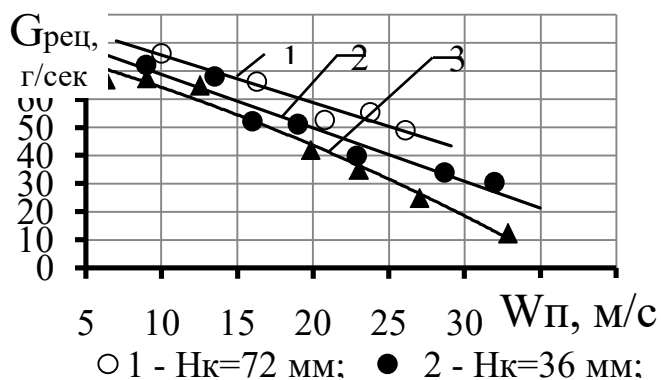


Рис. 4.4 Границі бідного затухання факелу, які залежать від висоти каналу окисника при $L/H=40/10$

На ефективність стабілізатору у разі спалювання заздалегідь підготовленої суміші, позитивно впливає збільшення масообміну. Узагальнюючі залежності, що стосуються масообміну нішевої порожнини з активною течією повітря, можуть мати вигляд (використовується для прямокутних закритих порожнин, де співвідношення сторін складає $L/H \approx 4,0$):

$$\frac{G_{II}^{pec}}{G_{II}} = k \cdot \left(\frac{H}{H_k} \right)^{1,1}, \quad (4.4)$$

k – параметр, який залежить від геометричних характеристик нішевої системи.

Таблиця 4.1

Результати розрахунку формули 4.3

Типорозмір нішевої порожнини L/H	k
20/5	0,07
33/7	0,1
40/10	0,13
75/15	0,17
80/20	0,24

Важливий вплив на процеси сумішоутворення в ніші має значення концентрації палива на режимах згасання, так, значення α_{33C} в ніші відноситься до верхньої концентраційної границі займання для пропану, але дещо знижується при підвищенні швидкості потоку повітря, завдяки інтенсифікації аерації суміші в ЗЗС (рис. 4.6).

Отже, масообмін ЗЗС в каверні прямокутного форми особливо залежить від характеристики захарачення активного потоку течії та її об'єму і в загальному визначає границі бідного затухання факелу в системі. Найменша з ніш, що досліджувались, була прямокутна з параметрами L/H= 20/5 (менші розміри не використовувались, з огляду на низьку ефективність процесу стабілізації). Так, завдяки отриманим даним можна спроектувати пальники з найбільш сприятливими геометричними параметрами як для повітря так і паливо розподілу в системі газорозподільних колекторів-модулів.

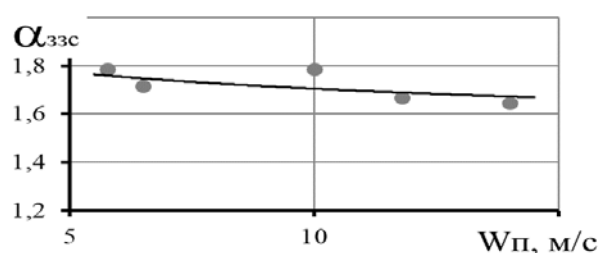


Рис. 4.5 Коефіцієнт надлишку повітря в ніші на параметрах затухання при зміні швидкості течії окисника, якщо L/H= 40/10, H_к =36 мм

4.2 Визначення характеристик бідного зриву при стабілізації полум'я з застосуванням нішових порожнин

4.2.1 Побудова залежності для визначення параметрів бідного зриву на основі рівняння теплового балансу

При побудові теоретичної моделі процесу стабілізації полум'я при бідному зриві в системі (бідний зрив характеризується кількісною нестачею пального в об'ємі окисника, задля проходження процесу спалювання) слід зробити декілька припущень стосовно взаємодії струменів палива з потоком повітря в зоні циркуляційного потоку нішевої порожнини.

Для побудови теоретичної моделі процесу стабілізації полум'я вважатимемо, що потік в зоні стабілізації є незалежним від часу, а об'єм палива, що поступає в нішу завдяки ежекції, спалюється там повністю. Щоб зазначити масову витрату суміші в зону циркуляції необхідно ввести коефіцієнт масообміну n (в цій ситуації $G_{Г1}/G_{Г2}$), що залежить від геометричних характеристик струменево-нішевої системи. В аналізі не враховуються втрати тепла крізь стінки ніші. Місцем горіння є зона циркуляції в ніші, на рис. 4.7 наведено схему розрахунків. Рівняння потоків теплоти в даній системі наведено нижче:

$$Q_{\text{сум}} = Q_{\text{ЗЗС}} . \quad (4.6)$$

Оскільки, за умовою, повне спалювання суміші в об'ємі ЗЗС проходить без теплових втрат, тому кількість тепла, що надходить від продуктів згорання визначається наступним рівнянням:

$$Q_{\text{сум}} = Q_n^p \cdot G_{Г} = Q_n^p \frac{G_{II}}{\alpha_{\Sigma} \cdot L_0} . \quad (4.7)$$

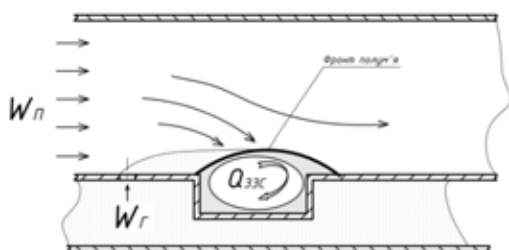


Рис. 4.6 Стабілізація полум'я в системі з нішею під час займання спалюваної суміші $Q_{\text{ЗЗС}}$ – тепло, що йде в З.З.Т.

Рівняння витрати паливо-повітряної суміші:

$$G_{\text{сум}} = G_{\text{П}} + G_{\text{Г}}. \quad (4.8)$$

Припустимо, що паливо повністю потрапляє в нішу на мінімальних витратах, тому витрата суміші в зоні зворотних струмів визначається як:

$$G_{\text{сумЗЗС}} = G_{\text{П}} \cdot n + G_{\text{Г}}. \quad (4.9)$$

Коефіцієнт надлишку повітря розраховується як:

$$\alpha_{\Sigma} = \frac{G_{\text{П}}}{G_{\text{Г}} \cdot L_o}. \quad (4.10)$$

Існує декілька теплових умов, які потрібно виконати при займанні суміші в системі: об'єм тепла, що підводиться, повинен бути достатнім аби підігріти свіже паливо повітряної суміші до температури спалаху в потоці (зазначимо цю температуру як T_3), витрати теплоти знаходяться як:

$$Q_{\text{ЗЗС}} = G_{\text{сумЗЗС}} \cdot c_p \cdot (T_3 - T_{\text{сум}}). \quad (4.11)$$

Рівняння теплового балансу системи з нішею, що враховує всі припущення, описані вище, має вигляд:

$$Q_n^p \cdot G_{\text{Г}} = G_{\text{П}} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{\text{ЗОТ}} \cdot L_o} + n \right) \cdot c_p \cdot (T_3 - T_{\text{сум}}). \quad (4.12)$$

Коефіцієнт надлишку повітря в ЗЗС при зриві полум'я з рівняння 4.12 визначається як:

$$\alpha_{\text{ЗЗС}} = \frac{\alpha_{\Sigma} \cdot c_p \cdot (T_3 - T_{\text{сум}})}{Q_n^p - L_o \cdot \alpha_{\Sigma} \cdot n \cdot c_p \cdot (T_3 - T_{\text{сум}})}. \quad (4.13)$$

Щоб визначити пускові параметри СНС необхідно використати результати наведених в попередньому розділі робіт, що стосуються масообмінних процесів. Так як, при нагріванні паливної суміші її властивості змінюються, то при розрахунку теплоти необхідно приймати середню ізобарну теплоємність (щоб спростити розрахунки приймаємо $c_p = const$). Температура спалаху T_3 являє собою функцію тиску, складу та швидкості суміші. Вважатимемо, що ця величина є незмінним значенням для палива, що досліджується. Отже, $L_o = 23,9$,

з огляду на геометричні характеристики системи, враховуємо, що

$$c_p = 1250 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}} T_3 = 850 \text{ К}, T_{\text{сум}} = 290 \text{ К}, Q_n^p = 96 \frac{\text{МДж}}{\text{м}^3} \text{ (паливо пропан, дод. А)}$$

(рис. 4.7).

Для палива, що досліджується, верхня концентраційна границя займання палива становить 1,7, тому беручи до уваги експериментальні дані, що приведені на рис. 4.5, видно достатню відповідність замірів розрахунковим даним.

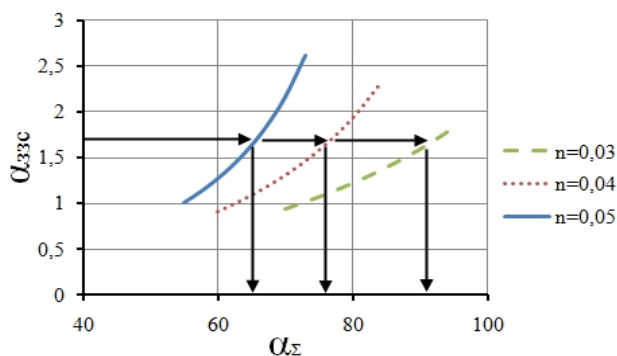


Рис. 4.7 Значення коефіцієнту надлишку повітря в ЗЗС в залежності від загального коефіцієнту надлишку повітря СНС при зміні величини параметру масообміну n

4.2.2 Закономірності масообміну в струменево-нішовій системі

Аналізуючи рис. 4.8 можна зробити висновок, що зі збільшенням коефіцієнту масообміну звужуються діапазон сталого горіння у зоні збіднених сумішей. З фізичної точки зору це можна пояснити тим, що більша за розмірами ніша вимагає більшого об'єму палива, щоб забезпечити стехіометричний склад суміші у порівнянні з нішею, що має менший об'єм, при однаковій висоті каналу. Але вище вказане твердження справедливе тільки для каналів з $H_k > 40$ мм, коли висота каналу зменшується до $H_k = 40 \dots 24$ мм стабілізаційні характеристики невеликих ніш стають гіршими. Це можна пояснити тим, що збільшується вплив пограничного шару на гідродинаміку течії суміші у повітропроводах.

Використовуючи запропонований вище підхід, далі приведена залежність задля обчислення бідного зриву полум'я в системі з нішею спираючись на основні теплофізичні характеристики палива: швидкість повітря в каналі та коефіцієнт масообміну ніші з окисником. Завдяки результатам

експериментальних досліджень зривних параметрів системи, коефіцієнт надлишку повітря розраховується за виразом:

$$\alpha_{\Sigma}^{\text{Бідн.зр.}} = (3,5 + n)^{-0,75} \cdot \left[\frac{Q_n^p}{\left(\frac{1}{\alpha_{33C}} + L_o \cdot n \right) \cdot c_p \cdot (T_3 - T_{\text{сум}})} - \frac{(W_{II})^{1,9}}{(100 - W_{II})^{0,65}} \right]. \quad (4.14)$$

Приведене співвідношення (4.14) допомагає аналізувати границі бідного зриву полум'я для газоподібного палива (рис. 4.9) з нижчою теплотою згоряння в діапазоні 6...106 МДж/м³ та для інших палив з різними теплофізичними параметрами.

В таблиці 4.2. приведені теплофізичні характеристики палив, що досліджуються.

За допомогою виразу можна досить точно визначити границю бідного зриву з висотою каналу в межах значень $H_k=40...80$ мм. Якщо висота каналу зменшується H_k , посилюється дія пограничного шару тому доцільно збільшити розміри нішевої порожнини для розширення діапазону сталої роботи системи.

Загальна похибка прогнозування -12,3 % відповідає відносній похибці апроксимації - 11,5 %.

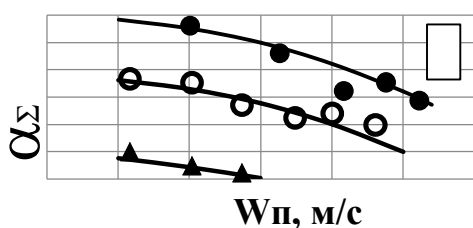


Рис. 4.8 Графічне зображення узагальнюючої кореляції (12) для визначення границь бідного згасання факелу в СНС

$L/H=40/10$, $H_k=72$ мм: 1 – пропан, 2 – метан, 3 – генераторний газ

Теплофізичні характеристики газів, що досліджуються

Газ \ Параметр	$Q_{н^p}$, МДж/м ³	C_p , Дж/(м ³ ·К)	L_0 , м ³ /м ³	T_3 , К
Пропан-бутанова суміш	106	1300	29	850
Природний газ	38	900	9,5	950
Генераторний газ	6	800	1,3	830

Спираючись на залежності, що запропоновані в даній роботі, треба врахувати той факт, що задля одержання результатів, які більш точно відповідатимуть теоретичним, в практичних умовах треба реалізувати раціональний розподіл палива, а саме – величина діаметрів газорозподільних отворів повинна відповідати певним крокам їх розміщення. Наприклад, при дослідженні горючих газів дістали висновку, що найбільша гомогенізація паливної суміші досягається коли паливні отвори зменшуються (до 2 мм), а крок розміщення отворів виконується в межах 2,5...5,0, це дасть змогу більш точно врахувати всі допущення, яких дотримувались при проведенні теоретичних розрахунків.

4.3 Результати дослідження меж стійкості і запалення для струменевонішового модуля з нішами різної конфігурації

З огляду на мету дослідження, головним кроком експериментальних робіт було виявлення впливу геометричних параметрів системи на процес розпау та «бідного» зриву полум'я. Спочатку була подана конструкція стабілізатору з нішею, що відмінна від обраної раніше (рис. 4.17). Наступний крок досліджень - пристосування паливоподачі до пускового режиму.

Випробування ніші «непрямокутного» виду показало позитивні результати, бо відбувається зменшення гідравлічного опору системи на шляху окисника і одночасного вдосконалюється охолодження паливом стінок стабілізатору. Слід зазначити, що значно спрощується технологія виготовлення пальників. Отже, проаналізовано вплив використання принішевої накладки на стабілізаційні характеристики системи в порівнянні з нішею прямокутного

обрису (рис. 4.10).

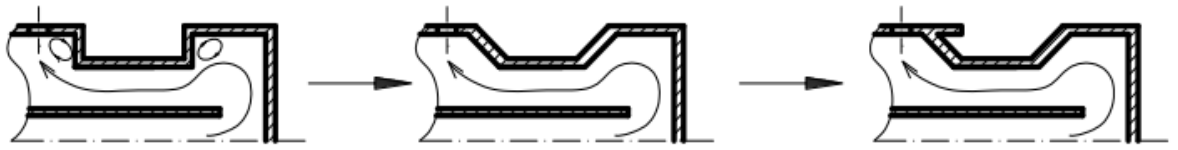


Рис. 4.9 Різновиди нішевої порожнини

Коефіцієнт місцевого опору ніші визначається наступним виразом [14]:

$$\xi_0 = (2\Delta P_0) / (\rho W_{cp}^2), \quad (4.15)$$

де ΔP_0 - різниця статичних тисків до та після проходження каверни.

Число Рейнольдса в умовах струменево нішевої системи:




$$Re = (2W_{cp} \cdot h) / \nu. \quad (4.16)$$

На гідравлічні втрати в СНС, що розташована на модулі, значним чином впливають геометричні характеристики СНС. Гідравлічний опір полум'я визначався за одиничним модулем полум'я шириною 45 мм, $L/H=20/5$, діаметром отворів для подачі газу - 4 мм, товщиною стінок - 1,5 мм, номінальною пропускною здатністю - 75 м³/год, внутрішній щілинний газохід висотою $h=5$ мм.

В таблиці 4.3 наведено результати розрахунків коефіцієнту місцевого гідравлічного опору СНС. Отже, кут нахилу бокових стінок ніші змінюється в діапазоні 90 - 45⁰ та зумовлює зниження втрат у внутрішньому газоході модулю на 20%.

Зниження гідравлічного опору модуля за рахунок зміни геометрії нішевої порожнини дещо покращує пускові характеристики системи. Результати впливу кута нахилу бокових стінок на стабілізаційні параметри в СНС наведено в таблиці нижче.

**Величина коефіцієнта місцевих гідравлічних втрат в умовах
внутрішнього обтікання ніші**

Re		$2 \cdot 10^3$	$5,3 \cdot 10^3$	$3,5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$
ξ_0		3,25	3,01	2,88	2,86
ξ/ξ_0		0,95	0,94	0,93	0,93
		0,78	0,79	0,8	0,8

При аналізі режими пуску системи, по-перше, визначались параметри бідного зриву та спалаху палива в системі, при зміні геометричних параметрів ніші та наявності нішового «структуратора». На рисунку 2.1 приведено результати дослідження граничних критеріїв СНС з різними геометричними параметрами.

4.3.1 Характеристики меж стійкості і запалення для різних пальникових газів

Аналіз граничних характеристик спалювання відбувався так: встановлювалась початкова швидкість повітря в газоході $W_{п} \approx 5$ м/с. За допомогою електроіскрового запалювання і вентилів тонкого регулювання витратою палива, якщо $W_{п} \approx \text{const}$, повільно підвищувалась витрата палива поки не відбувся спалах. В цей час реєструвалась зміна тиску за допомогою витратомірної діафрагми, а запалювання спостерігалось через оглядове вікно, розміщеного на боковій стінці повітряного газоходу на висоті розташування стабілізатору полум'я. Після реєстрації показників приладів знижувалась витрата палива доки не відбувався бідний зрив факелу та фіксувались відповідні показники витратомірних приладів. Далі зупинялась витрата палива та проводилась продувка проточної частини лабораторного стенду. Потім знов реєструвались показання витрати палива при затуханні факелу на максимально можливих для стабілізатору витратах, тобто при багатому зриву полум'я. Так було виконано не менше чотирьох дослідів при однаковій швидкості. Далі

змінювалась швидкість повітря і алгоритм дослідження повторювався.

На рис. 4.11 наведено визначальні границі бідного та багатого зривів полум'я в СНС, а також наведена зоною границя електроіскрового займання палива. Слід відмітити, що головною характеристикою, яка впливає на границі багатого та бідного зриву СНС, є висота повітряного каналу H_k , в якому розміщена дана система. Зона займання має подібні властивості до границі бідного затухання полум'я і, якщо відбувається зміна геометричних характеристик СНС, її усереднені величини міняються залежно від зміни границь зриву факелу. Значна різниця площ взаємодії електроіскрового приладу (в даному дослідженні при запалюванні - ним виступає свіча, а при бідному згасанні – центр горіння, обмежений об'ємом каверни ніші) з горючою сумішшю зумовлює зсув границі бідного затухання полум'я по відношенню до зони електроіскрового займання в бік збіднених сумішей.

Аналізуючи вплив геометричних показників ніші на зону сталого горіння, в експерименті приймали участь такі типорозміри нішевих порожнин: 40/10 та 20/5. Ці розміри ніші подібні до тих, що реально застосовуються на пальниках. Зона займання далі приводиться в осередненому вигляді.

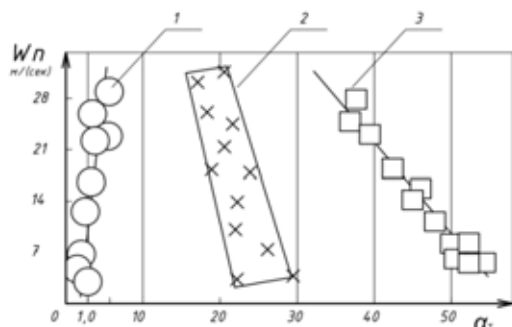


Рис. 4.10 Характерні зони горіння природного газу в СНС

при $d=2$ мм, $S=3,4$, $L_1=15$ мм, ніша прямокутного обрису $L/H=40/10$: 1 –багатий зрив факела, 2 –займання паливної суміші електричною іскрою, 3 – зрив факелу у зоні бідних сумішей.

Різниця згладжується при збільшенні геометричних параметрів ніші. Вид палива та типорозміри ніші відповідають різниці витрат між границями, що досліджуються (це видно з таблиці 4.4). Важливий вплив на різницю витрат має температурний стан стінок стабілізатору, при займанні - стінки охолоджені,

відповідно, при затуханні – нагріті в діапазоні температур 300...400 °С в умовах струменево-нішевого модуля [15].

Таблиця 4.4

Співвідношення витрати палива в умовах СНС в період займання та зриву полум'я $G^* = G_{зан} / G_{загас.}$ для ніші прямокутної геометрії

L/H/ W _п , м/с	40/10	20/5	40/10	20/5
Газ	Природний		Зріджений	
4,5	1,64	2,2	1,87	2,53
9,0	1,55	2,27	1,61	2,45
14,0	1,29	2,25	1,27	2,4
20,5	1,13	1,4	1,2	1,63
25,0	1,09	1,32	1,16	1,5

4.3.2 Зіставлення параметрів стійкості полум'я при застосуванні прямокутних і трапецієподібних ніш

Отже, результати вказують на те, що геометричні параметри ніші визначають пусковий діапазон стабілізатору. Аналізуючи отримані границі горіння встановлено, що задовільні стабілізаційні параметри має ніша прямокутного обрису. Граничний кут нахилу бокових стінок складає близько 60°, при ньому факел стабілізується не при всіх значеннях досліджень, а лише при швидкостях потоку окисника, що набігає, - вище, ніж 15 м/с. Показано, що для ніш (L/H=20/5) зміна прямого кута на кут - 45° має менший вплив на діапазон стабілізації порівнюючи з порожниною, більшою в розмірах. Також, на границі стабілізації менший вплив має зміна кута при швидкостях потоку повітря – вище, ніж 20 м/с (рис. 4.19, 4.20).

Слід зазначити, що в ранніх роботах також було досліджено стабілізаторні ПП кутникового типу [16]. В літературних джерелах проводили аналіз стабілізаторів, а саме емісійні показники пальників. Доведено, що краща гомогенізація пальної суміші, що відбувається в області стабілізації полум'я, завдяки значної турбулізації течії ЗЗС, зумовлює зменшення діапазону сталої

роботи даних ПП. В цій роботі, досліджуваний пилоподібний турбулізатор, має більш вузькі параметри, ніж всі інші розглянуті варіанти.

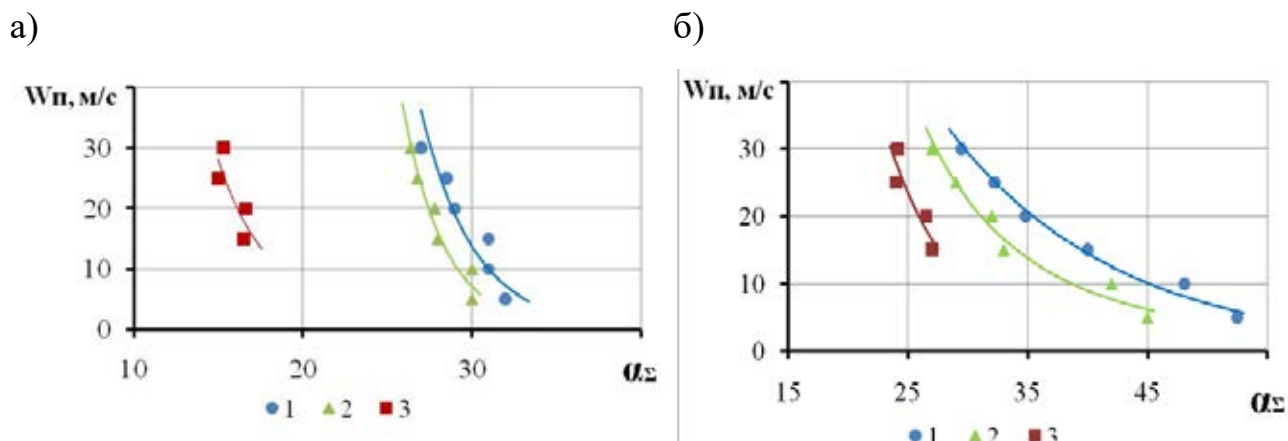


Рис. 4.11 Границі займання

а), та бідного згасання факелу в СНС з $d=2$ мм, $L/H=40/10$ – б) для ніші, 1 –ніша прямокутного типу; 2 – трапецієподібна ніша зі скошеними стінками з боків кутом 45° , 3 - 60° ; паливо – природний газ.

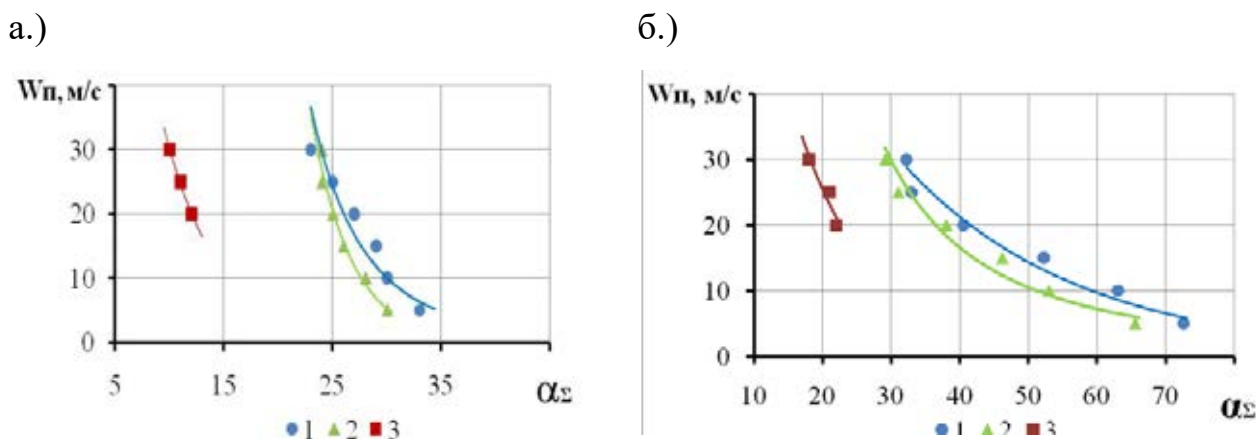


Рис. 4.12 Границі займання

а), та бідного згасання факелу в СНС з $d=2$ мм, $L/H=20/5$, – позначки аналогічні до рис. 4.19, паливо-природний газ.

4.3.3 Аналіз робочого процесу струменево-нішових систем при застосуванні плоского «структуратора» потоку

Аналіз границь затухання факелу вказує на те, що застосування плоского «структуратора» на «малих» нішах за якістю стабілізації схожий з нішею прямокутного типу, та зумовлює більш надійний діапазон пускових режимів. Температурний стан металу «структуратора» - помірний (рис. 4.21) на нього

впливає швидкість течії повітря, що набігає, та витратні характеристики паливоподачі. Тобто, температура металу підвищується у разі збільшення швидкості окисника. При збільшенні витрати палива, в діапазоні режиму з однією швидкістю потоку повітря, що набігає, температура металу дещо зменшується.

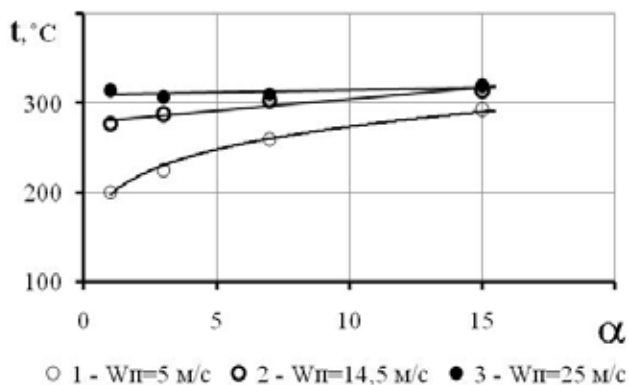


Рис. 4.13 Температурний стан нішевого турбулізатора плоского типу при ($d=2 \text{ мм}$, $L/H=20/5$) та швидкостях окисника $W_{\text{п}}=5 \text{ м/с}$ - 1, $W_{\text{п}}=14,5 \text{ м/с}$ - 2, $W_{\text{п}}=25,5 \text{ м/с}$ - 3, паливо-зріджений газ.

4.4 Процес стабілізації полум'я в умовах СНС на номінальних витратах палива

Коли система знаходилась в режимі з максимальною витратою палива, існувало два вида початкової ділянки факелу. Один з них - це розташування полум'я в ніші, завдяки цьому відбувалось запалювання горючої суміші та факел розповсюджувався далі за потоком (рис. 4.15, а), такий режим є початковим для підвищення теплової потужності системи та її виходу на номінальні параметри. Другий режим характеризується плавним підвищенням витрати палива, при незмінній швидкості окиснювача, відбувається «стабілізація факелу на струменях». Під час «стабілізації на струменях» факел зміщується з каверни до газових отворів, а горіння супроводжується утворенням тимчасових пульсацій полум'я (періодичне проскакування полум'я в бік струменів палива), різкою зміною тиску та незначним збільшенням ступеню шуму. Слід підкреслити, що вищеописаний режим протікає як в прямому так і в зворотному напрямку зі зниженням швидкості окиснювача при незмінних витратах палива.

Проходження даного режиму описується співвідношенням швидкісних напорів компонентів що приймають участь у горінні q . При виході на необхідний швидкісний рівень системи, факел надійно стабілізується на початковому шляху за системою струменів та значно розповсюджується у слід за нішею та у зоні над нею. (Рис. 4.15, б). За допомогою експериментальних досліджень процесу спалювання за різних значень швидкості протікання потоку повітря встановлено умови виникнення даного явища. Одним з найвпливовіших факторів є значення далекобійності паливних струменів h_c , в межах якого виникає зміна циркуляційного режиму течії у зоні гідродинамічного сліду. В цей час спалювання спостерігається не лише у нішевій порожнині, але і в зоні під струменями. Таким чином, виникає гідродинамічний екран, який виконує «гідродинамічну стабілізацію полум'я».

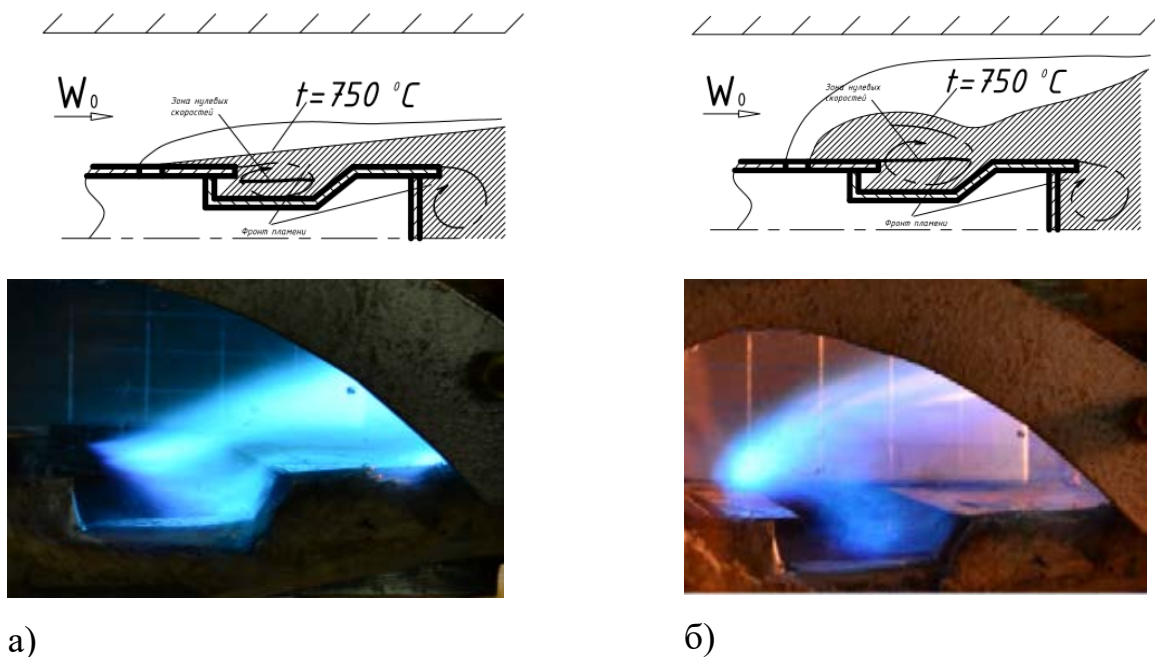


Рис. 4.14 Характеристики режимів стабільного розповсюдження полум'я у системі з нішею

Зміна течії відбувається завдяки перебудові стабільного циркуляційного потоку в каверні у складний вихор. Також головним параметром, при аналізі процесу організації стійкого горіння на струменях палива є величина гомогенізації пальної суміші, яка визначається головним чином параметрами системи розподілу палива (в умовах системи з нішею це крок паливних отворів

S та діаметри d, та L_1 - відстань від зривної кромки). Проведення експерименту в лабораторних умовах доводить, що СНС має широкий діапазон стабільної роботи при мінімальних значеннях швидкостей повітря (від 5 м/с), який зменшується, якщо швидкості повітря досягають до 30 м/с. Зона стабільного спалювання поділяється областю між режимами - «стабілізації полум'я на струменях», яка розташовується між затуханням і займанням факелу, та в загалом описується параметрами швидкісних режимів та залежить від геометричних характеристик пальників (рис. 4.23).

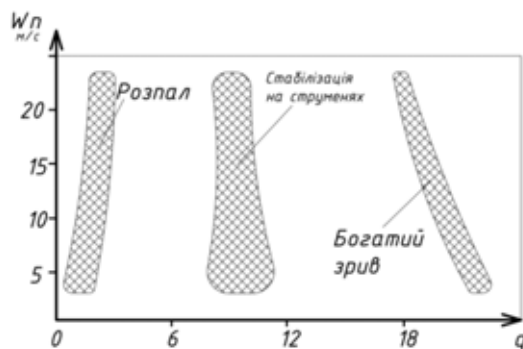


Рис. 4.15 Границі спалювання в СНС з моменту розпалу, стабілізації факелу на струменях до «багатого» затухання полум'я

Так, збільшення діаметрів газоподавальних отворів спричиняє зсув процесу стабілізації на струменях у бік «багатого» затухання факелу. Це залежить від ступеня подрібнення струменів: у випадку, якщо паливо подається дрібними струменями, при заданих геометричних характеристиках (проміжок від струменів палива до зривної кромки ніші) $L_1 = 60$ мм є визначальним, завдяки чому горюча суміш встигає гомогенізуватися до моменту потрапляння в ніші, що і зумовлює появу проскакування полум'я до ділянки паливоподачі назустріч потоку (рис. 4.24, а). Особливим є те, що параметри СНС з діаметрами від 2 до 3 мм доволі схожі між собою, а у випадку збільшення діаметрів до 4 мм відбувається перенос процесу до області «багатого» затухання полум'я.

Результати експериментів вказують на те, що на ділянках з більш високою швидкістю повітря процес стабілізації на струменях виникає при більш високих значеннях далькості струменів.

Аналізуючи вплив відстані від зривної кромки ніші (рис. 4.24, б) до отворів подачі газу L на досліджуване явище, слід відмітити, що цей параметр має визначальне значення а саме: при збільшенні відстані від 15 до 60 мм зона

стабільного процесу горіння зсувається у бік з більшою витратою палива.

Дані, що були отримані, пояснюються достатньою ефективністю процесу тепло і масообміну, що здійснюється у ніші, та більш глибоким розмиванням струменів на ділянці між нішею та соплами при великих швидкостях потоку повітря, що набігає. Цей факт описує незначне звуження досліджуваної зони при збільшенні швидкості течії окисника.

СНС при $L_1 \leq 15$ мм «здійснює» появу процесу стабілізації на струменях при менших значеннях q , що має відмінності від випадку з $L_1 = 60$ мм, які пояснюються меншою відстанню від джерела займання, та подекуди більшим впливом гідродинамічних процесів у каверні. Також, при цьому підвищується далекобійність системи струменів газу.

4.5 Аналіз впливу геометричних параметрів паливорозподілення на характеристики запалення і бідного зриву для струменево-нішевого модуля з прямокутними нішами

Якість роботи пальника значною мірою визначається робочим процесом СНС, тому головним завданням виконання експерименту є отримання геометричних параметрів, що дозволили б в процесі проектування зважити вплив виникнення пульсацій полум'я при горінні на робочих режимах в області виникнення «стабілізації на струменях».

Так, аналізуючи вплив діаметрів отворів для газу та величини їх відстані від ніші на параметри «перехідних» процесів по всій ділянці стабільного протікання полум'я, необхідно зазначити, що діаметри струменів газу при величині вище 3,0 мм дозволяють істотно зсунути ділянку стабілізації на струменях у бік «багатого» зриву, та в той же час, при постійній величині L_1 в діапазоні 15,0 мм, можна також забезпечити стабільний процес згоряння без попередньої гомогенізації палива з окисником. Також, при виконанні дослідження, отримані дані щодо впливу геометричних параметрів ніші на пульсаційні процеси. Ніші «квадратного» типу мають близькі до граничних значень багатого згасання полум'я параметри, при цьому ця залежність значно змінюється при зміні швидкості окисника, в порівнянні з іншими залежностями,

що були отримані. Ніші, що мають більшу довжину характеризуються наближеними параметрами до граничного значення підпалу. Отже, в умовах закритих порожнин ($L/H > 4$), режим стабільної організації полум'я на струменях починається в діапазоні значень $q = 4 \dots 6$, а у випадку відкритих каверн зміщуються як надалі від зони займання факелу і мало залежать від швидкості течії окисника. Таким чином, необхідно застосовувати нішеву порожнину з параметрами $L/H = 4 \dots 6$ [17] та приймати такі її значення, щоб отримати більш інтенсивнішу адаптацію СНС при певних геометричних характеристиках ПП (тобто довжина і глибина ніші повинна бути в діапазоні 20-25 і 4-7 мм відповідно).

Результати аналізу впливу параметрів захаращення каналу окисника, приведені на рис. 4.24, в. З рисунку видно, що при зменшенні висоти каналу H_k з 72 мм до 36 мм процес зсувається у бік збагачення газової суміші. Не зважаючи на значення швидкості течії окисника, дані для каналу ($H_k = 72$ мм) СНС знаходяться в діапазоні стехіометричної суміші ($\alpha \approx 1$). В цей час, зниження H_k у 2 рази зсуває границі стабілізації на струменях у бік порогових значень багатого зриву факелу (для зрідженого газу верхня границя складає $\alpha_v = 0,41$). При наближенні геометричних параметрів модулів, що досліджуються, до дійсних значень пальників, необхідно зважати на закономірності появи досліджуваного явища, щоб усунути пульсаційне згоряння в ПП. У випадку спалювання природного газу, аналіз появи стабілізації полум'я на струменях можна використовувати залежності нижче:

$$\alpha_{CC} = \frac{5,1}{(S/d)^{1,4}} \cdot q^{0,5} \cdot (1 - k_f)^{1,2}, \quad (4.17)$$

де: S – відстань між паливними отворами, мм; d – діаметр паливнихотворів, мм; q – гідродинамічний параметр, мм; $k_f = (k \cdot B_{cm}) / H_k$ - ступінь розташування модулів у повітряному каналі, k – кількість модулів в пальнику, шт; B_{cm} – висота модуля, мм; H_k – висота повітряного каналу, де розташовані модулі.

Якщо використовується зріджене паливо в ПП струменеві-нішевого типу, геометричні параметри розподілу палива повинні враховувати теплофізичні характеристики цього палива та його стехіометричні параметри. Отже, співвідношення 4.17 для більш точного розрахунку має наступний вигляд:

$$\alpha_{CC} = \frac{4,8}{\left(\frac{S}{d}\right)^{1,45}} \cdot q^{0,3} \cdot (1 - k_f)^{1,2}. \quad (4.18)$$

З вище приведених виразів можна констатувати, що зі збільшенням відносного кроку розміщення отворів для потоку газу виникає зсув границь стабілізації на струменях в бік багатих сумішей, відповідно числу стабілізаторів в каналі, а збільшення величин гідродинамічного напору, навпаки, зсуває границі у бік бідного зриву.

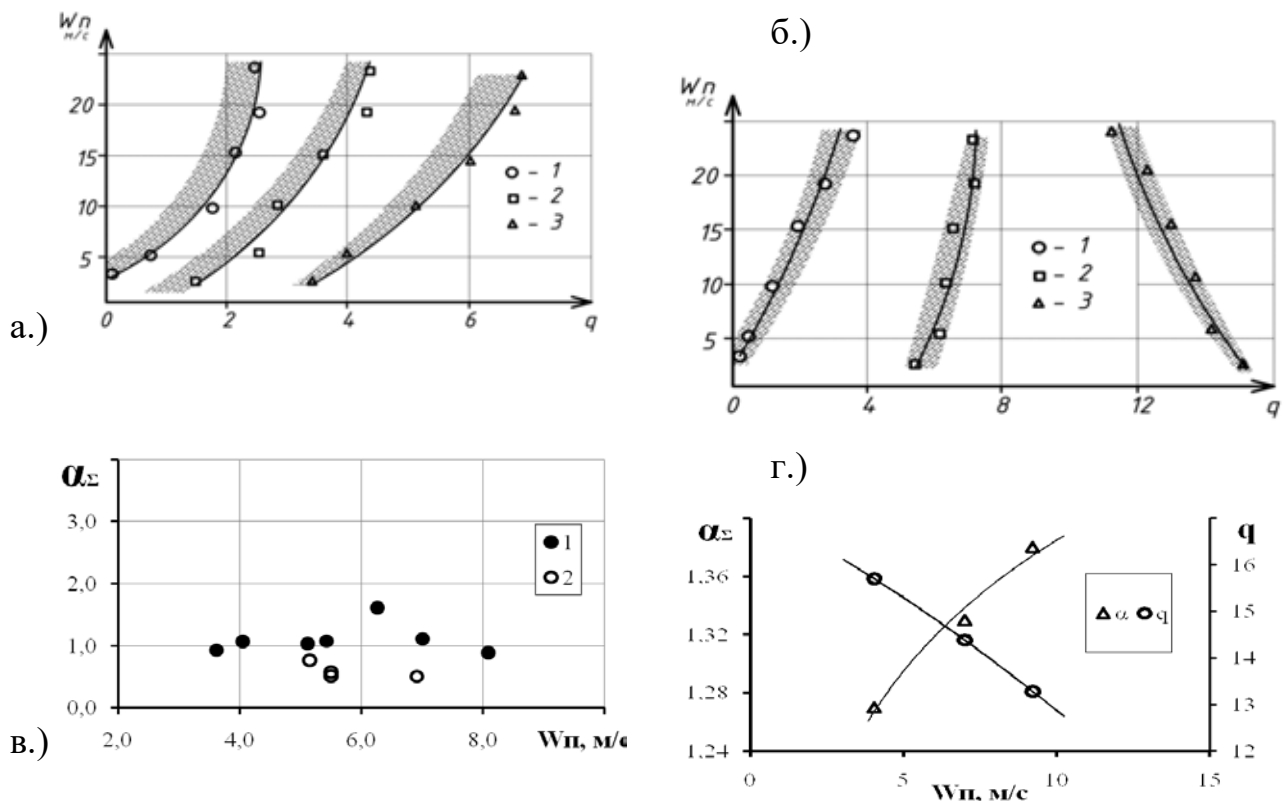


Рис. 4.16 Початок стабілізації полум'я на струменях газу в умовах СНС при таких геометричних характеристиках

а) $L/H=23/15$, $S/d=4$, $L_1=60$, 1 – $d=2$, 2 – $d=4$ та 3 – $d=6$ мм; б) $L/H=75/37$, $S/d=3$, $d=2$, 1 – $L_1=25$, 2 – $L_1=43$ та 3 – $L_1=75$ мм; в) 1 – $H_k=72$ мм, 2 – $H_k=36$ мм; г) $L/H=40/10$, $S/d=4,6$, $L_1=11$, $d=4$ мм, $H_k=72$ мм; паливо: природний газ (а, б), пропан-бутан-(в, г).

4.6 Визначення гідравлічного опору струменево-нішової системи

В даному розділі представлено значення коефіцієнту гідравлічного опору $\xi = 2\Delta P / (\rho W^2)$ промислових ПП, що працюють на газі, в залежності від значення захарашення каналу окисника модулями – стабілізаторами. Додатково наведені дані стосовно гідравлічних втрат для пальників сконструйованих у КПІ ім. Ігоря Сікорського (рис. 4.25) [18]. Видно, що великі гідравлічні втрати мають реєстрові пальники, в яких відбувається закрутка потоку суміші пального та окисника, в цей час, у пристроїв з важко обтічним тілом значно менші гідравлічні втрати. Отже, ПП, виготовлені у КПІ ім. Ігоря Сікорського, розташовані в такому порядку (в залежності від зростання гідравлічних втрат): реєстрові, струменево-стабілізаторні, кутникового обрису; модульні, СНС. Зазначимо, що для струменево-нішової системи результати приведені на пусковому режимі, це зв'язано з достатнім впливом теплового розширення продуктів згоряння на гідравлічні втрати при виході системи на витрати палива при номінальному режимі. Коефіцієнт захарашення для цієї системи записується у вигляді відношення висоти ніші до висоти каналу для повітря $k_f = H/H_k$.

Зниження витрат на привід тяго-дугтєвого устаткування, та можливість переходу на режим роботи без вентилятору, досягається завдяки зниженню гідравлічних втрат у повітряному тракті, в цей самий час, зменшення гідравлічних втрат у паливному тракті дозволяє збільшити діапазон значень коефіцієнту регулювання ПП та забезпечує більш надійну роботу на часткових навантаженнях ВО.

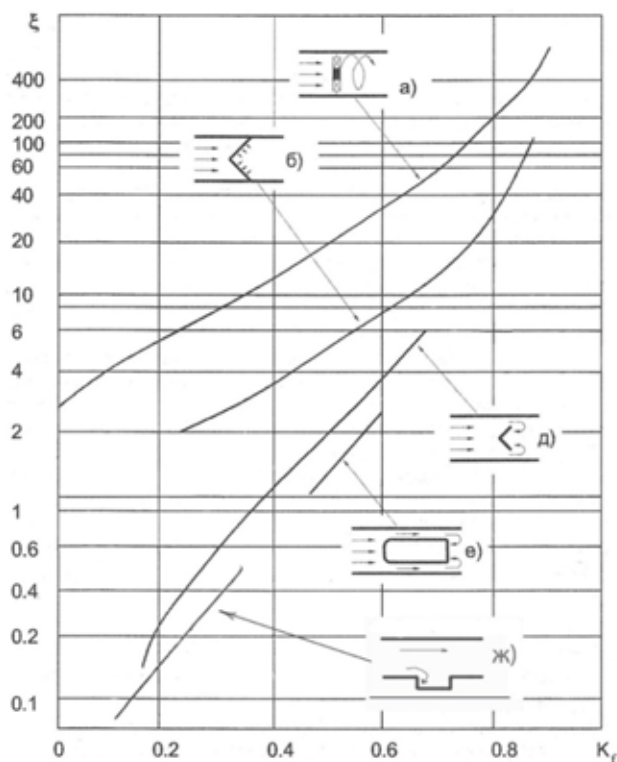


Рис. 4.17 Гідравлічний опір ПП в залежності від значення

захарачення повітряного каналу

- а) реєстрові ПП; б) струменево-стабілізаторні;
- д) кутникові;
- е) модульні;
- ж) струменево-нішева система.

Для здійснення вимірювань в робочій зоні розташовують імпульсні лінії до та після системи з нішею, завдяки ним можна визначити втрати тиску в потоці при постійній температурі, та при спалюванні (рис. 4.26).

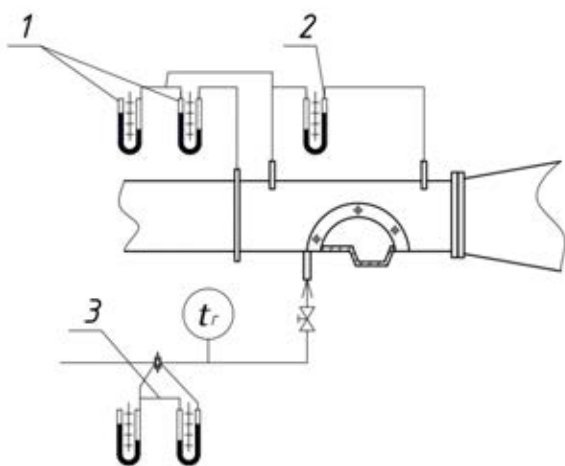


Рис. 4.18 Схема розташування

імпульсних трубок для вимірювання гідравлічного опору в умовах СНС

- 1 – статичний та динамічний напори в каналі окисника, мм;
- 2 – перепад тиску в зоні, що досліджується ΔP , Па;
- 3 – перепад тиску на діафрагмі

Стенд оснащено інтегруючими трубками Піто в каналі окисника, а також діафрагмами на лінії подачі палива задля визначення витрат окисника та пального. На рис. 4.20 представлено гідравлічні втрати у робочому каналі з трапецієподібною нішею.

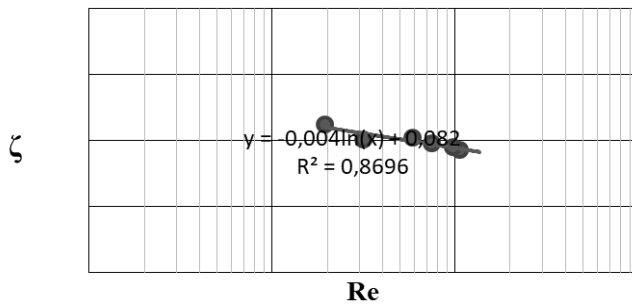


Рис. 4.19 Гідравлічні втрати в повітряному каналі, що має висоту $H_k=72$ мм з нішею $L/H=40/10$

Результати досліджень, отримані в ході експерименту, мають достатнє співпадіння з результатами числових розрахунків [19].

На рис. 4.21. представлено дані для стабілізатору СНС на номінальних витратах палива, де видно, що відповідно збільшується гідравлічний опір каналу окисника зі збільшенням витрати газу.

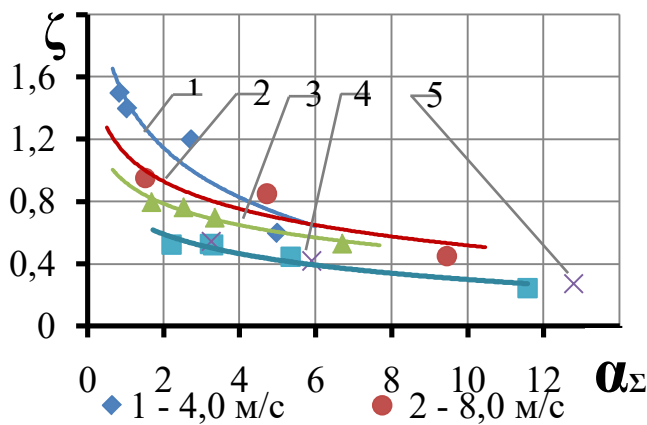


Рис. 4.20 Значення коефіцієнта гідравлічних втрат у повітряному каналі висотою $H_k=72$ мм з нішею $L/H=40/10$ при спалюванні газоподібного палива з різними швидкостями течії окисника.

Отже, при холодних продувках гідравлічні втрати в каналі достатньо відрізняються від величини гідравлічних втрат при горінні, це відбувається в результаті значного теплового розширення продуктів згорання в ході хімічної реакції, так, втрати з 0,04 збільшуються до 0,24 на пускових режимах роботи стабілізатору (порівнюючи з режимом на максимальній швидкості окисника). Помітно також, що в той час, коли система з нішею починає працювати при номінальній швидкості повітря та палива, гідравлічний опір зменшується. В цей час, максимальні його значення приблизно дорівнюють $\zeta=1,5$ при мінімальних швидкостях повітря в потоці $W_{п} = 4$ м/с.

На рис. 4.22 представлено вплив величини гідродинамічного параметру на коефіцієнт гідравлічних втрат. Загалом, дана функція описує величину значення струменів газу h_c і видно, що при збільшенні q збільшується опір повітрю через

«екрануванню» потоку, що набігає системою струменів, глибина проникнення яких пропорційна величині їх далекобійності. Опір потоку окисника при спалюванні палива у струменево-нішевій системі описується співвідношенням:

$$\xi = \frac{-0,0042 \cdot Fr_n + 3,4}{\alpha^{1,3}}, \quad (4.19)$$

де $Fr_n = \frac{W_n^2}{g \cdot H_k}$ – число Фруда для потоку повітря; W_n – швидкість потоку

окисника, що набігає, м/с; H_k – висота каналу, м.

Значення втрат тиску в пальниковому пристрої СНТ, при дослідженні його в лабораторних умовах, представлені на рис. 4.30.

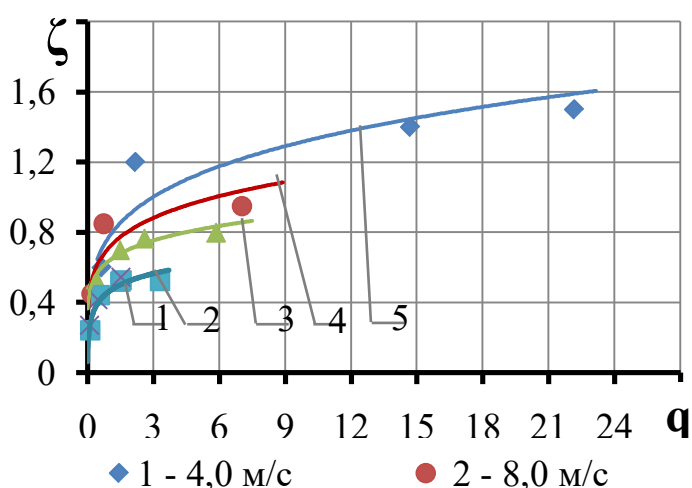


Рис. 4.21 Гідравлічні втрати в повітряному каналі висотою $H_k=72$ мм з нішею $L/H=40/10$ при спалюванні газоподібного палива в залежності від значення гідродинамічного параметру q .

Для досліджень пальник виконано для роботи на природному газі. В розрізі він являє собою прямокутний металевий короб з розмірами 92×104 мм, і має два стабілізатори струменево-нішевого типу, що досягають в ширині 23 мм, та розташовані з кроком 46 мм на вході до коробу. Природний газ йде у напрямі від магістралі через колектор ПП до внутрішньої камери стабілізаторів. Через два ряди отворів, що розташовані з кожного боку стабілізатора, газ направляється у потік окисника, який омиває систему ніш пристінну і торцеву. На величину гідравлічних втрат газу впливає геометрія подачі палива та умови проведення дослідження.

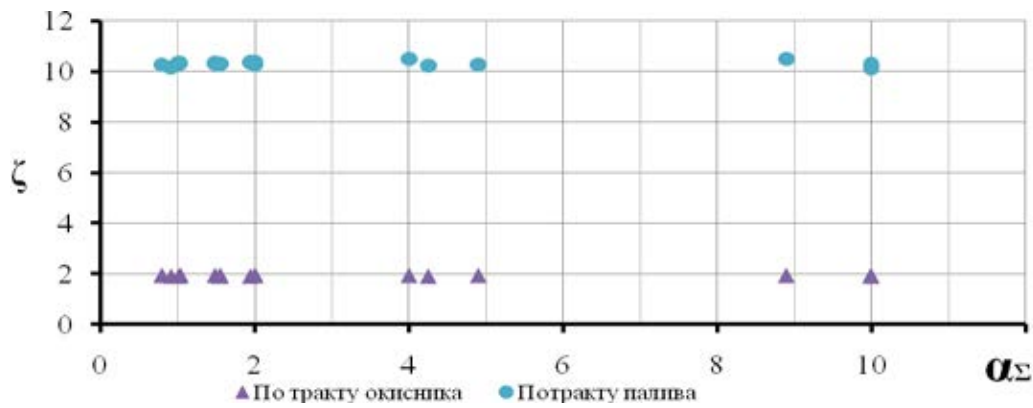


Рис. 4.22 Гідравлічні втрати в пальнику СНТ при відкритому факелі, тепловою потужністю $N_{\text{п}}=0,33$ МВт

Стосовно паливорозподілу слід відмітити, що величина втрат з боку паливного тракту пальника значною мірою залежить від геометричних параметрів паливорозподілу. Результати, що приведені, стосуються паливорозподілу зі значенням діаметрів $d=2$ мм, а для діаметрів $d=3$ мм, гідравлічні втрати менше в 1,8 разів. На практиці впливає, що при згорянні палива у відкритому полум'ї гідравлічні втрати дещо нижчі у порівнянні зі штатним пальником на об'єкті. Це пояснюється тим, що діапазон перепадів тиску на ПП збільшується рівно на стільки, на скільки збільшується розрідження в топці.

4.7 Визначення впливу основних геометричних параметрів паливорозподілу на граничні режими роботи СНС

Щоб визначити залежність від геометричних параметрів розподілу палива, параметру відстані газових отворів (L_1), їх діаметру (d) та відносного кроку розміщення (S/d) на границі сталого спалювання було використано методику математичного планування експерименту. Метою планування в наведеному методі є організація повнофакторного експерименту (ПФЕ), в результаті отримують лінійні регресійної залежності, які часто вказують на неадекватність математичної моделі. Тому, щоб враховувати не лише міжфакторні взаємодії слід виконати заміри у зіркових точках задля отримання квадратичних членів поліному. Головним при плануванні є побудова математичної моделі кореляції загального коефіцієнту надлишку повітря (параметр оптимізації) при пускових

режимах та геометричних характеристик розподілу палива в системі з нішею при пусковій швидкості потоку повітря, що набігає, $W_{\text{п}}=5$ м/с та робочій швидкості окисника $W_{\text{п}}=15$ м/с у вигляді поліному другого ступеню $\alpha_{\text{пускової}} = f(d, L, \bar{S})$ для природного газу та пропан-бутанової суміші, щоб оптимізувати конструктивні особливості ПП для інтенсифікації пускових параметрів. Другий крок оптимізації - це врахування залежності «пускових» характеристик при номінальній роботі системи від наданих рекомендацій і розробка уточнень щодо існуючої методики розрахунку ПП.

Головними рівнями факторів для побудови математичної моделі є наступні величини геометричних параметрів: $d=X_1=3$ мм, $L_1=X_2=17,5$ мм, $S/d=X_3=3,45$. За значенням X_1 крок варіювання $\Delta X_1=1$ мм, по $X_2 - \Delta X_2=7,5$ мм, а за значенням $X_3 - \Delta X_3=1,15$.

Виконання паралельних експериментів для всіх точок плану допомагає перевірити відтворюваність досліджень. В усіх умовах, що аналізувались (геометрія розподілу палива та саме паливо), для кожної величини проводилось порівняння розрахункового значення критерію Кохрена (G_p) з табличним (G). В усіх випадках при довірчій вірогідності $P=0,95$ одержано $G_p < G$, тобто експерименти вважаються відтворюваними.

Важливість коефіцієнтів b_i визначалась з $|b_i| > S_{b_i} t$, де t – величина критерію Стюдента, а S_{b_i} – оцінка дисперсій при визначенні коефіцієнтів регресії. Перевірка правильності одержаних рівнянь регресії проводилась з використанням критерія Фішера. Дані, після перевірки точності математичного планування експерименту наведені в табл. 4.5.

За даною залежністю можна оцінити величину загального коефіцієнту надлишку повітря в умовах СНС для бідного зриву за умов впливу діаметру отворів для подачі газу (1,3-4,7 мм), відстані від зривної кромки каверни (5,0-30,0 мм), та відносного кроку розташування отворів (1,5-5,4).

**Аналіз точності регресійних співвідношень при пускових режимах
розподілу палива в системі з нішею**

Паливо	Параметр	S_y^2	S_{ad}^2		
Природний газ	Запалювання, ($W_{п}=5$ м/с)	0,46	2,88	6,19	6,2
	Згасання, ($W_{п}=15$ м/с)	1,37	7,85	5,72	6,2
Зріджений газ	Запалювання, ($W_{п}=5$ м/с)	2,8	13,67	4,88	6,2
	Згасання, ($W_{п}=15$ м/с)	1,74	9,44	5,41	6,2

Щоб оцінити залежність значення параметрів подачі палива далі будуть наведені дані планування експерименту щодо виявлення функції відгуку - сумарного коефіцієнту надлишку повітря в СНС при бідному згасанні та займанні факелу при згорянні природного та зрідженого газів. У таблиці 4.6 приведено регресійні залежності зривних параметрів системи.

Порівняння результатів, за допомогою оцінки коефіцієнтів при змінних в залежностях 4.24 та 4.26 вказує на те, як геометричні характеристики впливають на пуск системи при певній геометрії, а рівняння 4.25 і 4.27 характеризує діапазон стабільного горіння газу в СНС. Таким чином можна оцінити залежність коефіцієнту регулювання пальника від геометричних умов СНС.

З рівнянь, наведених раніше, видно, що при збільшенні геометричних характеристик зменшується величина α_{Σ} , це негативно впливає на якість процесу стабілізації факелу при пускових режимах (підвищується витрата палива на пуск системи). При згорянні природного газу визначальне значення має величина відносного кроку \bar{S} , а саме: відповідає за забезпечення в області стабілізації стехіометричного складу суміші, а також визначає гідродинамічну картину циркуляційного потоку у розгляданій системі.

Результати математичного планування зривних процесів в СНС

Природний газ	
Wп=5 м/с, підпал	$\alpha_{\Sigma} = 98,2 - 12,4d - 2,1L_1 - 17,1\bar{S} + 0,4L_1\bar{S} + 2,6d\bar{S}$ (4.24)
Wп=15 м/с, затування	$\alpha_{\Sigma} = 112,5 - 8,5d - 0,3L_1 - 30,8\bar{S} - 1,73d^2 -$ $-0,04L_1^2 + 0,6S^2 + 0,4L_1\bar{S} + 4,7d\bar{S}$ (4.25)
Зріджений газ	
Wп=5 м/с, підпал	$\alpha_{\Sigma} = 21,7 - 0,7d - 0,6L_1 - 2,74\bar{S} + 1,1d^2 +$ $+0,03L_1^2 + 0,73\bar{S}^2 - 0,05L_1\bar{S} + 4,7d\bar{S}$ (4.26)
Wп=15 м/с, затування	$\alpha_{\Sigma} = 45,5 - 6,3d - 0,6L_1 - 4,6\bar{S} + 1,8d\bar{S}$ (4.27)

Для підвищення ефективності роботи системи на знижених витратах необхідно здійснити загальний аналіз всіх досліджуваних величин параметрів паливорозподілу за результатами математичного планування експерименту (рис. 4.31, 4.32).

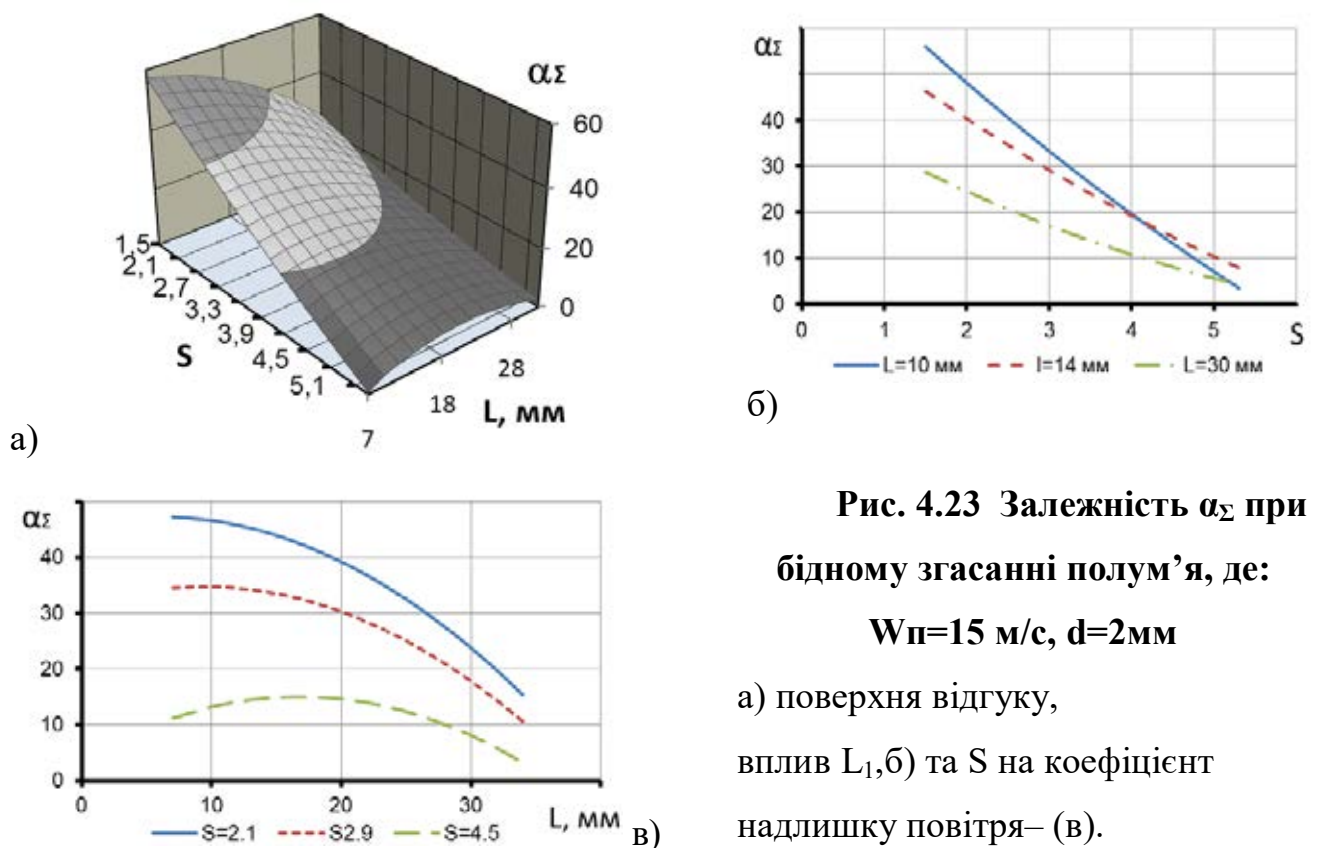
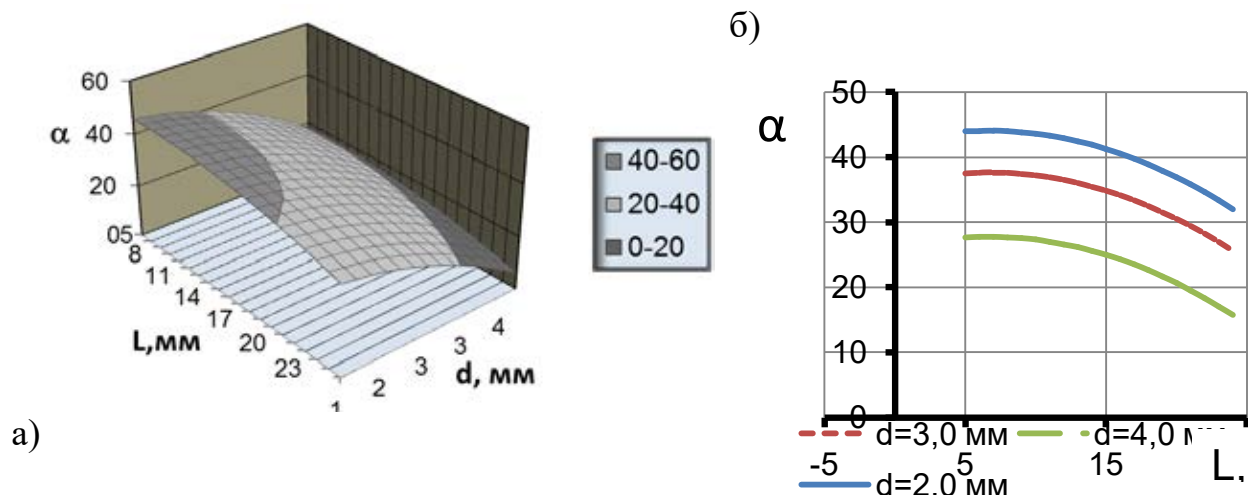


Рис. 4.23 Залежність α_{Σ} при бідному згасанні полум'я, де:

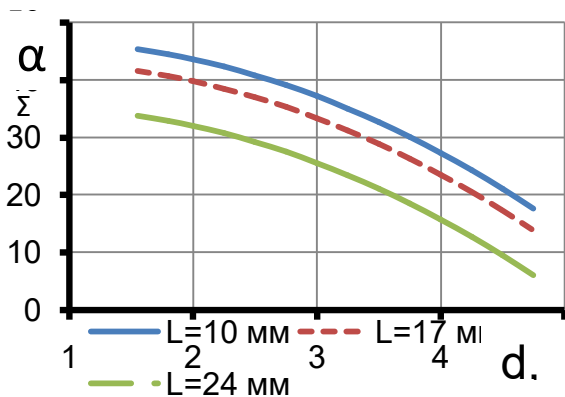
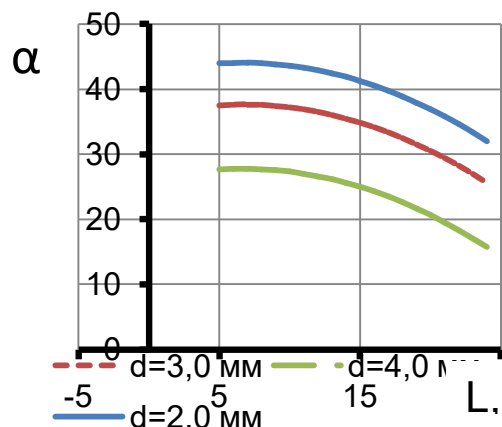
Wп=15 м/с, d=2мм

а) поверхня відгуку, вплив L , б) та S на коефіцієнт надлишку повітря– (в).



а)

б)



в)

Рис. 4.24 Залежність α_{Σ} на межі згасання полум'я

де $W_{П}=15$ м/с, $\bar{S}=2,3$, а) - поверхня відгуку, б) – вплив L_1 та діаметру отворів на коефіцієнт надлишку повітря – в).

В результаті аналізу процесів згасання факелу в системі, можливо покращити коефіцієнт регулювання системи за умов правильного вибору досліджуваних величин. З результатів, що були наведені вище видно, найбільш прийнятною є комбінація з найменшими значенням величин: $d=1,3$ мм, $L=5$ мм, $\bar{S}=1,5$ (беручі до уваги результати досліджень в зіркових точках).

Задля визначення оптимальних параметрів при дослідженні даних регресійних рівнянь треба аналізувати поведінку функції відгуку при визначенні мінімуму та максимуму. Процедура виявлення екстремумів отриманих функцій виконана у програмному середовищі MathCAD. В таблиці 4.7 наведено результати, що були отримані.

Дані аналізу цільових функцій залежності коефіцієнту надлишку повітря при режимах пуску системи

Параметр	Позначення	Максимум α для природного газу	Максимум α для зрідженого газу
Діаметр	d	1,3...2 мм	4,5...4,7 мм
Крок отворів	\bar{S}	1,5...1,7	4,3...4,8
Відстань від кромки	L_1	5,0...7,0 мм	27,0...30,0 мм

З результатів видно, що має місце залежність «пускових» параметрів та характеристик «згасання» системи для досліджуваних газів, тому при подальшому дослідженні буде враховуватись лише область «бідного» зриву факелу. Важливо відмітити, що ефективність пальника для обох видів палива не однакова, бо для палива з вищою калорійністю задля покращення режимів пуску, в межах значень, що аналізуються, необхідна інша концентрація в ділянці стабілізації. Достатні концентрації досягаються при збільшені відстані між отворами, у порівнянні з подачею газу у пальниках на природному газі.

Так, для природного газу головним є організація геометрії паливоподачі з найменшими значеннями параметрів в границях, що досліджуються. У свою чергу, для пропан-бутанової суміші, необхідним є певне збільшення відносного кроку, у зв'язку з більшою калорійністю пропан-бутанової суміші.

З рис. 4.33 видно, що для зрідженого газу збільшення сумарного коефіцієнту надлишку повітря α_{Σ} можливе за рахунок збільшення діаметрів, а при збільшенні відстані L_1 , в цей час, при менших діаметрах, величина L_1 має несуттєвий вплив.

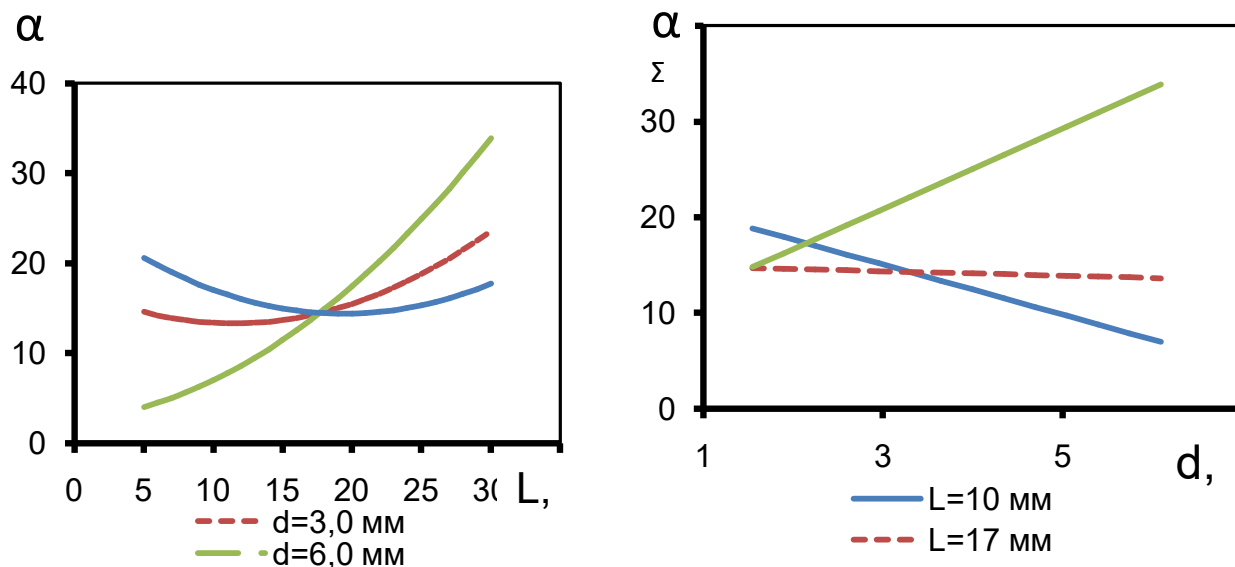


Рис. 4.25 Залежність впливу значення діаметрів отворів для палива на границі бідного згасання полум'я при різних значеннях L_1 , $S=4,6$, паливо – зріджений газ

Отже, при розробці рекомендацій щодо проектування пальників, першою геометричною характеристикою подачі палива має бути величина діаметру отворів для палива, що обирається відповідно з технологічних умов ВО (див. табл. 4.8).

В літературному джерелі [20] наведено дані щодо аналізу впливу обмежувача на стабільне згоряння палива в системі, та показана можливість застосування конструкції ПП щодо переходу до згоряння менш калорійних палив у ВО, що працює на природному газі. Також при спалюванні палив з низькою калорійністю в умовах СНС перспективною стає метод раціонального розподілу палива - багаторядкова схема [21, 22].

Таблиця 4.8

Рекомендації щодо визначення геометричних параметрів розподілу палива (паливо природний газ)

d, мм	0,5-2 мм	2-4 мм	4-6,5 мм
Об'єкт	Камери згоряння газових турбін	Котли, печі, сушарки	Котли, печі, сушарки
Характеристика течії пального та окисника	Мінімальна проникність струменів палива у	За умов $q=0,5-7$ досягається стійка вихрова структура	Стале горіння при: $q=1-10$

	потік окисника	потіку	
Процеси утворення пальної суміші	Концентраційні межі для суміші досягаються за умов: $\bar{S} = 4-12$	Концентраційні межі для суміші досягаються за умов: $\bar{S} = 3-4$	Концентраційні межі для суміші досягаються за умов: $\bar{S} = 4,0-4,3$
Стабілізація процесу горіння	Надійне горіння без хлопків та зривів при $\alpha > 2$	Надійне горіння без хлопків та зривів при $(\alpha > 1,01)$	Надійне горіння без хлопків та зривів при $(\alpha > 1,01)$

4.8 Визначення області рекомендованих значень параметрів паливорозподілення пальників на основі струменево-нішевої технології

Результати, що були отримані в ході експерименту, щодо впливу основних параметрів системи, на загальні та пускові якості при використанні СНС в межах рекомендованих геометричних параметрів паливорозподілу, допомагає скласти рекомендації для проектування газопальникового обладнання для широкого кола потреб енергетики та промисловості. Метод, що був представлений, заснований на принципі модульності пальників, в яких у вигляді паливної комірки виступає одиничний модуль полум'я, параметри роботи якого повністю визначають режими роботи пальників. У разі застосування набору з декількох робочих модулів можна спроектувати пальники з необхідною тепловою потужністю. Геометричні розміри стабілізаторів приймається з огляду на конструктивні особливості об'єкту, а повітропровід з модулями має розташовуватись у відповідному отворі, де розташовано штатний пальник. Отже, геометричні характеристики паливорозподілу необхідно обирати зі значень діаметрів отворів для палива так, як наведено на діаграмі (рис. 4.34) у наступній послідовності: відстань L_1 , відносний крок та значення коефіцієнта захарщення повітряного каналу стабілізаторами.

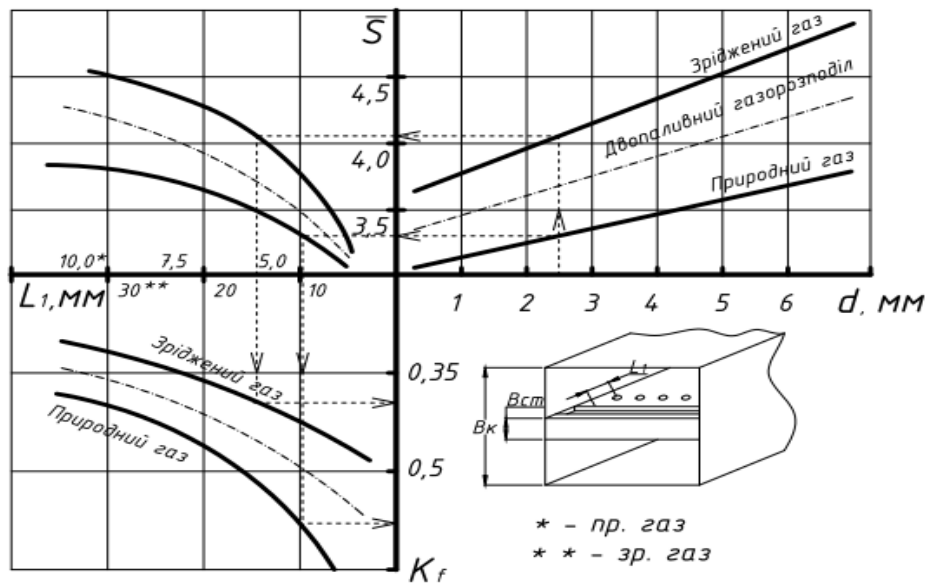


Рис. 4.26 Номограма для вибору основних параметрів паливорозподілу ПП на основі СНТ, повітропровід квадратного обрису, коефіцієнт захарашення $K_f = B_{ct} / B_k$

Відносний крок визначається з огляду на гідродинаміку струмин палива з течією окисника, та з врахуванням організації певної концентрації пальної суміші в області стабілізації факелу. Таким чином, робочі режими досягаються значенням відносних кроків (для обох видів газу) в діапазоні 3,0...5,0. Величина L_1 дозволяє регулювати ступінь гомогенізації пальної суміші, отже, необхідно при більших діаметрах обирати більші значення у певних для кожного випадку межах (2 квадрант діаграми). Завантаження модулями потоку окисника K_f при більших значеннях діаметрів зсовується в бік меншого діапазону варіювання, щоб забезпечити достатню кількість повітря при збереженні рекомендованих значень гідродинамічного параметру q .

4.9 Висновки за розділом

Стосовно матеріалу, що був приведений у третьому розділі, зроблені наступні висновки.

1. Експериментально визначені характеристики масообмінних процесів з потоком набігаючого повітря, що проходять у каверні. Встановлено автомодельність процесу масообміну. Виявлено, що на об'єм речовини, яка

поступає в ЗЗС стабілізатору визначальний вплив спричиняє значення висоти робочого каналу. Коефіцієнт масообміну підвищується у відповідності зі збільшенням швидкості течії суміші, що набігає.

2. Збільшення масообміну зони стабілізації з основним потоком звужують межі сталого горіння в області збіднених сумішей. Ця особливість стосується тільки каналів з характеристиками $H_k > 40$ мм. У випадку якщо висота каналу зменшується до $H_k = 40 \dots 24$ мм, діапазон сталої роботи для невеликих ніш зменшується. Це можна пояснити тим, що збільшується вплив пограничного шару на гідродинаміку течії суміші у повітропроводах відносно менших розмірів (дані, що були отримані стосуються лише ніш прямокутної форми з порожниною $H = 5 \dots 10$ мм зі співвідношенням сторін $L/H = 4 \dots 5$).

3. З врахуванням теплової теорії стабілізації, отримано узагальнюючі рівняння стосовно бідного згасання факелу в СНС, за допомогою яких можна визначити границі мінімально допустимих навантажень системи в залежності від виду палива та масообмінних якостей каверни.

4. Виявлено вплив геометричних параметрів каверни на характеристики сталої роботи системи. Доведено, що використання трапецієподібної ніші дозволяє надійно стабілізувати факел, при цьому граничне значення кута нахилу бокових стінок ніші лежить в діапазоні значень $45 \dots 90^\circ$.

5. В роботі проведено дослідження появи пульсаційних явищ при горінні палива в СНС, що пов'язано безпосередньо з виникненням процесу стабілізації факелу «на струминах». Встановлено закономірності виникнення пульсацій факелу в умовах струменево-нішевого стабілізатора за різних значень його геометричних параметрів. Сформульовано рекомендації стосовно проектування ПП на основі СНС з виключенням впливу зазначеного вище явища.

6. Проведено аналіз залежності величини гідравлічного опору окисника в каналі від режимних характеристик СНС. Виконано порівняння коефіцієнта гідравлічних втрат для пальників різних типів. Виявлено, що найменші значення гідравлічних втрат у повітряному каналі мають пальники на

основі СНТ.

7. На основі методів математичного планування отримано регресійні рівняння для коефіцієнту надлишку повітря при бідному згасанні факелу в залежності від параметрів паливорозподілу системи. Виявлено, що пальні гази, з різними характеристиками, потребують вибору відповідних параметрів паливорозподілу. Доведено, що використання «універсальної» схеми розподілу палива забезпечує ефективне згоряння обох видів палива з деяким погіршенням пускових режимів пальників.

8. В ході досліджень автономних струменево-нішевих модулів отримано результати, що дозволили виконати модернізацію великої кількості вогнетехнічного обладнання з використанням ПП СНТ. При цьому досягнуто значного підвищення ККД установок з максимальним дотриманням вимог щодо еколого-енергетичних показників обладнання.

4.10. Список використаних джерел

1. Иссерлин, А.С. (1980). *Основы сжигания газового топлива*. Москва. Недра, 336 с.
2. Сполдинг, Д.Б. (1980). *Горение и массообмен*. Пер. англ. Р.Н. Гизатуллина, В.И. Ягодкина; Под. ред. В.Е. Дорошенко, Москва. Машиностроение, 240 с.
3. Лефевр, А. (1986). *Процессы в камерах сгорания ГТД*. Москва, Машиностроение, 625 с.
4. Ильяшенко, С.М., Талантов, А.В. (1964). *Теория и расчет прямоточных камер сгорания*. Москва, Машиностроение, 306 с.
5. Зельдович, Я.Б., Франк-Каменецкий Д. А. (1938) *Теория теплового распространения пламени*. Журнал физической химии, Т. 12., № 1. с. 100-105.
6. Христич, В.А., Любчик, Г.Н., Гавриш, С.А. (1973). *Расходные характеристики и оптимальные геометрические соотношения горелок струйного типа*. Вестник КПИ, серия Теплоэнергетики, №10, С. 31–34.
7. Бутовский, Л.С., Грановская, Е.А., Любчик, Г.Н., Христич, В.А.

(1975). *Исследование закономерности выгорания топлива за уголковыми и плоскими стабилизаторами пламени*. Теория и практика сжигания газа, Вып. VI., Недра, С. 324–338.

8. Пчелкин, Ю.М. (1984). *Камеры сгорания газотурбинных двигателей*. Москва, Машиностроение, 280 с.

9. Христич, В.А, Бутовский, Л.С., Любчик, Г.Н. (1964). *О расходных характеристиках рециркуляционной зоны за уголковым стабилизатором*. Киев, Вестник КПИ, серия Теплоэнергетики, С. 328–341.

10. Раушенбах, Б.В., Белый, С.А., Беспалов, И.В., Бородачев, В.Я., Волынский, М.С., Прудников, А.Г. (1964). *Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей*. Москва. Машиностроение, 526 с.

11. Винтовкин, А.А., Ладыгичев, М.Г. (2001). *Современные горелочные устройства*. Москва. Машиностроение-1, 487 с.

12. Lefebvre, A.H., Ibrahim, A.R.A.F., Berson, N.C. (1966). *Factors affecting fresh mixture entrainment in bluff-body stabilized flames*. Combustion and Flame, vol. 10. № 3, P. 231–239.

13. Христич, В.А. (1982). *Камеры сгорания газотурбинных установок и их расчет*. Киев, КПИ, 107 с.

14. Идельчик И.Е., Штейнберга, М.О. (1992). *Справочник по гидравлическим сопротивлениям*. Москва, Машиностроение, 672 с.

15. Алешко, С.А. (2013) *Системы охлаждения микрофакельных горелочных устройств с плоскими стабилизаторами пламени*, автореферат дис. канд. техн. наук: 05.14.06, Киев, НАН У ИТТФ, 24 с.

16. Хасан Хайсам, (1993). *Эмиссия NO_x струйно-стабилизаторными горелками и некоторые возможности ее снижения*, автореферат дис. канд. техн. наук, 05.04.01, Киев, КПИ, 20 с.

17. Абдулін, М.З., Джамал, І. (1997). *Дослідження пальникового пристрою з поперечною подачею струменів палива*. Екотехнології та ресурсозбереження. Київ, №2, С. 68-70.

18. Любчик, Г.Н., Чабанович, Л.Б., Говдяк, Р.М., Реграги, А., Шелковский, Б.И. (2008). *Когенерационно-утилизационные технологии на базе газотурбинных установок*. Киев, Ваарта, 188 с.
19. Фиалко, Н.М., Прокопов, В.Г., Алешко, С.А., Полозенко, Н.П. та ін. (2012). *Анализ влияния геометрической формы нишевой полости на аэродинамическое сопротивление канала*. Промышленная теплотехника, №1., С.72–76.
20. Абдулін, М.З., Сірий, О.А. (2014). *Дослідження сталості горіння в струменево-нішевій системі при обмеженні далькобійності паливних струменів*. Енергетика:економіка, технології, екологія, № 64. С. 22 – 25.
21. Абдулін, М.З., Сірий, О.А. (2013). *Ізотермічні дослідження модулів пальникових пристроїв на основі струменево-нішевих систем*. Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків: НТУ «ХПИ», №13. С. 81–89.
22. Абдулін, М.З., Сірий, О.А. (2013). *Особенности процессов паливо роздачі в струменево-нішевих системах*. Східно-Європейський журнал передових технологій, № 64, С. 22 – 25.

РОЗДІЛ 5. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ВПЛИВУ ВИЗНАЧАЛЬНИХ ФАКТОРІВ НА РОБОЧИЙ ПРОЦЕС СИСТЕМ СТРУМЕНЕВО-НІШОВИХ МОДУЛІВ.

5.1. Порівняльний аналіз характеристик факелу і процесів вигорання для систем струменево-нішових модулів та їх автономних аналогів.

5.1.1 Основні особливості робочого процесу одного модуля з прямокутною нішевою порожниною.

З ціллю дослідження закономірностей робочого процесу для систем струменево-нішових модулів були виготовлені їх дослідні зразки (рис.5.1).



Рис.5.1 Перші дослідні зразки струменево-нішових модулів

Дослідження робочих процесів струменево-нішових модулів та їх взаємодія при об'єднанні в систему з декількох модулів представляє значний інтерес з точки зору реалізації модульного принципу створення палинкових пристроїв на їх основі.[1-7]Перед проведенням порівняльного аналізу характеристик факелу для одиночних модулів та їх систем був проведений детальний газовий аналіз продуктів згорання на вміст CO , NO_x , CO_2 , H_2 , O_2 .

Умови проведення дослідів:

- температура повітря в приміщенні - 16 °С;
- відносна вологість – 65%;
- швидкість повітря в приміщенні – 0м/с;
- тиск повітря в приміщенні – 98,3 кПа;
- нижня температура згорання – 36710 кДж/м³;

Діапазон проведення дослідів:

- тиск повітря перед пальником ($P_v^{вх}$) – 80...400 Па;
- витрата повітря на пальник (G_v) – 210...470м³;

- тиск повітря на пальник ($P_{г\text{вих}}$) – 24...5000 Па;
- витрата газу на пальник ($G_{г}$) - 2,1... 30,3 м³/год;
- коефіцієнт надлишку повітря (α) – 0,79...10,0;

Схема розташування модулів та точки відбору проб продуктів газового аналізу приведені на (рис.5.2).

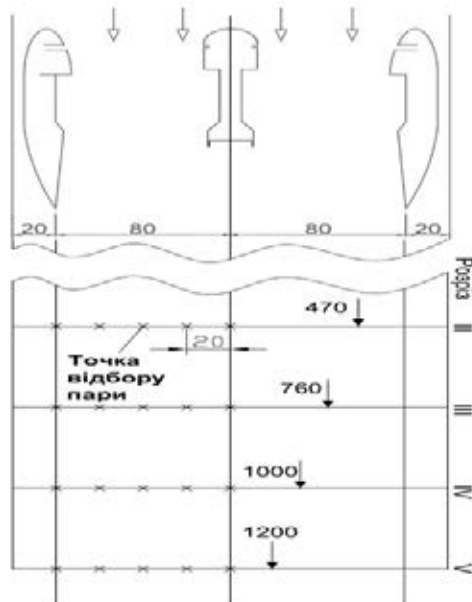


Рис.5.2 Схема встановлення струменево-нішових модулів та точки відбору проб продуктів газового аналізу

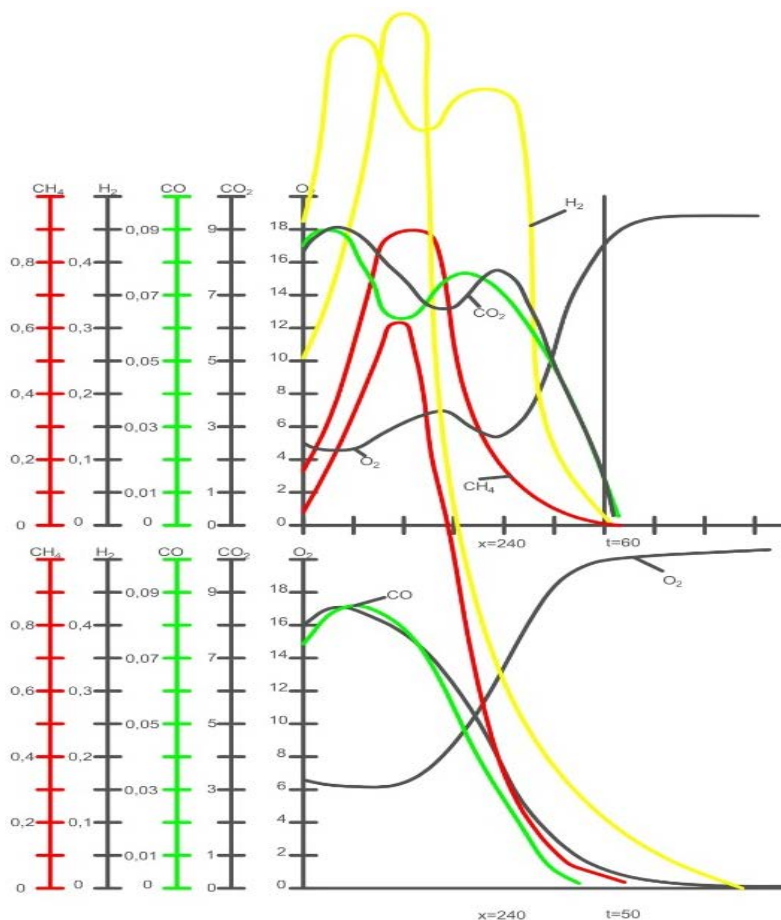


Рис.5.3 Результати газового аналізу по довжині факелу

Видно, що значно вищий рівень інтенсивності вигорання знаходиться на осі центрального модуля. Це пояснюється кращими умовами для протікання хімічних процесів. Факел центрального модуля знаходиться між факелами сусідніх модулів. Це означає, що на паливну суміш, яка знаходиться центральним модулем активно впливає тепло-виділення та активні центри факелів сусідніх модулів. Така ситуація є характерною для модуля, що працює в паливковому пристрої. На рис.5.4. приведені результати вигорання за струменево-нішовим модулем при різних коефіцієнтах надлишку повітря. Видно, що на початковій ділянці розвитку факела (до 200 мм) інтенсивність вигорання однакова в широкому діапазоні зміни надлишкового повітря.

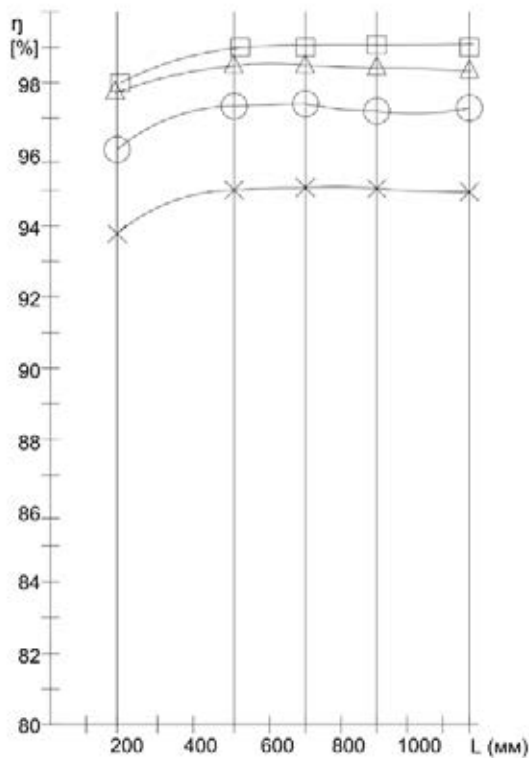


Рис. 5.4 Вигорання метану за одиночним струменево-нішовими пілонами

$C=18\text{мм}$; $H= \text{мм}$; $L= \text{мм}$; $d=1\text{мм}$; $S=3,5$; $x_1= \text{мм}$; $W_B=20\text{м/с}$;

Зонд інтегральний, паралельно модуля; $x = 16$; $o = 8,5$; $\Delta = 6$; $\blacksquare = 4,5$

Подальше зменшення α значно підвищує інтенсивність вигорання по

довжині факелу. Виміри хімічного недопалу по перерізу перпендикулярному осі стенду (рис.5.6.) показують його значну залежність від відстані між модулями. Це вказує на можливість суттєво змінювати характеристики факелу за рахунок зміни відстані між модулями, що означає зміну коефіцієнту захарашеності потоку. Данні приведені на рис.5.6 підтверджують висновки про залежність довжини факелу від коефіцієнту надлишку повітря. Видно, що на довжині близько 1 м маже повністю вигорає паливо не тільки за модулем але і по всьому перерізу. З рисунку видно, що за модулем цей процес відбувається найбільш інтенсивно. У міжмодульному пристрої вигорання факелу забезпечується за рахунок газу який розповсюджується над поверхнею фронта полум'я.

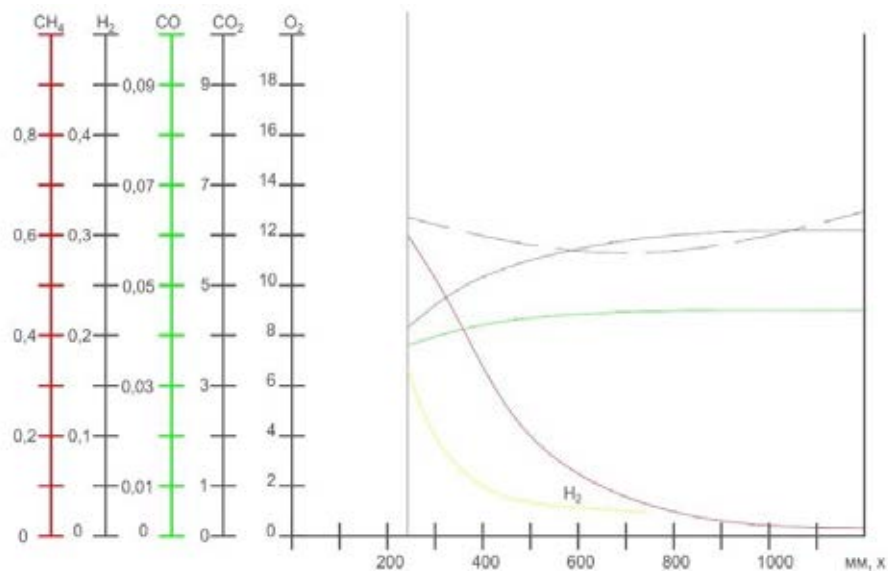


Рис. 5.5 Результати газового аналізу по довжині факелу

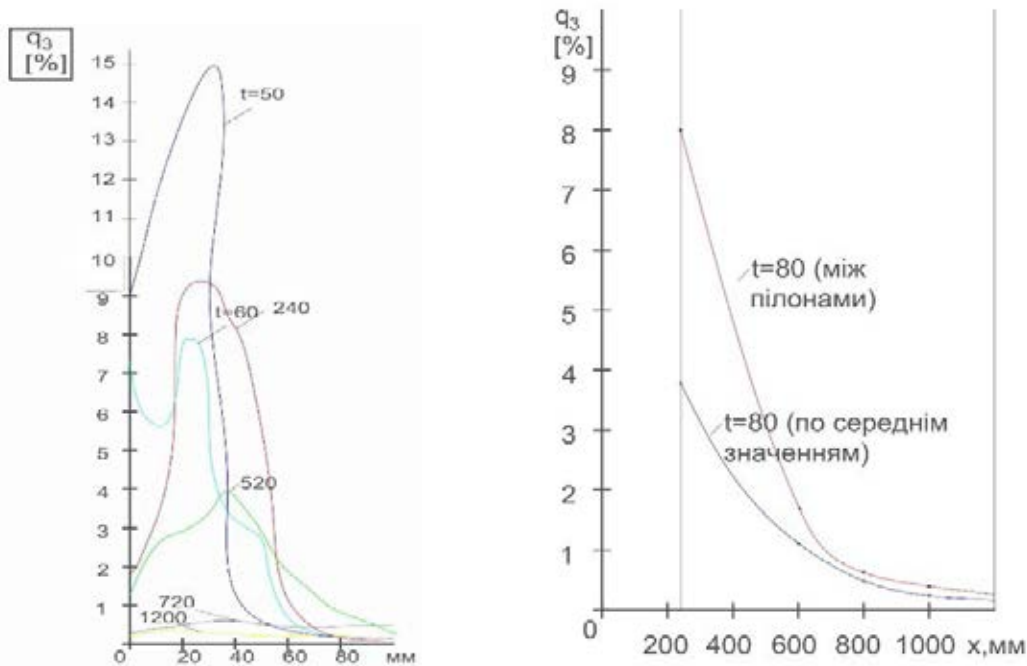


Рис. 5.6 Хімнедопал в залежності від відстані між модулями
t-відстань між модулями в мм

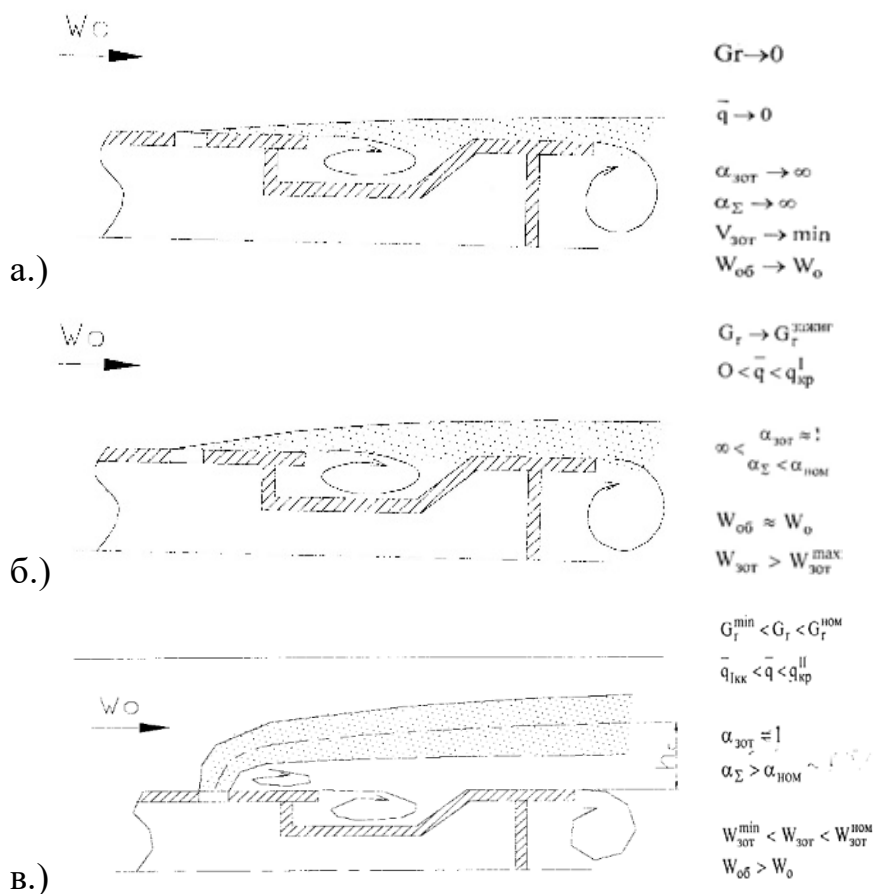
5.1.2 Фізична модель аеродинаміки та сумішоутворення в струменево-нішовій системі

Експериментальні і аналітичні дослідження взаємозв'язків, а також аномальних явищ аеродинаміки та сумішоутворення в струменево-нішовій системі дозволили створити фізичну модель аеродинаміки та сумішоутворення в струменево-нішовому модулі (рис.5.7). Вона відображає взаємозв'язок балансного коефіцієнта надлишку повітря, структури течії і сумішоутворення в циркуляційних зонах струменево-нішового модуля [1] для рекомендованих значень \bar{S} , d і L . (дивись розділ 4).

Модель показує, що циркуляційна зона, яка забезпечує сумішоутворення і надійну стабілізацію факела стійко існує в широкому діапазоні зміни витрат газу. Структура і об'єм циркуляційної зони змінюється в незначних межах і залежить від значень гідродинамічного параметру \bar{q} . При значеннях $\bar{q} \rightarrow 0$ (рис.5.7 а) стійка циркуляційна зона формується нішовою порожниною і має мінімальний розмір. При цьому забезпечується можливість горіння при мінімальних витратах газу достатніх для створення горючих концентрацій в зоні

стабілізації полум'я 5.7 б). Такому випадку відповідає значення $\bar{q}_{кр}^{-1}$, коли балансний надлишок повітря набуває значень $\alpha_{\Sigma} = 80-100$. Формування структури струменів відбувається при значеннях $q_{кр}^1 < \bar{q} < q_{кр}^2$. При цьому за системою струменів формується складна вихрова структура. В циркуляційних зонах підтримується стехіометрична концентрація паливної суміші яка визначається $(\bar{s}; L; d)$. 5.7в). При значеннях $\bar{q} \approx q_{кр}''$ відбувається формування стійкої загальної циркуляційної зони за рахунок злиття вихрових структур за системою струменів і в нішовій порожнині (Рис 5.8 г.) Розмір циркуляційної зони визначається гідродинамічним параметром.

При досягненні встановленої межі розповсюдження верхньої границі струменів газу сумарний надлишок повітря стає рівним надлишку повітря в циркуляційній зоні. (Рис 5.8 г.). Такий режим забезпечує $\alpha \approx 1$. При перевищенні далекобійності струменів межі розповсюдження $\bar{q} > q_{кр}'''$ виникає перебагачення паливної суміші на периферії і порушується рівномірність сумішоутворення по потоку. Такий режим є неробочим.



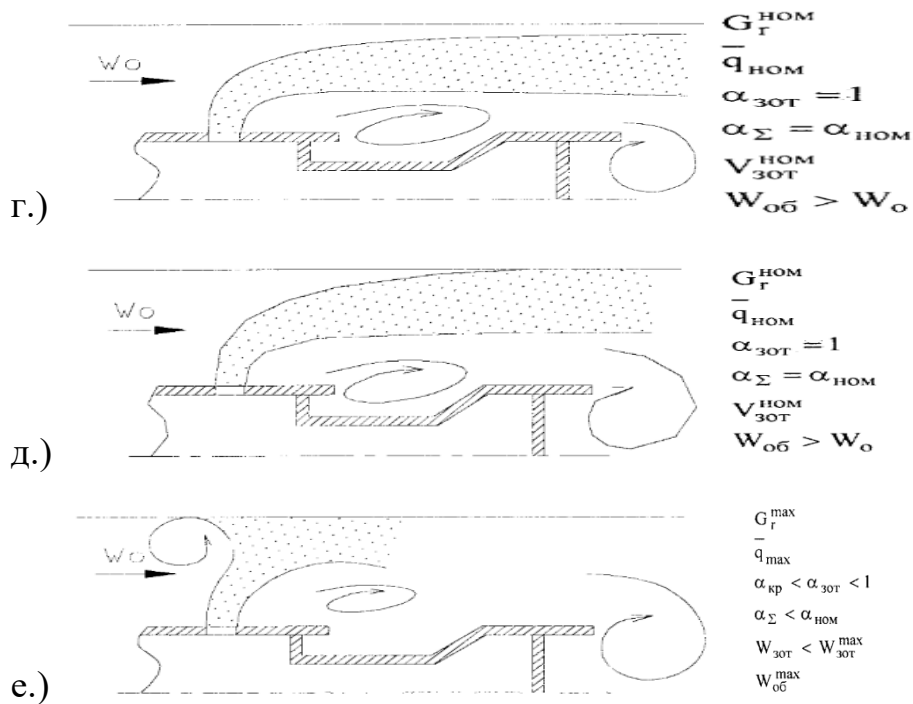


Рис.5.7 Фізична модель структури течії та сумішоутворення в струменево-нішовому модулі.

де, G_{Γ} – витрата пального через систему отворів, $\bar{q} = \rho_{\Gamma} W_{\Gamma} / \rho_{\text{В}} W_{\text{В}}$ – гідродинамічний параметр, $\alpha_{30\Gamma}$ – коефіцієнт надлишку повітря в вихрових зонах, W_{Γ} , $W_{\text{В}}$ – швидкість горючого і окиснювача, $W_{\text{об}}$ – швидкість окиснювача, що обтікає струмені газу.

5.1.3 Дослідження розвитку факелу в ПП з двома модулями

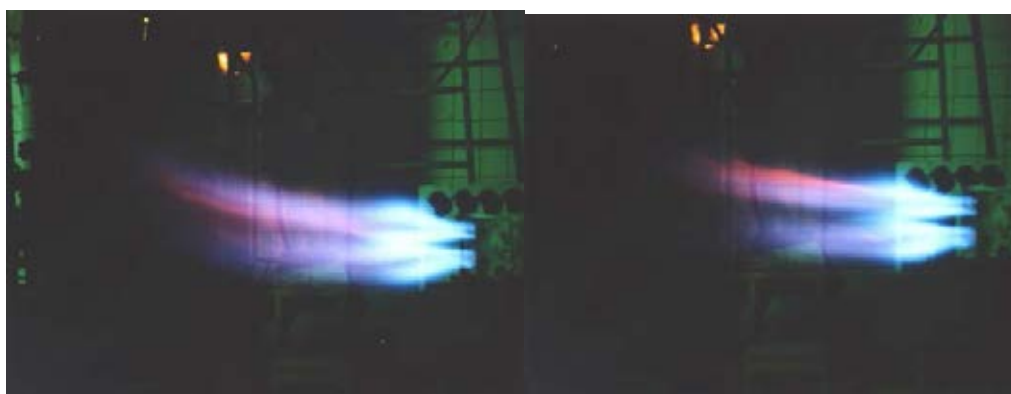
Для дослідження стійкості горіння та структури факела проведено дослідження горіння за двома однаковими струменево-нішовими модулями ($L/H=40/10$; $S \approx 3,5$; $l=10\text{мм.}$). Режими досліджень приведені в табл 5.1.

Відношення витрати газу приведено у вигляді коефіцієнту надлишку повітря – α , які показані для кожного режиму горіння. Як видно з малюнків (рис.5.9-5.12), стабільне запалення факелу і горіння здійснюється в широкому діапазоні зміни α . Візуальна довжина факела при цьому дорівнює одному калібру пальника. Слід відмітити, що довжина факелу не залежить від абсолютних значень швидкості повітряного потоку і витрати газу, а в основному визначається їх співвідношенням (значення α).

Факел за стабілізатором стійко тримається при коефіцієнті надлишку

повітря, $\alpha < 1,0$. При швидкості $W_B=25,0$ м/с режиму з $\alpha < 1,0$, не вдалось досягнути зриву факелу в зв'язку з обмеженням витрати газу в умовах даного стенду. Коефіцієнт робочого регулювання пальникового пристрою в межах швидкості повітряного потоку між стабілізаторами $W_B=11-25,0$ м/с рівний 10. За результатами дослідження встановлено, що в діапазоні швидкостей повітряного потоку між стабілізаторами $W_B = 11-25,0$ м/с стабільне запалювання факелу від додаткового факелу здійснюється навіть при коефіцієнті надлишку повітря $\alpha \approx 10$. Пальниковий пристрій надійно працює при зменшенні коефіцієнту надлишку повітря $\alpha \approx 1$ і навіть при $\alpha < 1,0$ (отримано для $W_B = 11-16$ м/с). Видно, що система з струменево-нішових модулів забезпечує стійке горіння в діапазоні швидкостей повітряного потоку, відповідних експлуатації ВО. Причому факел розвивався в умовах холодного повітря ($+5^0\text{C}$). В топковому просторі ВО температура на сотні градусів вище і тому, характеристики горіння будуть значно покращуватись. Звертає на себе увагу стійкість структури факелу і ідентичність факелів системи. Кожен модуль ефективно забезпечує всі стадії робочого процесу і являється автономним. Це підтверджує можливість набрати пальниковий пристрій необхідної потужності з окремих модулів.

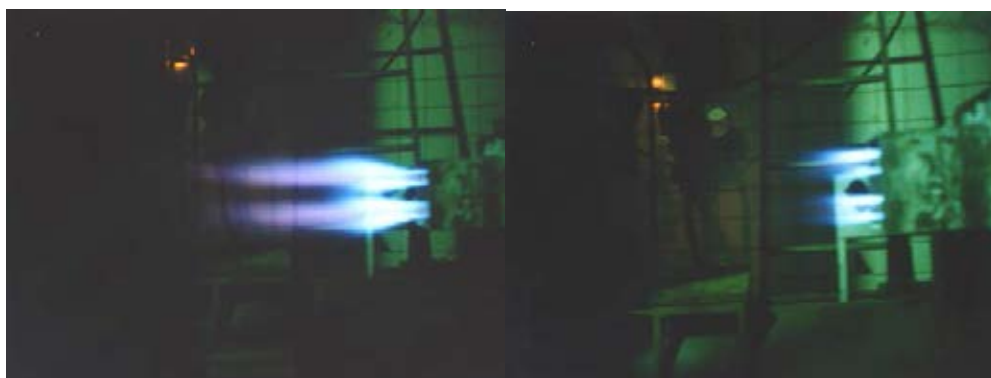
1-два модуля з приструменевими нішами, 2- два модуля з торцевими нішами.



$\alpha=0,79$

$\alpha=1,48$

Рис.5.9 Вигорання паливної суміші по довжині футерованого каналу при $W_B=25\text{м/с}$ і $q=15$



$\alpha=2,00$

$\alpha=10$

Рис.5.10 Розвиток факела в струменево-нішевому пальниковому пристрої при зміні режимів роботи. $W_{п}=11$ м/с



$\alpha=1,01$

$\alpha=1,54$



$\alpha=1,94$

$\alpha=10$

Рис.5.11 Розвиток факела в струменево-нішевому пальниковому пристрої при зміні режимів роботи. $W_{п}=16$ м/с



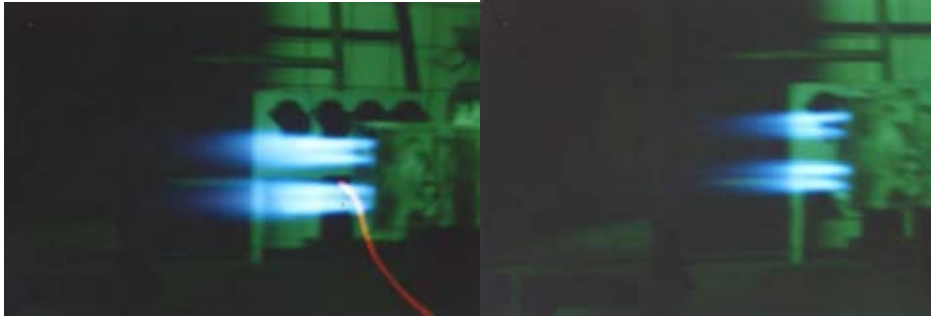
$\alpha=1,55$ $\alpha=2,00$  $\alpha=4,90$ $\alpha=8,90$

Рис. 5.12 Розвиток факела в струменево-нішевому пальниковому пристрої при зміні режимів роботи. $W_{\text{п}}=25$ м/с

5.1.4 Дослідження вигорання паливної суміші для системи струменево-нішових модулів з торцевими та приструменевими нішами

При зазначених вище умовах проведення порівняльних досліджень вигорання паливної суміші по довжині футерованого каналу для двомодульних пальникових пристроїв з приструменевими нішами та з торцевими нішами. Результати досліджень приведені на рис. 5.13. Видно, що наявність приструменевих ніш забезпечує більш високий рівень інтенсивності вигорання, особливо на початку розвитку факела.

Вимірювання гідравлічного супротиву по тракту окиснювача не виявило різниці між пальниками. Дослідження ПП з приструменевими нішами в промислових умовах показали невелике зростання гідравлічного супротиву у порівнянні з ПП з торцевими нішами менше на 5%.

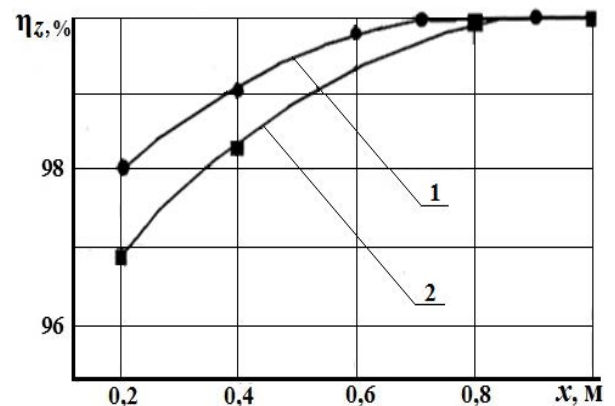
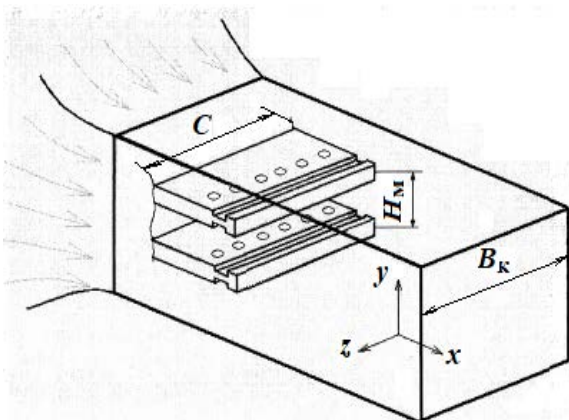


Рис. 5.13 Схема системи з двох струменево-нішових модулів з
прямокутною нішою

(а) та повнота вигорання палива η_z по довжині каналу (б) для даного модуля (1) та відповідного струменевого модуля з торцевою нішою (2) при $L = 20 \cdot 10^{-3}$ м; $H = 5 \cdot 10^{-3}$ м; $\bar{S} = 3,5$; $L_1 = 15 \cdot 10^{-3}$ м; $W_{\Pi} = 20,0$ м/с; $\alpha = 1,05$.

Таблиця 5.1. – Режими досліджень пального пристрою струменево-нішового типу на відкритому стенді.

Номер режиму		1	2	5	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Назва параметру	Од.вим.	Числове значення параметру															
Тиск повітря перед пальником	Па	80	80	80	80	80	80	150	150	150	150	150	150	400	400	400	400
Швидкість повітря між стабілізаторами	м/с	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Витрата повітря на пальник	м ³ /год	210	210	210	210	210	210	290	290	290	290	290	290	470	470	470	470
Тиск газу на пальнику	Па	24	150	600	1100	2250	3900	450	250	1200	1900	4400	5500	150	500	2900	5000
Витрата газу на пальник	м ³ /год	2,1	5,2	10,5	14,2	20,3	26,8	2,9	6,8	14,8	18,7	28,4	32,0	5,2	9,6	23,0	30,3
Коефіцієнт надлишку повітря		10,0	4,0	2,0	1,48	1,03	0,79	10,0	4,25	1,94	1,54	1,01	0,91	8,9	4,9	2,0	1,55
Примітка		Роз-пал						Роз-пал						Роз-пал			

5.1.5 Вплив коефіцієнта захарашення прохідного перерізу каналу ПП на характеристики вигорання факела

Вимірювання якості вигорання палива в умовах футерованого каналу показало скорочення довжини факела для системи модулів. Також проводились дослідження вигорання газу за системою з п'яти модулів (рис 5.14). Вони показали скорочення довжини факелу при зміні відстані між пілонами. При цьому змінюється коефіцієнт захарашення потоку(рис.5.15):

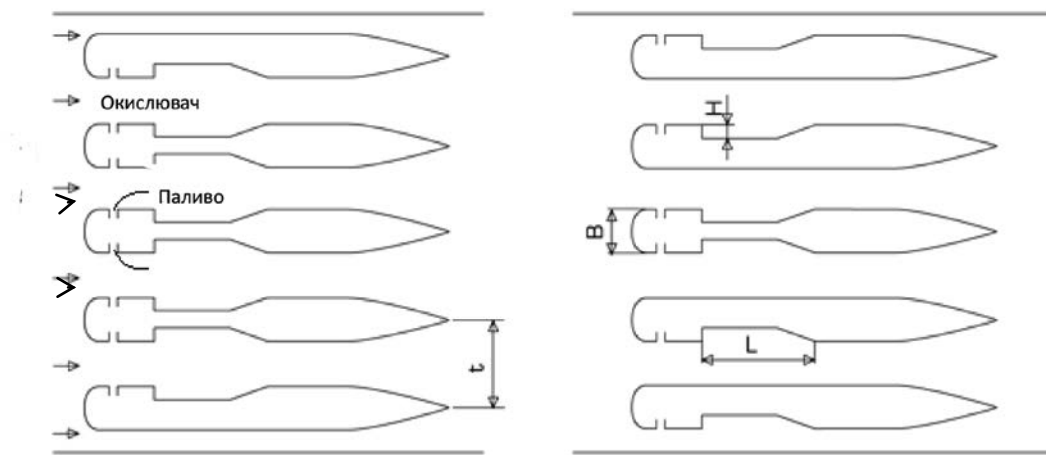


Рис. 5.14 Решітка з струменево-нішових модулів

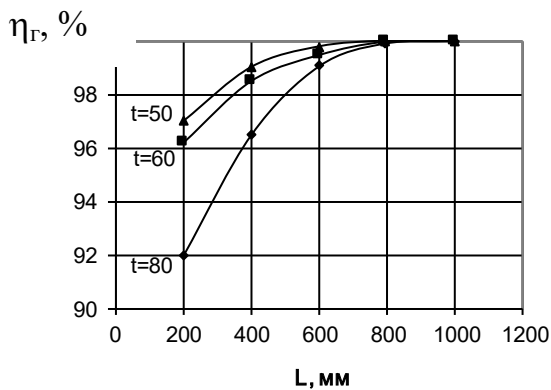


Рис. 5.15 Вигорання природного газу з решіткою з струменево-нішових модулів. $B=10\text{мм}$; $K_f=0,15\dots0,5$

$$K_f = \frac{f}{\beta}$$

Стійке й ефективне горіння спостерігалось в діапазоні $0,15 \leq K_f \leq 0,5$

Такий рівень загромождження забезпечує зниження гідравлічних втрат по тракту окисника в декілька раз. Цей розділ присвячений дослідженням течії при обтіканні пілона по трактам горючого і окиснювача. Від структури течії по тракту горючого залежить: рівень робочого тиску газу, можливість виникнення вібраційних режимів, рівномірність самоохолодження елементів

ГУ і т.д.

5.2 Дослідження структури факелу за струменево-нішовим модулем

На рис. 5.16 представлені результати експериментального дослідження структури факелу струменево-нішового модуля на початкових ділянках, де відбувається підпалення та стабілізація горіння циркуляційної зони СНС.

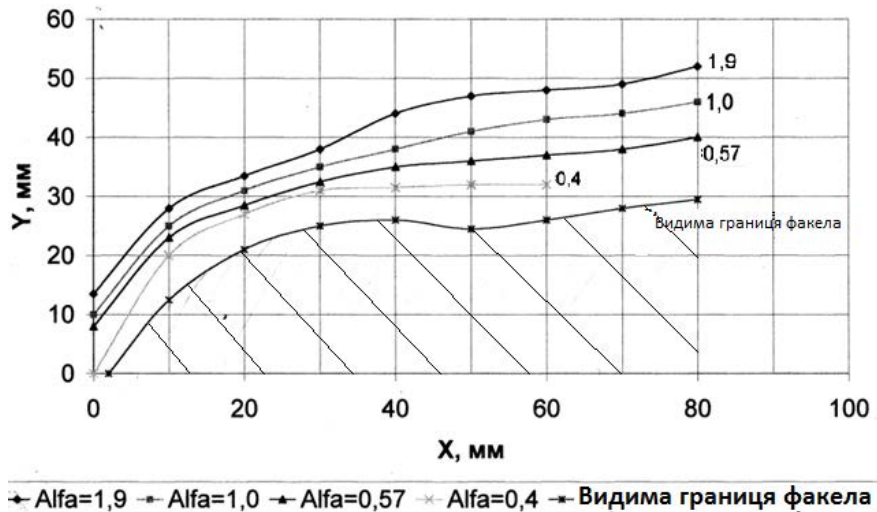


Рис. 5.16 Структура факела на початковій ділянці. ($L/H=40/10$; $\bar{S} = 3,5$; $d=3$ мм; $l=10$ мм; $w=15$ м/с)

Також проведені дослідження формування вихрової структури за системою струменів. Пневматичними зондами визначалась зона нульових швидкостей, яка приймалась за центр циркуляційної течії. Видно як збільшення швидкості газу підіймає центр вихору від дна ніши у обтікаючий потік. (рис.5.17)

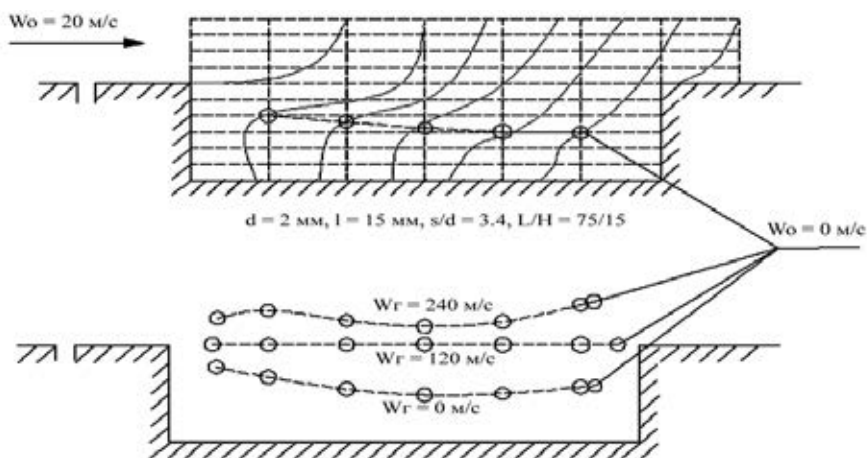


Рис. 5.17 Формування циркуляційних зон струменево-нішової системи в залежності від швидкості витікання струменів газу

а.) без струменів газу б.) з системою струменів газу

На рис.5.17. представлені дослідження аеродинаміки ближнього сліду т сумішоутворення в ближньому сліді за системою струменів.

Видно, що вихрова структура знаходиться в області горючих концентрацій паливної суміші. Це забезпечує організацію стійкої аеродинамічної стбілізації горіння.

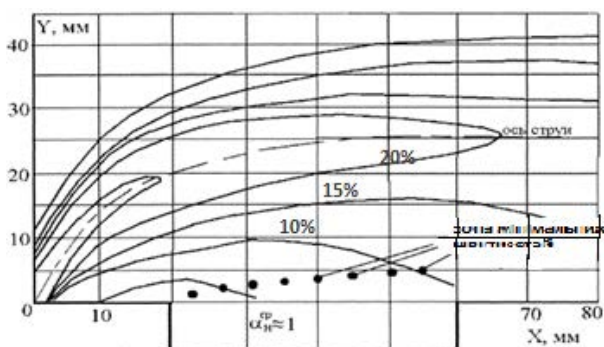


Рис. 5.18 Розташування зони мінімальних швидкостей вихорової структури в концентраційному полі паливної суміші в приструменевій ніші

Експериментальні і теоретичні дослідження струменево-нішової системи, а також струменевих і струменево-нішових модулів різної конструкції дозволили створити фізичну модель робочого процесу струменево-нішових модулів з приструменевою нішею. Система струменів горючого рівномірно розподіляє паливну суміш в просторі, що прилягає до ніш на глибину проникнення струменів в потік що зносить і автономально насичає циркуляційні зони в приструменевій та торцевій нішах (рис.5.19). При збільшенні далекобійності струменів відбувається перебудова структури течії пов'язана з виникненням циркуляційної течії в ближньому сліді за системою струменів.

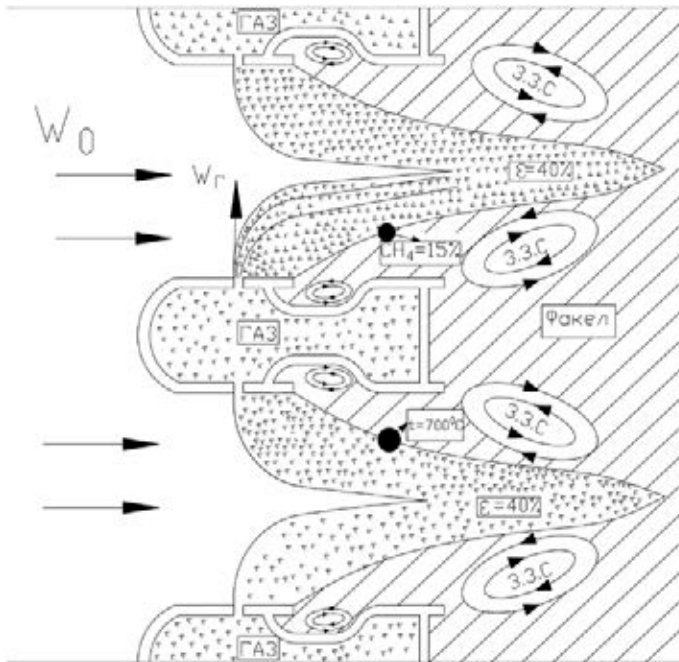


Рис. 5.19.
Структура факела
струменево
нішевого модуля на
номінальному
режимі роботи.

5.3 Принципи проектування пальникових пристроїв зі струменево-нішовими системами

5.3.1 Проектування пальникових пристроїв на основі струменево-нішових модулів

Результати досліджень в ізотермічних умовах і при горінні струменево-нішової системи, струменево-нішевого модуля, а також взаємодії даних модулів показали, що струменево-нішовий модулі з визначеними геометричними і режимними параметрами паливороздачі забезпечує ефективну організацію всіх стадій робочого процесу спалювання. Тому можна стверджувати, що струменево-нішовий модуль може автономно вирішувати задачі якісного сумішоутворення, надійної стабілізації горіння та високого рівня повноти згорання. При роботі модулів в системі вирішальним фактором є коефіцієнт захаращення потоку окиснювача, який визначає довжину факела та гідравлічні втрати по тракт окиснювача.

Таким чином на основі досліджених автономних модулів можливо формувати струменево-нішовий пальниковий пристрій з тепловою потужністю яка визначається кількістю модулів.

5.3.2 Пристрій розпалу ПП на основі СНТ

Для організації надійного займання пальникового приладу, розроблений і випробуваний прилад розпалу на основі СНТ. В залежності від відстані між пристроями запалювання і ПП вибираються параметри газорозподіляючої системи. Необхідна довжина факела забезпечується за рахунок варіювання коефіцієнта надлишку повітря в нішовій порожнині і організації в ній відповідної структури течії.

Таблиця 5.2

Геометричні параметри паливо роздачі пристрою розпалу на основі СНС

Відстань від ПП [м] до місця установки розпалюючих пристроїв.	0,3	0,5	0,6	0,7	0,8
L [мм]	30	30	45	45	45
L /H	3	3	4	4	4
l= [мм]	5	5	7	7	7
S= [мм]	5	5	8	8	8
d= [мм]	2	2	3	3	3

5.4 Висновки за розділом

1. Проведено детальний газовий аналіз факелу за одиночним модулем та за модулем в системі.
2. Виконані комплексні експериментальні дослідження ближнього сліду за струменево-нішовим модулем в ізотермічних умовах і при горінні дозволили сформуванню уявлення про структуру факелу та фізичну модель забезпечення стійкого горіння.
3. Виявлено значне скорочення довжини факелу в системі модулів в порівнянні з одним модулем. При цьому інтенсивність вигорання наближається до умов вигорання попередньо підготовленої паливної суміші.
4. Випробування двох однакових струменево-нішових модулів при горінні проведенні в широкому діапазоні змін коефіцієнту надлишку повітря ($\alpha=1-10$) і його швидкості ($W=5-25$ м/с) показали, що форма та геометричні

характеристики факелу є практично однаковими за обома модулями і залежать головним чином від коефіцієнту надлишку повітря і несуттєво від швидкості.

5. Встановлено, що величина коефіцієнту захаращення (K_p) прохідного перерізу каналу суттєво впливає на інтенсивність вигорання палива. Більшим значенням K_p відповідає значно більш висока інтенсивність вигорання.

6. Ідентичність характеристик процесів горіння за окремими модульними системами є підставою для реалізації модульного принципу конструювання пальникових пристроїв з струменево-нішовими системами.

5.5 Список використаних джерел

1. Абдулин М.З. Применение струйно-нишевой технологии сжигания топлива в энергетических установках. «Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование», Вісник НТУ «ХПІ». Харків. №6. 2005. С. 130-144. (видання входить до переліку фахових).

2. Абдулин М.З. Ізотермічні дослідження модулів пальникових пристроїв на основі струменеві-нішевих систем. Стаття. Харків: НТУ «ХПІ», Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2013. № 13/987. С. 81-88.

3. Абдулин М.З. Особливості процесів паливо роздачі в

струменево-нішевих системах. Східно-Європейський журнал передових технологій. Харків. 2013. № 64. С. 22-25

4. Фіалко Н.М., Прокопов В.Г., Шеренковський Ю.В., Алешко С.А., Полозенко Н.П., Бутовський Л.С., Абдулін М.З., Клищ А.В. Новицький В.С., Евтушенко А.А. Закономерности смесеобразования в эшелонированных решетках плоских стабилизаторов пламени. Науковий вісник НЛТУ України. 2014. №24.7. С.187 – 191.

5. Абдулін М.З., Сірій О.А. Принципи організації робочого процесу камер згоряння. Авіаційно-космічна техніка та технологія. Харків. 2014. № 8/115. С. 73-78.

6. Abdulin M., Polupan G., Lopez G.J. Burner devices for industrial boilers on the basis of microdiffusion burning. BSME-ASME International Conference on Thermal Engineering. Dhaka. 2002.

7. Polupan G., Abdulin M., Real Ramirez C. A., Tolentino Eslava G., Lopez Ramirez S. Desarrollo e Investigacion Computacional de Quemadores Rectangulares con Combustion Tipo Microdifusa. 8 Congreso Nacional de Ingenieria Electromecanica y de Sistemas. Mexico. 2004. С. 312-317.

РОЗДІЛ 6. АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ ПАЛЬНИКОВИХ ПРИСТРОЇВ СТРУМЕНЕВО- НІШОВОГО ТИПУ.

6.1 Особливості методики математичного моделювання робочого процесу в пальникових пристроях на основі струменево-нішових систем

Ця глава присвячена розгляду основних особливостей методики комп'ютерного моделювання досліджуваних процесів переносу при горінні газоподібного палива в системі стабілізаторів полум'я в умовах наявності їх спеціального охолодження. Формується математична модель досліджуваних процесів. Розглядаються питання, що стосуються верифікації моделей турбулентності. Наводиться опис запропонованої в роботі методики поетапного моделювання, застосування якої дозволяє істотно спростити рішення даної задачі. Особлива увага приділяється оцінці достовірності одержуваних чисельних рішень.

6.1.1 Математична модель досліджуваних процесів в системі стабілізаторів полум'я

Вирішення проблеми підвищення довговічності і надійності мікрофакельних пальників стабілізаторного типу безпосередньо пов'язано, як вже зазначалося, з розробкою і дослідженням їх систем охолодження. При цьому особливий інтерес представляє розгляд систем «самоохолодження» даних пристроїв.

Основна особливість таких систем полягає в охолодженні найбільш теплонапружених ділянок стабілізаторів природним газом, який спеціальним чином подається у внутрішню порожнину стабілізатора і далі, після виконання своєї функції охолоджуючого агента, надходить в газоподаючі отвори і використовується як паливо. Тобто в даних системах відсутній спеціальний охолоджуючий агент, і його роль виконує природний газ, що підлягає подальшому спалюванню.

В рамках цього дослідження розгляду підлягали мікрофакельні пальники з плоскими стабілізаторами полум'я при подачі палива в потік

окиснювача, що зносить в умовах наявності спеціальних систем самоохолодження таких пристроїв.[1-7]

У досліджуваних горілчаних пристроях при відсутності їх спеціального охолодження найбільш високі рівні температур стінок стабілізатора зазвичай спостерігаються на їх торцевих поверхнях. У даній роботі в якості способу локального охолодження таких високотемпературних зон розглядається їх струменевий обдув, що є, як відомо, одним з ефективних методів інтенсифікації теплообміну.

На рис. 6.1 представлені принципові схеми розглянутого пальникового пристрою і одного з варіантів його системи охолодження з обдувом торцевої поверхні стабілізатора плоским імпульсним струменем.

При дослідженні елементів робочих процесів пальникових пристроїв все більше уваги приділяється математичному моделюванню. Причому цей метод становиться все більш важливим і ефективним інструментом вивчення складних теплофізичних процесів.[8-29]. При математичному моделюванні досліджуваної фізичної ситуації для кожного стабілізатора полум'я враховувалася взаємопов'язаність процесів переносу, що відбуваються у внутрішній порожнині стабілізатора, з його зовнішнього боку і в які поділяють ці зони стінках стабілізатора. Тобто, мав місце спільний облік процесів течії і теплообміну усередині стабілізатора, теплопровідності в елементах його конструкції, а також процесів розвитку струменів газу в зносить потоці окиснювача, сумішоутворення палива і окиснювача і власне горіння палива із зовнішнього боку стабілізатора.

Таким чином, стосовно до окремого стабілізатора розгляду підлягала трьохкомпонентне сполучене завдання, що формується для взаємопов'язаних процесів переносу, що реалізуються в трьох суміжних підгалузях. [30]

Математична модель досліджуваних процесів переносу для мікрофакельний пальникового пристрою, інтегрованого в котельну установку, має вигляд:

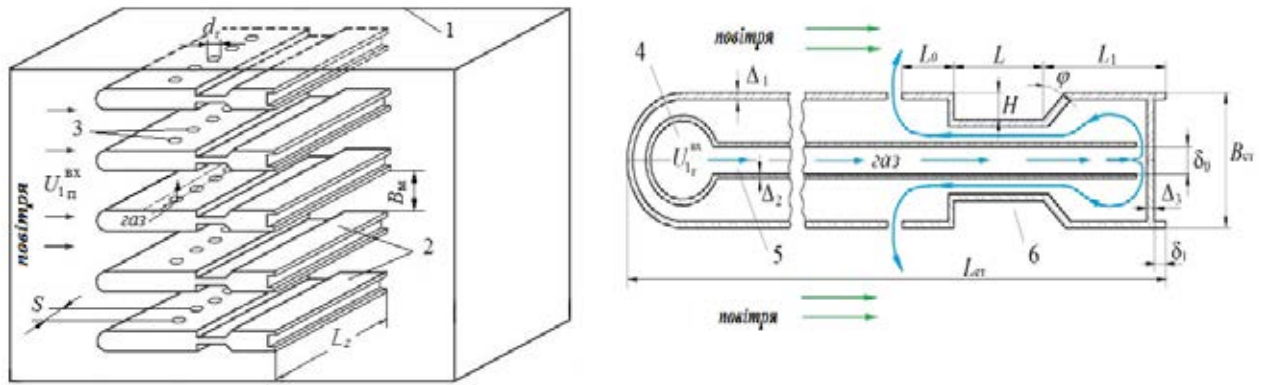


Рис. 6.1 До постановки задачі: схема мікрофакельного пальникового пристрою стабілізаторного типу

(а) і його системи охолодження з обдувом торцевої поверхні стабілізатора плоским імпульсним струменем (б): 1 - плоский канал; 2 - стабілізатори полум'я; 3 - газоподаючі отвори; 4 - газоподаючий колектор; 5 - канал для охолоджуючого газу; 6 - нішева порожнину.

Рівняння руху:

$$\frac{\partial(\rho U_j U_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial(\tau_{ij})}{\partial x_j}, \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (6.1)$$

рівняння неперивності:

$$\frac{\partial(\rho U_j)}{\partial x_j} = 0, \quad (6.2)$$

рівняння енергії для реагують турбулентних потоків у формі рівняння переносу ентальпії:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j h) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_T}{Pr_T} \right) \frac{\partial h}{\partial x_j} \right] + q_h, \quad (6.3)$$

рівняння збереження маси компонент реакує суміші:

$$\frac{\partial(\rho_k U_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\nu}{Sc_k} + \frac{\nu_T}{Sc_T} \right) \frac{\partial \rho_k}{\partial x_j} \right] + R_k, \quad (6.4)$$

Де, $k = 1, 2, \dots, N^*-1$, рівняння стану для багатоконпонентної суміші :

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T \sum_k \frac{W_k}{M_k}}, \quad (6.5)$$

рівняння теплопровідності для стінок стабілізатора:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x_j} \right) = 0. \quad (6.6)$$

У наведеній моделі підсумовування відбувається по повторюваному індексом j .

При формулюванні завдання (6.1) - (6.6) в даній області виділялися три підобласті відповідно до особливостей протікаючих в них процесів.[31] Перша підобласті охоплює простір всередині стабілізаторів, в якому за рахунок спеціальної організації течії охолоджуючого газу реалізується процес охолодження стінок стабілізаторів. Друга підобласть включає в себе як простір між стабілізаторами, так і топковий простір і характеризується протіканням в них поряд з процесами течії і теплообміну також процесів сумішоутворення і горіння. Третя підобласть, що розділяє першу і другу підобласті, являє собою стінки стабілізаторів, необхідний температурний режим яких покликані забезпечити досліджувані системи охолодження.

Процеси, що протікають в 1-ій і 2-ій підгалузях, описуються наведеною вище системою рівнянь (6.1) - (6.6) з тією відмінністю, що в 1-ій підобласті (порожнини стабілізатора) через відсутність в ній хімічних реакцій джерельні члени q_h і R_k в рівняннях (6.3) і (6.4) дорівнюють нулю. У 2-ій же підобласті в зв'язку з протіканням в ній процесу горіння зазначені джерельні члени відмінні від нуля і визначаються відповідно до прийнятими моделями (про що буде сказано нижче). Процес теплопереносу в 3-ій підобласті - стінках стабілізаторів - описується рівнянням (6.6).

Граничні умови до системи рівнянь (6.1) - (6.6) задавалися таким чином: у вхідних перетинах приймалися постійні значення відповідних величин (швидкостей, концентрацій, температур і т.д.), у вихідних перетинах - м'які граничні умови; на твердих межах задавалися умови прилипання для швидкостей і рівність нулю перших похідних по нормалі до цих поверхонь від концентрації компонент суміші. Як теплових умов на поверхнях топки і каналу, в якому встановлюється стабілізаторна решітка, приймалися граничні умови першого роду, на поверхнях стабілізатора - умови сполучення. Для

опису радіаційного теплопереносу застосовувався метод сферичних гармонік в P1 наближенні. При цьому властивості газової суміші визначалися відповідно до моделі селективно-сірого наближення. Моделювання процесу горіння здійснювалося з використанням функції щільності ймовірності (PDF - модель).

6.1.2 Верифікація моделей турбулентного перенесення

Верифікація моделей турбулентності проводилася на основі зіставлення отриманих чисельних рішень з результатами експериментальних досліджень. В якості базових натурних експериментів використовувалися дані Хагена Р.Л., Данако С.М., Грайхена К, Корнілова В.І., Хівади М., Мабуші І. та ін. [32-36]. З метою вибору адекватної моделі турбулентності розглянута задача вирішувалася із застосуванням таких моделей: однопараметричній моделі Спаларта-Аллмареса, двопараметричних моделей k-ε (в різних модифікаціях), k-ω і моделі рейнольдсових напружень. При цьому зіставлення розрахункових і експериментальних даних проводилося для таких величин: швидкість течії, інтенсивність турбулентності і коефіцієнт тиску. Вибір моделі турбулентності ґрунтувався на оцінці величини середнього абсолютного відхилення розрахункових значень зазначених величин від відповідних результатів експериментів. На рис. 6.2 - 6.4 і в табл. 6.1 як приклад представлені дані зіставлення результатів натурних експериментів і математичного моделювання для різних моделей турбулентності. Згідно з даними, наведеними в табл. 6.1, в цілому найменші відхилення чисельних рішень від результатів експериментів мають місце для k-ε моделі турбулентності в модифікації RNG.

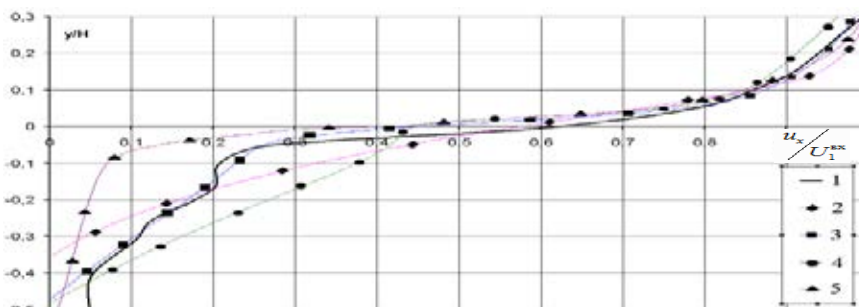


Рис. 6.2 Розподіл швидкості в центральному поперечному перерізі

1 - експеримент Хагена Р.Л., Данак А.М; 2, 3, 4, 5 - чисельні рішення для різних моделей турбулентності - Спаларта-Аллмареса, $k-\varepsilon$ RNG, $k-\omega$ і рейнольдсових напружень. Зіставлення даних експериментів і результатів математичного моделювання для різних моделей турбулентності

Таблиця 6.1.

Експериментальні роботи	Порівнювані величини	Середні відносні відхилення δ_n для різних моделей турбулентності, %						
		<i>SA</i>	<i>Standard k-ε</i>	<i>RNG k-ε</i>	<i>Realizable k-ε</i>	<i>Standard k-ω</i>	<i>SST k-ω</i>	<i>RSM</i>
Хаген Р.Л., Данак А.М.	Швидкість, $U_1/U_1^{вх}$	6,9	1,8	1,6	1,6	9,5	4,9	10,9
Грайхен К., Корнилов В.И.	Коефіцієнт тиску, C_p	38,0	4,7	4,7	9,5	19,0	9,5	28,5
Хивада М., Мабуши И.	Коефіцієнт тиску, C_p	13,3	5,9	0,7	2,2	15,5	8,9	9,6

6.1.3 Методика поетапного моделювання

Одна з характерних особливостей поставленого завдання полягає в тому, що розміри найбільш важливою для даного дослідження підобласті, тобто власне стабілізатора з його системою охолодження, є істотно меншими, ніж розміри даної розрахункової області в цілому, що включає пальниковий пристрій і топковий простір. Так, розміри складових елементів системи охолодження відрізняються від габаритів топки більш, ніж на три порядки. Оскільки дана обставина, як очевидно, виявляється додатковим ускладнює фактором при чисельній реалізації рішення зазначеної пов'язаною завдання, то за доцільне скористатися запропонованою методикою поетапного моделювання.

Основним положенням даної методики є поділ вихідної трикомпонентної пов'язаною завдання на дві двокомпонентні. Тобто формуються дві окремі двокомпонентні пов'язані завдання - перша власне для кожного стабілізатора, що включає процеси перенесення у внутрішній порожнині і теплопровідності в його стінках, друга - для підобласті, що

охоплює всю розглянуту розрахункову область за винятком внутрішніх порожнин стабілізаторів. Таким чином, процеси теплопровідності в стінках стабілізаторів враховуються при вирішенні кожної з двокомпонентних пов'язаних завдань. Узгодження рішень цих завдань здійснюється завдяки ітераційного процесу, покликаному забезпечити виконання умов сполучення на кордонах кожної із зазначених розрахункових підобластей.

При вирішенні першої і другої пов'язаною задачею на зовнішній і внутрішній поверхнях стабілізаторів відповідно задавалися граничні умови III роду, що визначаються на попередніх ітераціях. При цьому для першої із зазначених завдань послідовно використовувалися результати вирішення другого завдання, а для другої - дані, отримані при реалізації рішення першого завдання. Ітераційний процес вважався завершеним при виконанні з необхідною точністю умов сполучення на кордонах розглянутих суміжних підгалузей, тобто умов наближеної рівності температур і теплових потоків на сполучених поверхнях для попередньої і подальшої ітерації.

Слід зазначити, що на етапі вирішення першої із зазначених двокомпонентних пов'язаних завдань, сформульованій для власне стабілізатора, враховується також взаємопов'язаність всіх складових процесу перенесення в його внутрішньої порожнини, а саме: а) конвективного теплопереносу в газоподаючому каналі, що знаходиться всередині стабілізатора; б) теплопровідності в стінках даного каналу; в) перенесення тепла конвекцією у внутрішній порожнині стабілізатора, де газоподаючий канал і внутрішні стінки стабілізатора омиваються охолоджуючим газом. Очевидно, ця обставина в свою чергу призводить до необхідності формулювання відповідної додаткової пов'язаною завдання теплопереносу. І якщо взяти до уваги, що величина компонентності тієї чи іншої пов'язаною завдання визначається по числу підлягають сполученню процесів теплопереносу (кожен з яких реалізується в одній з відповідних під областей даної області), то в цілому розглянута задача, строго кажучи, є п'ятикомпонентної сполученої завданням. Що ж стосується описаної вище

методики чисельної реалізації рішення поставленого завдання, то тут зазначена додаткова сполучена завдання включалася в якості складового елемента в першу з двокомпонентних пов'язаних завдань.

6.1.4 Оцінка достовірності чисельних рішень

В даному підрозділі розглядаються основні способи оцінок достовірності отриманих результатів, що застосовуються в даній роботі. Остаточним критерієм правильності використовуваної математичної моделі і чисельних даних, отриманих на її основі, служить, як відомо, їх досить гарний збіг з результатами експерименту. В роботі відповідні зіставлення проводилися для різних елементів математичної моделі. Наприклад, дані математичного моделювання струменевої течії в зносі потоці, що зносить порівнювалися з результатами експериментальних досліджень Камотані Ю. [35]. Відповідні зіставлення представлені на рис. 6.9. Тут наведені розрахункові та експериментальні траєкторії струменів (швидкісні і температурні). Як видно, має місце задовільне узгодження порівнюваних даних. Для ситуації течії і теплообміну в нішевих порожнинах різної конфігурації виконані зіставлення з натурними експериментами Грайхена К., Корнілова В.І., Дьяченко А.Ю., Терехова В.І., Яригіна Н.І. [32-34]. На рис. 6.10 як приклад представлені розрахункові та експериментальні дані розподілу по миделевого перетину нішевої порожнини коефіцієнта тиску C_p , на рис. 6.11 - коефіцієнта тепловіддачі α . Як випливає з наведених результатів, відхилення зіставляються величин виявляються відносно невеликими.

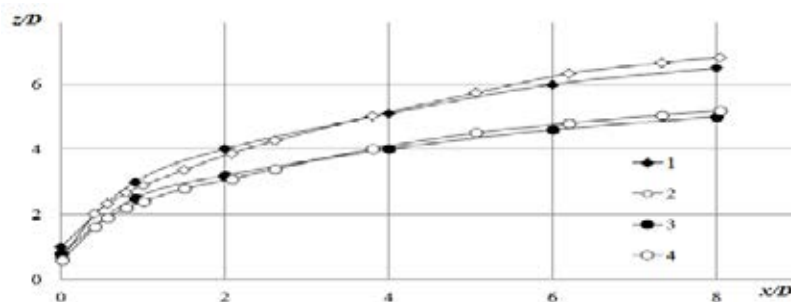


Рис. 6.3 Швидкісна і температурна траєкторії струменя у зносимому потоці

1, 3 - експеримент Камотані Ю .: 2, 4 - чисельне рішення; 1, 2 - швидкісна траєкторія; 3,4 - температурна траєкторія.

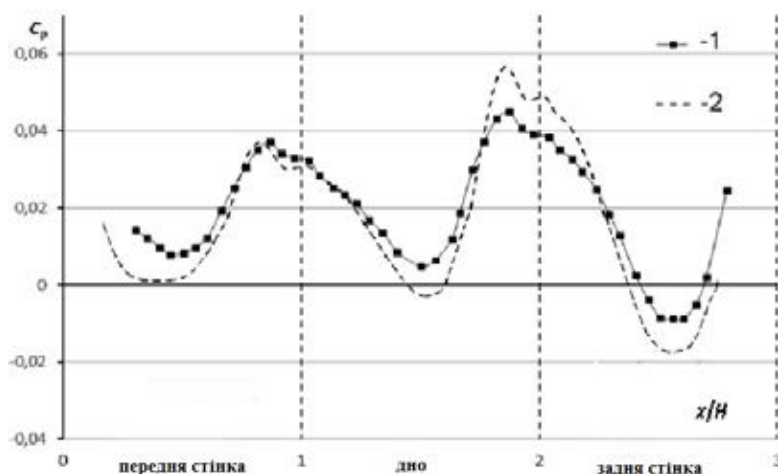


Рис. 6.4 Розподіл коефіцієнта тиску у поздовжньому перетині прямокутної ніші

1 - експеримент Грайхена К., Корнілова В.І .; 2 - чисельне рішення.

Велика увага в роботі приділялася оцінці достовірності даних про значеннях температури стінок стабілізаторів полум'я. Рис. 6.12 ілюструє зміна температури центральної зони торця стабілізатора в залежності від гідродинамічного параметра q^* , де $V_{г}$, $V_{в}$ - швидкість газу і повітря; $\rho_{г}$, $\rho_{в}$ - щільність газу і повітря). Згідно з наведеними результатами розбіжності розрахункових і експериментальних даних не перевищують 7%.

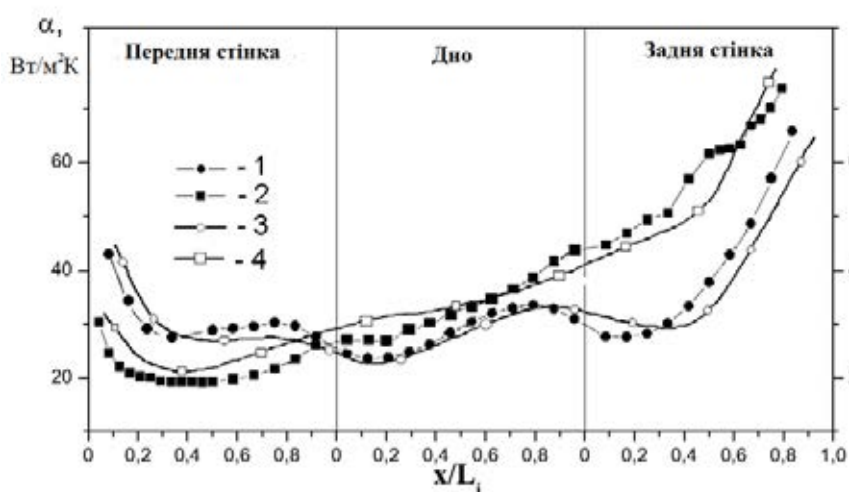


Рис. 6.5 Розподілення коефіцієнту тепловіддачі в миделевом січенні трапецеподібної ніші

1, 3-експеримент Дьяченко А.Ю., Терехова В.И., Ярыгиной Н.И. [104]; 2, 4-

численне рішення; 1, 2 – $\varphi = 30^\circ$; 3, 4 – $\varphi = 90^\circ$.

На рис. 2.13 показана експериментальна и розрахункова залежність температури газу на виході з систем охолодження від гідродинамічного параметра q^* . Як видно, спостерігається доволі хороше узгодження даних, що зіставляються.

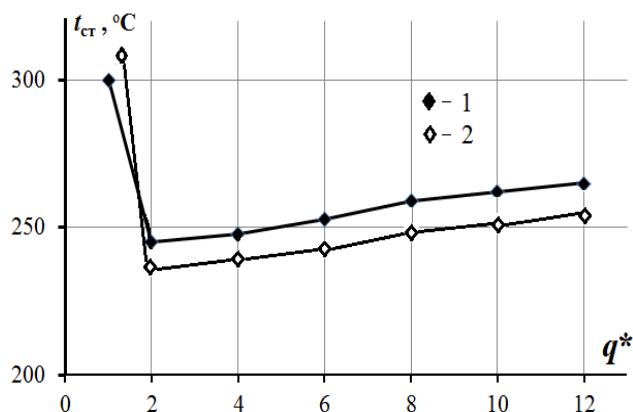


Рис. 6.6 Залежність температури центральної зони торця стабілізатору від гідродинамічного параметра

1 – експеримент Джамала И. [37]; 2 – численне рішення.

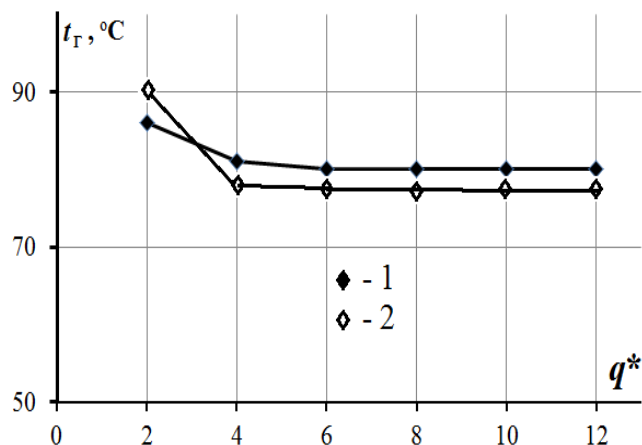


Рис. 6.7 Температура газу на виході з системи охолодження в залежності від гідродинамічного параметра

1 – експеримент Джамала И. [37]; 2 – численне рішення.

6.2 Принципові схемні рішення систем охолодження стабілізаторів пальників і визначення ефективності таких систем

У розглянутих горілочних пристроях стабілізаторного типу при відсутності їх спеціального охолодження найбільш високі рівні температур

мають місце у тій частині конструкції, яка охоплює звернену у топковий простір торцеву зону стабілізатора [37]. Дана обставина обумовлює необхідність розробки для зазначених пальників спеціальних систем охолодження, покликаних знизити рівні температур у зазначених теплонапружених торцевих зонах стабілізатора. Як спосіб локального охолодження торцевих стінок стабілізатора був обраний їх струменевий обдув, оскільки він займає одне з перших місць серед вискоефективних методів інтенсифікації конвективного теплообміну. Що ж стосується ділянок стабілізатора, прилеглих до його торцевої зони, то тут запропоновано використовувати спеціально організоване поздовжнє обтікання поверхонь цих ділянок.

У ситуації, що розглядається у якості охолоджуючого агенту доцільно використовувати природний газ до його надходження у газоподаючі отвори. Таким чином, запропонована схема охолодження являє собою систему самоохолодження із струменевим обдувом торцевої поверхні стабілізатора і зі спеціально організованим поздовжнім обтіканням прилеглих до неї поверхонь природним газом, що підлягає подальшому спалюванню.

В рамках цього дослідження розглянута можливість реалізації ряду систем охолодження, орієнтованих на різні умови експлуатації пальників.

Залежно від умов експлуатації пальників стабілізаторного типу (рис. 6.1) останні знаходяться в більш-менш жорсткої у тепловому відношенні обстановці. І, отже, системи охолодження використаних пальників повинні забезпечувати відведення теплоти від поверхонь, які відповідали би різним умовам їх роботи. Беручи це до уваги, у даному дослідженні аналізується можливість застосування різних систем охолодження відповідно до умов експлуатації пальників. При цьому для струминного охолодження торцевої поверхні стабілізатора пропонується використовувати системи круглих імпульсних струменів або плоскі імпульсні струмені. Що ж стосується охолодження ділянок, прилеглих до торцевій стінці стабілізатора, то тут поздовжнє обтікання поверхні може бути організовано як без застосування,

так і з застосуванням напрямних дефлекторів різної конфігурації. У рамках цієї роботи розглядаються дефлекторні конструкції з напрямних прямим і округленим дефлектором й зі спеціально спрофільованим дефлектором з прямим і округленим торцем.

6.2.1 Системи охолодження пальникових пристроїв

Використання прямого і округленого напрямних дефлекторів дозволяє організувати вузький канал поблизу торцевої поверхні стабілізатора, що забезпечує високі швидкості течії газу і відповідно інтенсифікацію відведення теплоти від зазначених поверхонь. Завдяки застосуванню спеціально спрофільованих дефлекторів формується вузький канал для течії охолоджуючого агенту уздовж всієї охолоджувальної поверхні, через що може реалізуватися висока ефективність охолодження.

При визначенні ефективності досліджуваних систем охолодження пальників бралися до уваги наступні основні вимоги, що пред'являються до таких систем:

- по-перше, застосування систем охолодження повинно забезпечувати такий тепловий стан стінок пілона, при якому їх температура не перевищує 550°C;

- по-друге, температура охолоджуючого агенту - природного газу - на виході з системи охолодження повинна бути нижче 350°C для запобігання розкладання метану;

- по-третє, аеродинамічні втрати у системі охолодження не повинні перевищувати більш ніж на 40% відповідні втрати у разі відсутності спеціального охолодження пальників.

У зв'язку з цим при аналізі ефективності систем охолодження пальників вивчаються особливості перебігу природного газу в власне системі охолодження, закономірності його теплообміну зі стінками стабілізатора і характеристики температурного режиму стабілізатора. Визначаються також рівні аеродинамічних втрат по тракту охолоджувача, рівні нагріву газу в системі і т.д.

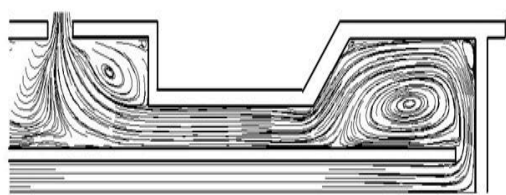
температура газу на вході в систему охолодження = 15°C ; температура повітря на вході в палинковий пристрій = 20°C ; матеріал стінки стабілізатора - сталь 12X18H9T; коефіцієнт захарачення прохідного перетину каналу = 0,3; діаметр газоподаючих отворів = м; відносний крок розташування отворів = 3,33.

6.2.3 Схема охолодження з обдувом плоским імпактним струменем

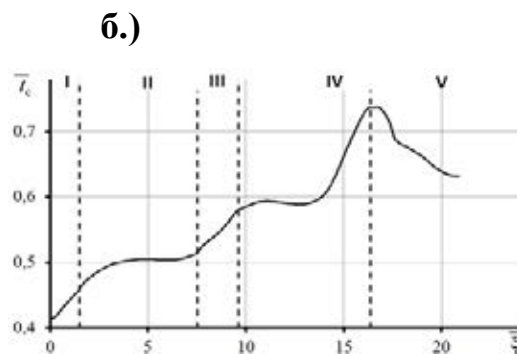
На рис 6.4 наводяться типові результати досліджень, що стосуються визначення основних характеристик системи охолодження з обдувом торця стабілізатора плоским імпактним струменем. Картину течії охолоджуючого газу у внутрішній порожнині стабілізатора ілюструє рис. 6.4, а). Як видно, потік газу з плоского каналу, б'ючись об торцеву поверхню стабілізатора, розтікається уздовж неї і далі, огинаючи нішу, надходить в газоподающі отвори. При цьому в приторцевій зоні стабілізатора утворюється великий вихор, зовнішня поверхня якого обмежує прилегла до внутрішньої стінки каналу потік, де з досить високою швидкістю рухається охолоджуючий газ. Тобто цей вихор в певному сенсі виконує функцію обмежувача потоку газу, за допомогою якого формується вузький канал для перебігу охолоджувача уздовж поверхні стабілізатора. Перебіг охолоджуючого газу характеризується також наявністю другого великого вихору поблизу передньої стінки ніші і, крім того, ряду дрібних вихорів в кутових зонах стабілізатора. Розглянуті особливості перебігу природного газу в системі охолодження багато в чому визначають поведінку числа Нуссельта на внутрішній поверхні стабілізатора (див. Рис. 6.4, в). Як впливає з зіставлення даних, наведених на рис. 6.4, а) і 6.4, в), екстремуми на кривій $Nu = f ()$ відповідають відповідно до зон відриву, приєднання потоку, кутовим вихровим зонам і т.д.

Що стосується рівня величини числа Nu , то в зоні удару плоскою струменя про торцеву поверхню стабілізатора вона досягає максимального значення, рівного приблизно 45,5. У міру ж розтікання струменя уздовж даної поверхні величина числа Nu зменшується і далі, як уже зазначалося,

слід описаним вище особливостям течії охолоджуючого газу.



а.)



в.)

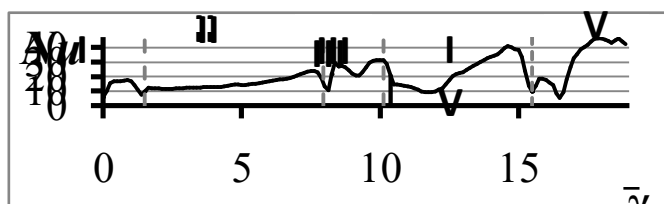


Рис. 6.9 Картина ліній току (а),
безрозмірна температура
зовнішньої поверхні
стабілізатору \bar{t}_c

(б) и число Nu на его внутрішньої поверхні (в) для системи охолодження з обдувом торця стабілізатору плоскої імпаکتним струменем.

Зазначені закономірності зміни числа Nu великою мірою зумовлюють характер розподілу температури стінок стабілізатора. На рис. 6.4, б) в якості прикладу представлено відповідний розподіл безрозмірною температури уздовж зовнішньої поверхні стінки стабілізатора. Як видно, мінімальне значення температури торцевої стінки стабілізатора має місце в області удару струменя об її поверхню і становить 0,596. У міру віддалення від цієї області температура зростає, досягаючи найбільшого значення, рівного 0,718 на зривної кромці стабілізатора. Далі в зонах IV, III, II і I вбачається в цілому тенденція до зниження температури зовнішньої поверхні стінки стабілізатора, так що на кордоні зони I, яка відповідає передній стінці нішевої порожнини, вона виявляється рівною 0,411. Згідно з даними комп'ютерного моделювання безрозмірна температура газу на виході з системи охолодження становить 0,228, тобто рівень нагріву газу не перевищує допустиму величину.

Що ж стосується значення числа Ейлера, що відповідає втратам тиску по тракту охолоджувача, то воно дорівнює 13,3. Слід зазначити, що збільшення числа Ейлера в порівнянні з ситуацією відсутності спеціального

охолодження стабілізатора відносно невелика і складає приблизно 27%.

Таким чином, розглянута система охолодження пальникового пристрою стабілізаторного типу з обдувом внутрішньої торцевої поверхні стабілізатора плоским імпактним струменем є досить ефективною в плані забезпечення допустимого рівня як температур стінок стабілізаторів, так і нагрівання охолоджуючого газу при порівняно невеликому зростанні втрат тиску, обумовленому наявністю даної системи.

6.2.4 Схема охолодження з обдувом круглими імпактними струменями

З метою забезпечення високоефективного охолодження торцевої стінки стабілізатора розглядалася також система охолодження із застосуванням круглих імпактних струменів. Відповідні характерні результати комп'ютерного моделювання представлені на рис. 3.5 - 3.8. Як видно з рис. 3.5, а), б), картини перебігу в приторцевій зоні стабілізатора для поздовжніх перетинів, що проходять по осі струменя і середині міжструменевого простору, суттєво відрізняються між собою. Ця обставина свідчить про наявність досить яскраво вираженою тривимірної структури течії в даній зоні.

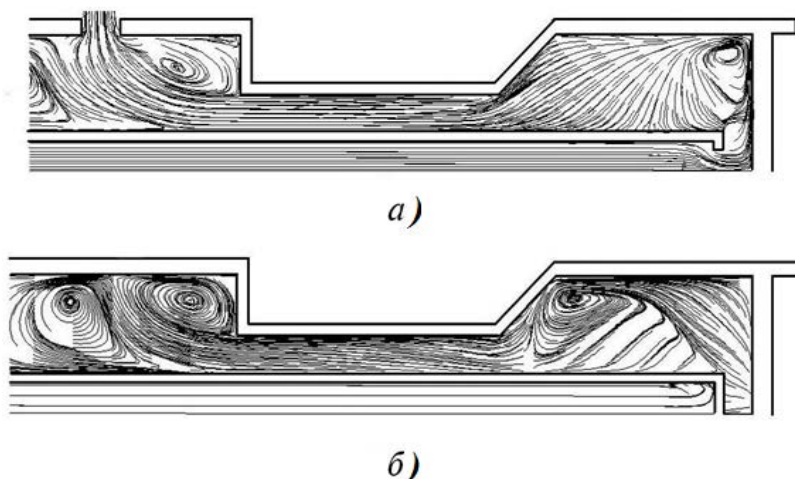


Рис. 6.10 Картина ліній струму охолоджуючого агента в поздовжньому перерізі, що проходить через вісь газоподаючого отвори (а) і через середину міжструменевого простору (б), для системи охолодження з обдувом торця стабілізатора круглими імпактними струменями.

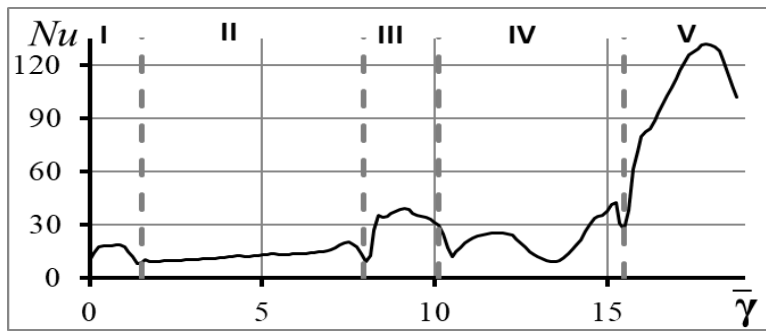


Рис. 6.11 Число Нуссельта на внутрішній поверхні стабілізатора в поздовжньому перерізі, що проходить через вісь газоподаючого отвори, для системи охолодження з обдувом торця стабілізатора круглими імпаکتними струменями.

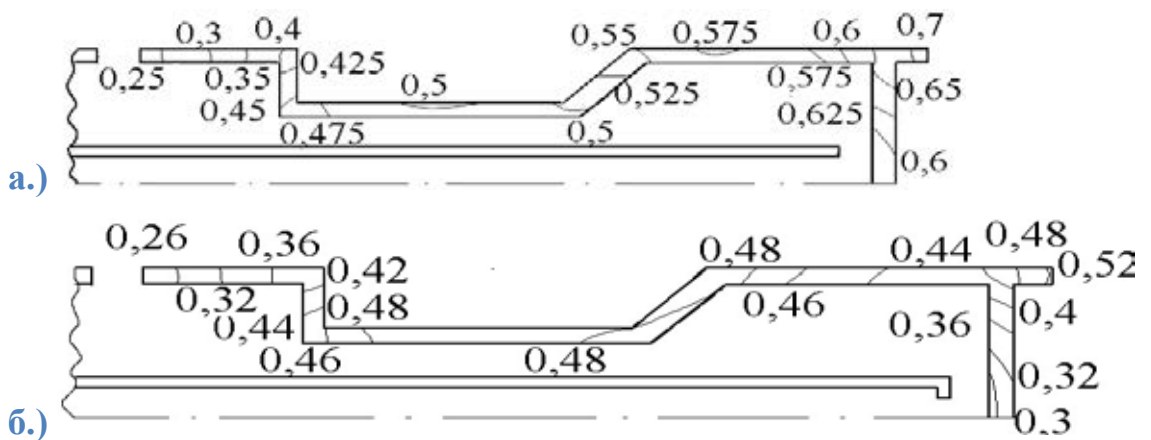


Рис. 6.12 Поле безрозмірною температури в поздовжньому перетині стабілізатора, що проходить через вісь газоподаючого отвори, для схем охолодження з обдувом торця стабілізатора плоскою струменем (а) і системою круглих струменів (б).

Проведені дослідження показали, що максимальні значення швидкості газу в приторцевій зоні стабілізатора в разі плоскої струменя (перша з аналізованих ситуацій) виявляються істотно нижче, ніж при наявності круглих імпактних струменів (друга ситуація). Так в розглянутих умовах для першої і другої ситуації зазначені величини рівні 1,61 і 6,64. Відповідно до цього може мати місце і істотна відмінність теплових станів стінок стабілізатора для зіставляються систем охолодження (рис. 6.7, а, б). Наприклад, згідно з отриманими даними в центрі торцевій зоні стабілізатора безрозмірна температура його зовнішньої поверхні становить 0,60 і 0,32 для

випадку плоскої і круглих імпульсних струменів. Слід також зазначити, що як видно з рис. 6.7, різниці температур стінок стабілізатора для зіставляються ситуацій падають у міру віддалення від його торцевій поверхні, так що вже в області нішевої порожнини вони виявляються порівняно невеликими. Так, в кутових зонах дна ніші відповідні безрозмірні температури рівні 0,50 і 0,46 для першої з розглянутих ситуацій і 0,48 і 0,46 - для другої. Дана обставина є наслідком прояву ефекту просторової локалізації впливу специфіки струменевої подачі газу в приторцевій зоні стабілізатора.

Рис. 6.8 ілюструє поле температур зовнішньої поверхні торцевої стінки стабілізатора для системи охолодження з круглими імпульсними струменями. Як видно, в області удару струменя об торцеву стінку температурне поле є істотно тривимірним. У міру ж віддалення від цієї області спостерігається виродження розмірності поля температур, так що, починаючи з деякого значення u , зміна температури уздовж координати z виявляється незначним.

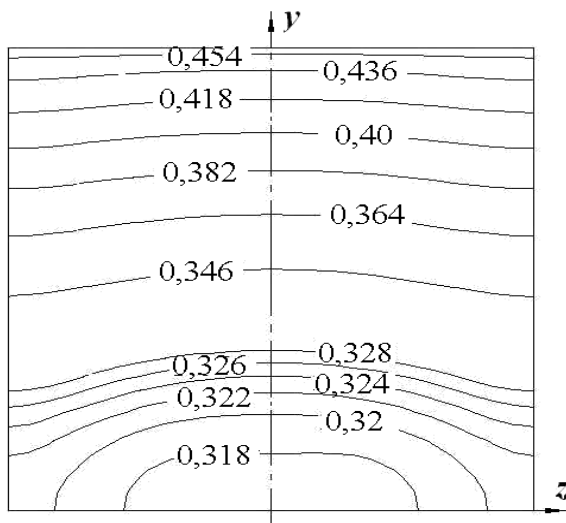


Рис. 6.13 Поле безрозмірною температури зовнішньої поверхні торця стабілізатора для схеми охолодження з обдувом системою круглих струменів.

Описані вище особливості перебігу охолоджуючого газу в разі круглих струменів визначають закономірності зміни числа Нуссельта уздовж внутрішньої поверхні стабілізатора (рис. 6.6). Максимальні значення числа Нуссельта Nu мають місце в області удару струменя об торцеву поверхню стабілізатора, причому тут ці значення дуже великі і досягають 131,9. З видаленням ж від місця удару струменя спостерігається досить різке зниження числа Нуссельта. Так, в кутовий приторцевій зоні величина Nu

становить 27,1, тобто зменшується приблизно в 5 разів.

Зазначені закономірності зміни Nu , що відповідають круглим імпактним струменям, істотно відрізняються від ситуації застосування плоскої імпактного струменя. Ці відмінності найбільш яскраво виражені для приторцевій зони стабілізатора (зіставте дані на рис. 6.4, б) і 6.6). В області удару струменя об торцеву поверхню значення Nu_{max} рівні 131,9 і 45,5 відповідно для круглих і плоскою струменів. Тобто в разі плоскої струменя інтенсивність тепловіддачі в даній області виявляється менше в 2,9 рази.

Наслідком підвищення інтенсивності тепловіддачі в умовах круглих струменів є більш високий рівень нагріву газу в системі охолодження. Так, згідно з отриманими даними безрозмірні температури газу на виході з системи охолодження складають 0,26 і 0,23 при використанні обдування торцевої поверхні стабілізатора відповідно круглими і плоскою струменями.

Як очевидно, підвищення інтенсивності тепловіддачі в разі круглих струменів пов'язано, впершу чергу, зі збільшенням швидкості власне струменів за рахунок зменшення прохідного перетину каналу в порівнянні з плоскою струменем при незмінній витраті газу. Відповідно до цього число Ейлера відповідає сумарним втрат тисків по тракту охолоджувача E_u в умовах круглих струменів виявляються істотно вище. Так, тут значення E_u досягає 53,5, що приблизно в чотири рази перевищує цю величину для випадку плоскої імпактного струменя.

Таким чином, система охолодження з круглими імпактними струменями є досить ефективною в плані забезпечення інтенсивного охолодження стінок стабілізатора, проте гідравлічні втрати в цьому випадку надзвичайно великі.

6.3 Дослідження характеристик систем охолодження з плоским імпактним струменем при використанні дефлекторів різної конфігурації

В даному підрозділі розглядаються системи охолодження, елементами яких є дефлекторні конструкції з напрямних прямим і округленим дефлекторами, а також зі спеціально спрофільоване дефлектором з прямим і

округленим торцем (рис. 6.9).

При цьому для кожної із зазначених схем на основі математичного моделювання вивчаються особливості перебігу, теплообміну зі стінками стабілізатора, характеристики температурного режиму стабілізатора, визначаються рівні гідравлічних втрат по тракту охолоджувача, рівні нагріву газу в системі і т.д. Особлива увага приділяється порівняльному аналізу ефективності запропонованих схем охолодження.

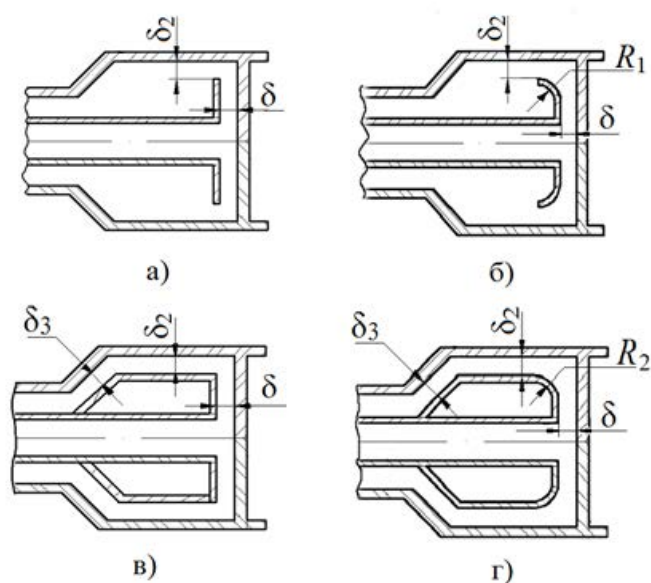


Рис. 6.14 Дефлектори різної конфігурації в системі охолодження пального пристрою

направляючий прямий (а) і округлений (б); спеціально спрофільовані з прямим (в) і округленим торцем (г).

Розглянемо спочатку особливості перебігу охолоджуючого агента (природного газу) в досліджуваних системах охолодження з прямим і округленим напрямними дефлекторами.

На рис. 6.10, а), б) представлені лінії струму для двох зазначених ситуацій. Як видно, характер перебігу в обох випадках в цілому є дуже близьким. А саме, газ з направляючого дефлектора тече з досить високою швидкістю вздовж внутрішньої поверхні стабілізатора в напрямку нішевої порожнини, далі рухається в щілини, утвореної нішею і стінкою внутрішнього каналу, і нарешті, огинаючи нішу, надходить в газоподаючі

отвори. При цьому картина перебігу характеризується наявністю вихрових структур. Тут, в першу чергу, звертають на себе увагу два великих вихору, один з яких розташований за дефлектором в приторцевій області стабілізатора, а другий - в кутовій зоні поблизу передньої стінки ніші. Крім того, в ситуаціях, які аналізуються, спостерігається також ряд дрібних вихорів.

Що стосується відмінностей в картинах течій, які зіставляються, то тут необхідно зазначити наступне. По-перше, дані відмінності відносяться, головним чином, до приторцевій зоні стабілізатора. Так, для ситуацій, які зіставляються, істотно різними виявляються розміри вихорів в кутових приторцевих зонах. А саме, в разі округленій направляючого дефлектора розміри даного вихору є помітно більшими, ніж для умов, відповідних прямому дефлектору. Крім того, при використанні прямого дефлектора швидкості охолоджуючого газу поблизу бокової поверхні приторцевій зони помітно перевищують їх значення в ситуації округленій дефлектора. Наприклад, максимальні величини швидкостей в цих підгалузях становлять відповідно 2,06 і 1,38.

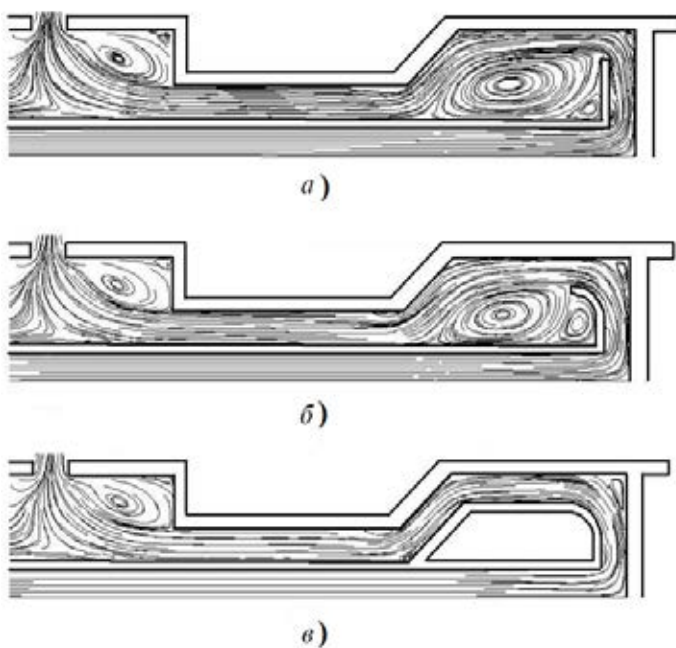


Рис. 6.15 Картина ліній струму охолоджуючого агента в поздовжньому перетині стабілізатора для систем охолодження з напрямних прямим

(а) і округленим (б) дефлектором і спеціально спрофільоване (в) дефлектором з округленим торцем.

Важливо підкреслити, що, як буде показано нижче, саме описані відмінності в закономірностях перебігу охолоджуючого газу зумовлюють

певні відмінності в тепловому стані стінок стабілізатора стосовно до двох розглянутих типів направляючих дефлекторів. Ці відмінності, як очевидно, значною мірою визначають і особливості зміни числа Нуссельта на внутрішній поверхні стабілізатора для ситуацій, які зіставляються (див. Рис. 6.11). Так, вищі в разі прямого дефлектора величини Nu на поверхнях, прилеглих до кутових приторцевих зон, і на бічних поверхнях цих зон пов'язані з зазначеними вище значеннями швидкостей газу поблизу даних поверхонь.

На рис. 6.12 представлено розподіл безрозмірною температури зовнішньої поверхні стабілізатора для випадку прямого і округлених напрямних дефлекторів. Як видно, дещо вищі рівні температур мають місце в разі округлених дефлектора. Так, тут на зовнішньої торцевої поверхні стабілізатора для ситуації округлених дефлектора безрозмірна температура виявляється на 0,018-0,031 вище, ніж при використанні прямого дефлектора. На бічній ж приторцевій поверхні відміну зіставляються температур зростають до 0,051.

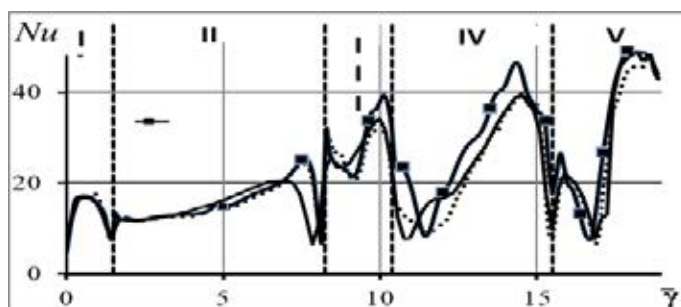


Рис 6.16 Значення числа Нуссельта на внутрішній поверхні стабілізатора для системи охолодження з дефлекторами різної конфігурації

1, 2 - направляючий прямий і округлений дефлектор; 3 - спеціально спрофільований дефлектор з округленим торцем; розташування характерних зон (див. рис. 3.3, б).

Далі в області нішевої порожнини дані відмінності зменшуються, так що на передній стінці ніші і боковій стінці стабілізатора поблизу газоподаючих отворів вони стають дуже малими. Таким чином, помітні

відмінності температури в двох зіставляються варіантах спостерігаються в тих зонах, де мають місце суттєві відмінності в характері перебігу охолоджуючого агенту і рівнях його швидкостей.

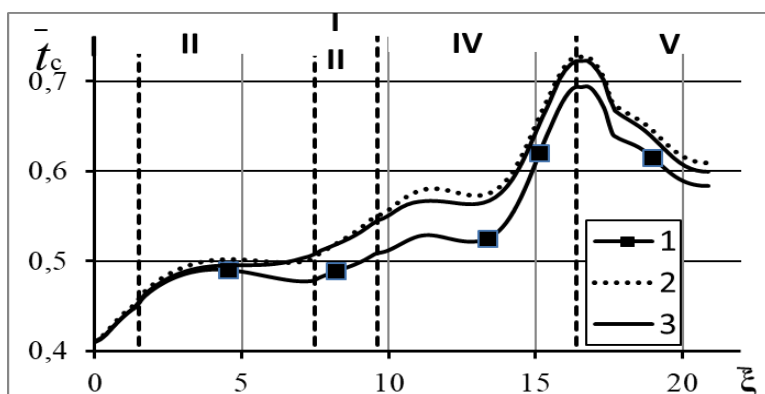


Рис. 6.17 Температура зовнішньої поверхні стабілізатора при використанні систем охолодження з дефлекторами різної конфігурації
1, 2 - направляючий прямий і округлений дефлектор; 3 - спеціально спрофільований дефлектор з округленим торцем.

В умовах, які розглядаються, відносно високі температури газу спостерігаються поблизу внутрішніх поверхонь стабілізатора. Підвищені рівні температури також мають місце в кутових зонах стабілізатора, де швидкості руху газу в вихрових структурах відносно невеликі. Що стосується підвищення температури газу при проходженні системи охолодження, то воно виявляється приблизно однаковим в разі використання прямого і округленій напрямних дефлекторів. Так, при температурі газу на вході в систему охолодження, яка дорівнює 0,043, на виході з цієї системи вона становить відповідно 0,234 і 0,226 для прямого і округленій дефлектора. Деякі вищі рівні температур газу в першому випадку обумовлені більш інтенсивним тепловим потоком, пов'язаним з підвищеними швидкостями газу в відповідних зонах.

Згідно з отриманими даними число Ейлера, що відповідає втратам тиску в системі охолодження з прямим напрямним дефлектором, становить приблизно 14,3, а з округленим дефлектором - 13,2. Тобто в разі прямого дефлектора ці втрати виявляються деяко більшими за величиною.

Таким чином, системи охолодження з прямим і округленим напрямними дефлекторами дуже близькі по ефективності. Наявність округленої дефлектора хоча і незначно, але все ж знижує ефективність охолодження, і відповідно рівні температур стінок стабілізатора тут в цілому трохи вище. При цьому, однак, число Ейлера, що відповідає втратам тиску по холодному тілу тракту, в даній ситуації зменшується в порівнянні з випадком прямого дефлектора.

При використанні спеціально спрофільованого дефлектора формується досить вузький канал для течії охолоджуючого агенту уздовж всієї охолоджувальної поверхні стабілізатора. Причому в ситуації, що розглядається розміри і конфігурація дефлектора вибиралися в такий спосіб. Прохідний перетин утвореного каналу поблизу торця стабілізатора було таким же, як і в разі округленої направляючого дефлектора і зберігалось приблизно однаковим поблизу інших внутрішніх поверхонь стабілізатора.

Зіставлення даних по картині течії для ситуації, що відповідає спеціально спрофільоване дефлектори з округленим торцем (рис. 6.10, в), і ситуації, яка відповідає округленими направляючої дефлектори (рис. 6.10, б), дозволяє зробити наступні висновки. В цілому характеристики течії газу поблизу охолоджуваної поверхні стабілізатора для зазначених випадків відрізняються несуттєво, незважаючи на значні конструктивні відмінності в застосовуваних системах охолодження. Це обумовлено тим, що при відсутності спеціально спрофільованого дефлектора його роль фактично виконує вихрова структура, що утворюється за напрямних дефлектором і складається з основного великого вихору і ряду дрібних вторинних вихорів. Інакше кажучи, завдяки зазначеним вихровим структурам уздовж охолоджувальної поверхні стабілізатора реалізується спрямований рух охолоджуючого газу близьке до такого при наявності спеціально спрофільованого дефлектора. Зазначена аналогічність зазначених характеристик течії визначає також і подібний характер зміни інших параметрів охолодження для зіставляються ситуацій. Наприклад,

температура зовнішньої поверхні стабілізатора в області її максимальних значень в кутових торцевих зонах становить 0,722 і 0,727 відповідно при наявності спеціально спрофільованого дефлектора з округленим торцем і округленої направляючого дефлектора (див. Рис. 6.12). Розбіжності ж безрозмірних температур на даній поверхні в цілому для зіставляються ситуацій не перевищують 0,015.

Таким чином, застосування спеціально спрофільованого дефлектора не приводить до очікуваного суттєвого зниження температури стінки стабілізатора з огляду на те, що і в разі застосування тільки направляє дефлектора за ними реалізується вихрова структура, конфігурація обмежуючих поверхонь якої у великій мірі аналогічна формі спеціально спрофільованого дефлектора з округленим торцем.

Звертає на себе увагу також той факт, що в зіставляються ситуаціях близькими за величиною виявляються і температури газу на виході з системи охолодження.

Слід також зазначити, що з огляду на зазначеної аналогічності гідродинамічних картин течії числа Ейлера, що відповідають загальним втрат тиску в системі охолодження, в порівнюваних ситуаціях відрізняються несуттєво; $Eu = 13,25$ і $13,33$ для випадку округленої направляє та спеціально спрофільованого дефлектора з округленим торцем.

В цілому на основі виконаних досліджень встановлено, що за рівнем забезпечення ефекту охолодження найбільш теплонапружених зон стабілізаторів розглянуті системи охолодження ранжуються наступним чином:

- зі спеціально спрофільоване дефлектором з прямим торцем;
- з прямим напрямних дефлектором.

Що стосується систем охолодження, відповідних округленим дефлекторам, то їх ефективність є практично такою ж, як і в умовах відсутності дефлекторних конструкцій.

Щодо зіставлення систем з прямим напрямних і спеціально

спрофільоване дефлектором з прямим торцем, то згідно з отриманими даними використання останнього не призводить до суттєвого підвищення ефективності охолодження пальників в порівнянні з відповідним напрямним дефлектором. З огляду на це і беручи до уваги, що застосування спеціально спрофільованих дефлекторів істотно ускладнює систему охолодження, в цілому ряді практично важливих ситуацій допустимим і доцільним є використання прямих напрямних дефлекторів.

6.4 Залежність ефективності охолодження пальникового пристрою від відстані між вихідним перетином газоподаючого каналу і внутрішньою торцевою поверхнею стінки стабілізатора

Справжній підрозділ присвячений розгляду результатів досліджень по встановленню залежності різних характеристик системи охолодження стабілізатора з плоским імпульсним струменем від відстані (l) між вихідним перетином охолоджуючого каналу і внутрішньої торцевої поверхнею стінки стабілізатора. При проведенні обчислювальних експериментів величина варіювалася в широких практичних межах від 0,375 до 1,5.

На рис. 6.13 - 6.17 і в табл. 6.1 представлені характерні дані виконаних досліджень. Рис. 6.13, а), б) ілюструють особливості картини перебігу палива у внутрішній порожнині стабілізатора для найменшого $l = 0,375$ і найбільшого $l = 1,5$ з розглянутих значень. Як видно, зіставляються ситуації течії характеризуються певною спільністю. А саме наявністю великого стійкого вихору, прилеглого до стінки охолоджуючого каналу, а також оточуючого даний вихор потоку. Поряд з цим вбачаються також і суттєві відмінності, які стосуються в першу чергу розмірів зазначеного вихору і зон його обтікання.

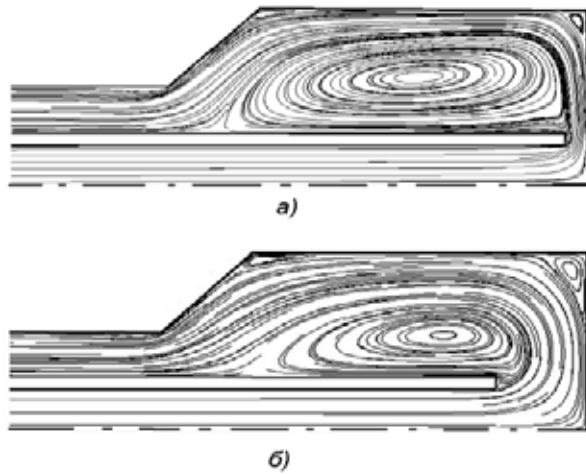


Рис. 6.18 Картина ліній току для системи самоохолодження з обдувом торця стабілізатору плоского імпактного струменя

а) $\bar{\delta}=0,375$; б) $\bar{\delta}=1,5$.

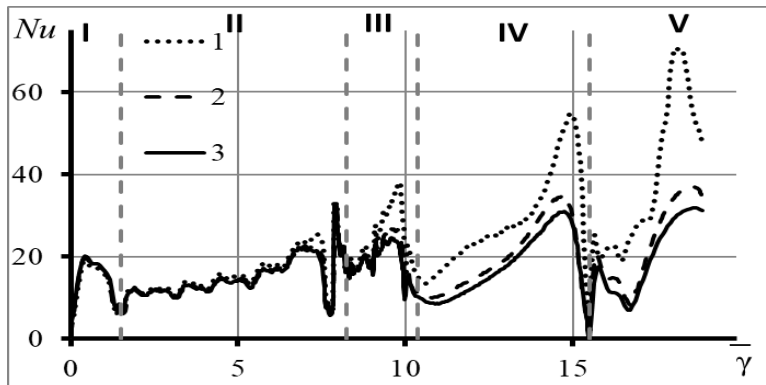


Рис. 6.19 Число Нуссельта на внутрішній поверхні стабілізатора для системи самоохолодження з обдувом торця стабілізатора плоским імпактним струменем при різному значенні

1 - $= 0,375$; 2 - $= 1,0$; 3 - $= 1,5$.

Меншому значенню відповідають великі розміри вихору і в цілому менші величини поперечних перерізів потоку, що обтікає вихор. Відповідно до цього значення швидкостей в даному потоці виявляються суттєво вищими при менших.

До того ж, як відомо, зі зменшенням величини δ зростає швидкість газу в зоні удару плоскою струменя про торцеву поверхню стабілізатора. Згідно з отриманими даними максимальні величини швидкості у торцевій поверхні стабілізатора становлять 2,99 і 0,945 при $= 0,375$ і 1,5 відповідно. Саме описані особливості аеродинаміки течії визначають зростання інтенсивності

охолодження стабілізатора зі зменшенням відстані між вихідним перетином газоподаючого каналу і внутрішньою поверхнею торцевої стінки стабілізатора.

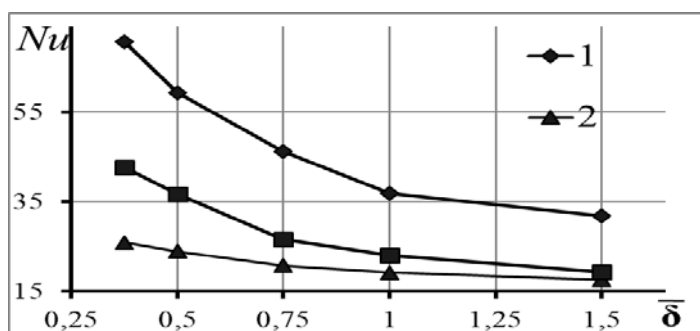


Рис. 6.20 Залежність чисел Nu_{max} , Nu_T і $Nu_{ср}$, від величини

1 - Nu_{max} ; 2 - Nu_T ; 3 - $Nu_{ср}$.

Зазначену закономірність ілюструє наведені на рис. 6.14 дані про зміну числа Нуссельта уздовж внутрішньої поверхні стабілізатора. Найбільше значення Nu на торцевій поверхні стабілізатора складає згідно з отриманими даними 70,6 і 31,9 для $\delta = 0,375$ і 1,5 відповідно.

У міру віддалення від області максимальних значень числа Нуссельта вниз по потоку до газоподаючих отворів відмінності в величинах чисел Нуссельта, що відповідають різним значенням параметра, в цілому істотно зменшуються. І на достатньому видаленні від цієї області в зоні, яка відповідає дну ніші, відмічені відмінності виявляються вже незначними. Таким чином, в даній ситуації має місце ефект просторової локалізації впливу відстані на інтенсивність тепловіддачі.

На рис. 6.15 представлена залежність чисел Нуссельта: Nu_{max} , Nu_T і $Nu_{ср}$ від відстані. Тут Nu_{max} , Nu_T - максимальне і середнє значення числа Nu на торцевій поверхні стабілізатора, $Nu_{ср}$ - середнє значення числа Nu уздовж всієї охолоджуючої поверхні. Як видно, зі зменшенням найбільш істотно збільшується Nu_{max} , а найменш - $Nu_{ср}$. Звертає на себе також увагу той факт, що в найбільшій мірі ефект впливу проявляється в діапазоні його зміни від $\delta = 0,375$ м до 1,5. Подальше ж збільшення не робить настільки істотного впливу на величини $Nu_{ср}$ і Nu_T .

Як видно з наведених на рис. 6.15 даних, виявляється можливим значне збільшення як максимальної, так і середньої величини числа Nu на торцевій поверхні стабілізатора за рахунок зменшення відстані. Так, при зниженні від 1,5 до 0,375 величини Nu_{max} і Nu_T зростають приблизно в 2,2 рази. Дана обставина заслуговує на особливу увагу, оскільки саме торцеві поверхні стабілізатора є найбільш теплонапружених.

Рис. 6.16 ілюструє зміна температури уздовж зовнішньої поверхні стінки стабілізатора при різних значеннях. Згідно з наведеними даними загальний характер цієї зміни однаковий для різних величин. При цьому меншим відповідають в цілому більш низькі значення температури. Найбільша розбіжність безрозмірних температур, що відповідають різним величинам ($= 0,375$ і $1,5$), має місце в центрі торцевій зони стабілізатора і становить $0,23$. Значні, хоча і менш високі, розбіжності зіставляються температур зберігаються на всій торцевій поверхні стабілізатора (зона V на графіку), а також і на ділянці його бічної поверхні (зона IV). Таким чином, наведені дані свідчать про те, що зменшення у розглянутих межах величини параметра, дозволяє знизити температуру стінок стабілізатора у найбільш теплонапружених торцевих зонах у середньому приблизно на $0,18$.

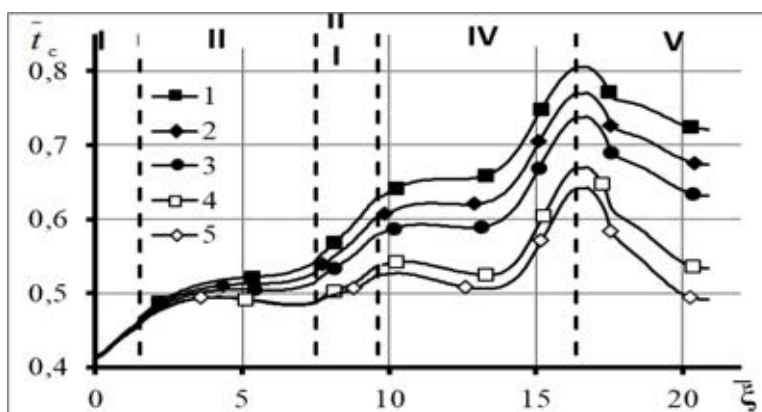


Рис. 6.21 Температура зовнішньої поверхні стінки стабілізатора для системи самоохолодження з обдувом торця стабілізатора плоским імпульсним струменем при різному значенні

1 - = 1,5; 2 - = 1,0; 3 - = 0,75; 4 - = 0,5; 5 - = 0,375.

Тобто варіювання параметра є одним із дуже ефективних засобів

впливу на тепловий стан стінок стабілізатора у його високотемпературних підгалузях.

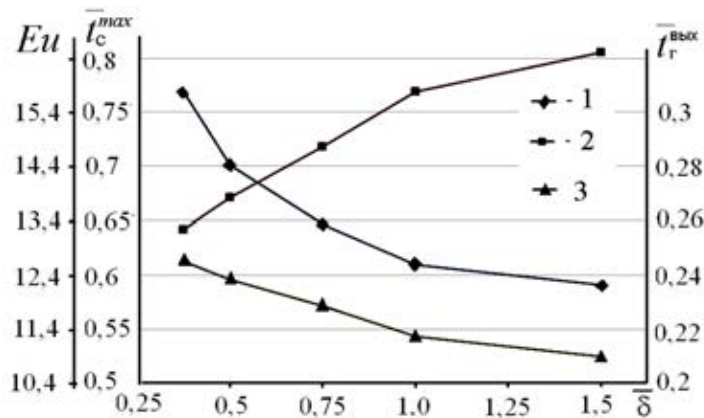


Рис. 6.22 Залежність параметрів Eu , від величини зазору між торцем газоподаючого каналу та стінкою стабілізатора

Таблиця 6.2

Характеристики системи охолодження при варіюванні відстані

$\bar{\delta}$	0,375	0,5	0,75	1	1,5
\bar{U}_{max}	2,99	2,38	1,66	1,30	0,95
Nu_{max}	70,6	59,2	46,3	36,8	31,9
Nu_r	42,7	36,7	26,5	23,0	19,3
Nu_{cp}	25,8	24,0	20,7	19,2	17,6
\bar{t}_c^{max}	0,642	0,671	0,718	0,769	0,805
Eu	15,8	14,4	13,3	12,6	12,2
$\bar{t}_r^{вых}$	0,245	0,238	0,229	0,217	0,210

Слід зазначити, що зі зменшенням зазору між торцем газоподаючого каналу і стінкою стабілізатора має місце зростання числа Ейлера, відповідного втрат тиску по тракту охолоджувача (природного газу). Однак це зростання у досліджуваному діапазоні параметрів порівняно невелика (див. Табл. 6.2 і рис. 6.22). Що стосується температури охолоджуючого газу, то, як очевидно, вона підвищується у міру зменшення зазору через збільшення інтенсивності тепловіддачі від стінок стабілізатора до газу. Величина ж цього підвищення виявляється відносно невеликий внаслідок значної витрати охолоджуючого газу. Так, температура газу на виході з

системи охолодження становить 0,244 і 0,209 при $\beta = 0,375$ і 1,5 відповідно.

6.5 Вплив ширини стабілізатора на аеродинамічні і теплові характеристики системи охолодження

У цьому підрозділі наводяться результати досліджень по встановленню залежності від ширини стабілізатора таких характеристик процесу, як втрати тиску по тракту охолоджувача, рівні нагріву газу на виході з системи охолодження, тепловий стан стінок стабілізатора, структура потоку охолоджуючого газу та ін. Нижче в якості характерного прикладу представлені дані, що відповідають системі охолодження з плоским імпульсним струменем при відсутності дефлекторних конструкцій. Основні вихідні параметри тут такі ж, як і в попередньому підрозділі. При цьому величина приймалася рівною 0,75; ширина стабілізатора варіювалася у діапазоні 7,5 - 12,5.

Типові результати виконаних досліджень представлені на рис. 6.18 - 6.20 і у табл. 6.2.

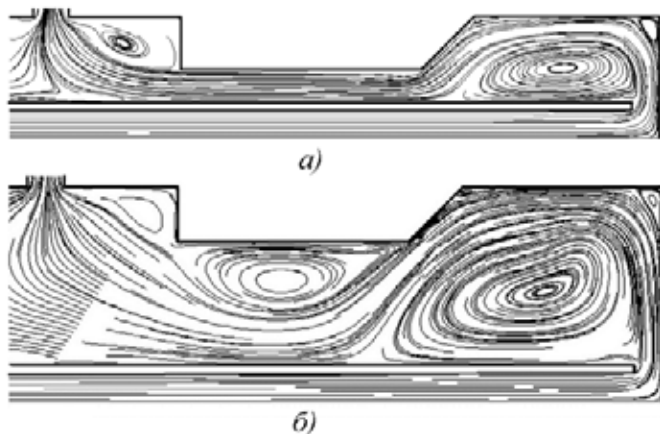


Рис. 6.23 Картина ліній струму охолоджуючого агента в поздовжньому перетині стабілізатора

ширина = 7,5 (а) і = 12,5 (б) для системи охолодження з обдувом торця стабілізатора плоским імпульсним струменем.

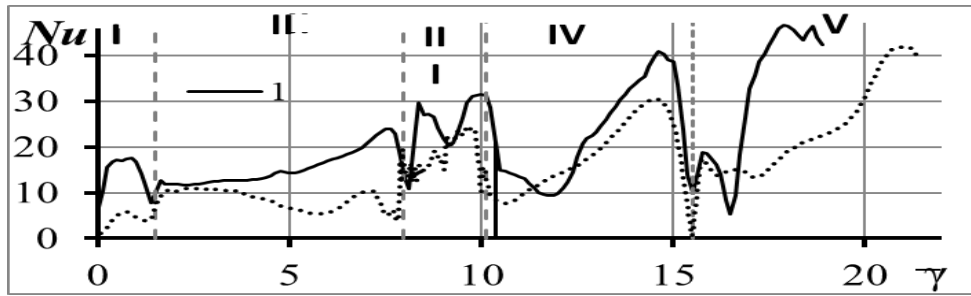


Рис. 6.24 Число Нуссельта на внутрішній поверхні стабілізатора ширина = 7,5 (1) і = 12,5 (2) для системи охолодження з обдувом торця стабілізатора плоским імпульсним струменем.

Зупинимося спочатку на розгляді структури течії охолоджуючого газу у внутрішній порожнині стабілізатора при різних значеннях. Як видно із зіставлення рис. 6.18, а) і б), картини ліній струму при $\gamma = 7,5$ і $\gamma = 12,5$ істотно відрізняються. Так, якщо у першому випадку має місце тільки один великий вихор, що знаходиться поблизу торцевої стінки стабілізатора, то у другій ситуації реалізується два вихору. Причому один з них також розташовується поблизу торця стабілізатора. Другий же прилягає безпосередньо до дна ніші. Наявність другого вихору, як очевидно, має знижувати ефективність охолодження стінки дна ніші.

Особливості тепловіддачі від стінки стабілізатора до більш холодному тілу газу ілюструє рис. 6.19. Згідно з наведеними даними великим значенням ширини стабілізатора ($\gamma = 12,5$) відповідають нижчі в цілому значення числа Нуссельта. При цьому помітні відмінності в величинах числа Нуссельта для різних значень ширини стабілізатора ($\gamma = 7,5$ і $\gamma = 12,5$) мають місце уздовж всієї охолоджувальної поверхні.

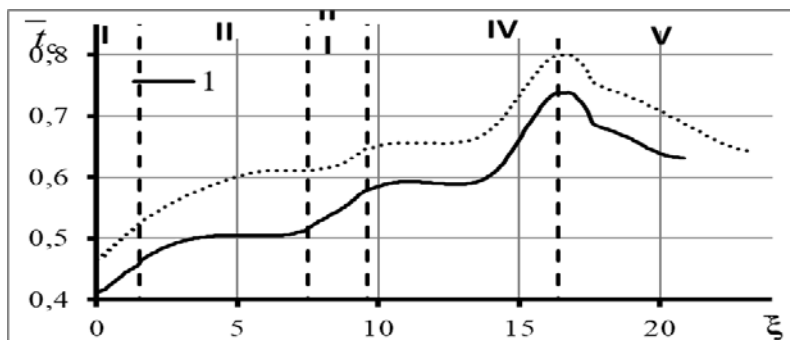


Рис. 6.25 Температура зовнішньої поверхні стінки стабілізатора

ширина = 7,5 (1) і = 12,5 (2) для системи охолодження з обдувом торця стабілізатора плоским імпактним струменем.

Таблиця 6.2

Характеристики системи охолодження при варіюванні ширини стабілізатора

$\bar{B}_{ст}$	Nu_{max}	$Nu_{т}$	$Nu_{ср}$	$\bar{t}_{с}^{max}$	Eu	$\bar{t}_{г}^{ввых}$
7,5	46,3	26,5	20,7	0,718	13,3	0,228
12,5	41,7	23,8	16,7	0,798	14,3	0,254

Середні величини числа $Nu_{т}$ на торці стабілізатора і на всій охолоджувальній поверхні $Nu_{ср}$ для зіставляються ситуацій відрізняються в 1,11 і 1,24 рази. Спостерігаються також і помітні розбіжності в рівнях температур охолоджуваних стінок стабілізатора (див. Рис. 6.20). Причому зі збільшенням ширини стабілізатора температура його стінок зростає. Відмінність максимальних температур стінок стабілізатора при = 12,5 і 7,5 становить 0,08. Найбільша ж різниця температур в порівнюваних ситуаціях має місце в області дна ніші і досягає приблизно 0,11. Це обумовлено описаним вище істотною відмінністю картин течії вздовж дна ніші при різних значеннях ширини стабілізатора.

Що стосується числа Ейлера, що відповідає втратам тиску по тракту охолоджуючого газу, то воно дещо зростає при збільшенні ширини стабілізатора. Як зазначено в табл. 3.2, $Eu = 13,3$ і $14,3$ при = 7,5 і 12,5. Зі збільшенням ширини підвищується, хоча і незначно, температура газу на виході з системи охолодження. А саме, вона становить 0,228 при = 7,5 і 0,254 при = 12,5. Резюмуючи викладене, слід зазначити, що збільшення ширини стабілізатора при інших рівних умовах призводить до деякого погіршення ефективності охолодження.

6.6 Висновки за розділом

Таким чином, на основі проведених досліджень систем охолодження стабілізаторних пальникових пристроїв в номінальному режимі роботи котлоагрегатів можна зробити наступні висновки:

1. Виконано чисельні дослідження перебігу і теплопереносу в системах охолодження з обдувом внутрішньої торцевої поверхні стабілізатора плоским імпульсним струменем при використанні дефлекторних конструкцій різної конфігурації - напрямних прямого і округлених дефлекторів і спеціально спрофільованих дефлекторів з прямим і округленим торцем, а також при відсутності дефлекторів. При цьому:

а) встановлено, що при використанні різних дефлекторів в цілому має місце суттєва відмінність в структурах течії, проте характеристики потоку уздовж охолоджувальної поверхні в безпосередній близькості від неї відрізняються незначно. Останнє обумовлено тим, що при відсутності спеціально спрофільованих дефлекторів їх роль фактично виконує вихрова структура в центральній області приторцевій зони стабілізатора, конфігурація обмежуючих поверхонь якої в значній мірі аналогічна формі спеціально спрофільованого дефлектора;

б) показано, що за рівнем забезпечення ефекту охолодження найбільш ефективними є система із спеціально спрофільоване дефлектором з прямим торцем і система з напрямним дефлектором. Три ж інші схеми направляючого округлених дефлектора, спеціально спрофільованого дефлектора з округленим торцем, а також при відсутності дефлекторів характеризуються практично однаковою і дещо нижчою, ніж зазначені системи, ефективністю охолодження. У широкому практично важливому діапазоні зміни досліджуваних параметрів розглянуті системи охолодження відповідають всім вимогам по забезпеченню необхідного теплового стану стінок стабілізаторів і допустимих рівнів нагріву охолоджуючого агента і аеродинамічних втрат в цих системах. Наприклад, при застосуванні даних систем для мікрофакельного пальникового пристрою типу СНТ-45

температура стінок стабілізатора не перевищувала 0,727, рівень температури газу на виході з системи охолодження - 0,234, а число Ейлера, що відповідає втратам тиску в системі охолодження, - 14,3.

2. На основі комп'ютерного моделювання виконано дослідження характеристик системи охолодження з обдувом внутрішньої торцевої поверхні стабілізатора системою круглих імпульсних струменів і проведені відповідні зіставлення з ситуацією застосування плоского імпульсного струменя. Виявлено особливості складної тривимірної структури течії природного газу в системі охолодження з круглими струменями. Встановлено закономірності зміни числа Нуссельта, які істотно відрізняються від ситуації застосування плоского струменя, перш за все, в зоні торцевої поверхні стабілізатора. Так, для розглянутих умов максимальні значення Nu в зоні удару струменя об торцеву поверхню стабілізатора для круглих струменів перевищують відповідні величини для плоского струменя майже в 3 рази. Показано, що застосування круглих імпульсних струменів забезпечує при інших рівних умовах значно більш інтенсивне охолодження стінок стабілізатора, ніж у випадку плоского струменя. Однак, при цьому число Ейлера, що відповідає втратам тиску по тракту охолоджувача, збільшується більш ніж в 4 рази в порівнянні з ситуацією плоскою струменя.

3. Встановлено закономірності впливу на ефективність систем охолодження стабілізаторних пальників ширини стабілізатора. Показано, що збільшення ширини стабілізатора ($B_{\text{став}}$) при інших рівних параметрах призводить у цілому до деякого погіршення умов охолодження пальників. Так, у ситуації відсутності дефлекторних конструкцій для системи охолодження з плоским імпульсним струменем при підвищенні від 7,5 до 12,5 істотно змінюється картина перебігу охолоджуючого агента в порожнині стабілізатора, що проявляється, перш за все, у появі циркуляційної течії, безпосередньо прилеглого до дна ніші. Збільшення призводить до зменшення в цілому величини числа Нуссельта уздовж всієї охолоджувальної поверхні і відповідно до зростання температура стінок стабілізатора.

4. Виявлено вплив на ефективність розглянутих систем охолодження пальників стабілізаторного типу відстані між внутрішньою поверхнею його торцевої стіни і вихідним перетином газоподаючого каналу. Зокрема, для системи охолодження з плоским імпактним струменем при відсутності дефлекторних конструкцій показано, що зменшення зазору між торцем газоподаючого каналу і стінкою стабілізатора до технологічно допустимого рівня 0,375 забезпечує істотне підвищення ефективності охолодження найбільш теплонапружених торцевої стінки стабілізатора. При зниженні від 1,5 до 0,375 збільшуються розміри циркуляційної зони в приторцевій області стабілізатора, а, отже, зменшуються поперечні перерізу потоку, що обтікає цю зону і охолоджуєму поверхню стабілізатора. При зазначеному зниженні величини має місце також зростання значень числа Нуссельта, який найбільшою мірою проявляється в центральній зоні торця стабілізатора і регресує вниз по потоку; згідно з цим відбувається зниження температури стінок стабілізатора. Ефект впливу величини зазору на інтенсивність охолодження пальникового пристрою є найбільш істотним в діапазоні зміни від 0,375 до 0,75. Подальше збільшення не робить такого значного впливу на характеристики систем охолодження.

6.7 Список використаних джерел

- 1) Особенности обтекания плоских стабилизаторов ограниченным потоком / Н.М. Фиалко, Л.С. Бутовский, В.Г. Прокопов [и др.] // Промышленная теплотехника. – 2010. – Т. 32, № 5. – С. 53 - 57.
- 2) Устойчивость факела за плоским стабилизатором при подаче газа внедрением в воздушный поток / Н.М. Фиалко, Л.С. Бутовский, Е.А. Грановская // Технологические системы. – 2010. – Т. 52, № 3. – С. 72 - 76.
- 3) Научно-технический опыт апробации струйно-нишевой технологии сжигания топлива на объектах промышленной и коммунальной энергетики / Н.М. Фиалко, М.З. Абдулин, Н.О. Меранова [и др.] // Проблемы промышленной теплотехники: V Межд. конф., Киев, май 2007 г.: сборник тезисов докл. – К.: ИТТФ НАНУ, 2007. – С. 118.
- 4) Особенности струйно-нишевой технологии сжигания топлива / Н.М. Фиалко, М.З. Абдулин, Н.О. Меранова [и др.] // Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики: материалы XVII международной конференции, Ялта 5-9 июня 2007 г. – Киев, 2007. – С. 135 - 137.
- 5) Абдулин М.З. Струйно-нишевая технология сжигания топлива на объектах муниципальной энергетики / М.З. Абдулин, В.С. Дубовик // Новости теплоснабжения. – 2004. – № 11. – С. 19 – 22.
- 6) Абдулін М.З. Тепловий режим елементів мікродифузійного газогорілочного пристрою / М.З. Абдулін, Ібрагім Джамал // Наукові вісті НТТУ «КПШ», серія теплоенергетика. – 1997. – С. 111-113.
- 7) Абдулін, М.З., Джамал, І. (1997). *Дослідження пальникового пристрою з поперечною подачею струменів палива*. Екотехнології та ресурсозбереження. Київ, №2, С. 68-70.
- 8) Абдулин М.З. Численное моделирование турбулентного теплообмена в горелочном устройстве на основе струйно-нишевой технологии сжигания топлива / М.З. Абдулин, С.А. Исаев, Д.А. Лысенко // Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках: Тр. 2-ой

Российской Конференции. - М. : Издательство МЭИ. – 2005. – С. 84-85.

9) Камалова Г.А. Моделирование турбулентных реагирующих течений в топочных устройствах / Г.А. Камалова, В.Е. Мессерле, А.Ж. Найманова [и др.] // Теплофизика и аэромеханика. – 2008. – Т. 15, № 1. – С. 149-161.

10) Моделирование структуры течения изотермического потока в эшелонированной решетке плоских стабилизаторов пламени / Н.М. Фиалко, Л.С. Бутовский, В.Г. Прокопов [и др.] // Промышленная теплотехника. – 2010. – № 6. – С. 28 - 36.

11) Варнатц Ю. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ / Ю. Варнатц, У. Маас, Р. Диббл; пер. с англ. Г.Л. Агафонова, под ред. П.А. Власова. – М.: Физматлит, 2003. – 352 с.

12) Математическое моделирование структуры течения при микрофакельном сжигании топлива / Н.М. Фиалко, В.Г. Прокопов, С.А. Алешко // Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики: материалы XVIII международной конференции, Ялта, 10-14 июня 2008 г. – Киев, 2008. – С. 112 - 114.

13) Численные исследования особенностей влияния шага между газоподающими отверстиями на закономерности смесеобразования при микрофакельном сжигании топлива / В.Г. Прокопов, С.А. Алешко, Ю.В. Шеренковский [и др.] // Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики: материалы XIX межд. конференции, Ялта, 8-12 июня 2009г. – Киев, 2009. – С. 177 - 179.

14) Особенности математического моделирования динамики течения и смесеобразования при реализации струйно-нишевой технологии сжигания топлива / В.Г. Прокопов, С.А. Алешко, Ю.В. Шеренковский // Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики: материалы XIX межд. конференции, Ялта, 8-12 июня 2009г. – Киев, 2009. – С. 180 -184.

15) Молочников В.М. Исследование применимости пакета FLUENT

к моделированию дозвуковых отрывных течений / В.М. Молочников, Н.И. Михеев, О.А. Душина // Теплофизика и аэромеханика. – 2009. - Т.16, № 3. - С. 387 - 394.

16) Численные исследования картины течения горючего и окислителя в горелочных устройствах струйно-нишевого типа / Фиалко Н.М., Прокопов В.Г., Алешко С.А. [и др.] // Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики: материалы XVIII международной конференции, Ялта, 10-14 июня 2008г. – Киев, 2008. – С. 101 - 104.

17) Joseph H.W. Lee. Turbulent jets and plumes: a Lagrangian approach / Joseph H.W. Lee, Vincent Chu. – Boston : Kluwer Academic Publishers Group., 2003. – 390p.

18) Gran I.R. A numerical study of a bluff-body stabilized diffusion flame. Part 2. Influence of combustion modeling and finite-rate chemistry / I.R. Gran, B.F. Magnussen // Combustion Science and Technology. – 1996. – P. 119 - 191.

19) Ночовний О.В. Моделирование обтекания плоских стабилизаторов пламени / О.В. Ночовний, Н.М. Фиалко, Н.П. Полозенко // Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: 9 міжнар. науково-практична конф. аспірантів, магістрантів і студентів, 18-22 квітня 2011р.: тези доповідей. – Київ, 2011. – С. 165.

20) Computation of Vibration-Dissociation Nonequilibrium Boundary Layers: Comparison of Various Models / N. Belouaggadia, I. Armenise, M. Capitelli [et al.] // Journal of Thermophysics and Heat Transfer. – Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2010. – Vol. 24, No. 4. – P. 684-693.

21) Branley N. Large eddy simulation of a turbulent non-premixed flame / N. Branley, W.P. Jones // Combustion and Flame. – Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 2001. – Vol. 127. – P. 1914 - 1934.

22) Fox R.O. Computational Models for Turbulent Reacting Flows / R.O. Fox. - Cambridge : Cambridge University Press, 2003. – 419 p.

23) Large Eddy Simulations of turbulent reacting flows in real burners: the status and challenges / Gicquel L., Staffelbach G., Cuenot B., Poinso T. // Journal of Physics: Conference Series. – 2008. – Vol. 125. – P. 12 - 29.

24) Zimont V. Gas Premixed Combustion at High Turbulence. Turbulent Flame Closure Model Combustion Model / V. Zimont // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2000. – Vol.21. – P. 179–186.

25) Jones W.P. Numerical study of n-heptane auto-ignition / W.P. Jones, S. Navarro-Martinez // Flow Turbul. Combust. – 2009. – Vol. 83. – P. 407–423.

26) Large Eddy Simulation of laser ignition and compressible flow in a rocket-like configuration / [Lacaze G., Cuenot B., Poinso T., Oschwald M.] // Combust. Flame. – 2009. – Vol. 156. – P. 1166–1180.

27) Marchione T. Ignition of turbulent swirling n-heptane spray flames using single and multiple sparks / T. Marchione, S. Ahmed, E. Mastorakos // Combust. Flame. – 2009. – Vol. 156. – P. 166–180.

28) Norton T.S. An experimental and modeling study of ethanol oxidation kinetics in an atmospheric pressure flow reactor / T.S. Norton, F.L. Dryer // International Journal of Chemical Kinetics. – 1992. – Vol. 24. – P. 319–344.

29) Veynante Denis. Turbulent combustion modeling / Denis Veynante, Luc Vervich // Progress in Energy and Combustion Science. – 2002. – P. 193-266.

30) Комп'ютерне моделювання течії та теплообміну в системах охолодження з дефлекторними конструкціями для мікрофакельних пальників / Н.М. Фіалко, В.Г. Прокопов, Ю.В. Шеренковський, С.О. Альошко // Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики: материалы XXII межд. конференции, Ялта, 8-12 июня 2012 г. – Киев, 2012. – С. 150 - 152.

31) Компьютерное моделирование процесса смесеобразования в горелочных устройствах стабилизаторного типа с подачей газа внедрением в сносящий поток воздуха / Н.М. Фиалко, Л.С. Бутовский, В.Г. Прокопов [и др.] // Промышленная теплотехника. – 2011. – №1. – С. 51 - 56.

32) Хаген Р.Л. Перенос импульса при турбулентном отрывном обтекании прямоугольной впадины / Хаген Р.Л., Данак А.М. // Прикладная

механика. – 1966. – Т. 3, № 3. – С. 189-195.

33) Грайхен К. Некоторые свойства турбулентного течения в каверне в условиях дозвукового обтекания / К. Грайхен, В.И. Корнилов // Теплофизика и аэромеханика. – 1996. – Т. 3, № 4. – С. 321-335.

34) Hiwada M. Three-Dimensional Flow and Heat Transfer in a Rectangular Cavity / M. Hiwada, I. Mabuchi, M. Cumada // Heat Transfer Jap. Res. – 1985. – V. 14, № 1. – P. 75-96.

35) Kamotani Y. Experiments on a Turbulent Jet in a Cross Flow / Y. Kamotani, I. Greber // AIAA Journal. – 1972. – Vol. 10, № 11. – P. 1425 – 1429.

36) Дьяченко А.Ю. Обтекание турбулентным потоком поперечной каверны с наклонными боковыми стенками. 2. Теплообмен. / А.Ю. Дьяченко, В.И. Терехов, Н.И. Ярыгина // Прикладная механика и техническая физика. – 2007. – Т. 48, № 4. – С. 23 – 2

37) Абдулін М.З. Тепловий режим елементів мікродифузійного газогорілочного пристрою / М.З. Абдулін, Ібрагім Джамал // Наукові вісті НТТУ «КПІ», серія теплоенергетика. – 1997. – С. 111-113.

РОЗДІЛ 7. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ХАРАКТЕРИСТИК РОЗРОБЛЕНИХ ПАЛЬНИКОВИХ ПРИСТРОЇВ НА ОСНОВІ СТРУМЕНЕВО-НІШОВИХ СИСТЕМ У ПРОМИСЛОВИХ УМОВАХ

З урахуванням результатів досліджень робочого процесу струменево-нішових модулів виготовлені і сертифіковані пальникові пристрої СНТ для проведення тестових випробувань на вогнетехнічних об'єктах різноманітного призначення. Перші дослідні зразки відображені на (рис.7.1). Перший пальник для топков КВН у порівнянні з аналогами а) також представлений типоряд ПП СНТ б) [1-6].



Типоряд ПП

Аналоги ПП

Рис.7.1 Перші дослідні зразки струменево-нішових пальників

Треба відмітити, що на експериментальних стендах неможливо перевірити всі необхідні характеристики пальникових пристроїв. Особливо це відноситься до екологічних характеристик. В умовах експлуатації вогнетехнічних об'єктів необхідно дослідити можливість ефективної роботи в умовах розрідження та протитиску в топковому просторі. Також представляє інтерес і робота пальникових пристроїв в умовах тепловідводу різної інтенсивності. Крім того багато типів вогнетехнічних об'єктів, особливо котли, мають режими вібраційного горіння і це значно звужує діапазон ефективної роботи. Для дослідження цих питань були вибрані такі вогнетехнічні об'єкти:

- Контактні водонагрівачі (КВН) в яких продукти горіння контактують з струменями води.
- Котел ДКВР -10/13 з неекранованим подом топкового простору.

- Котел КВГМ-20 – сучасний водогрійний котел з максимально можливою ступеню екранування топкового простору.
- Котел ДЕ-25-14 — сучасний паровий котел, з високим ступенем екранування топкового простору.
- НИИСТУ-5 – морально застарілий котел з низьким рівнем конвективного теплозйому з неекранованим подом.
- Стенд сушки та розігріву сталеливарних ковшів з високонагрітими стінками топкового простору відносно стінок котлів. Досліди здійснювалися з урахуванням вимог нормативної документації за методикою, що розроблена у дослідній лабораторії горіння НТУУ «КПІ» і викладена в Атестаті № 06-ВЛ «Робоча методика проведення досліджень пальників газових промислових».

7.1 Дослідження робочого процесу пальникового СНТ-22 пристрою на основі струменево-нішових систем у контактному водонагрівачі

У лабораторії горіння теплоенергетичного факультету КПІ були проведені досліди зразка пальникового пристрою струменево-нішового типу СНТ-22. Метою досліджень було визначення працездатності зразка в умовах протитиску в топковому просторі пальникового пристрою, у якому реалізована струменево-нішова технологія спалювання і визначення еколого-теплотехнічних характеристик пальникового пристрою в складі контактного водонагрівача КВН-2,9 (рис.7.2.)

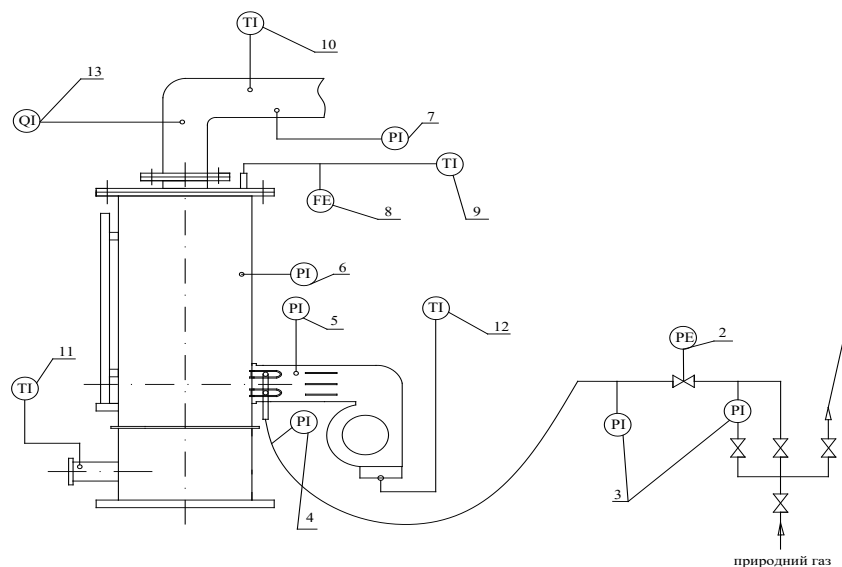


Рис. 7.2 Схема експериментальної установки для випробувань ПП в складі контактного водопідігрівача

1- свіча; 2- лічильник газу РЛ-20-2,0; 3 - манометри для виміру тиску газу на вході і виході лічильника; 4,5,6,7 - манометри для виміру, відповідно, тиску газу на вході у пальників пристрій, тиску повітря що набігає на модуль; тиску в топці і тиску продуктів горіння; 8 - лічильник Metran для виміру витрати води через котел; 9,10,11,12 - ртутні термометри ТЛ-4 для виміру, відповідно, температури води на вході у теплообмінник, температури газів, температури води на виході з теплообмінника і температури повітря на вході у пальників пристрій; 13 - газоаналізатор Testo 342.

Топковий простір являє собою камеру 700x580x550мм. Продукти горіння виходять через шар води, де охолоджуються до температури порядку 50-80 °С, і потім проходять через газохід у трубу. Контактний водонагрівач зроблено ТОВ «Лота». Підігрівач оснащений необхідним устаткуванням і ресурсами - системою живлення газом із надлишковим тиском 0,1 МПа, електроживленням - 380 В, системою відводу газів, які надаються, системою технічного водопостачання з надлишковим тиском води 0,4 МПа. В дослідях використовувалися засоби вимірювальної техніки, приведені в табл.7.1. (Див. Додаток) Умови проведення дослідження: температура повітря у приміщенні - +10 °С; відносна вологість - 70%; швидкість повітря у приміщенні - 0

м/с; тиск повітря у приміщенні - 98,8 кПа; нижня теплота згоряння газу - 36710 кДж/м³ (умови нормальні). Діапазон проведення дослідження: тиск газу перед пальником 2000-6800 Па; витрата газу на пальник 9,2-33,2 м³/год; тиск повітря перед пальником 350-2450 Па; тиск продуктів згоряння в топці 250-1500 Па; витрата води через нагрівач 7 м³/год; температура води перед нагрівачем 45-53⁰С.



Рис. 7.3 Контактний водопідігрівач з ПП СНТ

7.1.1 Результати дослідження теплотехнічних характеристик

За результатами дослідження спостерігалось, що потужність пальникового пристрою змінювалася у діапазоні від 93,04 кВт до 331,46 кВт (3,56 рази). Мінімальний досягнутий коефіцієнт надлишку повітря на номінальній потужності дорівнює 1,12. При цьому перевищення тиску газу перед пальником над тиском продуктів горіння у підігрівачі складало 4,9 кПа. Тобто, пальниковий пристрій у всьому діапазоні навантажень працює при низькому тиску газу. Слід зазначити, що даний пальниковий пристрій плавно набирає і знижує навантаження, при цьому пальник працює стабільно, без зривів і проскоків полум'я.

Дослідження температурного стану елементів пальникового пристрою підтвердили результати, отримані при дослідженні на відкритому стенді - температура торцевої стінки пілона не перевищувала 250⁰С, а температура газу у порожнині пілонамодуля була у межах 60-90⁰С.

7.1.2 Дослідження екологічних характеристик

Вміст оксидів вуглецю продуктах горіння у всьому діапазоні зміни навантажень у перерахуванні на нормальні фізичні умови при коефіцієнті надлишку повітря приведеному до 1,0 і потужності $i - 309$ кВт не перевищує 80ppm (0,008%), що відповідає вимогам ГОСТ - до 0,05%. Вміст оксидів азоту (рис.7.4) при такій потужності не перевищує 55 ppm (112 мг/м³), що відповідає вимогам ГОСТ - до 205мг/м³. Середня втрата теплоти від хімічного недопалу склала 0,0135. Основні показники роботи пального пристрою у теплообміннику надані на рис.7.4.

Треба відмітити, що при значному рівні протитиску у пальному просторі робочий процес відзначався стійкою роботою. Дослідження проведені за умови зміни потужності пальника від 93,04 кВт до 331,46 кВт за номінальної потужності 300 кВт. Коефіцієнт надлишку повітря підтримувався в межах 1,12-1,35. При цьому вміст оксидів азоту і вуглецю у продуктах горіння, концентрація яких приведена до $= 1,0$ не перевищувала значень, обмежених нормативними документами.

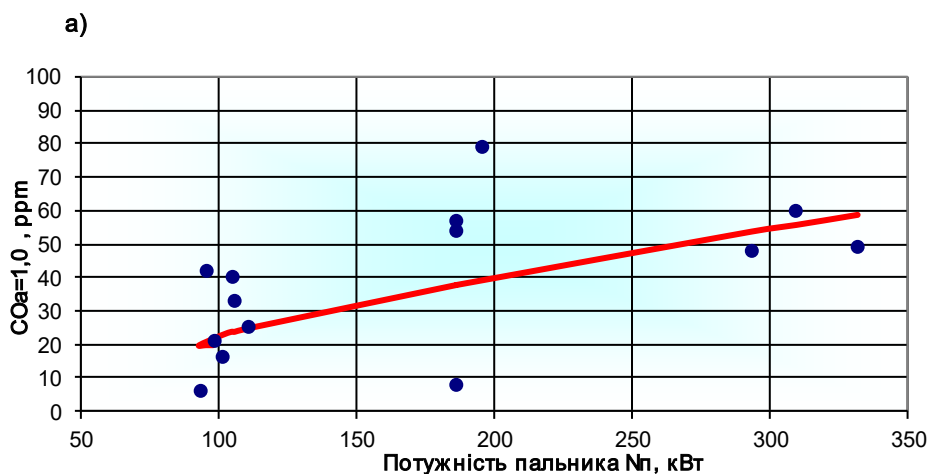




Рис. 7.4 Концентрація CO(a) і NOx (б), приведена до $\alpha=1,0$ у відхідних газах в залежності від теплової потужності

7.1.3. Дослідження питомого тепловиділення в топковому просторі

Важливою характеристикою пального пристрою є забезпечення питомого об'ємного тепловиділення в топковий простір.

$$q_v = \frac{Q}{V} = \frac{Q_H^P \times G_r}{V} \quad (7.1)$$

де Q_H^P - нижча робоча теплота згорання; G_r - витрата горючого; V – об'єм топкового простору в якому закінчується процес горіння.

Можливість підвищення рівня q_v пов'язана з якістю сумішоутворення у палинкових пристроях. Попереднє раціональне надання горючого у шарі окиснювача і турбулізація паливної суміші, що реалізується у палинкових пристроях на основі СНТ дозволяє забезпечувати високі значення q_v , які суттєво перевищують значення досяжні для котлоагрегатів. Випробування пального пристрою СНТ-22 у складі контактного водонагрівача КВН-0,29 показали, що значення питомого тепловиділення досягає значень в 1,5 МВт/м³ і більше. Такі значення недосяжні для сучасних палинкових пристроїв інших типів без організації попереднього змішування палива і окиснювача та без попереднього підігріву повітря.

За умови витрати природного газу для КВН-0,29 $G_r=33,2$ м³/год вся паливна суміш згоряла у межах топкового простору з розмірами

$V=0,7\text{м}\times 0,55\text{м}\times 0,22\text{м}$. Це можна визначити за показником концентрації оксиду вуглецю у продуктах горіння. Значення CO не перевищує $50\text{мг}/\text{м}^3$. Якщо б процес горіння продовжувався за межами топкового простору, то паливо почало б контактувати зі струменями води і процес горіння не доходив би до кінця.

7.2 Дослідження характеристик роботи котла НИИСТУ-5 модернізованого на основі СНТ

На сьогоднішній день на теренах України знаходяться в експлуатації десятки тисяч котлів з ККД нижче 80%. Такі котли працюють не тільки на периферії, але і у комунальній енергетиці великих міст. Враховуючи те, що матеріальних ресурсів на заміну застарілої техніки недостатньо, нагальною проблемою є суттєве підвищення їх ефективності.



Рис. 7.5 Котел НИИ СТУ-5 з ПП СНТ

Підвищення ККД котлів на 10-15% можливе для котлів типу НИИСТУ-5, Надточія (Рис. 7.5) і аналогічних. Конструктивною особливістю даних котлів є недостатній зйом тепла за рахунок відсутності інтенсивного конвективного теплообміну. Тому температура газів, які відходять значно перевищує 300C^0 і може сягати 400C^0 і більше. Використання тепла цих газів, за рахунок технології спалювання є значним потенціалом для

підвищення ККД вогнетехнічних об'єктів.

СНТ дозволяє понизити критичний коефіцієнт надлишку повітря ($\alpha_{кр}$) з 1,15-1,25 які характерні для існуючих пальникових пристроїв до значень 1,01-1,02. Таке зниження надлишкового повітря приведе до збільшення температури продуктів горіння у топковому просторі на 150-200°C. Це в відповідності з законом Стефана-Больцмана дозволяє значно збільшити радіаційний теплообмін у топковому просторі і таким чином дозволяє знизити температуру газів, що уходять і кількість надлишкового повітря. І таким чином дозволяє значно підвищити ККД вогнетехнічних об'єктів. Випробування десяти котлів НИИСТУ-5 у Горлівській тепломережі показали, що зниження надлишку повітря призводить до зниження температури газів, що уходять до 140°C. При цьому ККД котла зріс до 89,5%. А рівень емісії забруднюючих речовин не перевищує нормальних значень.

7.3 Дослідження характеристик роботи котла ДКВР 10/13 з пальниками СНТ-44

Значний інтерес представляє випробування струменево-нішевопальника у складі котла ДКВР (Рис.7.6). Ці котли початково були призначені для спалювання твердого палива. Тому, їх топковий простір повністю не екранований, а под викладений з жаростійких матеріалів, які розжарюється до температури 1100-1200С⁰. Це приводить до перегріву елементів пальникового пристрою. Крім того підвищується температура у районі початку факела, що призводить до підвищення рівня емісії NO_x. Котли такого типу розповсюдженні у комунальній енергетиці і в промисловості. Випробування пальникового пристрою СНТ-44 проводились у порівнянні з високоефективними пальниковими пристроями ГА-110-00Б.

Для участі у проведенні випробування були задіяні співробітники Держенергозбереження України і розроблена спеціальна програма досліджень. Програма передбачає перевірку всіх вимірювальних засобів у Держстандарті України та відтворення однакових умов для порівняння випробувань штатних і струменево-нішових пальників. Перед початком

випробувань всі вимірювальні прилади котельні згідно опису пройшли перевірку в лабораторіях держстандарту України.

Модернізація котла ДКВР-10/13 з установкою пальникових пристроїв СНП-44 відповідає вимогам діючих будівельних норм і правил:

- СНП П-35-76 «Котельні установки. Норми проектування»;
- ДБН В.2. 5-20-2001 «Газопостачання»;
- «Правила безпеки систем газопостачання України»;

Перед заміною пальникових пристроїв, фахівцями «Жилтеплоенерго», АЕК «Київенерго», регіонального відділення Державного підприємства «Енергозбереження» була знята «фотографія» роботи котла на штатно встановлених пальникових пристроях у кількості 2-х штук ГА-110. У результаті були зафіксовані теплотехнічні та екологічні параметри роботи котла на 5-ти навантаженнях відповідно до режимної карти наданої співробітниками котельної. В існуючі амбразури на фронтівій стінці котла №3 були встановлені два пальникових пристрої СНТ-44.

Метою модернізації було: зниження витрати газу не менше ніж на 3%, що відповідає збільшенню ККД котла; коефіцієнт надлишку повітря через пальниковий пристрій - не більш 1,1; приведення NOx у відповідність діючим нормативам; зниження витрат електроенергії не менше ніж на 10%, що відповідає зниженню коефіцієнта надлишку повітря; досягти стійкої роботи котла при тиску газу не менше 10 мм вод. ст.; досягти коефіцієнта робочого регулювання не менше 10. Першим етапом комплексного випробування було зняття фактичних характеристик роботи котельного агрегату ДКВР-10М з пальниками ГА-110.



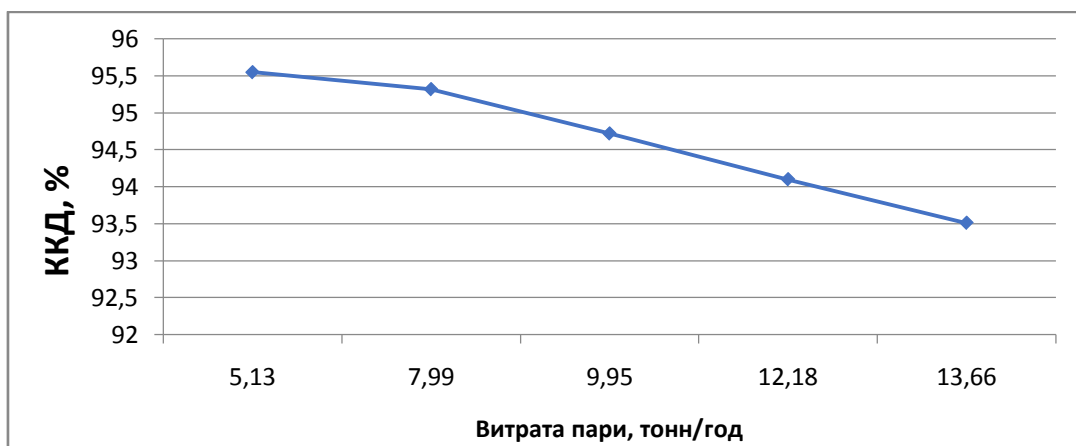
Рис.7.6 Котел ДКВР-10/13 з палинковим пристроєм СНТ

При знятті «фотографії» здійснювалися виміри наступних параметрів: тиск газу у колекторі і перед палинками (трубка Піто); витрата газу (діафрагма і ротаційний лічильник РГ-1000-01); витрата води через котел (штатний витратомір на щиті керування). Для більшої достовірності, також був зроблений контрольний вимір витрати води через котел накладним вимірником витрати «Зліт ПР» Енергоналадки АЕК «Київенерго»; тиск повітря після вентилятора і перед палинками (трубка Піто); тиск мережної води на вході і виході з котла (штатний манометр); температура мережної води на вході і виході з котла (переносний сертифікований лабораторний термометр); температура повітря, що подається на палинки (переносний сертифікований лабораторний термометр); температура газу в колекторі (переносний сертифікований лабораторний термометр); концентрація CO, CO₂, NO_x, O₂ (переносний газоаналізатор); температура газів, що ідуть, (переносний газоаналізатор); коефіцієнт надлишку повітря (переносний газоаналізатор). Слід також відмітити, що при проведенні зняття «фотографії» роботи котла з палинками ГА-110 і при проведенні пуско-наладкових робіт і зняття «фотографії» роботи котла з палинками СНГ-44 використовувались штатні пристрої, які встановлені на котлі. Обробка отриманих результатів проводилась згідно затвердженої для котельної методики розрахунку. Додатково, для отримання дійсної інформації було здійснено: підключення ротаційного лічильника для визначення часової

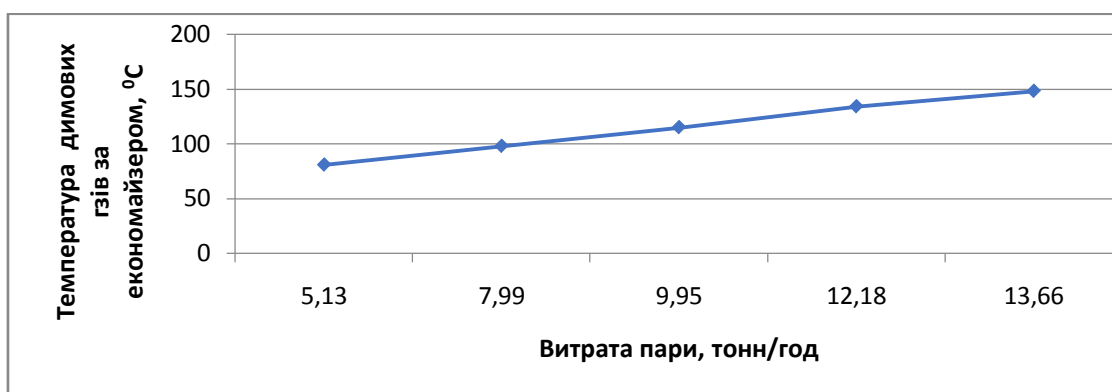
витрати газу; розрахована діаграма витрати мереживної води через котел на відповідність показників щитового пристрою (про що був складений Акт); організоване вимірювання температур сертифікованими термометрами у місцях замірів.

7.3.1 Робота котла у вентиляторному режимі

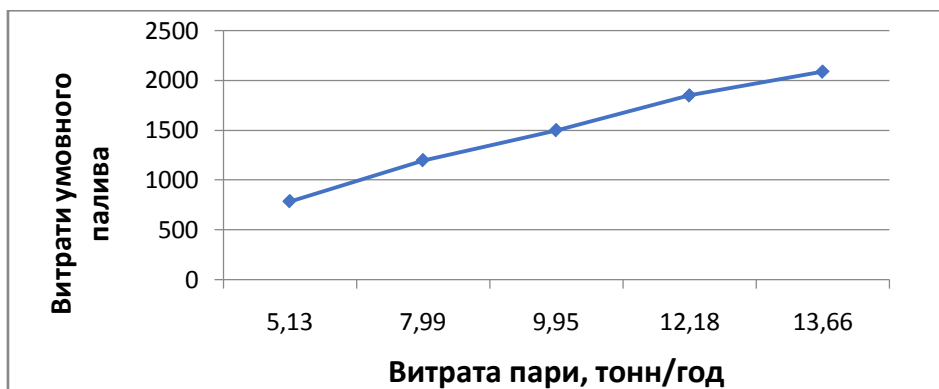
На модернізованому котлі були зняті теплотехнічні та екологічні параметри його роботи на 5-ти навантаженнях, при роботі з вентилятором Рис.7.7 і без нього Рис 7.8. Період між вимірами при навантаженнях, що відрізнялися один від одного більш ніж на 40% складав не менше 40 хвилин, в інших випадках виміри починалися після того, як котел вийшов на сталий режим роботи.



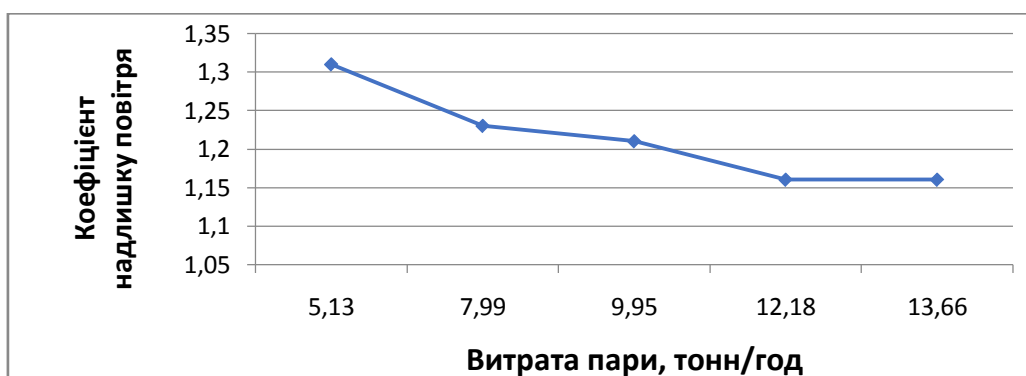
а.)



б)



в.)



г.)

Рис.7.7 Графіки залежностей характеристик котла від витрати пари в режимі роботи з вентилятором

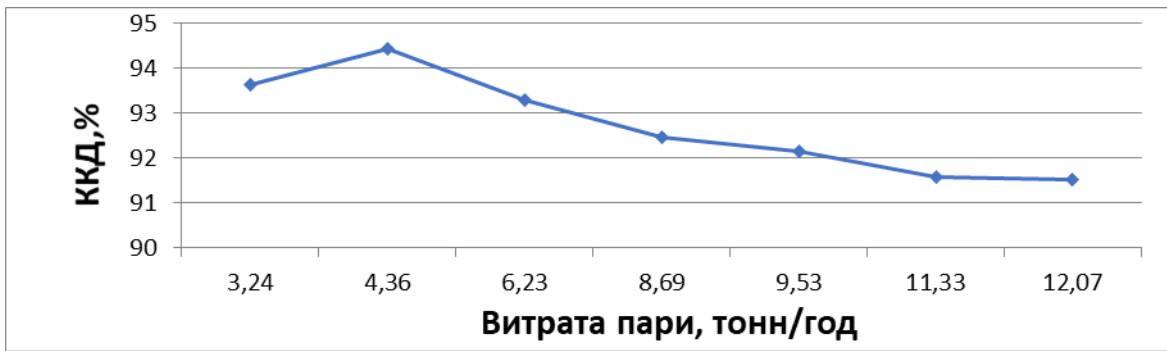
а) ККД від теплопродуктивності, б) температури за економайзером від теплопродуктивності, в) витрати умовного палива від теплопродуктивності, г) коефіцієнту надлишку повітря від теплопродуктивності.

При проведенні випробування пального пристрою СНТ-44 зняття всіх параметрів проводилося тими же приладами, що використовувалися при знятті характеристик роботи котла з пальниками ГА-110. Результати приведені в Додатку А.

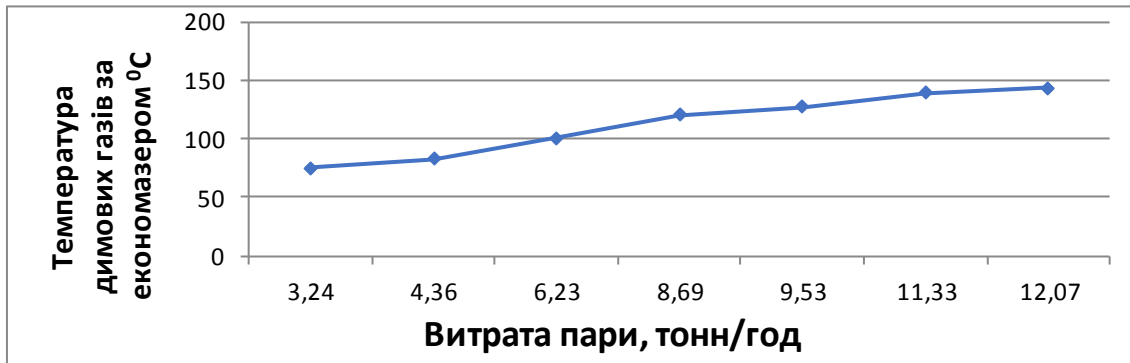
7.3.2 Робота котла в безвентиляторному режимі

Теплотехнічні та екологічні характеристики роботи котла ДКВР-10М з пальниками СНТ, при роботі котла без вентилятора, отримані за підсумками проведених випробувань надані у додатку.

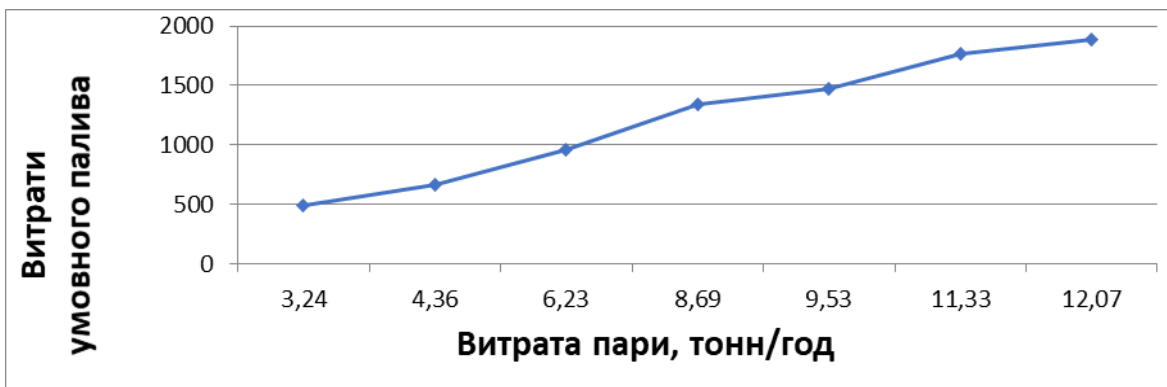
а.)



б.)



в.)



г.)

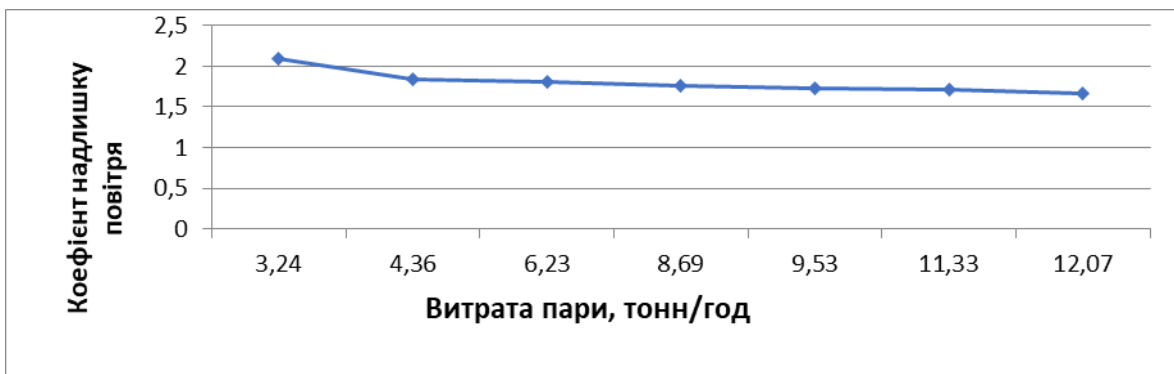


Рис.7.8 Графік залежності характеристик котла від витрати пари у режимі роботи без вентилятора

а.) ККД від теплопродуктивності, б.) температури за економайзером від теплопродуктивності, в.) витрати умовного палива від тепло-продуктивності, г.) коефіцієнту надлишку повітря від теплопродуктивності.

Виходячи з рис.7.9 залежність «тиск газу – розрідження» має лінійну залежність, що може спростити автоматичне регулювання навантаження привстановленні блоку управління.

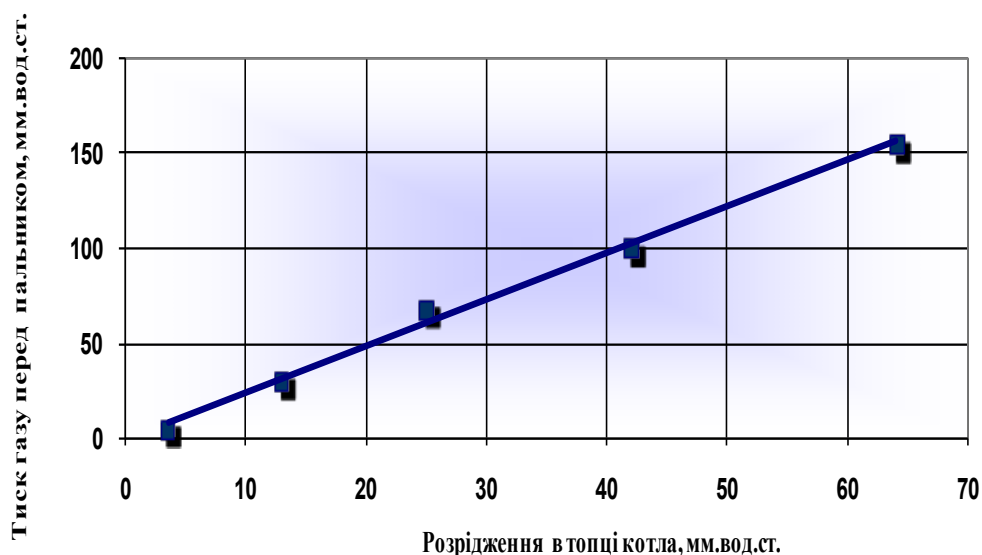


Рис.7.9 Графік залежності «тиск газу - розрідження» від теплового навантаження котла ДКВР-10/13

7.3.3 Теплотехнічні характеристики котлоагрегату з пальниками СНТ

Випробування показали :

1. Підвищення безпечної роботи котла при його розпалі (розпалювання здійснювалося при витратах 10-20 м³/год), що перешкоджає створенню вибухонебезпечної суміші і запобігає появі «хлопків» при розпалі або раптовому відключенні тяго-дутьових машин.
2. Стійкий процес горіння, що виключає зрив полум'я при всіх перехідних режимах роботи котла.
3. Збільшення максимально-можливого теплового навантаження котла з 8,2 до 9,6 Гкал/год.
4. Високу ефективність роботи котла в широкому діапазоні теплової потужності (рис.7.16)
5. Зниження потужності тяго-дутьових машин за рахунок мінімального аеродинамічного опору пальникового

пристрою на 30%.

У результаті аналізу викидів шкідливих речовин від навантаження котла було відмічено наступне:

— у режимі роботи котла без вентилятора викиди оксидів азоту за економайзером у два рази нижче гранично допустимої концентрації для котлів подібного типу;

— у режимі роботи котла з вентилятором викиди закисів азоту не перевищують встановлену граничну допустиму концентрацію для котлів подібного типу.

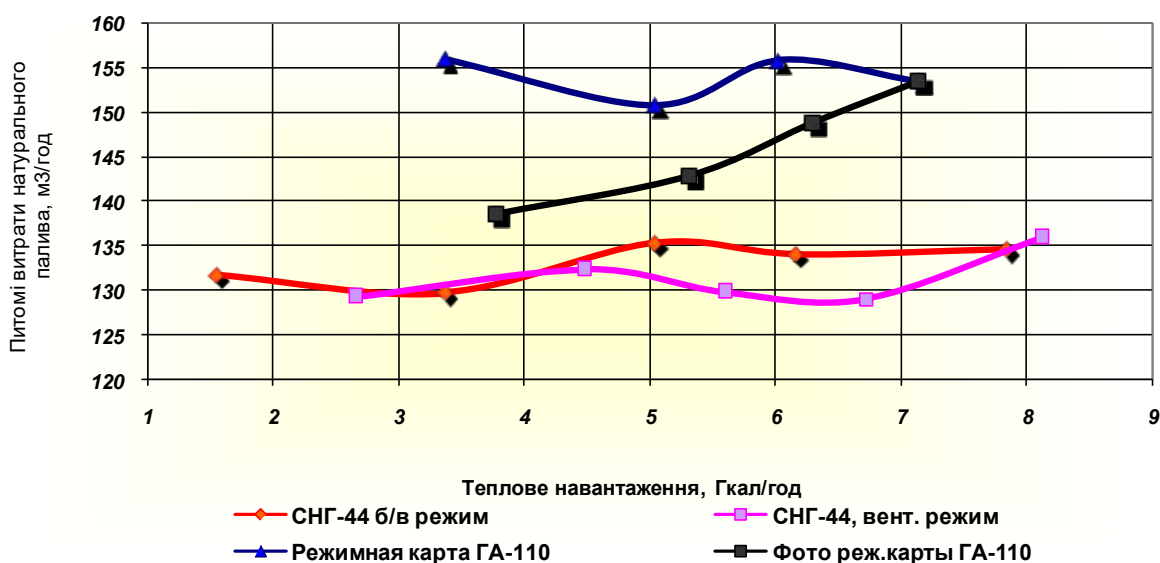


Рисунок 7.10 Графік залежності питомої витрати палива від навантаження

Слід відмітити можливість переходу роботи котла з режиму роботи без вентилятора на режим роботи з вентилятором (номінальне навантаження котла). Результати попередніх випробувань дали змогу висвітлити всі еколого-технічні переваги паливних пристроїв СНТ. Практично всі показники покращені у порівнянні з існуючими. Крім того, з'явилися нові переваги: робота на низьких тисках газу та робота в режимі без вентилятора на самотязі. Для котлів малої і середньої потужності період розпалу (особливо при довгому його простої) є моментом підвищеної небезпеки. На паливний пристрій типу ГМГ, ГА, ГМ, РГМ при автоматизованому

розпалі подається витрата газу до 200 м³/год. В котлах типу ДКВР-6.5, ДЕ-6.5 об'єм топкового простору не перевищує 7 м³. Простий розрахунок показує, що у випадку зриву факелу на запальнику в топковому об'ємі може створюватися вибухонебезпечна суміш протягом 5-10 секунд. Цього часу недостатньо для закриття оператором котла затворного крану подачі газу на пальниковому пристрої і часто оператор пробує розпалити запальник за відкритого надання газу на палик. Для такого розпалу є характерним хлопок що може привести до руйнівних наслідків.

Одним із методів зведень до мінімуму такої небезпеки є зниження витрати газу, як на запальник, так і на палики пристрій. Конструкція паликів типу ГМГ, ГА, ГМ, РГМ не дозволяє здійснювати розпал за мінімальними витратами.

Реалізований у паликовому пристрої типу СНГ метод сумішоутворення дозволяє на всіх етапах надання газу створювати у зоні рециркуляції надлишок повітря, який характеризується коефіцієнтом близьким до одиниці. Таким чином, навіть за витратами газу 10-15 м³/год створюються необхідні умови для розпалу (Рис.7.11). При даних витратах у топковому просторі вибухонебезпечна суміш не створюється навіть при розрідженні і за рахунок самотяги. Це підтверджує результати газового аналізу на СН₄ в топковому просторі.



Рис.7.11 Порівнянн режимів розпалу (тиск газу і витрати газу) ПП

Малий діапазон стійкої роботи (по надлишку повітря) вихрових пальників (Рис.7.12) з мінімальним значенням викидів призводить до проблем при експлуатації котлів.

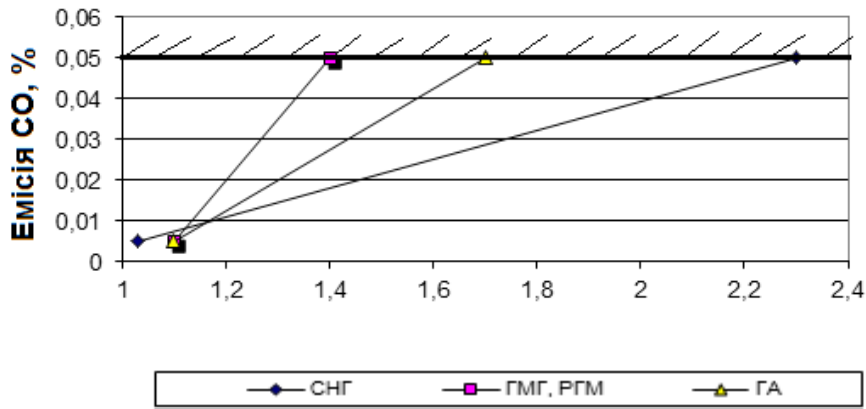


Рис. 7.12 Порівняння діапазонів ефективної роботи ПП по надлишку повітря

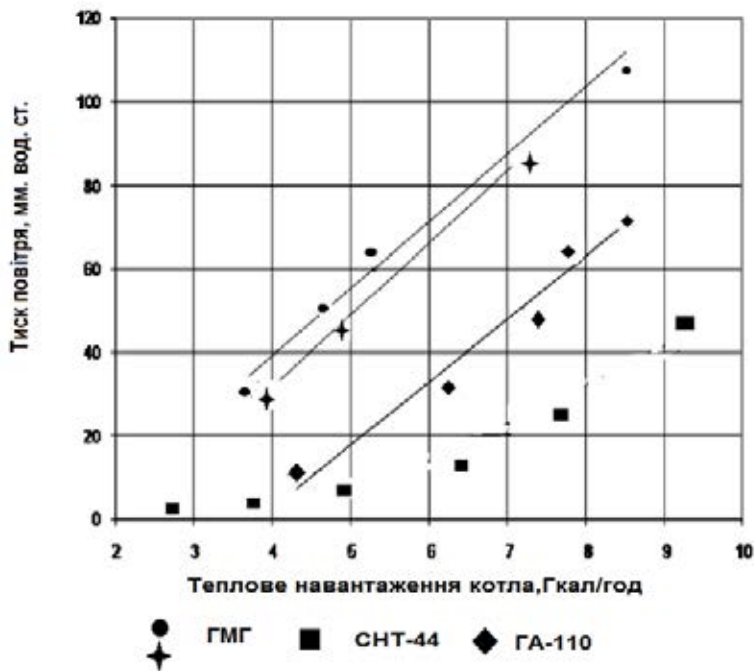


Рис. 7.13 Порівняння гідравлічного супротиву ПП у залежності від теплового навантаження

На наведеному рисунку, видно що пальникові пристрої типу ГМГ, ГА, РГМ не дозволяють роботу при високих значеннях коефіцієнту надлишку повітря вогнетехнічних об'єктів. Пальникові пристрої типу СНТ мають малий аеродинамічний опір по газо-повітряному тракту. На рис.7.13

представлений порівняльний аналіз роботи палинкових пристроїв трьох типів із яких видно, що застосування палинкових пристроїв типу СНГ дозволяє знизити тиск повітря у газо-повітряному тракті у 2-3 рази. Таким чином, установка палинкових пристроїв типу СНГ дозволяє знизити потужність тяго-дутьових пристроїв на 20-40%. Прикладом є заміна на котлоагрегатах ДКВР-10 двигуна вентилятора з 28кВт на 17 кВт після установки палинків СНГ.

Значне зниження гідравлічного опору палинкового пристрою за трактом окиснювача зменшує енергію вихроутворення у повітряному потоці, який є джерелом широкого за частотою спектру акустичних випромінювань. Це значно зменшує рівень шуму палинкового пристрою на 2-5dB. У діапазоні до 60% теплової потужності котлоагрегати стійко працюють у режимі без вентилятора, а у деяких випадках і на самотязі.

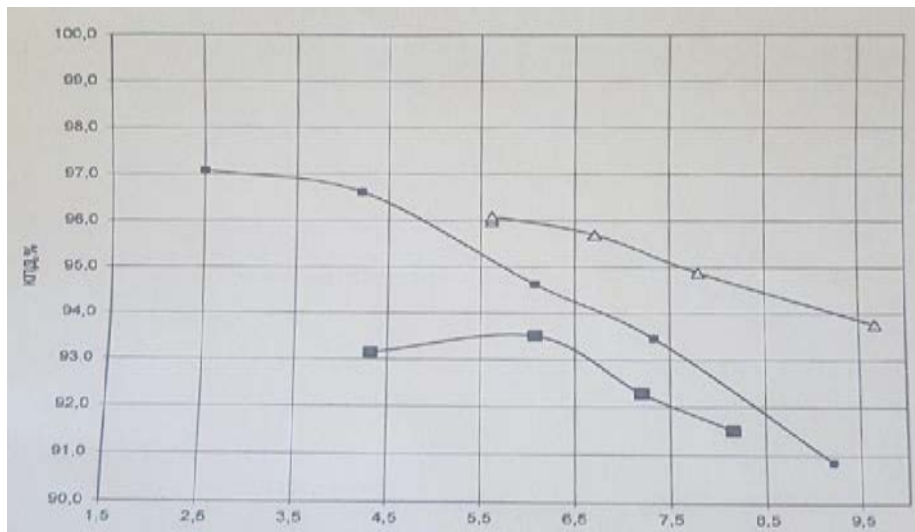


Рис. 7.14 Зміна ККД котла ДКВР-10, від теплового навантаження

Як видно з приведеного графіка (Рис. 7.14) за навантаженнями котлоагрегату менше 50% найбільш оптимальною є його експлуатація у режимі без вентилятора, коли включений тільки димосос. При більш високих навантаженнях необхідно перейти на режим з вентилятором, причому палинкові пристрої, що мають широкий діапазон стійкої роботи (у 2-3 рази вище ніж палинкові пристрої типу ГМГ і ГА) дозволяють здійснювати перехід у режим з вентилятором без виключення з роботи котла. Необхідно

також відмітити, що при режимі без вентилятора робота котлоагрегату проходить з емісією шкідливих викидів у 2-3 рази нижче ніж за режимом роботи з вентилятором.

7.3.4.1 Дослідження екологічних характеристик котла

У результаті аналізу викидів шкідливих речовин від навантаження котла було відзначено наступне: при режимі роботи котла без вентилятора викиди оксидів азоту за економайзером у два рази нижче допустимої концентрації (ГДК) для котлів подібного типу; значення викидів окислів азоту за котлом, у всьому діапазоні навантажень, не перевищувало 140 мг/м^3 (Рис.7.15); значення викидів окислів вуглецю за котлом, у всьому діапазоні навантажень, не перевищувало 100 мг/м^3 (Рис.7.16).

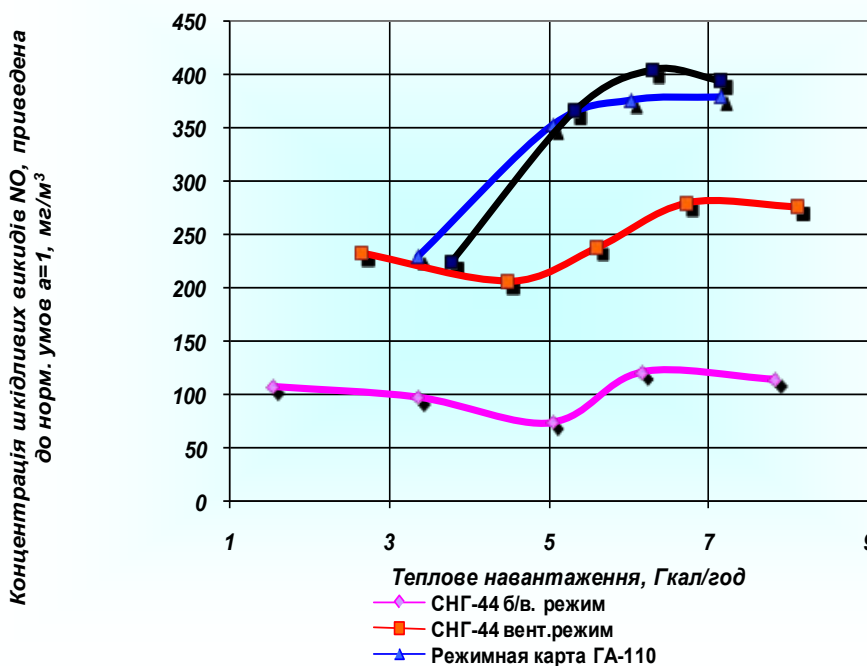


Рис. 7.15 Графік залежності концентрації шкідливих викидів NO_x приведених до нормальних умов $\alpha = 1$, від теплового навантаження котла ДКВР-10/13

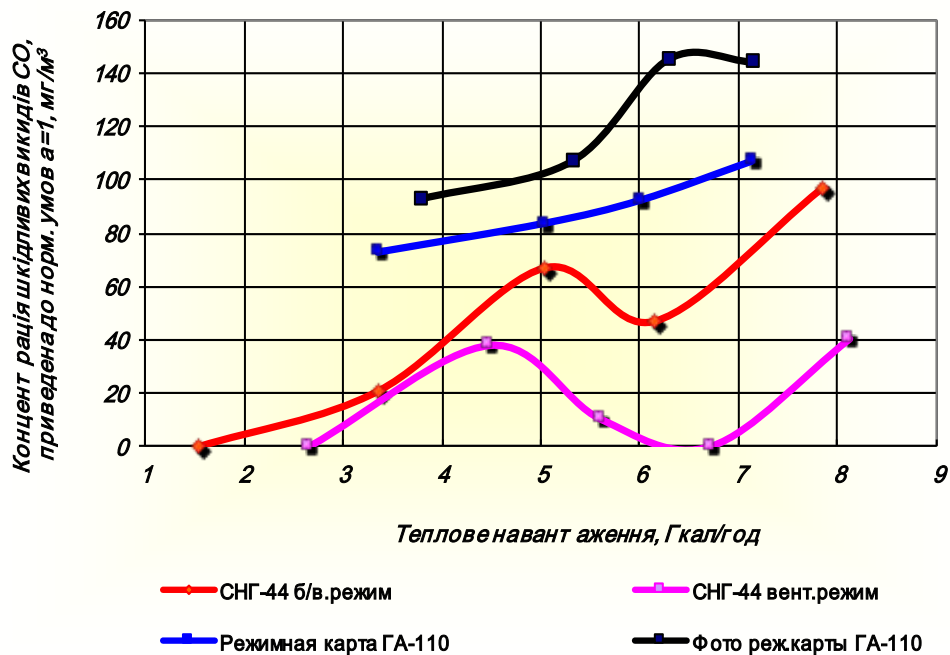


Рис.7.16 Графік залежності концентрації шкідливих викидів СО, приведених до нормальних умов $\alpha = 1$, від теплового навантаження котла ДКВР-10/13

В результаті аналізу викидів шкідливих речовин від навантаження котла, при його роботі з вентилятором, було відзначене наступне: емісія NOx не перевищує 170 мг/м^3 , при допустимому значенні 220 мг/м^3 , що у два рази нижче, ніж при роботі котла на пальниках ГА-110 до модернізації у цьому ж діапазоні навантажень.

При роботі модернізованого котла з вентилятором надлишок повітря за економайзером змінювався у межах $\alpha_k = 1,12 - 1,3$, за котлом- $\alpha_k = 1,06 - 1,11$. При проведенні пуско-налагоджувальних робіт було досліджено вплив надлишку повітря на ефективність роботи котла. Слід зазначити, що збільшення коефіцієнта повітря призводить до зниження емісії окислів азоту, але одночасно збільшуються викиди оксидів вуглецю.

7.3.4.2 Розрахунок валових викидів шкідливих речовин при спалюванні природного газу

За узагальненими результатами експлуатації котлоагрегатів ДКВР-10/13 з пальниками ГА-110 паспортний коефіцієнт корисної дії складає 90%. Середній коефіцієнт корисної дії після установки пальників СНП-44 склав

93-94%. Відповідно до існуючих нормативів викидаїв димових газів при спалюванні природного газу з шкідливих речовин присутні: оксиди азоту, оксиди вуглецю, оксиди діазоту, важких металів (ртуті), метану (Табл.7.8, 7.9). Розрахунок валових викидів шкідливих речовин в одиницю часу виконаний для холодного періоду часу.

Для розрахунку було прийнято режим роботи котла для опалювальних навантажень — 183 календарних дня.

1. Аналіз отриманих результатів показує, що: після установки пальників СНП-44 значно зменшилися шкідливі викиди у навколишнє середовище (табл.3.14):оксиди азоту на 403,7 кг/рік; оксиди вуглецю на 150,8 кг/рік;вуглекислого газу на 521 кг/рік; ртуті на 890 мг/рік;оксидів діазоту на 900 р/рік;метану на 8,9 кг/рік;

2. Розмір максимальної приземної концентрації (табл.3.15): для оксидів вуглецю зменшилася на 12,5 %;для оксидів азоту зменшилася на 15,2%.

Слід також відзначити, що за умови роботи з пальниками ГА-110-00Б викиди окислів азоту перевищували встановлені норми (290 мг/м³), починаючи з навантаження котла 65% і вище. Це приводило до погіршення екологічної ситуації району або зменшенню продуктивності котла. Розмір викидів шкідливих речовин, що містяться в димових газах, не має перевищувати припустимих концентрацій для населених місць.

7.3.5 Дослідження температури елементів ПП та паливного газу.

При випробуваннях модернізованого котла з пальниками СНП-44 візуально спостерігався рівномірний розподіл теплових потоків за внутрішньою поверхнею котлоагрегату. Дослідження температурного рівня металу елементів випробовуваного пальникового пристрою здійснювалося за допомогою хромель-алюмелевих термопар, гарячі спаї яких зачеканювались у метал за допомогою крапкового зварювання у торцевій стінки модулів.Показання термо-ЕДС термопар виводилися на дванадцятиканальний потенціометр типу КСП-4 класу точності 0,25. Середня

температура стінки модуля, за результатами випробувань, не перевищувала 300°C . Звідси слідує, що температура торцевої стінки пальникового пристрою підтримується в необхідному, для надійної роботи пальника, інтервалі за рахунок охолодження газом, що обтікає її внутрішню поверхню. Для контролю температури газу, що виходить з отворів, які надають газ, застосовувалися хромель-копелєві термопари з діаметром гарячого спаю $0,3\text{мм}$, термопари вставлялися у крайні отвори і їхні гарячі спаї розташовувалися на перетині вісі отвору, і площини симетрії пілона. Середня температура підігріву газу, за результатами дослідження, складала порядку 100°C . Таким чином, можна зробити висновок, що рівень підігріву газу у модулі невисокий із погляду протікання пірогених процесів і існує запас для більш глибокого охолодження пальникового пристрою за рахунок підігріву газу. Охолодження пальникового пристрою відбувалося повітрям, яке набігає на модулі, що не дозволяє розігріватися внутрішнім елементам пальника (зовнішнім частинам модулів і внутрішній частині повітряного тракту.)

7.3.6 Випробування стійкості горіння

Проведення випробування стійкості горіння на різних режимах виявило вплив рівномірності поля швидкостей повітряного потоку. Нерівномірне поле визивало вібраційне горіння. Ці явища легко усувалися за допомогою відомих способів вирівнювання швидкостей повітряного потоку (направляючі лопатки, ґратки.)

7.4 Дослідження характеристики роботи котла КВГМ-20 з пальником СНТ-45

Для випробувань пальникового пристрою був обраний котел КВГМ-20 з продуктивністю за теплом 20 Гкал/год . Котли цього типу мають високу ступінь екранування топкового простору, розвинуту поверхню конвективного теплообміну і працюють в умовах врівноваженої самотяги. Крім того котли типу КВГМ мають схильність до вібраційного горіння в діапазонах теплової потужності приблизно $(0,5-1) N_{\text{ном}}$.

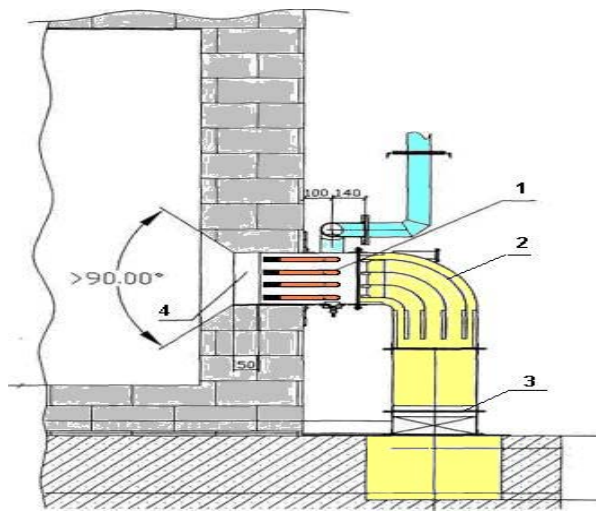


Рис. 7.17 Монтажний ескіз встановлення ПП СНГ в амбразуру котла

- 1 – Пальник газований СНГ,
 2 – напрямний повітровід,
 3 – спрямляючий регулюючий шибєр,
 4 – амбразура.

На Рис. 7.17 представлений приклад ПП СНГ в амбразуру котлоагрегату КВГМ-20.

Теплотехнічні дослідження котла проводилось у відповідності з загальноприйнятою методикою за допомогою пристрою «ТЕСТО-342» виготовленого у Германії.

Із співставлення результатів випробувань, проведених до і після модернізації пальникових пристроїв, видно, що заміна ротаційного пальникового пристрою вихрового типу, що був встановлений раніше на два струменево-нішових пальників типу СНГ-44 дозволила отримати наступні покращення характеристик котла КВГМ-20:

1. ККД котла в однакових умовах виріс до 90,70 до 95,32 % за рахунок зниження температури газів, які уходять на 27°C (від 125 до 98°C) і коефіцієнт надлишку повітря на 0,50 (від 1,73 до 1,23), а також повної відсутності хімічного допалу ($CO = 0$).

2. Діапазон стійкого горіння у котлі значно розширений, коефіцієнт робочого регулювання збільшився від 2 до 10.

3. Емісія токсичних речовин, які знаходяться у межах норми.

4. Зниження аеродинамічного спротиву пальникового пристрою зумовило можливість роботи котла у режимі без аварій та суттєвому зниженню витрати електроенергії на привід тяго-дугтьових приладів.

5. В результаті пробних пусків котла встановлено, що пальникові пристрої стійко розпалюється при значеннях тиску 5 мм вод. ст. і менше.

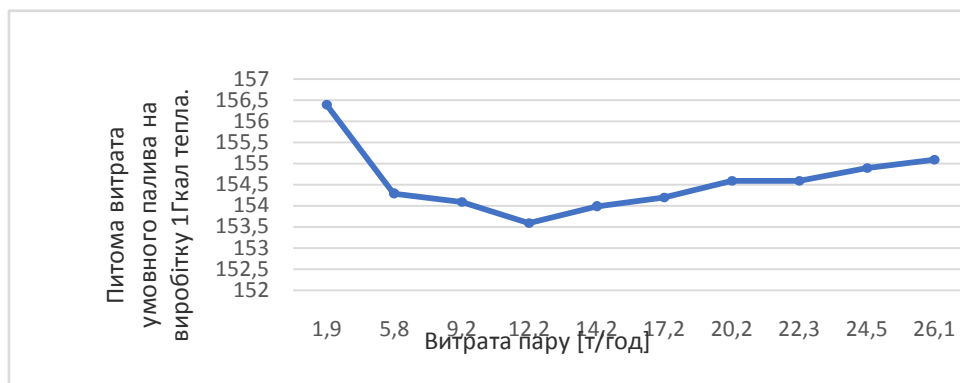
6. В усьому робочому діапазоні зникли режими вібраційного горіння.

7.5 Дослідження характеристик роботи котла ДЕ-25/14 з пальниками СНТ-55

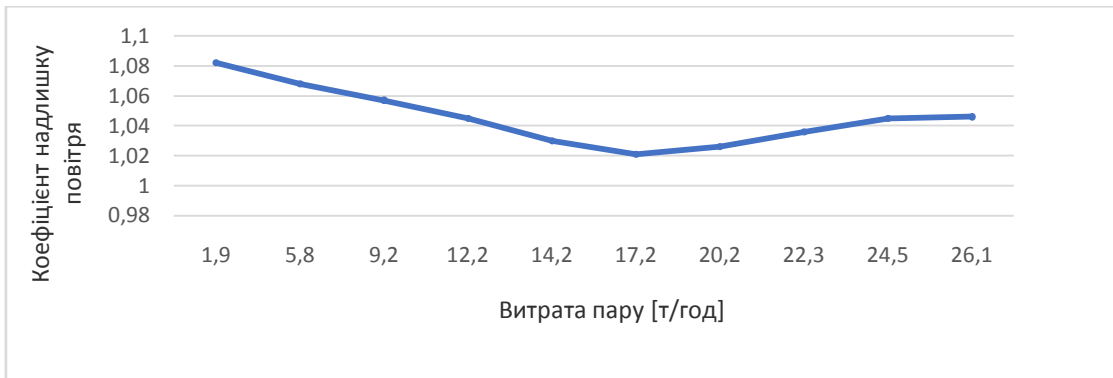
У присутності головного інженера «Бийського котлобудівельного заводу» м. Бійськ у Білорусі на фабриці «Світанок» проведено модернізацію котла ДЕ-25/14 – заміна штатного пальникового пристрою на пальник СНТ-55. Проведено дослідження з метою досягти максимально можливої економічності котлоагрегату в широкому діапазоні зміни потужності зі стійкою циркуляцією робочого тіла. З Рис.7.18 видно, що ПП СНТ забезпечують високий рівень ККД котлоагрегата в широкому діапазоні теплових навантажень. Досягнуто коефіцієнт робочого регулювання більше 12 та значення коефіцієнта надлишка повітря не більше 1,8.



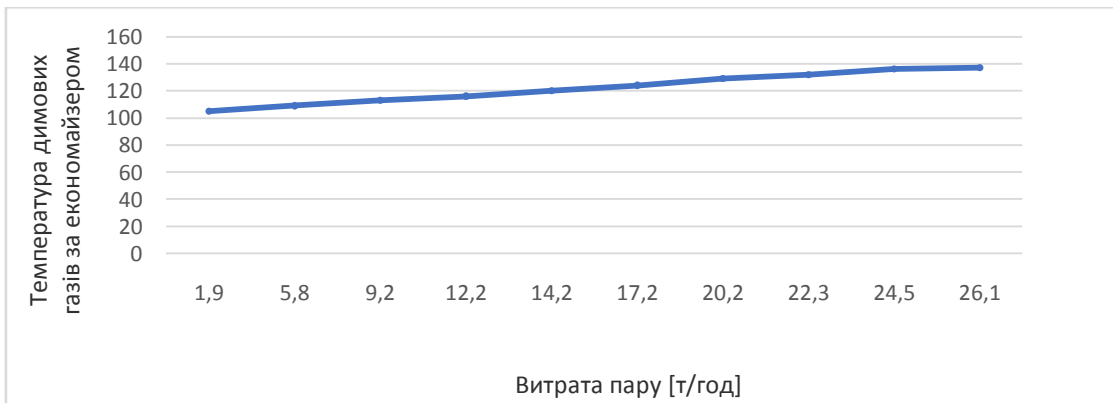
а.)



б.)



в.)



г.)

Рис. 7.18 Результати екологотеплотехнічних випробувань ПП СНТ в складі котла ДЕ-25/14

Графіки залежностей а.) ККД від витрати пари, б.) питомої витрати умовного палива від витрату пари, в.) коефіцієнту надлишку повітря від витрати пари, г.) температури димових газів за економайзером від витрати пари.

7.6 Дослідження рівномірності температури у топковому просторі для сталеливарного ковша

7.6.1 Дослідження температури лазерним пірометром

У промислових умовах проводились дослідження рівномірності температурного поля у топковому просторі. Пальникові пристрої СНТ-22 встановлені на стенді сушки і розігріву сталерозливних ковшів (Рис.7.19)[7]. Треба відмітити, що у штатному режимі температура футеровки вимірюється термопарами, які встановлюються у дні ковша на глибину 50 мм від поверхні футерування. Показники температури при цьому у значній мірі залежать від того наскільки точно встановлена термопара, а це в реальних умовах зробити

важко. Крім того термопари неможливо встановити за всім об'ємом. Дуже перспективним, з цієї точки зору, є контроль температури футерування оптичним пірометром. При цьому можливо заміряти температуру практично у будь-якій точці футерування. Це можливо робити за горизонтальним положенням ковша. Таке положення ковша вигідно і для проведення ремонтних робіт. Треба відзначити, що оптичним пірометром можливо заміряти температуру футерування якщо топковий простір заповнений прозорим факелом. Такий факел забезпечується при застосуванні струменево-нішової технології спалювання.

Температура футерування 11 ковшів вимірювалась оптичним пірометром (Рис. 7.20) у точках, які вказані на (Рис.7.21), і середнім чином відображає температуру продуктів горіння у топковому просторі. З Таблиці 7.1 видно, що у топковому просторі забезпечений високий рівень рівномірності температурного поля і здійснена можливість установки температурного режиму.

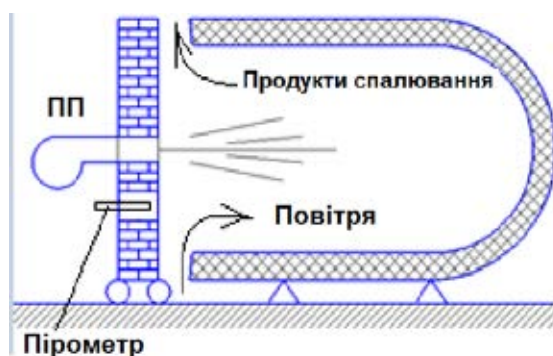


Рис. 7.19 Схема поста сушки і розігріву сталеплавильних ковшів



Рис. 7.20 Пальниковий пристрій СНТ з лазерним пірометром на посту сушки ковшів

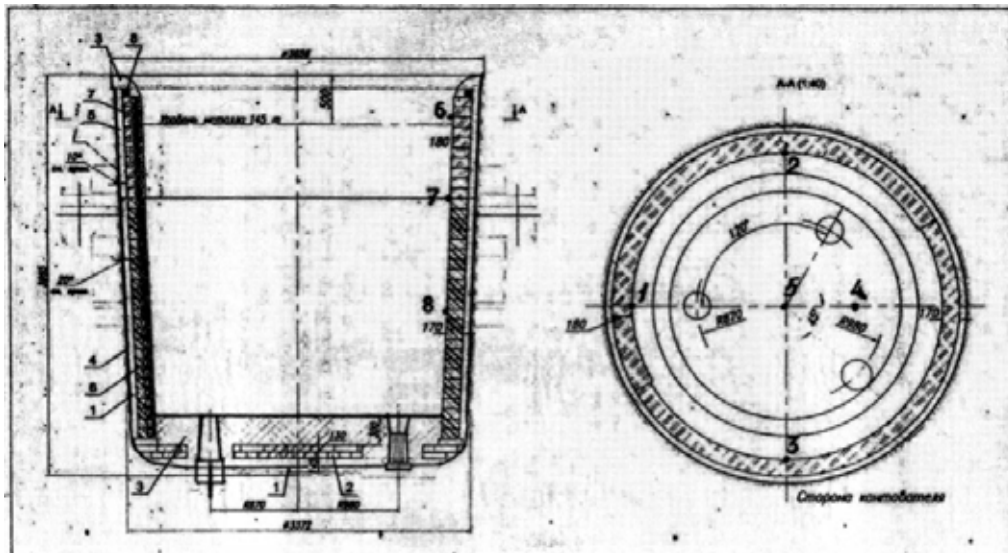


Рис. 7.21 Місця заміру температури футерування ковша 150 тон

В точці 6 має місце найбільше відхилення температури від середнього рівня. Це пояснюється аеродинамічною структурою течії (рис.7.19). За рахунок конвективного руху це місце найбільше охолоджується повітрям.

Таким чином максимальне відхилення від середньої температури у топковому просторі ковшів становить:

$$\Delta T = \frac{T_{\max} - T_{\text{сер}}}{T_{\max}} \times 100\% = \frac{1200 - 1166}{1200} \times 100\% \approx 3\% \quad (7.3)$$

**Температура футеровки ковша в точках заміру лазерним
піроментом**

№ КОВ ША	Час розігріву	Температура футеровки у кінці розігріву								Температура на термопарі	
										До	Після
4	0:15	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1198	1179
2	0:37	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1161	840
2	0:17	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1103	770
1	0:47	1200	1200	1167	1200	1200	1193	1200	1200	1117	730
8	0:25	1200	1200	1200	1200	1200	1108	1150	1200	1139	1014
4	0:38	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1195	1000
6	0:25	1200	1200	1200	1200	1200	1190	1200	1200	1181	1002
3	0:24	1200	1200	1200	1200	1200	1180	1200	1200	1104	1074
6	0:10	1200	1190	1181	1200	1180	1030	1115	1175	1300	1147
8	0:31	1200	1200	1200	1200	1200	1159	1200	1200	1120	1100
8	0:36	1200	1200	1200	1200	1200	1159	1200	1200	1340	1100

Це свідчить про високий рівень рівномірності температурного поля, яке формується факелами пального пристрою СНТ. На Рис.7.22 представлені фотографії ПП встановлених на постах сушки сталеплавильних ковшів Рис. 7.23.



Рис. 7.22 Пальникові пристрої СНТ-33



Рис.7.23 Пост сушки і розігріву сталеплавильних ковшів

На Рис.7.23 пост сушки та розігріву сталеплавильних ковшів.

7.6.2 Дослідження рівномірності розігріву поверхні сталеплавильних ковшів

У процесі експериментів були проведені заміри температури поверхні ковша (Рис.7.23) за допомогою тепловізора.

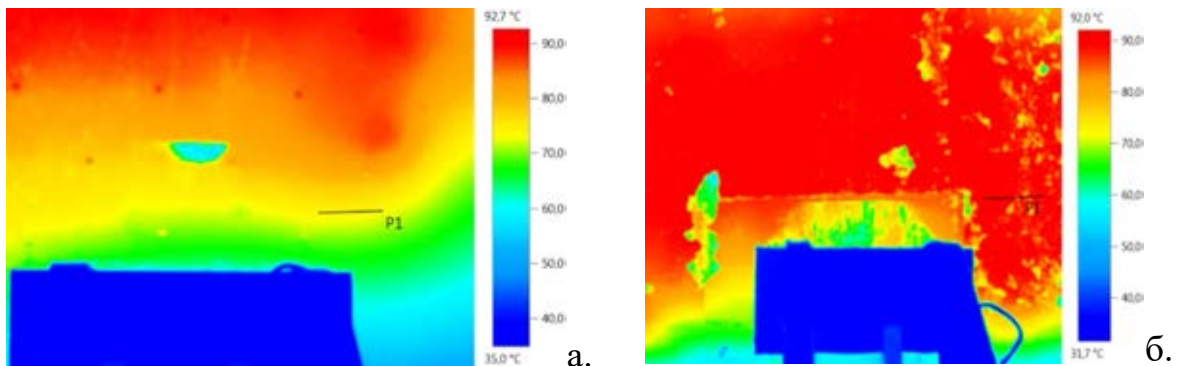


Рис. 7.24 Заміри температури поверхні ковшів при розігріві штатним а. та ПП СНТ б. (показники тепловізора)

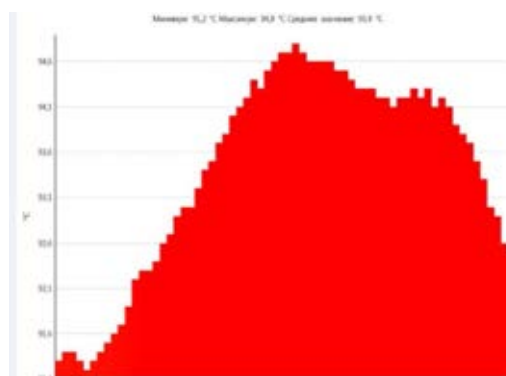
На Рис. 7.24 представлені результати порівняльних замірів температури поверхні ковшів в поточному часі. Видно, що по висоті ковша струменеві-нішовий ПП прогріває ковш більш рівномірно. ПП СНТ забезпечує більше на 20°C середнє значення прогріву ніж штатний ПП.

На Рис 7.26 приведені результати замірів температури поверхні ковшів та максимальний рівень нагріву через 8 годин після початку експерименту.

Видно, що пальників пристрій СНТ забезпечує рівномірний розігрів та більш високий рівень прогріву футеровки.



а. штатний ПП

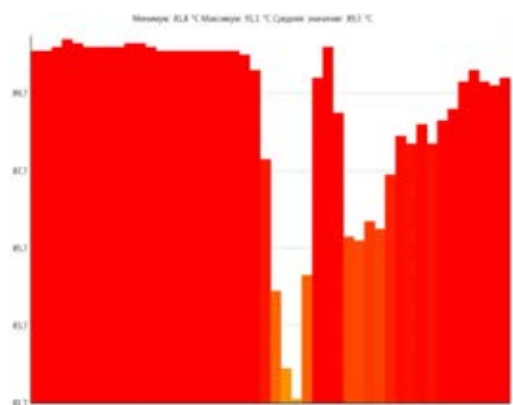


б. ПП СНТ

Рис.7.25 Результати замірів температурних профілів поверхні ковшів у поточному часі



а. штатний ПП



б. ПП СНТ

Рис. 7.26 Результати замірів на температурних профілів поверхні ковшів після закінчення сушки

На рис. 7.26 видно, що після завершення технологічного процесу пальників пристрої СНТ рівномірно розігрівають ковші та досягають більш високої середньої температури їх поверхні.

7.7 Досвід широкомасштабного впровадження струменево-нішової технології спалювання на вогнетехнічних об'єктах

З використанням результатів експериментальних досліджень робочого процесу струменево-нішових модулів та досвіду випробування у складі ВО в промислових умовах розроблені струменево-нішові пальникові пристрої (ТУУ 29.2-31750871-002:2008, ТУУ 28.2-31750871-003:2016).

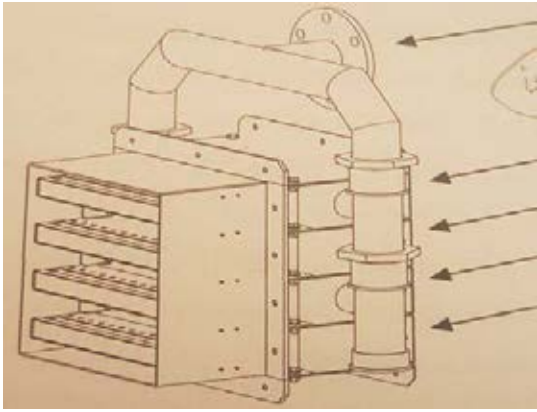


Рис.7.27 Схема пального пристрою на основі струменево-нішевих модулів

Струменево-нішові ПП СНТ пройшли паспортизацію в ДП «Сертифікаційний центр» на різноманітних ВО на низькому і середньому тиску і сертифіковані в діапазоні потужності від 0,1 МВт до 50 МВт, (Див.Додаток) ПП серійно випускаються і широко застосовуються на підприємствах України і в ряді країн ближнього закордону [1-14]. З початку 2000х років до теперішнього часу виготовлено і експлуатується на ВО різного призначення кілька тисяч ПП типу СНТ. Перші зразки надійно працюють з 1994 року. На рис 7.27. зображений паливник, що складається з декількох незалежних струменево-нішових модулів, які легко дістаються і по мірі необхідності для огляду і необхідного ремонту або заміни. Потужність ПП визначається кількістю стандартизованих модулів. ПП СНТ визначаються відносно великою площею газороздаючих отворів, тому вони вписуються в існуючу амбразуру для штатних паливників ВО (рис. 7.28)



Рис. 7.28 Установка ПП СНТ в існуючу амбразуру для штатних паливників. Котел ПТВМ-50

Пальникові пристрої СНТ встановлюються не тільки на нові ВО але й успішно застосовуються при модернізації морально і фізично застарілого обладнання, яке знаходилось в експлуатації більше 30-40 років. При модернізації ВО відбувається не тільки заміна одного робочого елемента на другий, а розглядається складний взаємозв'язок усіх аеродинамічних та термохімічних процесів [15]. При цьому для кожного типу обладнання проводиться повний цикл робіт (в тому числі інженерні, технічні, пуско-наладкові роботи та інші) На основі такого підходу модернізовано більше 60 типів та типорозмірів котлів (водогрійних, парових, жаротрубних) та контактних водопідігрівачів потужністю від 0,3 до 150 МВт. Також модернізовано десятки печей: від міні-печей для плавки базальту з витратою газу $10\text{м}^3/\text{год}$ до 150 метрових обертових печей та мартеновських печей з витратою газу більше $5000\text{м}^3/\text{год}$

7.7.1 Досвід модернізації котлоагрегатів

7.7.1.1 Результати модернізації котлів малої потужності

Досліджено впровадження ПП при модернізації котлів малої продуктивності (0,3-0,7 Гкал/год) НИИСТУ-5, «Надточия» та інш. (рис.7.29) [15]. Особливістю таких котлів є відсутність яскраво вираженої конвективної частини, і внаслідок цього, високий рівень температури газів що виходять ($350-450^{\circ}\text{C}$), значні присоси повітря у топку. Через це кількість надлишкового повітря у декілька раз перевищує нормативні значення. Внаслідок цього реальний ККД таких котлів рідко перевищує 75%. І хоча такі котли вважають морально і фізично застарілими, струменево-нішова технологія дозволяє суттєво підвищити рівень їх ефективності при відносно невеликих витратах на модернізацію.

На (рис.7.30.) приведені результати промислових випробувань котлів НИИСТУ-5 з газовими пальниками СНТ протягом декількох опалювальних сезонів, підтвердили можливість модернізації застарілих котлів, з переводом на низький тиск газу (котли стійко забезпечують номінальне теплове навантаження при тиску газу 40-50 мм вод.ст.) і підвищення ККД котлів до

90% [Див.додаток].



**Рис.7.29 Котел НИИСТУ-5,
модернізований на основі СНТ**

Оптимізація аеродинамічних і термохімічних процесів в даних котлах дозволила значно зменшити коефіцієнт надлишку повітря у порівнянні з штатними пальниками завдяки збільшенню температури факела і відповідно, інтенсифікації променевих теплових потоків, що допомогло значно знизити температуру відходящих газів (більш ніж на 250°C). Порівняння роботи ПП СНТ з встановленими раніше на котлі подовими пальниками в котельних міст Прилуки, Чернігів, Сокаль, Горлівка, Київ показали, (всього більше 30 котлів) що витрати палива на котлах знижувалась як мінімум на 10-15%, а викиди NO_x зменшились до 121-128 мг/м^3 .

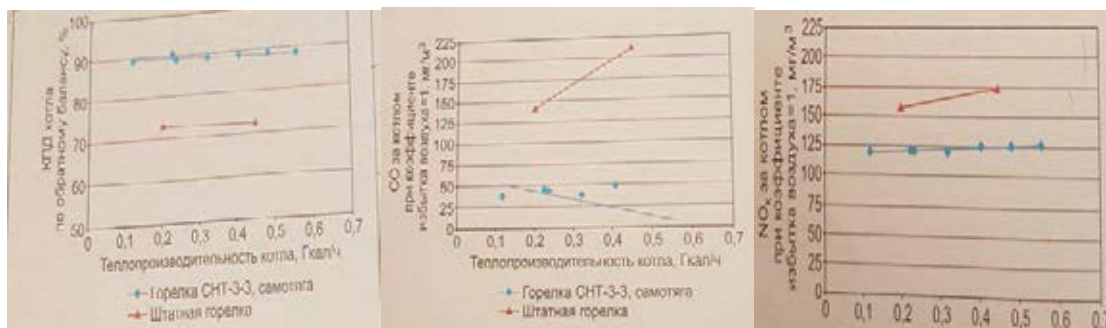


Рис. 7.30 Результати промислових випробувань котлів НИИСТУ-5 з ПП СНТ

За результатами порівняльних випробувань ефективності роботи котлів з встановленими сучасними пальниковими пристроями типу СНГ-22 (з автоматикою управління і безпеки з їх роботою на штатних подових пальниках встановлено:

1. Пальникові пристрої СНТ працюють стійко і високоефективно по всьому діапазоні заданих навантажень (від 100 КВт до 600КВт).

2. Відмічено пониження температури відходячих газів на 45-60⁰С
3. Відмічено пониження емісії шкідливих викидів більш чим на 30%
4. Відмічено зниження коефіцієнта надлишку повітря на 0,72-1,1.

Таблиця 7.2

Результати модернізації котлів НИИСТУ на основі ПП СНТ-22

Назва параметра	Горлівка		Дніпропетровськ		Саки	
	до	після	до	після	до	після
До модернізації/після модернізації						
Витрата газу, м ³ /год	52,8	44	55	50	53	48
Теплове навантаження, Гкал	0,29	0,34	0,34	0,38	0,36	0,37
Температура відходящих газів	215	170	223	175	230	170
ККД, %	78	91	74	90	71	89
К-ть надлишку повітря	2,05	1,32	2,12	1,4	2,6	1,5
NO _x , мг/м ³	185	144	180	138	198	140

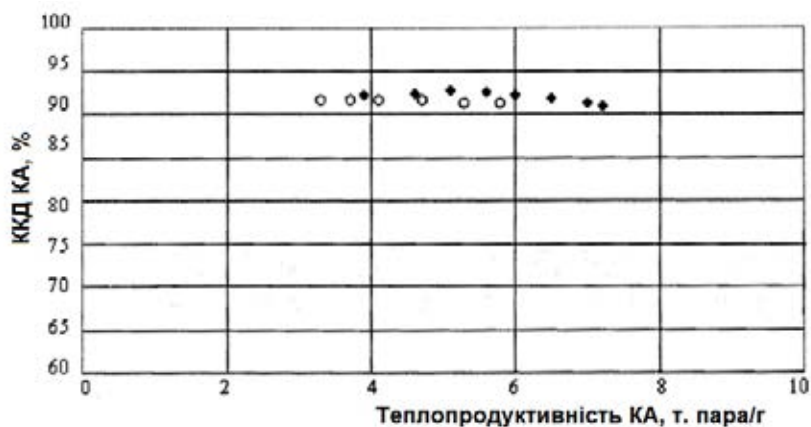
При стабільному навантаженні на котли середня питома витрата газу на вироблену гігакалорію складає відповідно: на котли Горлівської тепломережі до модернізації – 144,8 м³/Гкал, після модернізації – 131,2 м³/Гкал; на котли Дніпропетровської обл. тепломережі до модернізації – 147,2 м³/Гкал, після модернізації – 133,4 м³/Гкал; на котли тепломережі м. Саки – до модернізації 148,8 м³/Гкал, після модернізації – 134,2 м³/Гкал. Як видно з приведених даних усереднених значень приведених даних показують ефективну роботу паликових пристроїв типу СНТ. Крім того дана модернізація дозволяє вести режим навантажень котельної в реальному часі в залежності від температури повітря по заданому графіку, або по заданому температурному рівні зворотної мереживної води. Також застосування паликових пристроїв з автоматикою керування і безпеки дозволяє роботу котла з дотриманням у повному обсязі сучасних вимог до безпеки.

7.7.1.2 Досвід модернізації котлів типу ТВГ та КВГ з пальниковими пристроями СНТ

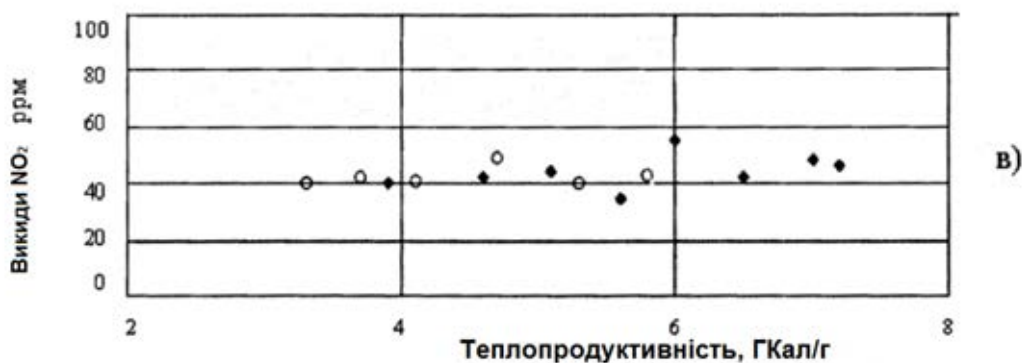
Накопичений досвід модернізації котлів ТВГ і КВГ (рис.7.31) які працюють з подовими пальниками. Хоча ці котли мають розвинену конвективну поверхню, однак двухсвітні екрани, що перегороджують топковий простір, негативно реагують на завелику довжину факела сажеутворенням і пониженням температурного рівня у топці. У таких жорстких умовах пальники СНТ забезпечують ККД на рівні 93% [15]. Покращення експлуатаційних характеристик (ККД в широкому діапазоні 91-94%) стало можливим завдяки рівномірності температурного поля у топковому просторі.



Рис. 7.31 Котел КВГ-6,5.



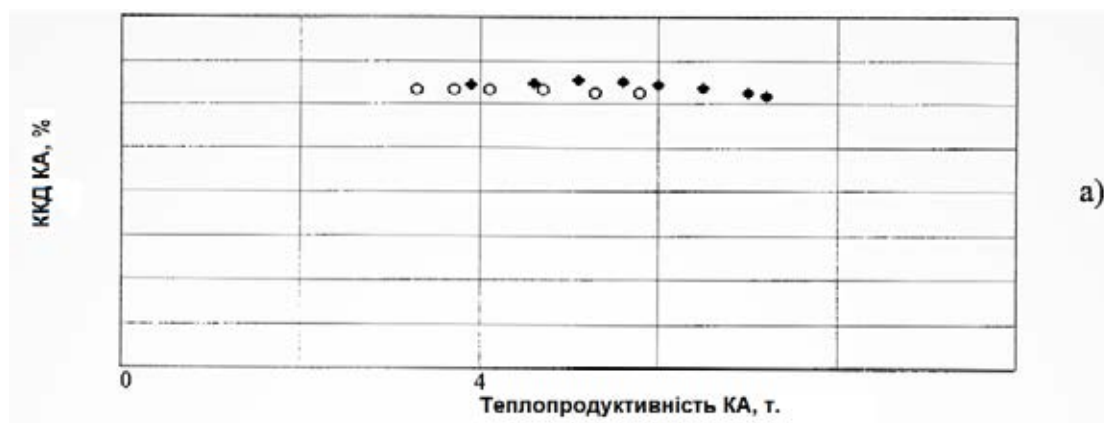
а)



■ - безвентиляторний режим

○ - вентиляторний режим

Рис. 7.32 Характеристики котлоагрегатів типу ТВГ та КВГ після модернізації на основі СНТ



Практично на всіх модернізованих ДКВР за рахунок пониження коефіцієнта надлишку повітря до 1.04-1.07 і значному зниженні температури відходячих газів в широкому діапазоні навантаження забезпечувалось високе у порівнянні з паспортним значенням ККД брутто (близько 95%). На одному з котлів ДКВР-6,5, працюючому в водогрійному режимі, були проведені порівняльні випробування пальників СНГ-43 з системою з двох ніш (приструменевою і торцевою) і штатних пальників ГМГ-4 замірів параметрів роботи котла до і після модернізації приведені на Рис. 7.32 з якого видно, що котел, що знаходився в експлуатації близько 40 років і дещо знизившихся економічних характеристик, після модернізації значно перевищив паспортні

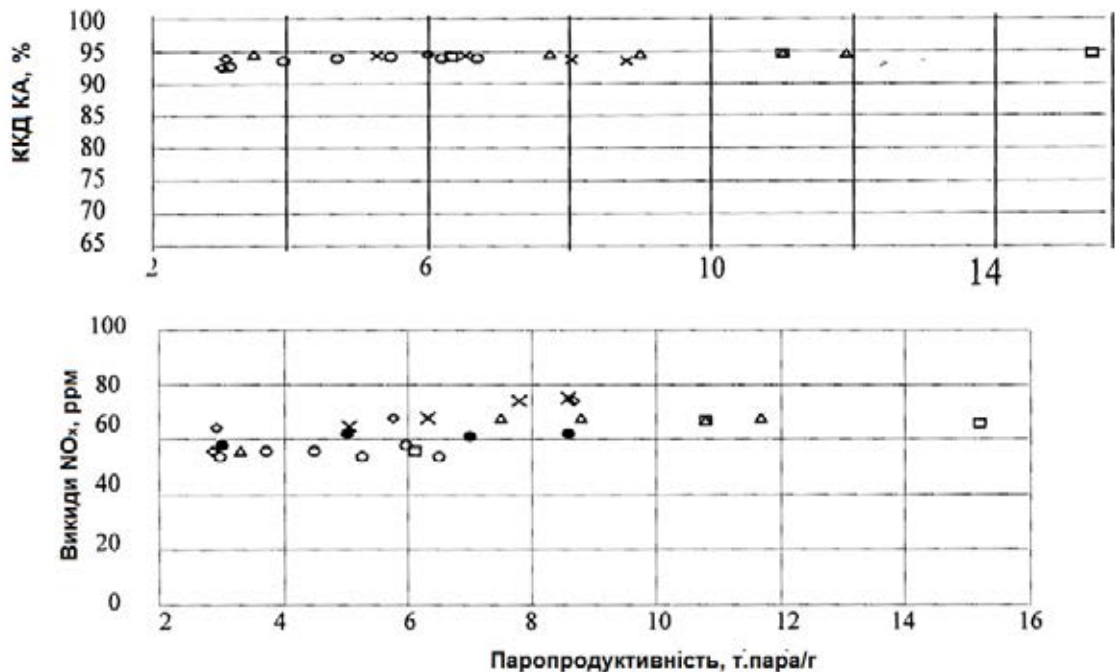
дані ККД.



■ - Горлівка, вентиляторний режим

○ - Горлівка, безвентиляторний режим

Рис.7.33 Характеристика котлоагрегатів типу ТВГ



◇ Узлове ДКВР-10 □ Котовск ДКВР-10; × Суходол ДКВР-6,5;
 △ Угерек ДКВР-10; ● Запоріжжя ДКВР-6,5; ○ Горлівка ДКВР-6,5;

Рис.7.34 Характеристики котлоагрегатів типу ДКВР

В процесі модернізації котлів ДКВР у багатьох з них повністю демонтувалася термообмуровка екранних труб і водяних колекторів, що призводило до збільшення радіаційної поверхні, забезпечення рівномірності нагріву екранів, покращенню умов роботи з точки зору зовнішньої корозії труб. На котлі ДКВР 6,5 проводилось також випробування можливостей його роботи в безвентиляторному режимі роботи. Зупинка вентилятора дала

економію більше 5000 кВт/год в місяць. При цьому не було видно зниження ефективності роботи котла. Обстеження котлів після року експлуатації показало відсутність яких небудь теплових і ерозійних пошкоджень елементів футерування, амбразурних, екранних і конвективних поверхонь нагріву. Відсутність сажі і нальоту на цих поверхнях також говорить про високу ефективність ПП. Прийомка котла ДКВР-6,5 в м. Запоріжжя з встановленим на ньому ПП СНТ, Запоріжським відділом Комітету по енергозбереженню України показала, що нерівномірність температурного поля трубних екранів топки котла не перевищує 2%, що свідчить про рівномірність температурного поля продуктів згорання в топковому просторі.

Рівень емісії NO_x по всьому робочому діапазоні модернізуємих котлів ДКВР практично мало змінюється і знаходиться в межах існуючих нормативів. Необхідно відмітити, що ПП при роботі в складі КА типу ДКВР піддаються підвищеному тепловому впливу зі сторони розпеченого поду котла, захисної кладки (з вогнетривкої цегли, водяних колекторів) та інших футерованих елементів. Заміри теплового стану показали, що температура найбільш теплонапружених елементів ПП не перевищувала 300⁰С. При цьому газ, охолоджуючи модулі, нагрівався до 200...350⁰С.

7.7.1.3 Вплив робочого процесу струменево-нішових пальникових пристроїв на характеристики котлів КВГМ та ПТВМ

Котли з високою ступеню екранування радіаційної частини (ПТВМ, КВГМ, ДЕ) після модернізації також значно покращили свої техніко-експлуатаційні характеристики. ККД таких котлів після модернізації склав 95% і вище за рахунок гранично низьких коефіцієнтів надлишку повітря і температури відходячих газів. Так, в м. Донецьк (Пролетарський район) котельня з трьома котлами ПТВМ-30 повністю переведена на низький тиск (до 500 мм вод. ст.). Значно розширений діапазон роботи котлів по потужності при роботі всіх ПП, тобто виключена необхідність регулювання потужності відключенням частини пальникових пристроїв. Встановлено, що розпал пальників СНТ на всіх типах модернізованих котлів легко

здійснюється при мінімально можливій витраті газу. Тиск газу на пальники при цьому складає декілька Па. Струменево-нішова технологія, реалізована в пальниках СНТ, забезпечує впорядковану течію продуктів згорання в топці, що, в свою чергу, дозволяє усунути потужні вихрі, викликані закруткою потоку повітря. В результаті запобігають виникненню досить частих вібраційних режимів котлів КВГМ-10, ДЕ-2,5, ДЕ-10, ДЕ-25 та інші при навантаженні більше 50-60% номінальної. Як правило, модернізовані котли експлуатувались 20-40 років і більше і їх технічний стан був незадовільним : завищенні в декілька раз присоси повітря, занесені труби (гідравлічний опір деяких котлів доходив до $6-7 \text{ кг/см}^2$), розбалансовані тягодуттвові засоби та інші. Однак застосування струменево-нішової технології незмінно відчутно покращувало всі характеристики роботи котлів.

Малий аеродинамічний опір СНТ по трактам горючого і окиснювача понижує навантаження на тягодуттвові засоби в 1,3-2 рази, що дозволяє заміну існуючих тягодуттвових пристроїв на пристрої меншої потужності. В діапазоні до 60%, котлоагрегати можуть працювати в безвентиляторному режимі, а в деяких випадках і на самотязі, за рахунок розрідження, що створює димова труба.

За рахунок плавного розпалу пальників і стійкості їх роботи при витраті газу, що складають не більше 2% від номінальної потужності досягається підвищення безпеки роботи котла на пускових режимах.

Висока степінь перемішування газо-повітряної суміші в ПП СНТ забезпечує зразу за пальниковим пристроєм рівномірну стехіметричну суміш для ефективного її спалювання. Даний факт дозволяє створювати в топковому просторі вогнетехнічного об'єкту температурне поле продуктів згорання високої рівномірності. Це сприяє високоефективному теплосприйняттю екранними поверхнями котла всієї енергії, що виділилась в результаті спалювання палива, а також усуненню теплових перекосів в топковому просторі і призводить до збільшення строку служби вогнетехнічного об'єкту в цілому.

Високе значення (більше 10) коефіцієнту робочого регулювання дозволяє збільшувати діапазон ефективної роботи вогнетехнічного об'єкту (від 10% до 100% потужності), причому нижче значення потужності об'єкту залежить лише від щільності закриття шибєрного апарату тяго-дутьєвих засобів. Відмінною особливістю струменево-нішової технології спалювання є можливість вирішувати неочікувані завдання (в тому числі і соціальні), виникаючі при експлуатації обладнання. Так в м. Запоріжжі було зірвано початок опалювального сезону (2003-2004р.) через низький тиск газу в мережі струменево-нішова технологія дозволяє вирішувати ці виклики.

Котельня м. Донецьк (теплова потужність 120 Гкал котли ПТВМ-30) настільки стійко працювала в зимовий період, що на 37% (більше 1млн. грн) збільшила збір коштів з населення за високу якість подачі тепла. (За весь сезон не було жодної скарги, і відповідно перерахунків). Розпал пальників типу СНТ на котлі ПТВМ-50 відбувається при тиску газу в декілька міліметрів водяного стовбця (рис.7.35). Завдяки цьому вихід на режим котла здійснюється при одночасній роботі всіх 12 ПП.

У поточному часі почали приділяти все більше уваги автоматизації роботи ВО. В зв'язку з цим необхідно відмітити, що технічний рівень автоматики знаходиться в прямій залежності з можливостями технології спалювання. Наприклад ця технологія забезпечує: розпал ПП при тиску газу менше 1-3 мм вод. ст. в ст., регулюванні потужності ВО всіма ПП одночасно, роботу ПП у безвентиляторному режимі і т.д. Рішення таких нових задач потребує від автоматики більш високого рівня розвитку. Потрібно відмітити, що автоматика за останні декілька років зробила великий крок вперед, але досі значно відстає від можливостей нових технологій спалювання.

На рис.7.35 представлений повністю автоматизований котел ПТВМ-100 (м. Алчевськ). Все обладнання для модернізації, включаючи сучасну автоматику, виготовлене в Україні. Причому при модернізації котлоагрегатів можлива автоматизація любого рівня складності.

Необхідно відмітити, що повна автоматизація за якістю продуктів

спалювання – захід достатньо затратний та забезпечує незначний приріст економічності (виростає економічність котлоагрегату лише на долі проценту). До важливих аспектів автоматизації можна віднести: усунення людського фактору і можливість диспетчеризації виробничого процесу.



Рис. 7.35 Котел ПТВМ-100, м. Алчевськ.

Модернізовані котли типу ДЕ-10/14, ДЕ-25/14 та Е-9/1 значно розширили діапазон регулювання потужності ($K_p > 10$) при ККД=93-95% (рис. 7.36)



Рис.7.36 Котел ДЕ-25, м. Южний.

7.7.1.4 Результати модернізації парових котлів

Окрім позитивних результатів, аналогічних для водогрійних котлів, слід відмітити, що у випадку модернізації парових котлів істотно

покращуються умови роботи пароперегрівача за рахунок рівномірного обігріву і значно зменшується витрата пари на пароохолоджувач за рахунок необхідного температурного рівня продуктів згорання. Це підтверджує досвід експлуатації модернізованих енергетичних котлів на Одеській та Шосткинській ТЕЦ (Рис.7.37 т 7.38).



**Рис. 7.37 Котел БК3-160
Одеська ТЕЦ**



**Рис.7.38 ПП ТП-170
Шосткинської ТЕЦ**

Як відомо, значний час вогнетехнічне обладнання працює на часткових навантаженнях, при цьому, як правило, знижається його ефективність. При зменшенні навантажень приходиться відключати частину ПП і пропускати через них повітря для охолодження. Надлишкове повітря заохолоджує топковий простір, порушує рівномірність температурного поля, збільшує значення хімічного недопалу і втрати тепла з відходящими газами. Все це істотно позначається на економічності вогнетехнічного обладнання. Така експлуатація характерна для всіх типів ПП.

Застосування СНТ дозволяє уникати даних недоліків, так як всі ПП СНТ розпалюються одночасно і регулювання потужності ВО, здійснюється всіма ПП з високим рівнем ефективності.

Вищенаведені особливості струменево-нішової технології підвищують рівень ККД установок вище паспортних значень навіть на оптимальних режимах роботи, не говорячи уже про часткові і граничні навантаження (рис. 7.39) що забезпечує значну економію палива.

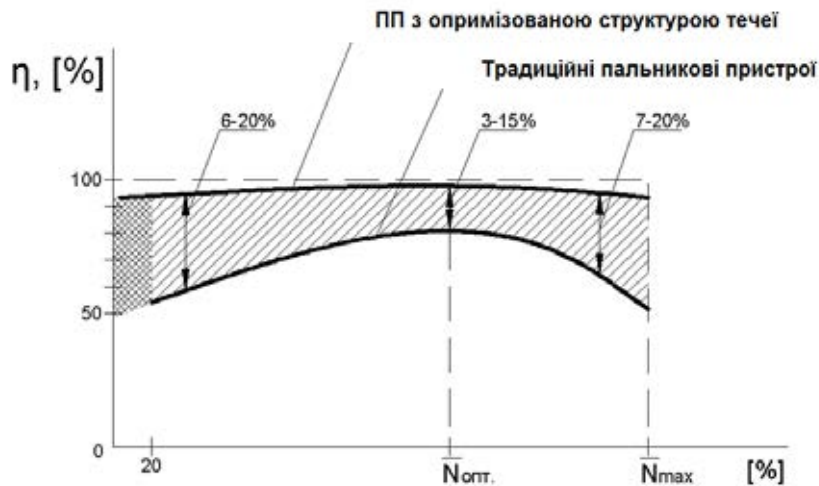


Рис. 7.39 ККД і економічність вогнетехнічного об'єкту

Досвід експлуатації багатьох об'єктів показав, що аеродинамічний опір модернізованих на основі СНТ вогнетехнічних установок знижується в декілька раз. Завдяки низькому аеродинамічному опору котли потужністю менше 15 МВт не втрачаючи ефективності працюють з відключеними вентиляторами на всьому робочому діапазоні, а котли ПТВМ-30 тільки за рахунок самотяги труби виходять на 30% номінального навантаження з відключеними вентиляторами та димососами. Також низький аеродинамічний опір значно понижає навантаження на електропривід тягодуттьових приладів.

Струменево-нішова технологія забезпечує ефективний механізм горіння — мікродифузійний. Такий механізм горіння, забезпечений рівномірним розподіленням горючого в потоці окиснювача, при інтенсивній турбулентності вихрових структур дозволяє понижати емісію СО до рівня слідів. Крім того, мала кількість кисню, що рівномірно розподілений по об'єму, високотемпературною зоною горіння, призводить до зниження рівня емісії NO_x на 20-30%.

Відсутність великих вихрових структур (з об'ємом більше 0,001 м³), як вказувалося вище, в області стабілізації процесу горіння, що має широкий спектр акустичного випромінювання по частоті і амплітуді, призводить до різкого зниження рівня шуму і до відсутності умов для виникнення

резонансних взаємодій (акустичних коливань і вібрацій конструкцій). Так, при роботі всіх без виключення модернізованих вогнетехнічних установок, практично повністю відсутні вібраційні режими, які різко зменшують діапазон робочих потужностей. Якщо з шумом ще можна боротися за допомогою спеціальних приладів, то проти вібрацій практично не існує методів їх подавлення, і це є дуже серйозною проблемою при експлуатації з точки зору охорони праці і втомної міцності об'єктів. Усунення вібраційних режимів, дозволяє знизити інтенсивність знищення елементів вогнетехнічних установок, особливо крихкої футеровки та теплоізоляційних матеріалів і підвищують рівень надійності їх роботи.

Малі об'єми високотемпературних циркуляційних зон, які стабілізують процеси горіння в струменево-нішовій системі, потребують невеликої кількості палива для створення в них горючих концентрацій, що забезпечує надійне розпалення всіх ПП одночасно при малих витратах і відповідно тиску газу (менше 1 мм вод. ст.). Така властивість дуже важлива при пусках об'єкту з холодного стану, так як при цьому, в топковому просторі можна забезпечити температуру продуктів згорання нижче 100. Даний температурний рівень не дозволяє волозі закипати і знищувати її структуру.

Гранично мала витрата газу при розпаленні забезпечує відсутність вибухових концентрацій паливної суміші в топковому просторі і робить запуск ВО практично безпечним і без поширених на даних режимах небезпечних «хлопків». Пуск вогнетехнічних установок з низьким рівнем температур в топковому просторі забезпечує критичні напруження в елементах конструкції зв'язаних з високим рівнем початкової температури і з термічною нерівномірністю прогріву. Повне згорання в топковому просторі, запобігає «закид» факелу в область пароперегрівача і в конвективну частину. Така організація режиму горіння дозволяє запобігати прогарам елементів ВО і відкладенню в них сажі.

Важливу роль в забезпеченні рівномірного температурного поля в топці котла і в забезпеченні безвібраційного режиму роботи грає правильна

установка ПП і профіль амбразури (рис.7.40). Якщо не притримуватися науково-обґрунтованих рекомендації, вироблених в результаті дослідницьких і експлуатаційних робіт, то установка любых ПП може погіршити роботу ВО з точки зору економічності, екологічності, вібраційної стійкості і надійності.



Рис.7.40 Профіль амбразури пального пристрою типу СНТ

Вище перелічені особливості роботи модернізованих на основі струменево-нішової технології вогнетехнічних установок дозволяють збільшити міжремонтний період їх роботи в 1,5-2 рази.

Першими ПП на основі струменево-нішової технології є МДГГ. В подальшому на основі досвіду експлуатації покращувалась їх система самоохолодження і оптимізувалась аеродинаміка течії горючого, окиснювача і продуктів згорання, що дозволило значно покращити експлуатаційні якості (відсутність обгорання, ліквідація пульсаційного горіння і т.д.)

Науково-технічна рада міністерства ЖКГ на спеціальному засіданні робочої групи експертів з енергоефективності в сфері житлово-комунального господарства розглянула звіт широкомасштабних модернізації котельного парку з застосуванням струменево-нішових технологій і рекомендовано впроваджувати її на об'єктах ЖКГ (Див.дод.).

Єдина із відомих технологій спалювання – СНТ постійно проходить

тестування заявлених характеристик.

7.7.2 Результати тестових випробувань підігрівачів з пальниковими пристроями на основі струменево-нішової технології

При модернізації морально застарілого обладнання оговорюється не тільки рівень показників по економічності, екологічності, надійності та по продовженню міжремонтного періоду, але і науково обґрунтована методика проведення комплексних тестових випробувань. Перед модернізацією замовник проводить ремонт котлоагрегату і відновлює характеристики близькі до паспортних значень при роботі на штатних ПП. Паралельно перевіряються прилади, якими оснащена котельня (термометри, манометри, витратоміри, газоаналізатори, лічильники газу і т.д.). Узгоджуються режими, на яких проводяться дослідження (як правило 6-10 режимів). Випробування проводяться по прямому і зворотному балансі. На кожному режимі визначаються питомі затрати палива на одиницю тепла, або на одиницю отриманої продукції (Гкал, тонн пари і т.д.).

Після зняття всіх характеристик котлоагрегату проводиться модернізація, що заключається в установці ПП, оптимізованих по аеродинаміці повітроводів, і зпрофільованих амбразур. На тих же режимах проводяться аналогічні випробування. Причому, підбираються аналогічні умови (температурний графік, навантаження). Первинні данні отримані під час тестових випробувань, фіксуються комісією, в яку входять представники замовника і генпідрядника.

Такі випробування проводились при заході в великі холдинги: «РусАл» (Росія), «Київенерго» (Україна), «Московская объединённая энергетическая компания» (Росія), «Метінвест» (Україна). Тривалість тестового випробування від 1 до 2 років і при цьому потребує великих матеріальних затрат [17]. На рис.7.41 зображені результати тестових випробувань котлоагрегату у порівнянні питомих затрат палива на виробіток 1 тон пари і 1 Гкал зі штатними ПП і ПП СНТ.

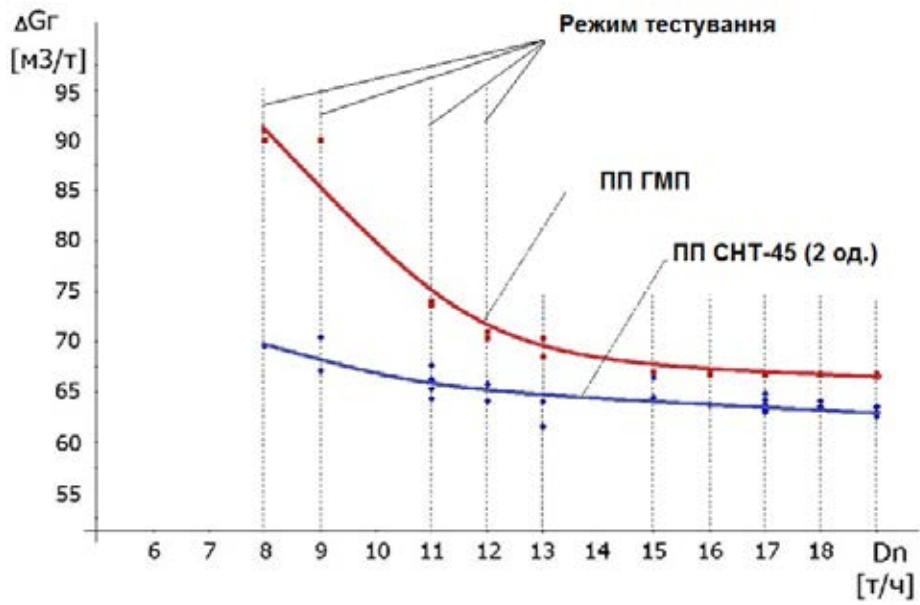


Рис. 7.41 ДЕ-25, «РусАл»

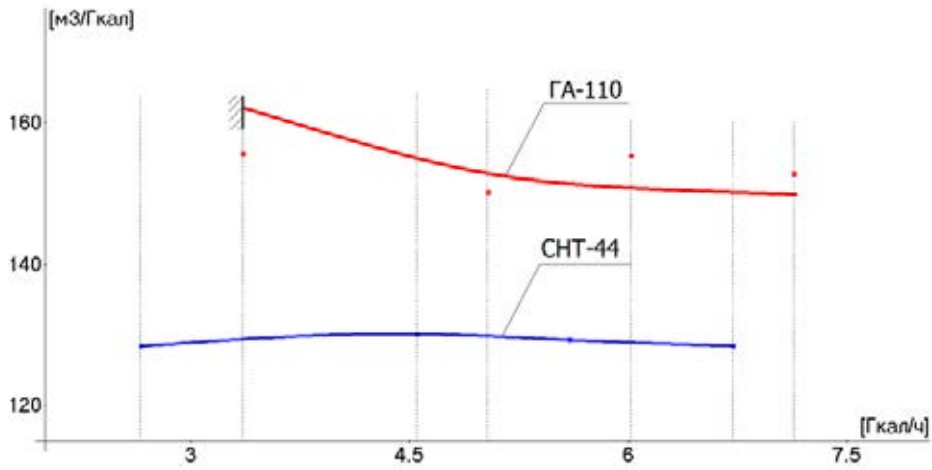


Рис. 7.42 ДКВР-10, «Київенерго»

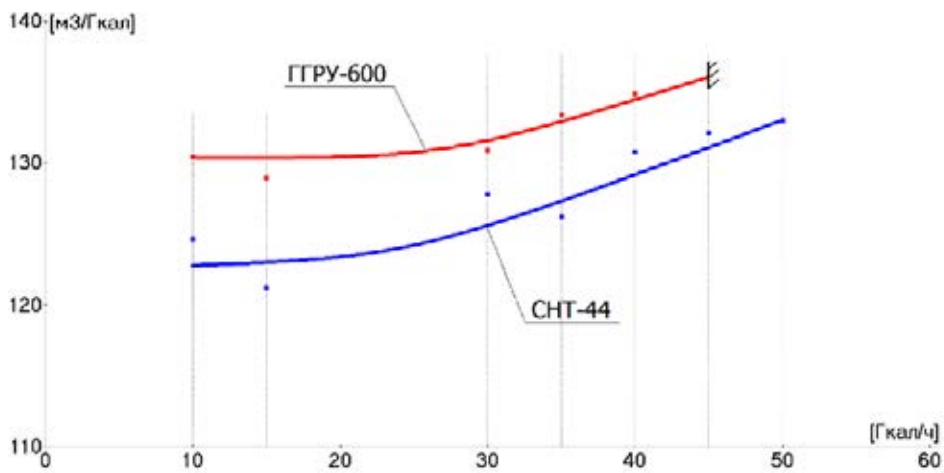


Рис. 7.43 ПТВМ-50, «МОЭК»

Видно ,що модернізація вогнетехнічного об'єкту на основі СНТ значно

підвищує економічність роботи котлоагрегату. Причому на часткових навантаженнях питомі витрати газу на виробіток 1 ГКал значно знижуються.

На основі струменево-нішової технології спалювання палива СНТ, модернізовано більше 1000 ВО, таких як котли, печі, сушила. При проведенні їх модернізації, окрім економії паливних ресурсів часто виникає необхідність в підвищенні надійності роботи на режимах нестабільного газопостачання (падіння газу в мережі). Особливо актуально це стало в кінці 90-х років минулого століття. В цей час СНТ була адаптована до роботи на низьких тисках.

В теперішні час консорціум компаній «СНТ» накопичив великий досвід установки пальникових пристроїв, що реалізують струменево-нішову технологію на вогнетехнічних об'єктах різної потужності, що працюють на низькому тиску газу, а також перевід роботи газовикористовуючих агрегатів з середнього тиску газу на низький. Переведені котельні, потужністю до декількох сотень мегават в містах: Житомир, Севастополь, Алчевськ, Херсон, Миколаїв. Додатково хочеться відмітити, що незалежно від приєднувального тиску газу, пальникові пристрої, що реалізують струменево-нішову технологію розпалюються при тиску газу 1-5 мм вод. ст., що дозволяє стійко працювати при таких тисках на пальник на відміну від інших пальникових пристроїв, включаючи імпортні (рис.7.44). Показний досвід перевodu котлів і котельних в цілому на низький тиск в містах Донецьк і Севастополь, причому перевід здійснювався на котлах, які спочатку працювали на середньому тиску. При літньому навантаженні відпрацьований безвентиляторний режим роботи. В м. Севастополі котельня в Камишовій бухті (потужністю 220 Гкал/год), яка розміщена в тупиковій вітці і відповідно має різкі падіння тиску в газопроводі, характеризувалась провальними отоплювальними сезонами на протязі 20 років.

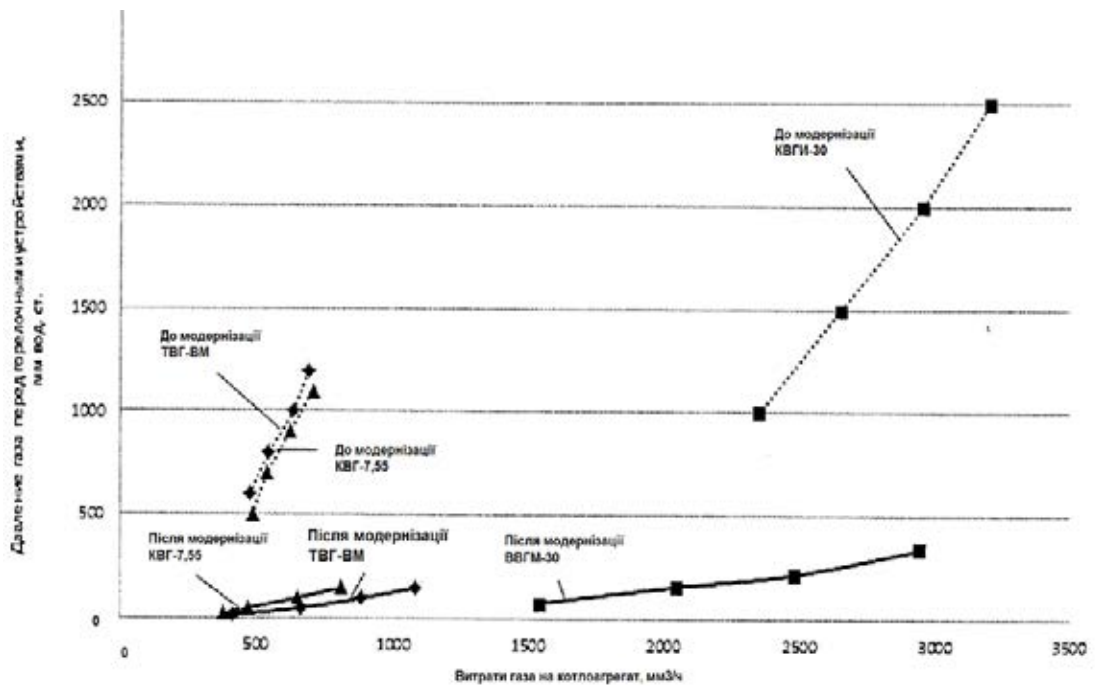


Рис. 7.44 Результати модернізації котлів на основі палинкових пристроїв СНТ

Після установки ПП СНТ, останні 10 років дана котельня змогла забезпечити стабільну подачу тепла на протязі всього опалювального сезону. Регулювання потужності котлів ПТВМ-30 здійснено всіма шістьма палиниками одночасно, розпал проведений при тиску газу 2-3 мм вод. ст. (Див. дод).

На цій же котельні вперше було отримано дуже важливий досвід сушки футеровки котлів після ремонту. Як відомо після оновлення амбразур, футеровки в них накопичується велика кількість вологи (до декількох тон). Якщо її не видалити то при запуску котла вона почне випаровуватись та руйнувати футеровку. Щоб запобігти цьому в топці розпалюють вогнище з дров і багато днів сушать футеровку при помірних температурах. Завдяки особливості СНТ (рис.7.45), які дозволяють розпалювати на малих витратах газу в котлі було розпалено всі палиники з тиском газу 1 мм вод. ст. При цьому температура продуктів згорання в топковому просторі була не більше 90

°С. Ц

короткий строк. Після цього кілька років експлуатації котлів показали, що

якість футеровки була найвищого гатунку. За рахунок “м’якого” розпалу та рівномірності температури по топковому простору значно збільшився міжремонтний період роботи котлів. На котлах ПТВМ-30 зафіксовано збільшення в 2-3 рази.

7.7.3 Досвід експлуатації підігрівачів з пальниковими пристроями на основі струменево-нішової технології

7.7.3.1 Результати експлуатації підігрівачів газу

СНТ застосовується при модернізації різноманітних підігрівачів. Яскравим прикладом такої модернізації є модернізація підігрівача природного газу «Факел ПГ-5» який застосовується на магістральних газопроводах України.



Рис. 7.45 Підігрівач газу «Факел ПГ-5»

Комісія під керівництвом начальника управління експлуатації магістральних газопроводів і газорозподільних систем ДК «Укртрансгазу» зафіксувала такі результати випробувань.

- Розпал пальника СНГ відбувається надійно, без вібрацій, при витраті газу, приблизно 1-2% від номінального.
- В робочому діапазоні навантажень підтримується значення коефіцієнту надлишку повітря не вище 1.09-1.1.
- Стабільна робота ПП забезпечується при тиску газу не вище 100 мм р. б. і тиску повітря 15 мм вод. ст.

- Коефіцієнт використання палива на номінальних режимах склав не менше 97%.

- При високій енергоефективності (практично повному згоранні) емісія NO_x в продуктах згорання не перевищувала 80мг/м^3 . (Див.Додаток).

7.7.3.2 Досвід експлуатації контактних водонагрівачів

Накопичено досвід роботи струменево нішових ПП в контактних водонагрівачах потужністю від 0,3 до 9 МВт. Як відомо їх ККД досягає значень 100-102% за рахунок пониження температури відходячих газів до 40

згорання органічного палива. До пальників, що працюють в умовах контакту продуктів згорання з водою, пред'являють жорсткі обмеження: полум'я не повинне контактувати з водою, теплонапруженість топкового простору повинна бути в декілька раз вище, чим в котлах, і досягає 3МВт/м^3 , тиск в топковому просторі надлишковий – 300-400 мм вод. ст. (рис.7.46).

Результати модернізації десятків контактних водонагрівачів показали високу ефективність їх роботи, надійність і широкий діапазон зміни коефіцієнта робочого регулювання.

Крім того в умовах прямого контакту топкових газів з водою рівень емісії CO і NO_x не перевищував 50 і 40 ppm (приєдено до $\alpha=1$) відповідно. Екологічні характеристики таких підігрівачів значно кращі ніж у передового теплотехнічного обладнання включаючи закордонні зразки.

7.7.4 Досвід експлуатації печей з пальниковими пристроями на основі струменево-нішової технології спалювання

7.7.4.1 Результати модернізації агломераційних машин

Підвищення якості продукції та зниження її собівартості є одним з найважливіших завдань, що стоїть перед вітчизняною металургією. Для вирішення цих проблем для модернізації аглофабрики ММК ім. Ілліча (найбільшої в Європі) було модернізовано 12 агломашин.

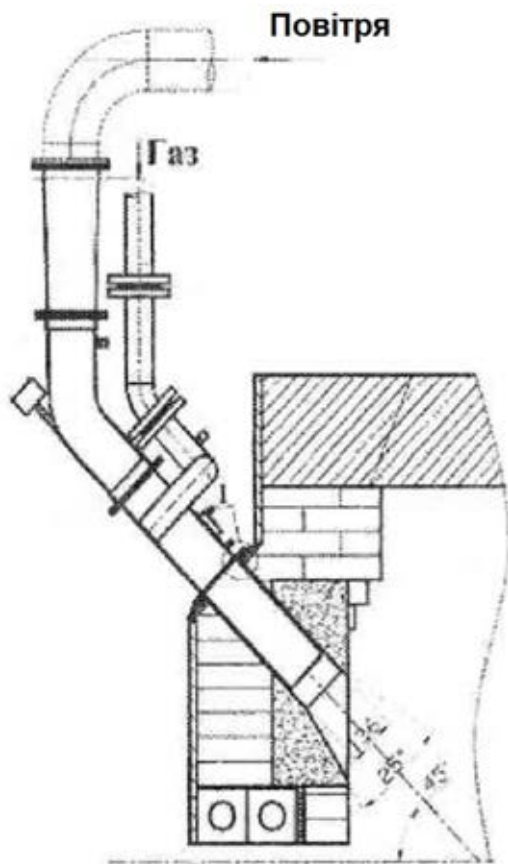


Рис. 7.46 Схема пального пристрою СНТ-22, встановленого на агломашинах ММК ім. Ілліча

Проблеми, що пов'язані з роботою штатних ПП були успішно вирішені з використанням струменево-нішових технологій. Проблеми зв'язані з використанням пальників ГНП-6 успішно вирішені застосуванням СНТ:

- за рахунок реалізуємих принципів СНТ маємо на виході з ПП СНТ поле температур з високою рівномірністю розподілення (рис.7.47);
- за рахунок рівномірного розподілення палива в потоці окиснювача, а також за рахунок проміжного, між дифузійним і кінетичним горінням, механізму горіння (мікродифузійне горіння), реалізованого в ПП СНТ, газ спалюється в короткому факелі з високою теплонапруженністю топового простору горну, що призводить до зниження необхідної кількості палива для підтримання необхідних температур;
- значно понижений зніс палива в неробочі зони агломашини;
- ПП СНТ працюють у всіх діапазонах можливих потужностей агломашин.

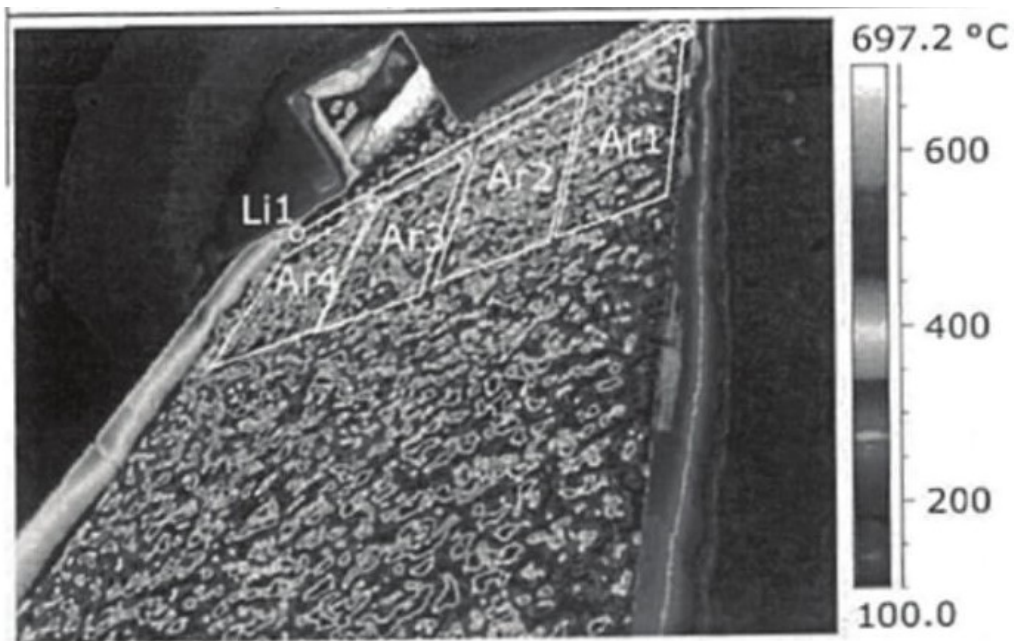


Рис. 7.47 Результати термографічного дослідження рівномірності температурного поля по ширині пілети на виході з горна в ході експлуатації ПП СНТ-22

В результаті модернізації і послідууючої спільної наладки спеціалістами МКМ ім. Ілліча та СНТ отримані наступні результати:

- на робочій АМ №8 досягнутий режим горіння, що забезпечує задовільне спікання при мінімальній витраті газу: на номінальному режимі машина споживає 380м³/год природного газу і 4000м³/год повітря (для порівняння, до модернізації ця же машина споживала близько 600-650м³/год природного газу, та 5200-5500 м³/год повітря);
- загальне пониження витрат природного газу на агломашинах, за рахунок заміни пальників, склало 25-35% (рис.7.48);
- забезпечена стабільність якості агломерату; вихід двох сортів по фракції понижений з 7,52 до 3,29%, що свідчить про покращення якості спікання агломерату.

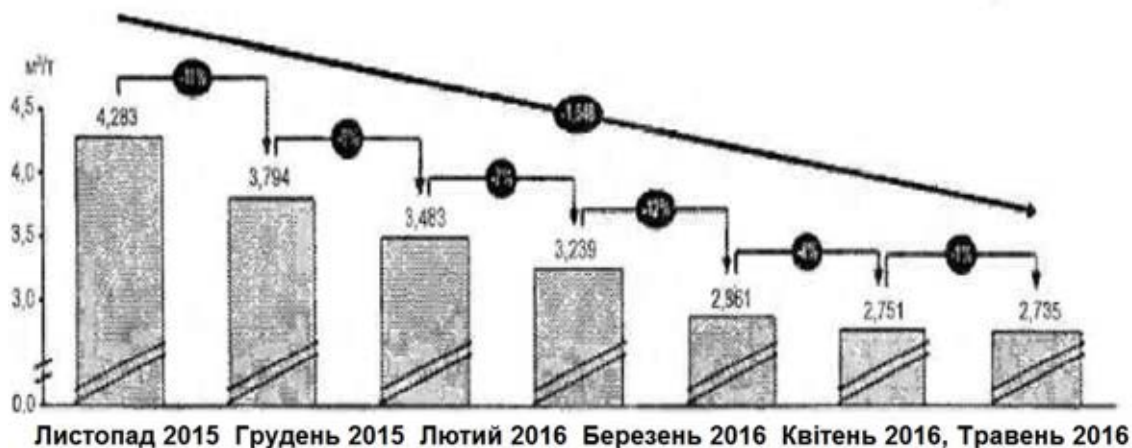


Рис. 7.48 Динаміка фактичної питомої витрати природного газу на запалювання аглошихти

Штатні пальники типу ГНП-6, встановлені на агломераційних машинах, мають ряд недоліків, таких як нерівномірність поля температур, на виході з ПП, неповне згорання палива в факелі, відкидання факела на стінки топкового простору та інше, що свідчить про необхідність заміни їх на більш сучасні пальникові пристрої.

Заміна штатних пальників на ПП СНТ-22 дозволила досягнути високої рівномірності розподілення температурного поля по ширині пілети, повного спалювання природного газу в короткому факелі з високою теплонапруженістю топкового простору горну, зниження уносу палива в неробочі зони агломашини.

Загальне пониження витрати природного газу за рахунок модернізації запалювальних горнів агломашин склало 20-25%. Питома витрата природного газу на запалювання аглошихти була знижена з 4,283 до 2,735 м³/т (36%).

7.7.4.2 Результати модернізації пічного господарства ОАО «Запоріжсталь»

З 2005р. накопичився багатий досвід застосування СНТ в металургійній промисловості. Першим заводом на якому широкомасштабно проведена модернізація пічного господарства став ОАО «Запоріжсталь». За 4 роки в мартенівському цеху було модернізовано 9 мартенівських (рис.7.49) печей,

двухванний сталеплавильний агрегат, два міксери (рис.7.50), декілька постів сушки та розігріву сталеплавильних ковшів.(рис.7.51).



Рис. 7.49 ПП СНТ на мартенівській печі



Рис.7.50 Міксер ОАО «Запоріжсталь»

Півроку експлуатації струменево-нішових пальників показали їх значну перевагу над штатними.

Таблиця 8.2

Фактичні показники ефективно всі впроваджених ПП на ВО Запоріжсталі

ЛПОН до кін	
с. навар в	
ЛПОН до кін	
с. навар в	
ЛПОН до кін	58.8
с. навар в	9.81
ЛПОН до кін	48.7
с. навар в	48.7
ЛПОН до кін	10.9
с. навар в	95.0
ЛПОН до кін	50.0
с. навар в	82.8
ЛПОН до кін	40.5
с. навар в	78.8
ЛПОН до кін	88.8
с. навар в	1.17-8
ЛПОН до кін	8.17-8
с. навар в	8.77-8
ЛПОН до кін	8.77-8
с. навар в	8.77

Так відмічається, що в 1300 тонному міксері за рахунок рівномірності температур по об'єму значно поліпшилась якість топкового процесу. Зникли так звані «настилі» які дуже заважали нормальному технологічному процесу і доволі часто призводять до аварійних ситуацій. При цьому в результаті модернізації витрати газу на міксер було знижено на 25-50%.

Так, наприклад заміна двотрубних пальникових пристроїв на міксері мартенівського цеху ЗАО «Запоріжсталь» дозволила знизити споживання природного газу до 58%, усунути утворення шлаку на поверхні футерування при збереженні необхідного температурного рівня в топковому просторі. Заміна пальникових пристроїв на двохванні печі привела до зниження витрати природного газу більш ніж в два рази і виключило подачу кисню на пальникові пристрої, що призвело до зниження витрати умовного палива на виробництво однієї тони металу в три рази. Установка пальникових пристроїв на пост сушки футерування ковша дозволила знизити витрати газу на 60%.

7.7.4.3 Впровадження СНТ на постах сушки та розігріву сталеливарних ковшів

Унікальний досвід застосування СНТ для горизонтальних постів сушки та розігріву сталеплавильних пече. Горизонтальне розташування ковшів дозволяє значно полегшити відновлювальні роботи і поліпшити теплові умови роботи обладнання яке знаходиться на кришці ковша. Крім цього це дозволяє використовувати безконтактний лазерний пірометр для вимірювання температури практично у всіх точках поверхні футерування. Термопара вимірює температуру тільки в одній точці і то на глибині 50 мм. Так експлуатація такого поста з пальником СНТ-22 показала, що підвищення рівня якості сушки та розігріву ковшів супроводжується зниженням витрат газу на 25-30%.

7.7.4.4 Результати модернізації обертових печей

Показовими є результати експлуатації обертових обжигових печей. Так на Побужському феро-нікелевому комбінаті в 2007 році після модернізації

печей (рис.7.51) значно підвищилась якість технологічного процесу.

Питомі витрати газу на одиницю продукції знизилась з 110 до 98 м³/т. За рахунок рівномірного розподілу температури по топковому простору та зниженню середньої швидкості продуктів згорання значно знизився винос продукції за границі печі. Крім цього струменево-нішова технологія дозволила на 25-30% збільшити продуктивність печі.

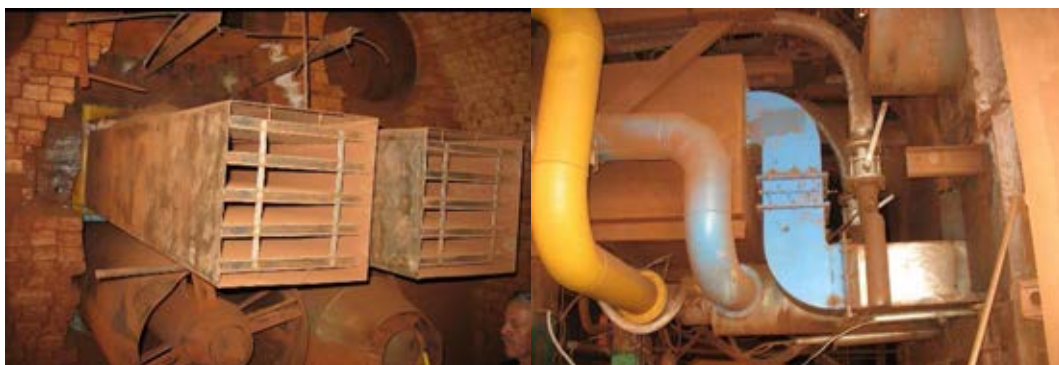


Рис. 7.51 Обжигові печі



Рис. 7.52 Обертова піч

7.7.5 Підвищення рівня ефективності процесів сушки і обпалу вогнетривких матеріалів на основі струменево-нішових технологій

Існуючі на сьогоднішній день технології сушки і обпалу вогнетривків ковша мають ряд істотних недоліків (нерівномірність температурного поля

сушильного агента, високі температурні градієнти, недотримання температурного графіка і т.д.). Основною причиною перелічених недоліків, які призводять до значних затрат палива і відображаються на техніко-економічних показниках всього виробництва, понижуючи його рентабельність і не забезпечуючи потрібний рівень екологічної безпеки і надійності є низький рівень технологій спалювання палива реалізований в існуючих ПП, недостатній рівень автоматизації топкового і технологічного процесів.

Крім того, існуючий графік розігріву ковша і сушки його футерування за допомогою уже наявного газопальникового пристрою не відповідає сучасним вимогам організації теплоенергетичного процесу з точки зору енергозбереження в зв'язку зі значними втратами тепла зв'язаними з неповним спалюванням газового палива, на непотрібний перегрів футерування, екологічним забрудненням виробничого приміщення викидами оксидів вуглецю та азоту.

Критерії для вироблення рекомендацій по модернізації постів сушки футерування ковша є заходи направлені на підвищення якості футерування і пониження витрати енергоносія на процес сушки, шляхом створення нового пальникового пристрою, оптимізуючого процес горіння, підвищення надійності роботи і екологічної безпеки процесу горіння, а також можливістю забезпечення оптимального теплового графіка сушки.

Застосування технології реалізованої в ПП з струменево-нішовою технологією дозволяє підвищити рівень якості футерування за рахунок:

- відсутності вібраційного горіння;
- рівномірності поля температур сушильного агента (продуктів згорання) $\Delta T \leq 20$ на поверхні футерування;
- відсутність контакту фронту полум'я з футеруванням;
- дотримання температурного графіку сушки;

Крім того, модернізація призводить до відсутності в районі сушки ковшів відкритого полум'я і великих потоків високотемпературних

висхідних газів.

Застосування такої технології також дозволяє забезпечити графік сушки ковша необхідним, заданим, температурним режимом з періодичним пониженням подачі газу (Рис.7.53), що в свою чергу призводить до істотної економії палива.

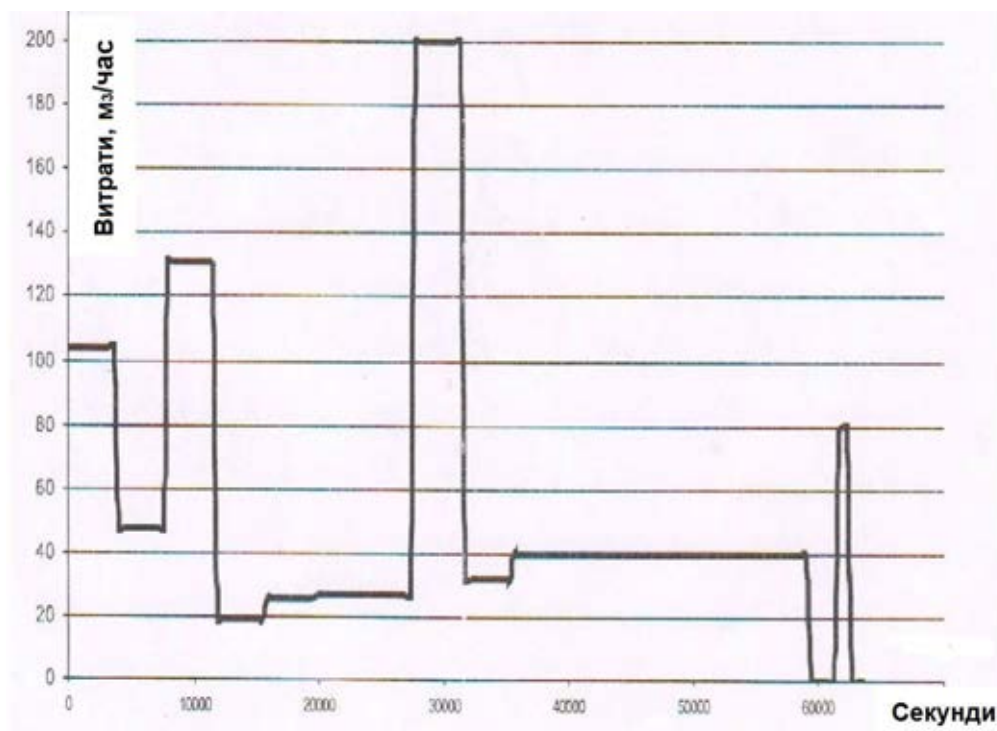


Рис. 7.53 - Витрати газу при сушці футеровки сталеливарного ковша

Також накопичено немалий досвід застосування ПП СНТ в печах гірnodобувної, будівельної, хімічної та інших галузях промисловості показав економію природного газу на 15-50% і значне покращення якості продукції.

7.7.6 Впровадження струменево-нішевої технології при процесах сушки

7.7.6.1 Результати модернізації зерносушарок

Струменево-нішеві технології успішно застосовуються в різноманітних сушарках (сушильні камери для авто, жомо, зерно-сушарки та інш.) (рис.7.54). Рівномірна роздача горючого в потоці окиснювача та помірний рівень швидкості продуктів згорання дає можливість ефективно організувати технологічний процес сушки суттєво економити

енергоресурси (газ та електроенергію).

У порівнянні з печами економія енергоресурсів для зерносушарок не така велика (10-15%), але має місце високий рівень рівномірності температури по масі зерна і що особливо важливо можливість дуже точно дотримуватися необхідного рівня температури в діапазоні 103-110 °С. Ці температури необхідно для того, щоб зерно не перегрілось і щоб в ньому не залишилося зайвої вологи.

7.7.6.2 Результати модернізації жомосушарок

Жомосушарки цукрових заводів теж потребують рівномірного прогріву топкового простору. Але при цьому необхідно підтримувати значно вищий рівень температури в топковому просторі 600-650 °С. Ці температури може призвести до пересушки жому і вибухонебезпеки.

На таких об'єктах СНТ показало можливість економії енергоресурсів на 20-40% при збереженні якості кінцевого продукту.



Рис. 7.54 Блочний пальник зерносушарки.



Рис.7.55 Автосушарка



Рис.7.56 Жомосушарка.

7.7.7 Можливості СНТ спалювання при термічному знешкодженні шкідливих викидів

В поточному часі вельми посилюються економічні норми щодо різноманітних технологічних процесів. Так великі лако-фарбові цехи є джерелами великої кількості забрудненого повітря і це є значною проблемою для оточуючого середовища.

Одним з засобів боротьби з забрудненими є знешкодження. Таким прикладом є встановлення установки знешкодження парів сольвентів в термічному окиснювачі ОАО «Магнітогорський металокомбінат». Складність в тому, що температура парів досягає 350-400 °С. Вводяться пари розчинника (сольвент-нафта та інш.). Для їх термічної

нейтралізації вони пропускаються через пальник СНТ-44.(Рис.7.58)

На пальник подається 250м^3 газу. Сольвент горить при досягненні температури більше 800°C . Штатні пальники типу «Махон» не витримували теплової взаємодії зі сторони факелу та повітря і в цих умовах швидко деформувались і згорали. Організація самоохолодження модулів струменево-нішових пальників дозволила підтримувати температуру в найгарячіших областях пристрою не вище 400°C . Здатність струменево-нішових пальників до організації рівномірного температурного поля в районі факелу забезпечила відсутність нерівномірностей розігріву елементів пальникового пристрою і всієї установки в цілому.



Рис. 7.57 Блок автоматики



Рис.7.58 Блок допалюючого пристрою.

Данна технологія може успішно застосовуватись і в інших областях, а також при використанні газів різного походження в калорійності (доменний, коксовий, шахтний і т.д.).

7.8 Висновки за розділом

1. Порівняльні промислові дослідження струменево-нішової технології на водогрійному та паровому котлі та контактному підігрівачі на стенді розігріву сталерозливних ковшів та агломераційних печей підтвердили дані лабораторних досліджень стосовно ефективності робочого процесу

струменево-нішових модулів.

Пальникові пристрої на основі струменево-нішових модулів забезпечують:

- можливість підвищення ККД котла на 2-5%;
- зниження пускового тиску газу до 10-20 Па;
- зниження витрат газу при пуску котла у декілька раз;
- розширення діапазону коефіцієнта робочого регулювання до значення 10 і більше;
- зниження аеродинамічного опору котлоагрегату у декілька разів, що приводить до зниження витрат електроенергії та шуму;
- зниження критичного значення коефіцієнта повітря до 1,01...1,05;
- можливість забезпечення рівномірного температурного поля у топковому просторі.

2. Випробування показали реальну можливість ефективної роботи котла без вентилятора за рахунок димососу, а також на амбразурі.

3. Випробування показали значне зниження емісії шкідливих викидів.

4. Зміна навантажень вогнетехнічних об'єктів в усьому робочому діапазоні показали повну відсутність вібраційних режимів горіння.

5. Випробування показали високі рівні рівномірності температурного поля, яке формує факел пальника СНТ у топковому просторі.

6. Досвід широкомаштабної експлуатації ПП в складі ВО показав, що:

СНТ дозволяє вирішувати такі задачі:

1. Підвищення безпеки роботи котла в режимі розпалу і перемінних режимів навантаження

2. Підвищення маневреності ВО

3. Розширення діапазону навантажень при збереженні ефективності роботи котла.

4. Зниження споживання газу на виробіток 1 Гкал тепла або 1 т.пари.

5. Зниження споживання електроенергії тягодуттьовими

механізмами.

6. Зниження шкідливих викидів в атмосферу.
7. Підвищення міжремонтного пробігу котла.
8. Підвищення строку служби котла і тягодуттьових приладів.
9. Усунення вібраційних і пульсаційних режимів роботи.

7.9. Список використаних джерел

1. Абдулин М.З. Применение новых технологий сжигания топлива в отопительных котлах малой производительности. Коллективная монография «Актуальные проблемы устойчивого развития». Киев. 2003. С. 338-352.
2. Абдулін М.З. Створення нових технологій горіння, які забезпечують зниження витрат палива та низьку емісію шкідливих викидів в довкілля. Колективна монографія «Комунальна теплоенергетика України: стан, проблеми, шляхи модернізації», том I. Київ. 2007. С. 241-246.
3. Абдулин М.З., Дворцин Г.Р., Жученко А.М., Кулешов Ю.А., Овсиенко И.П. Оптимизация топочного процесса – путь к повышению эффективности, экологической безопасности и надежности работы котлов. Научно-технический журнал «Новости теплоснабжения». Москва. 2008. №4. С. 31-34.
4. Абдулин М.З., Дворцин Г. Р., Жученко А.М. Опыт модернизации огнетехнических установок на основе струйно-нишевой технологии. Научно-технический журнал «Новости теплоснабжения». Москва. №9. 2012. С. 41-45.
5. Абдулин М.З., Дворцин Г.Р., Жученко А.М., Доманский О.В., Абдулин А.М. Струйно-нишевая технология сжигания – решающий фактор модернизации огнетехнических объектов. Производственно-массовый журнал «Энергетик». Москва. №9. 2012. С. 40-44.
6. Абдулин М.З., Дворцин Г.Р., Жученко А.М., Кулешов Ю.А. Высокоэффективная технология сжигания газообразного топлива, реализованная в горелочных устройствах типа СНГ. Сборник научных трудов международной конференции «Энергоэффективность крупного промышленного региона». Донецк. 2004. С. 263-270.
7. Абдулин М.З., Дворцин Г.Р., Жученко А.М., Турунов Д.Н., Абдулин А.М., Ткаченко А.Г. Модернизация горизонтального стенда разогрева сталеразливочных ковшей на основе СНТ. Труды XVI международной конференции «Теплотехника и энергетика в

металлургии». Днепропетровск. 2011. С. 5-7.

8. Абдулин М.З., Дубовик В.С. Струйно-нишевая технология сжигания топлива – ключ к энергоэффективности. Аналитический журнал «Энергетическая политика Украины». Киев. 2004. С. 66-70.

9. Абдулин М.З. Фиалко Н.М. Меранова Н.О. Дворцин Г.Р. Жученко А.М. Научно-технический опыт апробации струйно-нишевой технологии сжигания топлива на объектах промышленной и коммунальной энергетики. Материалы V Международной конференции «Проблемы промышленной теплотехники». Киев. 2007.

10. Абдулин М.З. Дубовик В.С. Струйно-нишевая технология сжигания топлива на объектах муниципальной энергетики. Научно-технический журнал «Новости теплоснабжения». Москва. 2004. С. 23-28.

11. Абдулин М.З., Дворцин Г.Р., Жученко А.М. Технология сжигания – определяющий фактор эффективности огнетехнических объектов. Научно-технический журнал «Новости теплоснабжения». Москва. 2009. С. 23-27.

12. Фиалко Н.М., Абдулин М.З, Меранова Н.О., Дворцын Г.Р., Жученко А.М. Научно-технический опыт апробации струйно-нишевой технологии сжи-гания топлива на объектах промышленной и коммунальной энергетики. Сб. тезисов докл. V Межд. конф. «Проблемы промышленной теплотехники». ИТТФ НАНУ. Киев, май 2007, с.118

13. Фіалко Н.М., Абдулін М.З, Меранова Н.О. Дворцин Г.Р., Жученко А.М. Научно-технический опыт апробации струйно-нишевой технологии сжигания топлива на объектах промышленной и коммунальной энергетики. Сб. тезисов докл. V Межд. Конф. «Проблемы промышленно теплотехники». ИТТФ НАНУ. Киев, ма 007 с.118

14. Абдулин М.З. Эффективное продление ресурса энергетического оборудования в промышленной и коммунальной энергетике на основе внедрения струйно-нишевой технологии сжигания топлива. Тезисы докладов международной научно-практической конференции «Энергоэффективность-

2010». Киев. 2010. С. 74-75.

15. Абдулин М.З., Дворцин Г.Р., Жученко А.М. Продление ресурса высокоэффективной работы энергетического оборудования на основе струйно-нишевой технологии. Труды. Второй всероссийской научно-практической конференции «Повышение надежности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем». НИУ МЭИ. Москва. 2012. С. 137-140.

16. Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции «Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология. МИСиС. Москва. 2012. С. 12-14.

17. Абдулин М.З. Технология сжигания топлива – основа создания высокоэффективных камер сгорания. Научно-технический журнал «Авиационно-космическая техника и технология». Харьков. 2009. С. 40-42.

18. Абдулін М.З., Дворцин Г.Р., Доманский О.В., Абдулін О.М., Сірій О.А. Вплив технологічних засобів зниження емісії NOx вогнетехнічними об'єктами модернізованими на основі СНТ. Тези доповідей 13-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Вугільна теплоенергетика: шляхи реконструкції та розвитку». (Київ, 19-21 вересня 2017). Київ. 2017. с. 96-98.

19. Абдулин М.З. Применение струйно-нишевой технологии сжигания топлива в энергетических установках. Сборник научных трудов, тематический юбилейный выпуск «Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование», Вестник национального технического университета «ХПИ». Харьков. №6. 2005. С. 130-144.

20. Абдулин М.З. Малозатратная модернизация существующего топливоиспользующего оборудования на основе применения струйно-нишевой технологии сжигания топлива. Сборник научных трудов II международной научно-практической конференции «Энергоэффективность крупного промышленного региона». Донецк. 2006. С. 79-82.

Загальні висновки

1. Розроблено загальні положення теплофізики робочих процесів пальникових пристроїв із застосуванням струменево-нішових систем і на цій основі виконано науково-технічне обґрунтування ряду нових технологій спалювання газоподібного палива підвищеної енергетичної ефективності.

2. Виконано комплекс експериментальних досліджень робочого процесу автономних пальникових модулів різних типів – струменевих і струменево-нішових з нішовими порожнинами різноманітної конфігурації.

При цьому:

а) для струменевих модулів – модуля з уступом і модуля з торцевою порожниною, встановлено закономірності течії, сумішоутворення палива і окиснювача та формування теплового стану стінок модуля. Зокрема, для модуля з торцевою порожниною отримано дані щодо характеристик сумішоутворення в закормовій області в залежності від гідродинамічного параметра \bar{q} , згідно з якими у широкому діапазоні зміни \bar{q} ($2,0 < \bar{q} < 12,0$) має місце практично постійний склад паливної суміші, що знаходиться у концентраційних межах займання; надано інтерпретацію факту перебагачення паливної суміші при $0,2 < \bar{q} < 2,0$ на основі ефекту Коанда;

б) для струменево-нішових модулів з прямокутною приструменевою нішою – зручнообтічного модуля і модуля з торцевою порожниною, отримано дані щодо структури течії, особливостей сумішоутворення, стабілізації полум'я і вигорання палива. При цьому для струменево-нішового модуля з торцевою порожниною встановлено факт суттєвого розширення діапазону стійкого горіння у бік бідного зриву у порівнянні зі струменевим модулем завдяки стабілізуючим властивостям приструменевої нішової порожнини. Так, для ніші $(40 \times 10) \cdot 10^{-3}$ м при $W_{\Pi} = 20,0$ м/с значення коефіцієнта надлишку повітря бідного зриву збільшується з 70 до 110. Показано також, що інтенсивність вигорання палива у струменево-нішових модулях є суттєво вищою, ніж у відповідній струменево-нішовій системі на гладкій поверхні; при цьому у досліджуваному діапазоні зміни

визначальних параметрів у струменево-нішовому модулі довжина факелу скорочується у 1,5...2,0 рази;

в) для струменево-нішових модулів з трапецієвидною нішою за наявності і відсутності структураторів потоку виконано аналіз впливу геометричних параметрів нішової порожнини і структураторів потоку на характеристики течії та сумішоутворення палива і окиснювача. За результатами візуалізації обтікання нішових порожнин повітряним потоком за допомогою сажо-газової суміші встановлено, що у порожнині трапецієвидної форми у порівнянні з прямокутною нішою спостерігається погіршення умов вихроутворення, так що при кутах нахилу бічних стінок ніші більше 60° основний нішовий вихор практично зникає. При встановленні на передній кромці ніші структуратора потоку безпосередньо під ним формується вихор, розміри якого є достатніми для надійної стабілізації полум'я. У широкому діапазоні зміни числа Рейнольдса $Re_r(2 \cdot 10^3 \dots 5 \cdot 10^4)$ виконано порівняльний аналіз гідравлічних втрат при обтіканні ніш різної конфігурації збоку газового тракту; показано, що для трапецієвидних ніш з кутом нахилу бічних поверхонь 45° вказані втрати зменшуються на 20% у порівнянні з відповідними втратами для прямокутної ніші. На основі зіставлення закономірностей сумішоутворення у трапецієвидних нішах зі структуратором потоку і нішах прямокутної форми показано, що для трапецієвидних ніш діапазон зміни відносних кроків \bar{S} розташування газоподавальних отворів, за якого забезпечуються концентраційні межі займання, зміщується в область більш низьких значень \bar{S} у порівнянні з прямокутною нішою.

3. Отримано експериментальні залежності відносних гідравлічних втрат у каналі з прямокутною нішою від гідродинамічного параметра \bar{q} і сумарного коефіцієнта надлишку повітря α_{Σ} у широкому діапазоні зміни швидкості повітря (4,0...18,8 м/с) і показано, що дані втрати є порівняно невеликими.

4. Виконано комплексні дослідження характеристик займання та зриву горіння у струменево-нішових пальникових модулях різної конфігурації. В тому числі:

- запропоновано експериментально-розрахунковий підхід до визначення характеристик бідного зриву полум'я у струменево-нішовій системі з прямокутною нішою, який базується на використанні рівняння теплового балансу для цієї системи і даних щодо масообміну в нішовій порожнині;

- отримано дані досліджень меж стійкості і займання для струменево-нішового модуля з прямокутною нішою у широкому діапазоні зміни її геометричних параметрів при спалюванні природного газу і пропан-бутану; встановлено, що для досліджуваних паливних газів відношення витрат палива на режимах запалювання та бідного зриву є тим більшим, чим менша швидкість повітря. Дане відношення зростає зі зменшенням розмірів нішової порожнини і є дещо більшим для пропан-бутану у порівнянні з природним газом;

- показано, що конфігурація нішової порожнини суттєво впливає на межі займання і бідного зриву. Для прямокутної ніші ці межі є більш широкими, ніж для трапецієвидної нішової порожнини; умови запалювання і бідного зриву для трапецієвидної ніші помітно погіршуються зі збільшенням кута нахилу бічних стінок ніші, так що при куті 60° загоряння реалізується лише при досить високих швидкостях повітря ($W_{\text{п}} \geq 15,0$ м/с); при цьому збільшення об'єму ніші призводить до погіршення її стабілізаційних властивостей;

- встановлено, що застосування структураторів потоку забезпечує надійну стабілізацію полум'я у нішах трапецієвидної форми у широкому діапазоні зміни швидкості повітря. Визначено геометричні параметри структураторів, за яких забезпечуються необхідні межі сталості горіння;

- на основі статистичних методів планування експерименту виконано аналіз впливу геометричних параметрів паливорозподілу на характеристики

бідного зриву для струменево-нішового модуля з прямокутною нішою і визначено області рекомендованих значень цих параметрів за умов спалювання природного газу і пропан-бутану.

5. Отримано результати експериментальних досліджень робочих процесів систем, що складаються з декількох струменево-нішових модулів:

- встановлено факт значного скорочення довжини факелу у системі модулів з прямокутною нішою у порівнянні з поодиноким модулем. Показано, що на початковій стадії розвитку факела інтенсивність горіння для системи струменево-нішових модулів є суттєво вищою, ніж для системи струменевих модулів;

- за даними досліджень, проведених у широкому практично важливому діапазоні зміни коефіцієнта надлишку повітря ($\alpha = 1 \dots 100$) і його швидкості ($W_{\Pi} = 16,0 \dots 25,0$ м/с), для систем, що складаються з двох модулів з прямокутною нішою, встановлено, що форма і геометричні характеристики факела полум'я є практично однаковими за обома модулями і визначаються коефіцієнтом надлишку повітря при незначній залежності від величини W_{Π} . Зроблено висновок, що ідентичність характеристик процесів горіння за окремими модулями, які входять до системи модулів, є основою для реалізації модульного принципу конструювання пальникових пристроїв зі струменево-нішовими системами;

- для системи зручнообтічних модулів виконано дослідження характеристик горіння палива у широкому діапазоні зміни коефіцієнта загромождження $k_{\text{прохідного}}$ перерізу каналу.

6. На основі CFD моделювання для пальникових пристроїв із застосуванням струменево-нішових модулів виконано цикл досліджень теплообміну та аеродинаміки у спеціальних системах їх охолодження, проведено аналіз теплового стану даних пристроїв і виконано загальну оцінку ефективності вказаних систем:

- встановлено закономірності течії та теплообміну у системах охолодження з обдувом внутрішньої торцевої поверхні стабілізатора полум'я

круглими імпактними струменями або плоским імпактним струменем за умови використання дефлекторних конструкцій різної конфігурації;

- досліджено особливості зміни характеристик систем охолодження при варіюванні навантаження котлоагрегату.

7. За результатами виконаних досліджень розроблено технічні рішення і ефективні конструкції пального пристроїв на основі струменево-нішових систем для котельних агрегатів, промислових печей, сушарок тощо. Понад 100 типів розроблених пальників пройшли сертифікацію у ДП «Сертифікаційний центр».

8. Проведено дослідження розроблених пального пристроїв у складі різних вогнетехнічних об'єктів. Показано, що при застосуванні даних пальників забезпечуються: широкі діапазони стійкості горіння як за величиною надлишку повітря, так і за швидкістю окиснювача; високі значення коефіцієнта робочого регулювання потужності вогнетехнічного об'єкту; гранично низькі величини втрат тиску за трактами палива та окиснювача, а відтак і низькі значення тиску паливного газу на пускових режимах (10-30Па); висока ступінь рівномірності поля температур у топковому просторі; підвищений ресурс пальників та термічна підготовка палива завдяки застосуванню спеціальних систем їхнього охолодження; незначна залежність ККД вогнетехнічного об'єкту від рівня його навантаження.

9. Результати роботи впроваджено більш ніж на 1000 вогнетехнічних об'єктах в Україні, Білорусі, Росії, Польщі та Казахстані. Отримано право встановлення розроблених пального пристроїв на котлах Монастирищенського, Бійського, Дрогобужського та інших котельних заводів.

Засоби вимірювальної техніки для дослідження ПП

Назва параметру, що вимірювався	Вимірювальний прилад			
	Назва, тип, марка, зав.№, інв.№	Діапазон вимірювання	Ціна поділок	Клас точності або допустима похибка
Атмосферний тиск	Барометр БАММ-1 зав.№6790, інв.№2012	80-106 кПа	100 Па	±200 Па
Вологість повітря	Психометр МВ-4М зав.№3415, інв.№2011	30-80%	0,2%	±3%
Час досліду	Секундомір СОПР-20-9-000 зав.№7602, інв.№10.2741	0-30 хв	0,2 с	Кл.2
Витрата газу	Лічильник газовий РЛ-20-2, зав.№3986, інв.№10.2677	0,5-20 м ³ /год	0,2 м ³ /год	±2,5%
Температура повітря у приміщенні	Термометр ртутний скляний ТЛ-4 інв.№10.3770	0-50 °С	0,1°С	±0,2 °С
Температура газу перед лічильником	Термометр ртутний скляний ТЛ-4 інв.№10.6765	0-50 °С	0,1°С	±0,2 °С
Тиск газу перед лічильником	Тяганапоромір ТДЖ 2х2500 зав. № 43071, інв.№10.1835	0-2500 Па	50 Па	Кл. 1,5
Тиск газу перед пальником	Тяганапоромір ТДЖ 2х2500 зав.№ 43071, інв.№10.1835	0-2500 Па	50 Па	Кл. 1,5
Тиск газу перед стабілізатором	Трубка Піто-Прандтля			
Теплота згоряння палива	Калориметр В-08	10000-1000000 кДж/нм ³	±170 кДж/нм ³	
Швидкість повітря в пальнику	Трубка Піто-Прандтля			
Швидкість повітря в приміщенні	Анемометр АСО-3 зав.№6748, інв.№10.2821	0-5 м/с	0,2 м/с	± (0,1+0,05V)

Додаток 2

«Режимна карта» роботи водогрійного котла ДКВР-10 ст.№3 при
роботі з ПП ГА-110

Параметри	Позна-чення	Од. виміру	Навантаження %			
			40,98	61,46	73,41	87,07
Теплопродуктивність	Q	Гкал/ год	3,36	5,04	6,02	7,14
Витрата газу ($Q_H=8114$ Ккал/нм ³)	B	нм ³ /год	524	760	938	1096
Витрата води через котел	G	т/ч	140,00	140,00	140,00	140,00
Темпера води на вході в котел	t _{вх}	°C	46,00	46,00	48,00	50,00
Темпера води на виході з котла	t _{вих}	°C	70,00	82,00	91,00	101,00
Тиск води на вході в котел	P _{вх}	кгс/см ²	6,1	6,1	6,1	6,1
Тиск води на виході з котла	P _{вих}	кгс/см ²	5,2	5,2	5,2	5,2
Тиск газу в колекторі	P _к	мм.в.ст	230	185	150	120
Тиск газу на пальниках						
-П1	P1	мм.в.ст	10	30	50	70
-П2	P2	мм.в.ст	10	30	50	70
Тиск повітря в колекторі	P _{общ}	мм.в.ст.	10	31	51	62
Тиск повітря на пальниках						
-П1	P1	мм.в.ст	8	28	48	60
-П2	P2	мм.в.ст	8	28	48	60
Розрідження в топці	S _т	мм.в.ст.	2,5	2,5	2,5	2,5
Розрідження за котлоагрегатом	S _к	мм.в.ст.	10	14	18	22

Розрідження за економайзером	S _{ЕК}	мм.в.ст.	23	45	67	93
Темпера повітря на всосі	t _{ХВ}	°С	22	22	22	22
Темпера відходячих газів за котлом	t _{КОТ}	°С	153	200	258	278
Темпера відходячих газів за економ.	t _{УХ}	°С	77	92	121	137
Вміст. в угод. газах за котлом:						
-вуглекислий газ	CO ₂	%	10,5	10,5	10,5	10,5
-кисень	O ₂	%	2,5	2,5	2,5	2,5
Коеф. надлишку повітря за котлом	a		1,11	1,11	1,11	1,11
Вміст. в угод. газах за економ.:						
-вуглекислий газ	CO ₂	%	9,1	8,9	8,8	8,8
-кисень	O ₂	%	4,8	5,2	5,3	5,3
-окис вуглецю	CO	р.р.м	46	52	57	66
-окис азоту	NO _x	р.р.м	88	133	141	142
Коеф. надлишку повітря за економ	a		1,27	1,29	1,3	1,3
Втрати тепла:						
-з відходячими газами	q ₂	%	2,79	3,60	5,13	5,96
-від хім.недопала	q ₃	%	-	-	-	-
-в оточуєче середовище	q ₅	%	4,15	2,77	2,32	1,95
ККД (за обратним балансом)	ККД обр бр	%	93,06	93,63	92,56	92,09
ККД (по прямому балансу)	ККД прямбр	%	79,03	81,73	79,10	80,29
Питома витрата палива	Вуд	г у.т./Гкал	180,13	174,17	179,97	177,29
	Вуд	м ³ ./Гкал	155,95	150,79	155,81	153,50
Конц. шкідливих викидів, приведені до норм.умов a=1	C(CO)	мг/м ³	73,03	83,85	92,63	107,25
	C(NO)	мг/м ³	229,44	352,23	376,31	378,98

**Результати порівняльних випробувань котла ДКВР-10М №3 рег. №762
з пальниками ГА та СНП**

Параметри	Одиниця виміру	Номер режиму					
		1	2	3	4	5	6
Навантаження							
Режимна карта ГА-110	Гкал/год		3,36	5,04	6,02	7,14	
Фото ГА-110	Гкал/год		3,78	5,32	6,30	7,14	
СНП-44 без вентилятора	Гкал/год	1,54	3,29	5,04	6,16	7,84	
СНП-44 з вентилятором	Гкал/год		2,66	4,55	5,6	6,72	8,12
Питома витрата палива							
Режимна карта ГА-110	кг.у.п/Гкал		180,30	174,17	179,97	177,29	
Фото ГА-110	кг.у.п/Гкал		160,11	165,00	171,97	177,29	
СНП-44 без вентилятора	кг.у.п/Гкал	152,8	153,61	156,85	155,43	155,98	
СНП-44 з вентилятором	кг.у.п/Гкал		149,37	150,53	149,94	149,02	157,03
ККД прямий баланс							
Режимна карта ГА-110	%		79,03	81,73	79,10	80,29	
Фото ГА-110	%		88,90	86,27	82,78	80,29	
СНП-44 без вентилятора	%	93,50	93,00	91,08	91,91	91,59	
СНП-44 з вентилятором	%		91,06	94,48	94,30	95,52	90,65
Концентрація СО							
Режимна карта	мг/м ³		73,03	83,85	92,63	107,25	

ГА-110							
Фото ГА-110	мг/м ³		93,00	107,20	145,56	144,50	
СНП-44 без вентилятора	мг/м ³	0,00	20,90	67,05	47,15	96,78	
СНП-44 з вентилятором	мг/м ³		0,00	38,03	10,24	0,0	40,5
Концентрація NOx							
Режимна карта ГА-110	мг/м ³		229,44	352,23	376,31	378,98	
Фото ГА-110	мг/м ³		224,02	365,89	405,02	393,68	
СНП-44 без вентилятора	мг/м ³	106,8	96,74	73,42	2,21	113,53	
СНП-44 з вентилятором	мг/м ³		232,81	206,57	237,80	279,72	275,92

Вихідні дані для розрахунку валових викидів шкідливих речовин в атмосферу при спалюванні газу

Показник	Од. вим.	Позначення	Величина
1	2	3	4
Теплотворна здатність газу	МДж/нм ³	Q _{н^p}	33,29
Густина газу	кг/нм ³	ρ ₀	0,719
Складова природного газу	%%	СН ₄	98,9
те ж саме	%%	С ₂ Н ₆	0,12
те ж саме	%%	С ₃ Н ₈	0,011
те ж саме	%%	С ₄ Н ₁₀	0,01
те ж саме	%%	Н ₂	1,188
те ж саме	%%	СО ₂	0,977
Масовий елементарний склад газу	%%	С ^r	73,67
Показник	Од. вим.	Позначення	Величина
те ж саме	%%	Н ^r	24,65
те ж саме	%%	О ^r	0,12
те ж саме	%%	Н ^r	1,56

**Розрахунок валових викидів шкідливих речовин
для котла ДКВР-10/13 з ПП ГА- 110**

Параметр	Од.вим.	Позначення	Формула	Числове значення
1	2	3	4	5
Річна витрата палива	тис. нм ³	$V_{год}$	(3.33)	5328
Масова витрата природного газу	т	B	-	1233,2
Маса індивідуального газу в сухому стани газоподібного палива	кг/нм ³	m_{CH_4}	(3.34)	0,70812
те ж саме	кг/нм ³	$m_{C_2H_6}$	(3.35)	0,00016
те ж саме	кг/нм ³	$m_{C_3H_8}$	(3.36)	0,00020
те ж саме	кг/нм ³	$m_{C_4H_{10}}$	(3.37)	0,00026
те ж саме	кг/нм ³	m_{N_2}	(3.38)	0,01485
те ж саме	кг/нм ³	m_{CO_2}	(3.39)	0,00120
Валовий викид окислів азоту				
Викид окислів азоту	т	E_{NOx}	(3.41)	2,599
Показник емісії окислів азоту без врахування заходів по скороченню викидів	г/ГДж	$(k_{NOx})_o$	[86]	100
Фактичний річний виробіток тепла	Гкал/год	$Q_{Г}$	-	37440
Кількість годин роботи котла	год	n	-	7200
Фактична теплова виробітка	ккал/год	$Q_{ф}$	-	5200
Номінальна теплова виробітка	ккал/чгод	$Q_{н}$	-	8163
Ступінь зменшення викидів при роботі на низьких навантаженнях		$f_{н}$	[86]	0,569
Емпіричний коефіцієнт, який залежить від виду палива, енергетичної установки, її		z	[86]	1,25

потужності				
Ефективність первинних (режимно-технологічних) заходів скорочення викидів		η_I	[86]	0,2
Ефективність вторинних заходів по скороченню викидів (азотоочисні установки)		η_{II}	[86]	0
Коефіцієнт роботи газоочисної установки		b	[86]	0
Показник емісії окислів азоту із врахуванням заходів по скороченню викидів	г/ГДж	k_{NOx}	(3.42)	45,53
Валовий викид оксидів вуглецю				
Викид оксидів вуглецю	т	E_{CO}	(3.43)	0,97
Показник емісії оксидів вуглецю	г/ГДж	k_{CO}	[86]	17
Валовий викид вуглекислого газу				
Викид вуглекислого газу	т	E_{CO_2}	(3.44)	3354,09
Ступінь окислення вуглецю при спалюванні газу в енергетичній установці		ϵ_C	[86]	0,995
Показник емісії вуглекислого газу	г/ГДж	k_{CO_2}	(3.45)	58743
Валовий викид ртуті				
Викид ртуті	т	E_{Hg}	(3.46)	0,0000057
Показник емісії ртуті	г/ГДж	k_{Hg}	[86]	0,0001
Викид оксидів діазоту	т	E_{N_2O}	(3.47)	0,00571
Показник емісії оксидів діазоту	г/ГДж	k_{N_2O}	[86]	0,1
Викид оксидів метану	т	E_{CH_4}	(3.48)	0,05710
Показник емісії метану	г/ГДж	k_{CH_4}	[86]	1
Об'єм сухих димових газів	нм ³ /кг	$v_{дг}$	(3.49)	16,4
Те ж саме, віднесений до одиниці об'єму природного газу	нм ³ /нм ³	$v_{дг}$	(3.50)	11,8

Дозвільна документація на пальникові пристрої

ДКПП 28.21.11

УКНД 27.060.20

ПОГОДЖЕНО

ЗАТВЕРДЖУЮ

ДЕРЖГІРПРОМНАГЛЯД УКРАЇНИ

Директор

Висновок експертизи
ДП «КЕТЦ»

ТОВ «НТЦ «ФЛОГІСТОН»

168 N 80.2-03-209-4593

Л.д. 22.08.2016



**Пристрої пальникові SPACE
зі струменево-нишовими плазмовими атракторами
спалювання газоподібного
та рідкого палива
Технічні умови**

ТУ У 28.2-31750871-003:2016



(Уведено уперше)

Дата надання чинності 23.08.2016

Чинні до 26.08.2016

РОЗРОБЛЕНО

Директор

ТОВ «НТЦ «ФЛОГІСТОН»



М.З.Абдулін

2016 г.

МІНЕКОНОМРОЗВИТКУ УКРАЇНИ
Державне підприємство
«Всеукраїнський державний науково-виробничий центр
стандартизації, метрології, сертифікації
та захисту прав споживачів»
ДП «Укрметрестандарт»
Ідентифікаційний код 02568182

ПЕРЕВІРЕНО
на відповідність законодавству України
«23» 08 2016 р.
Внесено до книги обліку за № 02568182/001607



ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
«КИЇВСЬКИЙ ЕКСПЕРТНО-ТЕХНІЧНИЙ ЦЕНТР ДЕРЖПРАЦІ»

Ідентифікаційний код 23510933
вул. Ливарська, 1-А, м. Київ, 04073

тел. (044) 454-10-00
факс (044) 454-10-10



ЗАТВЕРДЖУЮ
Заступник директора – керівник
департаменту ДП «КЕТЦ»

І.В. Солнцев
2016 року

ВИСНОВОК ЕКСПЕРТИЗИ

16В № 80.2-03-109-3121

відносно відповідності проекту технічних умов
ТУ У 28.2-31750871-003:2016 «Пристрої пального SPACE зі
струменево-нишовими плазмовими атракторами спалювання
газоподібного та рідкого палива. Технічні умови» вимогам
нормативно-правових актів з охорони праці та промислової безпеки

Технічні умови розроблені: ТОВ «НТЦ «ФЛОГІСТОН»

Юридична адреса замовника:

**ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
«НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЦЕНТР «ФЛОГІСТОН»**

Україна, 01010, м. Київ, вул. Січневого повстання, 3, оф. 41.
тел./факс(044) 462-52-62

Директор – Абдулін Михайло Загретдинович

Висновок експертизи розроблено на підставі договору від 19.07.2016 року
за № 19153121, укладеного із ТОВАРИСТВОМ З ОБМЕЖЕНОЮ
ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ «НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЦЕНТР «ФЛОГІСТОН».

м. Київ

Internet: www.ketc.kiev.ua e-mail: wr@ketc.kiev.ua

Дозволи №№: 1294.15.32; 1295.15.32; 339.15.30; 74.30.0; 340.15.30; 74.30.0;
340.15.30; 410.15.30



201809
ІСТУ ISO/IEC 17025

201809
ISO/IEC 17021

201809
ISO/IEC 17025



МІНІСТЕРСТВО ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ УКРАЇНИ
 ДЕРЖАВНА СИСТЕМА СЕРТИФІКАЦІЇ УкрСЕПРО

Серія ВГ

СЕРТИФІКАТ ВІДПОВІДНОСТІ

Зареєстровано в Реєстрі за № UA1.013.0022160-16
 Зарегистрирован в Реестре

Термін дії з 15 квітня 2016 14 квітня 2018
 Срок действия с

Продукція пристрої палинкові типу СНТ, що працюють на природному газі
Продукция ГOST 5542-87 низького та середнього тиску (згідно додатку 64 моделі)

код УКТ ЗЕД, ТН ЗЕД
28.21.11-50.0
 код ДКПД, ОКП

Відповідає вимогам
Соответствует требованиям

ДСТУ EN 676:2006 - 4; 4.1; 4.2; 4.2.1-4.2.4; 4.3; 4.3.1; 4.3.3; 4.3.4;
 4.3.4.1-4.3.4.3; 4.3.4.6; 4.3.4.8-4.3.4.14; 4.4; 4.4.1; 4.4.1.2-4.4.1.5;
 4.4.1.5.1; 4.4.1.5.3; 4.4.1.6; 4.4.1.6.1-4.4.1.6.3; 4.4.1.7; 4.4.1.8; 4.4.1.9;
 4.4.2; 4.4.2.1-4.4.2.4; 4.4.5; 4.4.6; 4.4.7; 4.4.7.1; 4.4.7.2; 4.4.7.2.1;
 4.4.7.2.2; 4.4.8; 4.4.9; ГOST 21204-83 - п.п.1.3.3; 1.3.5; 1.3.7; 1.4.2;
 1.4.9-1.4.11; 1.4.13; 1.6.4; 1.6.5; 1.8.2; 1.8.3; 1.8.5; 1.8.5а; 1.8.6; 1.8.7;

Виробник продукції ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ 'ВИРОБНИЧА
Изготовитель продукции КОМПАНІЯ 'СТРУМЕНОВО-НИШОВА ТЕХНОЛОГІЯ', 03115, м. Київ, проспект Перемоги, буд. 104, код ЄДРПОУ 40360034

Сертифікат видано ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ 'ВИРОБНИЧА
Сертификат выдан КОМПАНІЯ 'СТРУМЕНОВО-НИШОВА ТЕХНОЛОГІЯ', 03115, м. Київ, проспект Перемоги, буд. 104, код ЄДРПОУ 40360034

Додаткова інформація продукція, що випускається серійно з 15 квітня 2016 р.
Дополнительная информация до 14 квітня 2018 р. Контроль сертифікованої продукції здійснюється технічним наглядом один раз на рік

Сертифікат видано органом з сертифікації ДГП СВЦОО, м.Київ, вул. Механізаторів, 9
Сертификат выдан органом по сертификации призначений (свідоцтво №UA.P.013) та уповноважений (свідоцтво №UA.PN.013) від 29.04.2014 р.

На підставі протоколи №№ 68/16 ВПЛС від 14.04.2016 р., 69/16 ВПЛС від 14.04.2016 р.,
На основании 70/16 ВПЛС від 14.04.2016 р. ВЦ ДГП СВЦОО (атестат акредитації № 2Н122 від 16.07.2013 р.); висновок № 59-Р/16 від 15.04.2016 р., акт обстеження виробництва № 58-АО/16 від 11.04.2016 р.

Керівник органу з сертифікації
Руководитель органа по сертификации



підпис

А. П. Олєфіренко

ініціали, прізвище

Чинність сертифіката відповідності можна перевірити в Реєстрі системи УкрСЕПРО за тел. (044) 537-35-76.

03702030



ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
«СЕРТИФІКАЦІЙНИЙ ВИПРОБУВАЛЬНИЙ ЦЕНТР
ОПАЛЮВАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ» (ДП «СВЦОО»)



012

10024
ISO/IEC 17065

СЕРТИФІКАТ ЕКСПЕРТИЗИ ТИПУ

СЕРТИФІКАТ ЕКСПЕРТИЗИ ТИПА / TYPE EXAMINATION CERTIFICATE

Зареєстровано в Реєстрі ООВ ДП «СВЦОО» за № **UA.TR.012.C.0095-18**
Зареєстрован в Реєстре органа по оценке соответствия под № /
Registered at the Record of conformity assessment body under №

Термін дії з 03 квітня 2018 р. по 02 квітня 2020 р.
Срок действия /
Term of validity

Сертифікат видано **ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ**
Сертифікат выдан / **«ВИРОБНИЧА КОМПАНІЯ «СТРУМЕНЕВО-НИШОВА**
Certificate is issued on **ТЕХНОЛОГІЯ»**, код ЄДРПОУ 40360034,
03115, м. Київ, проспект Перемоги, буд. 104

Продукція **Пальникові пристрої струменево-нишові,**
Продукция / **типів СНТ та СНГ,**
Production **що працюють на природному газі,**
моделі згідно додатку,
запасні частини та комплектуючі до них

Код УКТЗЕД, ДК 016/
Код УКТ ВЕД, ДК 016/
UKT ZED code, DK 016
28.21.11

Код ДКПТУ Код ГКПТУ/
DKPP code

Відповідає вимогам **Технічного регламенту приладів, що працюють на газоподібному паливі**
Соответствует требованиям / **(ПКМУ від 24.09.2008 р. № 856), ДСТУ EN 676:2014, ГОСТ 21204-83**
Comply with the requirements

Виробник **ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ**
Производитель / **«ВИРОБНИЧА КОМПАНІЯ «СТРУМЕНЕВО-НИШОВА**
Producer **ТЕХНОЛОГІЯ»**, код ЄДРПОУ 40360034,
03115, м. Київ, проспект Перемоги, буд. 104

Місце виробництва **ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ**
Место производства / **«ВИРОБНИЧА КОМПАНІЯ «СТРУМЕНЕВО-НИШОВА**
Place of production **ТЕХНОЛОГІЯ»**, код ЄДРПОУ 40360034,
03115, м. Київ, проспект Перемоги, буд. 104

Додаткова інформація **Продукція, що випускається серійно з 03 квітня 2018 р. по 02 квітня**
Дополнительная информация / **2020 р. Контроль сертифікованої продукції здійснюється проведенням**
Additional information **технічного нагляду один раз на рік**

Сертифікат видано органом **ООВ ДП «СВЦОО», Україна,**
з оцінки відповідності **03150, м. Київ, вул. Загородня, 15 (юридична адреса),**
Сертифікат выдан органом оценки соответствия / **03045, м. Київ, вул. Плещесва, 10 (фактична адреса).**
Certificate is issued by the conformity assessment body **Номер призначеного ООВ № UA.TR.012**
Контактний телефон +38044-360-80-98, +38044-259-46-24

На підставі **Протоколів № 27/18 ВПлОВ від 28.02.2018 р., № 27-1/18 ВПлОВ**
На основании / **від 28.02.2018 р., № 27-2/18 ВПлОВ від 28.02.2018 р., № 27-3/18 ВПлОВ**
On the grounds of **від 28.02.2018 р. ВЦ ДП «СВЦОО» (№ 2Н122 від 16.07.2013 р.);**
акт перевірки виробництва № 26-АО/18 від 28.03.2018 р.; висновку
№ 26-Р/18 від 30.03.2018 р.

Керівник органу з оцінки відповідності
Руководитель органа по оценке соответствия /
Director of the conformity assessment body



А.П. Олєфіренко

Чинність сертифіката можна перевірити в базі даних органу з оцінки відповідності, що розміщена на:
Действие сертификата можно проверить в базе данных органа оценки соответствия, размещенной на:
Validity of the Certificate can be checked on the base of data of the conformity assessment body, which is loaded at:

www.svcoo.kiev.ua



ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИСМСТВО
«СЕРТИФІКАЦІЙНИЙ ВИПРОБУВАЛЬНИЙ ЦЕНТР
ОПАЛОВАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ» (ДП «СВЦОО»)



012

10824
ISO/IEC 17065

ДОДАТОК ДО СЕРТИФІКАТУ ЕКСПЕРТИЗИ ТИПУ

ПРИЛОЖЕНИЕ К СЕРТИФИКАТУ ЭКСПЕРТИЗЫ ТИПА / ATTACHMENT TO THE TYPE EXAMINATION CERTIFICATE

Зареєстровано в Реєстрі ООВ ДП «СВЦОО» за №
Зареєстрован в Реєстре органа по оценке соответствия под № /
Registered at the Record of conformity assessment body under №

UA.TR.012.C.0095-18

1. Пристрої пальникові типу СНТ:

- струменево-нишові пальникові модулі круглого типу, моделей:

СНТ-1К; СНТ-2К; СНТ-3К;

- струменево-нишові пальникові пристрої, моделей:

СНТ-11; СНТ-21; СНТ-31; СНТ-41; СНТ-51; СНТ-61; СНТ-71; СНТ-81; СНТ-91;

СНТ-22; СНТ-32; СНТ-42; СНТ-52; СНТ-62; СНТ-72; СНТ-82; СНТ-92;

СНТ-33; СНТ-43; СНТ-53; СНТ-63; СНТ-73; СНТ-83; СНТ-93;

СНТ-44; СНТ-54; СНТ-64; СНТ-74; СНТ-84; СНТ-94;

СНТ-55; СНТ-65; СНТ-75; СНТ-85; СНТ-95;

СНТ-66; СНТ-76; СНТ-86; СНТ-96;

СНТ-77; СНТ-87; СНТ-97;

СНТ-88; СНТ-98;

СНТ-99;

- струменево-нишові пальникові пристрої з можливістю встановлення мазутних форсунок, моделей:

СНТ-23; СНТ-33; СНТ-43; СНТ-53; СНТ-63; СНТ-73; СНТ-83; СНТ-93;

СНТ-45; СНТ-55; СНТ-65; СНТ-75; СНТ-85; СНТ-95;

СНТ-66; СНТ-67; СНТ-68; СНТ-69;

СНТ-77; СНТ-87; СНТ-97;

СНТ-88; СНТ-89;

СНТ-99;

- блочні газопальникові пристрої, моделей:

СНТ-11 БЛ; СНТ-21 БЛ; СНТ-12 БЛ; СНТ-22 БЛ;

СНТ-23 БЛ; СНТ-33 БЛ; СНТ-34 БЛ;

СНТ-44 БЛ; СНТ-45 БЛ;

СНТ-55 БЛ; СНТ-56 БЛ;

СНТ-66 БЛ.

2. Пристрої пальникові типу СНГ:

СНГ-11; СНГ-21; СНГ-31; СНГ-41; СНГ-51; СНГ-61; СНГ-71; СНГ-81; СНГ-91;

СНГ-22; СНГ-32; СНГ-42; СНГ-52; СНГ-62; СНГ-72; СНГ-82; СНГ-92;

СНГ-33; СНГ-43; СНГ-53; СНГ-63; СНГ-73; СНГ-83; СНГ-93;

СНГ-44; СНГ-54; СНГ-64; СНГ-74; СНГ-84; СНГ-94;

СНГ-55; СНГ-65; СНГ-75; СНГ-85; СНГ-95;

СНГ-66; СНГ-76; СНГ-86; СНГ-96;

СНГ-77; СНГ-87; СНГ-98;

СНГ-99.

Керівник органу з оцінки відповідності

Руководитель органа по оценке соответствия /
Director of the conformity assessment body

M.P./Stamp



А.П. Олєфіренко

Чинність сертифіката можна перевірити в базі даних органу з оцінки відповідності, що розміщена на:

Действительность сертификата можно проверить в базе данных органа оценки соответствия, размещенной на:

Validity of the Certificate can be checked on the base of data of the conformity assessment body, which is loaded at:

www.svcoo.kiev.ua

Дозвільна документація заводів виробників котлів на
впровадження пальникових пристроїв



ОАО «ДОРОГОВУЖКОТЛОМАШ»

JSC «DOROGOVUZHKOTLOMASH»



215750, Россия, Смоленская обл., п. Верхнеднепровский, ОАО «Дорогобужкотломаш»
тел: (08144) 5-32-88, тел.факс: (08144) 5-35-66, факс: 5-34-00, телетайп: 281415 Залки
Verkhnedneprovsky settl., 215750, Smolensk region, Russia. Tel.: (08144) 5-32-88,
tel/fax: (08144) 5-35-66; fax: (08144) 5-34-00. E-mail: dktm@sci.smolensk.ru

№ 06-09

Гл. инженеру
ООО «Научно-производственное объединение
«Струйно-нишевая технология»
Кулешову Ю.А.

Повторно

ОАО «Дорогобужкотломаш» согласовывает установку горелок

- СНТ -33 среднего давления на котле ПТВМ-30;
- СНТ -44 низкого давления на котле ПТВМ-30М; ПТВМ-50;
- СНТ -44 среднего давления на котле КВ-ГМ-10;
- 2 -х горелок СНТ-44 на котле КВ-ГМ-23,26 (КВ-ГМ-20)
- 4-х горелок СНТ-55 на котле КВ-ГМ-50

Константин Барбаш

С уважением
Главный конструктор

В.В. Барабаш

**ВІДКРИТЕ
АКЦІОНЕРНЕ
ТОВАРИСТВО**



ТЕКОМ

19100, Україна, м. Монастирище, Черкаської області, вул. Леніна, 122
р/р 26008301885545 в БФ №3 м. Умань МФО 354381, код 00255289
факс (04746) 2-23-07

19.07.05 № Г.С. 631

на № _____ від _____

Головному інженеру
ТОВ „Запорізький виробничий
комбінат „Спецгазпром“
п. Кулешову Ю.О.
м. Запоріжжя, пр. Леніна, 111-А
т/ф 8-0612-62-41-42

У відповідь на Ваш запит №286/05 від 11.07.2005 року повідомляємо, що:
СПІКТБ котломаш ВАТ „ТЕКОМ“ як головна спеціалізована організація (до-
даток 1 „Правил“) і ВАТ „ТЕКОМ“ як виробник котлів дозволяє обладнання па-
льниковими пристроями СНГ виробництва ТОВ „Запорізький виробничий ком-
бінат „Спецгазпром“ котлоагрегатів типу ТВГ-4; ТВГ-8; ТВГ-10; КВГ-4,65;
Е-1,0-0,9; Е-1,6-0,9; Е-2,5-0,9; КВГ-7,56; НИИСТу-5.




Директор СПІКТБ котломаш

Л.М. Мілевський

Акти впровадження пальникових пристроїв

«Затверджую»

Директор КП «Житомиртеплокомуненерго»
 Рогожин Дмитро Володимирович



« 8 » серпня 2019р

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи Абдуліна М.З.

“Розробка теплофізичних основ технологій спалювання палив з застосуванням струменево-нішових систем”

Комісія в складі : голова – директор КП “Житомиртеплокомуненерго” Рогожин Дмитро Володимирович , членів комісії – технічний директор Сергійчук Р. , головний інженер Бужинський В. Всклала акт по факту використання на підприємстві КП “Житомиртеплокомуненерго” результатів досліджень та рекомендацій, виконаних у дисертаційній роботі Абдуліна М.З. “Розробка теплофізичних основ технологій спалювання палив з застосуванням струменево-нішових систем”.

З 2008 р. по поточний час на об’єктах комунального підприємства КП “Житомиртеплокомуненерго” проходить модернізація котлоагрегатів які знаходяться в експлуатації більше 20 років. Це котли ТВГ, КВГ, ДЕ, КВГМ, ПТВМ.

Для підвищення рівня ефективності і надійності роботи обладнання, застосовувались пальникові пристрої СНТ-22 , СНТ-33 , СНТ-44 , СНТ-45 в яких реалізовані результати докторської дисертаційної роботи Абдуліна М.З. “Розробка теплофізичних основ технологій спалювання палив з застосуванням струменево-нішових систем”

Це дало змогу підвищити ККД котлів з 88% до 93%, забезпечити можливість пуску при тиску 1-2 мм вод. ст., збільшити значення коефіцієнту регулювання потужності до 10, забезпечити зниження затрат ел.енергії на

привід тягодуттьових пристроїв та позбутисявібраційних режимів роботи. Технологія дозволила за допомогою рециркуляції продуктів згорання знизити емісіюNO_xнижче 100 мг/м³ при нормативних значеннях CO. Впровадження енергоефективної технології дозволило знизити витрату енергоносіїв на до 10% в залежності від типу КА та об'єму його модернізації.

Голова комісії

Члени комісії



Рогожин Дмитро Володимирович

В. Бужа

КОМУНАЛЬНЕ ПІДПРИЄМСТВО ВІННИЦЬКОЇ МІСЬКОЇ РАДИ
“ВІННИЦЯМІСЬКТЕПЛОЕНЕРГО”

21100 м. Вінниця, вул. 600-річчя, 13 тел./факс 55-16-55

р/р 26009278920 в АБ «Укргазбанк», МФО 320478

ЄДРПОУ 33126849 e-mail:office@teplo.vin.ua

20.09.19р № 511/III.12
на № _____ від _____

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи Абдуліна М.З.

“Розробка теплофізичних основ технологій спалювання палив з
застосуванням струменево-нішових систем”

Комісія в складі:

Голови комісії – в.о. генерального директора КП ВМР
Вінницяміськтеплоенерго Ласкавчука А.В.

Членів комісії:

- в.о головного інженера Пісного В.Г.;
- начальника відділу режимів та випробувань Аліфанова О.В.;

склала даний Акт по факту використання на підприємстві КП ВМР
“Вінницяміськтеплоенерго” результатів досліджень та рекомендацій,
викладених у дисертаційній роботі Абдуліна М.З. “Розробка теплофізичних
основ технологій спалювання палив з застосуванням струменево-нішових
систем”.

Застосування конструктивних особливостей модулів пальникових
пристроїв СНТ дозволило забезпечити стійку роботу пальників та
котлоагрегату в цілому на низьких тисках газу, знизити витрати ел. енергії на
привід тяго-дутьових пристроїв та забезпечити безаварійність запуску котлів
на малих витратах газу.

Пальники сконструйовані по струйно-нішовим технологіям на нашому
підприємстві використовуються з 2003 року, їх використання дозволило
забезпечити стійку роботу основного та допоміжного обладнання
котлоагрегатів на низькому тиску газу, під час відсутності необхідного
навантаження на котлах великої потужності, при роботі на потреби гарячого
водопостачання в між опалювальний період. При відсутності достатнього
навантаження на опалення, в перехідний період, використання зазначених
пальників дозволяє забезпечити роботу енергетичних котлів для генерації
електричної енергії, що суттєво відображається на економічних показниках
підприємства, та приводить до незалежності від зовнішніх постачальників ел.
енергії.

Впровадження пальників з спалюванням палива в доганяючих потоках
повітря дозволяє добитися максимально можливого змішування газу з

повітрям, що сказується на покращенні процесу спалювання, та дає змогу підвищити ККД котлів на 2% і знизити викиди шкідливих речовин та парникових газів.

На підприємстві планується виконати модернізацію котлів з високою топкою типу ТВГ-8, що дасть можливість виключити малоефективні пальники «БІП», які не дозволяють добитись навантаження котла більше 60% (в свій час пальниками «БІП» були замінені подові щільові пальники, які практично не піддавались регулюванню).

Також слід відмітити можливість повної автоматизації процесу розпалу та роботи котелень обладнаних пальниками СНТ з можливістю диспетчеризації.

Зазначаємо, що за період експлуатації цих пальників, при мінімальних температурах зовнішнього повітря, іноді тиск газу знижується до значень при яких робота пальників інших типів середнього тиску не можлива. Варто відмітити безпеку проведення пуску котлів за рахунок плавного розпалу пальників при тиску газу практично від 0.

Голова комісії :



Ласкавчук А.В.

Члени комісії :

Пісний В.Г

Аліфанов О.В

Затверджую

Директор аглодоменного виробництва -
начальник аглофабрики ПАТ «ММК ім. Ілліча»

“ 6 ” ~~серпня~~ 2019

ПІДПИСАНО
ПАТ ІМЕНІ ІЛЛІЧА
АГЛОФАБРИКА

Акт

про впровадження результатів дисертаційної роботи Абдуліна М.З.
“ Розробка теплофізичних основ технологій спалювання палив з
застосуванням струменево-нішових систем”

В період 2015-2018 рр. на агломераційній фабриці з-да ім.Ілліча м.Маріуполь провадилась модернізація агломераційних машин. Для підвищення ефективності опіку агломерату. Витрати газу на одну машину становили 600-650 м³/год. Для оптимізації топочного процесу при апробації різних варіантів була вибрана відома струменево-нішова технологія спалювання палива (СНТ).

Замість штатних пальникових пристроїв (ПП) ГНП – 6 на 12 агломераційних машинах було встановлено по 4 пальникових пристроїв СНТ-22.

Нова технологія спалювання забезпечила рівномірний розподіл горючого в потоці окислювача, стійку вихрову структуру в зоні стабілізації полум'я, забезпечення мікродифузійного механізму спалювання та самоохолодження елементів ПП паливом та окислювачем.

За рахунок цього вдалося досягти : рівномірності температурного поля по топочному простору , розширення діапазону ефективної роботи агломашин по потужності, повного згорання палива в топочному просторі, покращення якості опіку агломерату (вихід другого сорту знизився з 7,2% до 3,9%).

Загальне зниження витрати газу на одну машину становить 20-25%, біля 750 тис. м³/рік.

«Затверджую»
Декан теплоенергетичного
факультету Національного
технічного університету України
«Київського політехнічного інституту
імені Ігоря Сікорського»



д.т.н. професор
Є.М.Письменний
_____ липня 2019р

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи Абдуліна М.З.

“Розробка теплофізичних основ технологій спалювання палив з
застосуванням струменево-нішових систем”

Ми, що нижче підписалися, представники кафедри теплових енергетичних установок теплових та атомних електричних станцій теплоенергетичного факультету – зав.кафедрою д.т.н. проф. О.Ю. Черноусенко та заступник зав. кафедрою Л.С. Бутовський склали цей акт про те, що матеріали досліджень та результатів дисертаційної роботи М.З. Абдуліна використовуються в навчальному процесі кафедри теплових енергетичних установок теплових та атомних електричних станцій.

Від кафедри теплових енергетичних установок
теплових та атомних електричних станцій

Зав. кафедри : _____ *Оле* _____ О.Ю. Черноусенко

Заст. зав. кафедри : _____ *Бутовський* _____ Л.С. Бутовський

Науково-виробниче товариство з обмеженою відповідальністю

«ЛОТА»

03056, Україна, м. Київ,
вул. Політехнічна, буд.6,
корпус 5, приміщення 10-1
код ЄДРПОУ 16289882

тел./ф. (044) 204-80-38
тел. (044) 204-80-39
e-mail: lotainkiev@gmail.com

«Затверджую»

Директор НВ ТОВ «ЛОТА»

к.т.н. О.Я.Королевич

«20» Вересня 2019 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи Абдуліна М.З.
«Розробка теплофізичних основ технологій спалювання
палива з застосуванням струменево-нішових систем»

Комісія в складі: голови – директора НВ ТОВ «ЛОТА» Королевича О.Я.,
членів комісії: заступника директора Безнощенко В.І., інженера Левченко Є.В.,
склала акт по факту використання НВ ТОВ «ЛОТА» результатів дисертаційної роботи
Абдуліна М.З. «Розробка теплофізичних основ технологій спалювання палива з застосуванням
струменево-нішових систем».

НВ ТОВ «ЛОТА» є лідером по розробці та впровадженню високоефективних контактних
водопідігрівачів. Таке обладнання пред'являє жорсткі умови для палинкових пристроїв:
високий рівень протитиску в топковому просторі, високий рівень питомого об'ємного
тепловиділення, стійкість в широкому діапазоні змін потужності та інше.

З 2003 р. по поточний час НВ ТОВ «ЛОТА» застосовує в контактних підігрівачах сотні
палинкових пристроїв СНТ-33, СНТ-44, СНТ-54 та інших, в яких реалізовано результати
докторської дисертаційної роботи Абдуліна М.З – «Розробка теплофізичних основ технологій
спалювання палива з застосуванням струменево-нішових систем».

Це дозволило контактним підігрівачам працювати надійно з ККД – 102-105% по Q_n^p і
забезпечувати рівень емісії CO – 60 мг/м³ та NOx - 80 мг/м³. При цьому був досягнутий рівень
питомого об'ємного тепловиділення в топковому просторі $q_v > 3$ Мвт/м³.

Треба відмітити, що жоден з відомих палинкових пристроїв, які були перевірені нами
не здатні досягнути таких результатів.

Голова комісії

Королевич О.Я.

Члени комісії:

Заступник директора

Безнощенко В.І.

Інженер

Левченко Є.В.,



«Затверджую»

Генеральний директор
НВК «Струменево-нішова технологія»
І.М.Піскун
2019р



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи Абдуліна М.З.

“Розробка теплофізичних основ технологій спалювання палив з застосуванням струменево-нішових систем”

Ми, що нижче підписалися, комісія НВК “Струменево-нішова технологія” : голова – ген.директор Ірина Миколаївна Піскун, технічний директор Олег Васильович Доманський, головний інженер Сергій Федорович Порхун склали цей акт про те, що у НВК “Струменево-нішова технологія” при розробці конструкції паливних пристроїв для використання в печах металургійної промисловості введено результати дисертаційної роботи Абдуліна М.З. “Розробка теплофізичних основ технологій спалювання палив з застосуванням струменево-нішових систем”

Використання даних результатів дозволило створити паливні пристрої, що значно підвищили економічність агрегаційних машин та печей опалювання вапна (на 15-30%). Крім того за рахунок рівномірного поля температури продуктів згорання на виході паливних пристроїв значно покращилась якість продукції. Зменшився вихід другого сорту продукту (більш ніж у 2 рази).

Також треба відмітити надійність та безпечність запуску печей на низьких тисках газу (пусковий тиск газу – 1-2 мм вод. ст.). Малі витрати газу на таких тисках дозволяють запобігти термічних “ударів” на пускових режимах. Це значно продовжує ресурс роботи пічного обладнання.

Голова комісії :

І.М.Піскун

Члени комісії :

О.В.Доманський

С.Ф. Порхун

«Затверджую»

Директор з наукової роботи
ТОВ «Науково – технічний центр «Флогістон»»,
Г.Р.Дворцин.
2019р



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи Абдуліна М.З.

“Розробка теплофізичних основ технологій спалювання палив з застосуванням струменево-нішових систем”

Ми, що нижче підписалися, комісія НТЦ “Флогістон” : директор з наукової роботи Дворцин Геннадій Романович, головний інженер Кулешов Юрій Олександрович, начальник проектного відділу Світан Сергій Олександрович склали цей акт про те, що на основі результатів дисертаційної роботи Абдуліна М.З “Розробка теплофізичних основ технологій спалювання палив з застосуванням струменево-нішових систем” розроблені пальникові пристрої потужністю від 0,3 до 40 МВт.

В конструкціях пальникових пристроїв та технічних умовах ТУУ 29.2 – 31750871-002:2008 використані унікальні можливості струменево-нішевої технології : раціональний розподіл горючого в потоці окиснювача, стійка компактна вихрова структура в зоні стабілізації полум'я , низький гідравлічний опір по трактах горючого та окиснювача, забезпечення мікродифузійного механізму спалювання та термічної підготовки паливної суміші за рахунок самоохолодження.

Впровадження даних пальникових пристроїв значно підвищує еколого-енергетичні показники не тільки нових котлоагрегатів але і таких, що знаходяться в експлуатації 20 і більше років.

Досвід експлуатації модернізованих об'єктів показав :

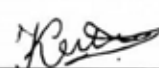
- підвищення ККД котлів з 88 до 95 %
- підвищення рівня безпечності роботи котельнь
- розширення робочого діапазону навантажень $K_p=10$
- стійку економічну роботу в широкому діапазоні потужності котла, особливо на часткових режимах.
- можливість ефективної роботи котла на низькому тиску газу ($P_r \leq 500$ мм вод. ст.)
- зниження витрат ел. енергії для приводу тягодуттьових пристроїв


- на 20-40%
- зниження рівня шуму від роботи пальників на 5-6 dbI
- відсутність перегріву елементів пального пристрою за рахунок самоохолодження газом і повітрям
- окупність модернізації котла за рахунок економії енергоресурсів від 6 до 12 місяці.

Голова комісії :


Г.Р. Дворцин

Члени комісії :


Ю.О Кулешов


С.О. Світан

УКРАЇНА
ГОЛОВНЕ УПРАВЛІННЯ ЖИТЛОВО-
КОМУНАЛЬНОГО ГОСПОДАРСТВА
ДОНЕЦЬКОЇ ОБЛАСНОЇ
ДЕРЖАВНОЇ АДМІНІСТРАЦІЇ
ОБЛАСНЕ
КОМУНАЛЬНЕ ПІДПРИЄМСТВО
«ДОНЕЦЬКТЕПЛОКОМУНЕНЕРГО»
83086, м. Донецьк, вул. Донецька, 38,
тел. (062) 334-14-60, факс (062) 304-62-95



УКРАИНА
ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ
ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОГО
ХОЗЯЙСТВА ДОНЕЦКОЙ ОБЛАСТНОЙ
ГОСУДАРСТВЕННОЙ АДМИНИСТРАЦИИ
ОБЛАСТНОЕ
КОММУНАЛЬНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«ДОНЕЦКТЕПЛОКОММУНЭНЕРГО»
83086, г. Донецк, ул. Донецкая, 38,
тел. (062) 334-14-60, факс (062) 304-62-95

від 26.01.2011 № 26/223

Інститут технічної теплофізики
НАН України
Директору
академіку НАН України
Долінському А.А.

Шановний Анатолію Андрійовичу!

Довожу до Вашого відома, що в обласному комунальному підприємстві «Донецьктеплокомуненерго» з 2007 року виконуються заходи щодо модернізації котлів типу КВГ-6,5 та ТВГ-8М з провадженням струменево-нішевої технології (пальники типу СНГ-33).

Досвід експлуатації модернізованих об'єктів показав високу економічну і екологічну ефективність застосування струменево-нішевої технології, а також більш високий рівень безпеки при роботі об'єктів зі встановленими на них пальниковими пристроями, підвищення ККД котлів з 88% до 93%.

Економія природного газу після впровадження заходу становить:

ВО «Шахтарськтепломережа»:

- котельня №1 (котел ТВГ-8М) – 63,3 тис.м3 на рік
- котельня №2 (котел ТВГ-8М) – 69,2 тис.м3 на рік;

ВО «Торезтепломережа»:

- котельня №8 (котел КВГ-6,5) – 50,4 тис.м3 на рік.

Економія енергетичних ресурсів на модернізованих об'єктах складає до 5% від їх споживання до модернізації.

Враховуючи позитивний досвід впровадження струменево-нішевих пальників на об'єктах теплопостачання, ОКП «Донецьктеплокомуненерго» під Вашим керівництвом розроблено «Регіональну програму модернізації комунальної теплоенергетики Донецької області», в яку внесені заходи щодо впровадження їх на котельнях теплозабезпечуючих підприємств Донецької області. Програмою передбачена заміна подових пальників, встановлених на котлах середньої потужності типу КВГ, ТВГ на струменево-нішеві.

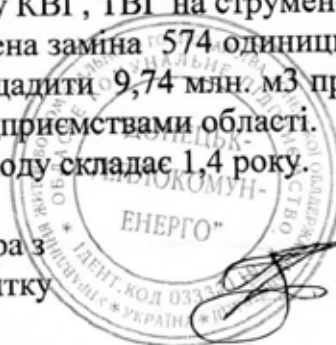
Всього по Програмі передбачена заміна 574 одиниць пальникових пристроїв. Заміна пальників дозволить заощадити 9,74 млн. м3 природного газу на рік або 0,9% від базової витрати газу підприємствами області.

Середній термін окупності заходу складас 1,4 року.

З повагою,

Заступник генерального директора з
інвестицій та стратегічного розвитку

В.М. Кучеренко





ЗАКРЫТОЕ
АКЦИОНЕРНОЕ
ОБЩЕСТВО

«Беличский завод
«ТЕПЛОЗВУКОИЗОЛЯЦИЯ»

08298, пгт. Коцюбинское, Киевской обл., ул. Пономарева, 7
Тел/факс (04497) 72-350

№ 6/365
от «20» 09 2006 г.

Руководителю программы
струйно-нишевая технология
Абдулину М.З.

Уважаемый Михаил Загретдинович!

В ответ на Ваш запрос, что впервые на нашем предприятии струйно-нишевая технология сжигания топлива (СНТ) была апробирована на печи плавки базальта № 3 в марте 2005 года при модернизации ее путем замены существующих горелочных устройств на ГУ СНГ-21 вашей разработки. Расход газа на данной печи до модернизации составлял 5,6 при отсутствии в продуктах сгорания химического недожога. После модернизации расход газа на печи составил 4,0 при сохранении той же тепловой загрузки на печь и, что особенно важно, при существенно улучшившемся качестве готового продукта.

После чего наше предприятие пошло на модернизацию остальных имеющихся печей плавки базальта. Такая модернизация была завершена в июне 2005 года. В результате средний расход газа на все печи снизился (при сохранении тепловой загрузки) на 40%.

В сентябре 2005 года была проведена модернизация нашего парового котла ДКВР-6,5, имевшего в составе 2 ГУ ГМГ. После модернизации котла 2-мя ГУ СНГ-33 удельный расход газа снизился на 45%. Кроме того, следует отметить, безопасный розжиг ГУ СНГ при давлениях газа на ГУ менее 5 мм.в.ст., широкий диапазон регулирования, постоянство к.п.д. котла на малых нагрузках, бесшумность работы, снижение вредных выбросов и многое другое.

Наше предприятие полностью перевело все свои топливноиспользующие объекты на струйно-нишевую технологию сжигания. В целом по предприятию за год экономия газа составила 200.000 м³.

Полученные на нашем предприятии результаты привели к массовому внедрению СНТ в нашей отрасли. На сегодняшний день СНТ применена более чем на 10 объектах. В том числе, и работающих в странах Евросоюза.

Председатель правления
ЗАО «Беличский з-д Теплозвукоизоляции»

Г.А. Медведев





ПРИВАТНЕ ПІДПРИЄМСТВО
ЩО ПОВНІСТЮ НАЛЕЖИТЬ ІНОЗЕМНОМУ ІНВЕСТОРУ
«ОВАС-цукор»

Вих № 4/15
дт - 07 2011 р.

Директору інституту
Інженерної теплофізики НАНУ
академіку Долинському А.А.

Шановний Анатолій Андрійович!

На Ваш запит щодо ефективності впровадження струменево-нішової технології спалювання природного газу на нашому підприємстві повідомляємо наступне.

У 2007 році на ТЕЦ нашого підприємства було здійснено модернізацію 4-ох парових котлів ДКВР-10/24 на основі струменево-нішової технології спалювання газу.

В результаті модернізації було отримано наступні результати:

1. Котел став розпалюватись легко без різких спалахів, починаючи з перепаду тиску газу на пальниковому пристрої 1-3 мм.рт.ст., що суттєво підвищило безпеку роботи котлоагрегатів.

2. Котли почали легко працювати в діапазоні навантажень від 10% до 130% потужності.

3. При роботі котлів на різних режимах практично відсутня шумова різниця в приміщенні котельні.

4. Значення всіх параметрів роботи котлоагрегатів, в тому числі температура перегрітої пари, знаходяться в необхідних межах.

5. Викиди CO та NOx в межах норми.

6. Економія природного газу в результаті модернізації склала близько 10% , що підтвердилось 4 роками експлуатації.

Головний інженер
ПП«ОВАС-цукор»



С.М.Дубарець
С.М.Дубарець

Україна
Житлово – комунальне об'єднання Нововолинської міської ради
КОМУНАЛЬНЕ ПІДПРИЄМСТВО "НОВОВОЛИНСЬКТЕПЛОКОМУНЕНЕРГО"
45400, Волинська область, місто Нововолинськ, вулиця Святого Володимира,3
Телефон / факс: (03344) 44657 Email: nvteplo@list.ru

23.02.2011р.

м. Нововолинськ

АКТ

Комісією, в складі головного інженера КП "Нововолинськтеплокомуненерго" Савченка М. Г., інженера-енергетика Троць М. М., в присутності представника "НВО СНТ" інженера-налагоджувальника Ткаченка А.Г. складено даний акт про те, що на котельні 26-го кварталу (нова) за адресою м. Нововолинськ, вул. СВ. Володимира, 5 було проведено модернізацію котла ТВГ-8М № 2 з встановленням струменево-нішових пальників СНТ-33.

До модернізації котла на виробництво однієї Гкал теплової енергії необхідно було затратити **138 м³** природного газу, після модернізації – **119 м³** природного газу.

Економія склала **19 м³** природного газу при виробництві однієї Гкал теплової енергії

Висновок : після модернізації котла ТВГ-8М з пальниками СНТ-33 економія природного газу склала **13,8 %** .



Головний інженер

М. Г. Савченко

Інженер-енергетик

М. М. Троць

Інженер-налагоджувальник "НВО СНТ"

А. Г. Ткаченко

УКРАЇНА
Комунальне підприємство
«МАКІЇВТЕПЛОМЕРЕЖА»
ідент код 31534547
86156, м.Макіївка Донецької обл.,
вулиця Лебедєва, 103Б/блок
DL-6619 9.0 05 08

**Руководителю программы СНТ
Абдулину М.З.**



ЛЬВІВСЬКА МІСЬКА РАДА
УПРАВЛІННЯ ІНЖЕНЕРНОГО ГОСПОДАРСТВА

ЛЬВІВСЬКЕ МІСЬКЕ КОМУНАЛЬНЕ ПІДПРИЄМСТВО

ЛЬВІВТЕПЛОЕНЕРГО

Україна 79000, м. Львів-МСП, вул. Данила Апостола 1, тел. (032) 267-31-31; факс: 297-07-43

23.01.07 № 06-163 На № _____ від _____

Керівнику НГЦ "Флогістон"
Абдуліну М.З.

Інформаційна записка

ЛМКП "Львівтеплоенерго" повідомляє, що палиник типу СНГ встановлений на нашому підприємстві у вересні 2006 року на котлі типу Е 1/9.

За час роботи та в результаті проведених пуско-налагоджувальних робіт палиники типу СНГ зарекомендували себе економічними, надійними і безпечними.

Для палиника типу СНГ характерне легке і надійне розпалювання при мінімально можливій витраті газу, стійке (безхлопкове) спалювання в широкому діапазоні регулювання навантаження палиника, надійність та простота регулювання режимів роботи, низький рівень шуму, високий ККД котла.

Аналіз економічності палиника дає підстави стверджувати, що його окупність не перевищує одного року.

Головний інженер

А.О.Кінаш

Торунь О.
229-30-38

Затверджую:

Генеральний директор
ТОВ «НВО «СНТ»
Піскун І.М.
М.П.

« » 2012 р.

Затверджую:

Головний інженер
КТП «Алчевсктаплокомуненерго»
ДПЧЕ Володажский В.М.



« » 2012 р.

м. Алчевськ

АКТ

порівняльних випробувань котлоагрегату ПТВМ -100 ст.№2, встановленого в котельні
КТП «Алчевсктаплокомуненерго», вул. Сарматська, 7.

В грудні 2011р. в котельні КТП «Алчевсктаплокомуненерго», на котлоагрегаті ПТВМ ст. № 2 проводилися роботи по заміні існуючих пальникових пристроїв на нові пальникові пристрої СНТ-44. В грудні 2011р. на вказаному котлі були проведені пуско-налагоджувальні роботи. Котел виведено на робочі режими з оптимальними еколого-теплотехнічними показниками.

При роботі котла з пальниковими пристроями СНТ та тепловому навантаженні близькому до 29 Гкал були отримані такі результати:

1. Теплопродуктивність по прямому балансу складала 29,5 Гкал;
2. Витрата газу по існуючому приладу складала 3787 м³/год

питома витрата умовного палива на виробництво 1 Гкал склала 147,6 кг/Гкал.

При роботі котла з існуючих пальниковими пристроями та тепловому навантаженні близькому до 26 Гкал були отримані такі результати (фотографія «роботи» котла):

1. Теплопродуктивність по прямому балансу складала 25,87 Гкал;
2. Витрата газу по існуючому приладу складала 3630 м³/год

питома витрата умовного палива на виробництво 1 Гкал склала 161,4 кг/Гкал.

Встановлення пальникових пристроїв СНТ призвело до зниження витрати газу на виробництво 1 Гкал на 8,5%.

Начальник відділу наладки ТОВ «НВО «СНТ»

Головний енергетик

Порхун С.Ф.



УКРАЇНА
ДОНЕЦЬКА ОБЛАСНА ДЕРЖАВНА АДМІНІСТРАЦІЯ
ГОЛОВНЕ УПРАВЛІННЯ МІСТОБУДУВАННЯ, АРХІТЕКТУРИ ТА
ЖИТЛОВО-КОМУНАЛЬНОГО ГОСПОДАРСТВА

83000, м. Донецьк, вул. Університетська, 13, Тел.: (062) 304-42-75, Факс: (062) 305-41-80
E-mail: ugkh@donoda.gov.ua

07.02.06 № *06/78*
На № _____ від _____

Керівнику програми
“Струменево-нішові технології”
Абдуліну М.З.

Інформація
про результати впровадження струменево-нішових
пальників (СНГ) на опалювальних котельнях Донецької області

Головне управління приділяє велику увагу ефективному використанню газу у системі комунальної теплоенергетики області. За період з 2002 року на теплопостачальних підприємствах пальниками СНГ обладнано біля 40 котлів типу ПТВМ, ДКВР, ТВГ, КВГМ, НІСТУ-5 у містах Донецьк, Горлівка, Красноармійськ, Макіївка, Слов'янськ.

Чотирирічний досвід експлуатації характеризує струменево-нішову технологію з позитивного боку, має місце:

1. Стійка робота котла по всіх діапазонах навантажень.
2. Упорядкована аеродинамічна структура руху газу і повітря підвищує безпеку виключаючи “хлопки” і “зриви” факелу.
3. Підвищення середнього рівня температури в топці до нормативної приводить до значної загрузки радіаційних поверхень нагріву котла і тягне за собою зниження температури відходящих газів на 50-60⁰С, і, відповідно, підвищення ККД на 7-8%. Ефективність роботи висока, незалежно від ступеню загрузки котла.
4. Практично повне спалювання газу забезпечую відмінні екологічні показники відходящих газів.
5. До 40% навантаження пальника може працювати без дутьєвого вентилятора, що дає значну економію електроенергії.
6. При аварійно низьких тисках в газопроводі СНГ працює однаково стійко та ефективно, тоді як при штатних - персонал котельної може забезпечити роботу тільки на “байпасі” або здійснює його зупинку.

Характерним прикладом всебічної ефективності впровадження вказаних пальників є котельня мікрорайону №2 Пролетарського району м.Донецька.

Підприємство не мало змоги забезпечити нормальну експлуатацію котла через низький тиск газу, особливо в зимовий період. Хронічно не витримувався температурний графік. Від населення мікрорайону (біля 40тис.) надходили численні скарги на якість опалення та гарячого водопостачання. Як слідство, мав місце низький рівень оплати послуг теплопостачання. Через недотримання режиму роботи передчасно виходили зі строю котли, на відновлення яких було втрачено біля 1 млн.грн.

Оснащення котлів струменеві-нішовими пальниками дозволило вирішити всі перелічені проблеми. Більш того у порівнянні з опалювальним періодом 2002-2003 років збір з населення за послуги опалення збільшився з 2,7 млн.грн. до 3,7 млн.грн. за рахунок відсутності перерахунків за неякісне теплопостачання, тобто витрат на впровадження пальників СНГ (510тис.грн.) окупилися двічі.

При цьому, якщо урахувати економію газу до 10% та економію електроенергії, поліпшення умов експлуатації котлів (як наслідок, збільшення терміну служби у 2-3 рази), то економічний ефект від впровадження пальників на котельні буде значно вище.

Головне управління підтримує необхідність виконання подальшої науково-дослідної розробки "Розробка струменово-нішової технології спалювання палива на вогнетехнічному устаткуванні різноманітного призначення" і подальше впровадження пальників типу СНГ на опалювальних котельнях.

Начальник головного управління



О.О.Кривобородов

Толмачів 304-78-31

КОММУНАЛЬНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
« СЕВТЕПЛОЭНЕРГО »
СЕВАСТОПОЛЬСКОГО ГОРОДСКОГО СОВЕТА

9011, г. Севастополь, ул. Павличенко, 2
расчётный счёт № 26007945206831 в СФ АКБ УСБ
ОКПО 03358357 Свид. № 39520105, инд. № 033583527024

тел./факс (0692) 54-59-64
тел. (0692) 54-26-37
e-mail: sevteploenergo@sevsky.net

02.08.08 исх. № 100

Научному руководителю
НТЦ «Флогистон»
Абдулину М.З.

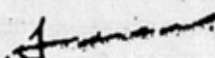
Информация

В период 2004-2005г.г. на районной котельной в бухте Камышовой котлы ПТВМ-30ме были оборудованы горелочными устройствами нового типа СНГ, реализующие струйно-нишевую технологию сжигания газообразного топлива. По результатам эксплуатации можно сделать вывод об улучшении экологических показателей, повышении уровня безопасности, повышении эффективности использования топлива.

Особое внимание следует уделить возможности работы котлоагрегатов как на среднем так и на низком давлении природного газа, что особенно актуально для этой котельной. Впервые за 20 лет работы котельная смогла вырабатывать тепло в зимние месяцы в периоды резкого падения давления газа при температуре наружного воздуха $-15 + -20^{\circ}\text{C}$.

Примерный срок окупаемости составит 12 месяцев.

Директор

 Андреев М.Б.

Утверждаю:

Директор

ОАО «Одесская ТЭЦ»

Донченко И.С.



Утверждаю:

Генеральный директор

ООО «НПО «СНТ»

Доманский И.Н.



АКТ

о проведения сравнительных испытаний котлоагрегата ТП – 170 ст № 6 установленного в котельной
ОАО «Одесская ТЭЦ»

Комиссией в составе:

от ОАО «Одесская ТЭЦ»

технический директор

начальник КТЦ

начальник ПТО

Шенгелевич А.И.,

Ладо А.А.,

Мединская Е.В.,

от ООО «НПО «СНТ»

технический директор

начальник отдела наладки

ведущего инженера-наладчика

Доманский О.В.,

Порхун С.Ф.,

Ткаченко А.Г.

был произведен анализ работы котлоагрегата ТП-170 ст. №6 после замены штатных горелочных устройств на горелочные устройства нового поколения – СНТ в марте – апреле 2009 года.

Розжиг котлоагрегата с горелочными устройствами СНТ происходит плавно, без хлопков, на минимальных расходах газа при давлениях газа близких к 0 мм. в. ст.

По данным предоставленными ПТО ОАО «Одесская ТЭЦ» получены такие результаты:

1. При работе котлоагрегата с 10 по 13 апреля 2008 года на штатно установленных горелочных устройствах выработка пара составила 9242 тонны. Потребление газа при этом, согласно коммерческого узла учета, составило 873968 м³. Исходя из этого потребление газа на выработку 1 тонны пара составило: 94,57 м³.
2. При работе котлоагрегата с 14 по 16 ноября 2009 года на горелочных устройствах СНТ выработка пара составила 11194 тонны. Потребление газа при этом, согласно коммерческого узла учета, составило 1002273 м³. Исходя из этого потребление газа на выработку 1 тонны пара составило: 89,54 м³.

Выводы: Применение горелочных устройств СНТ позволило снизить расход газа на выработку 1 тонны пара на 5,62 %, повысить безопасность розжига котлоагрегата.

Рекомендации: Для повышения эффективности работы котлоагрегата и снижения вредных выбросов в атмосферу необходимо устранить присосы воздуха в топку и газоходы. Провести ревизию воздухоподогревателя. Провести балансировку тяго-дутьевых средств котлоагрегата. Восстановить линию рециркуляции дымовых газов.

От ОАО «Одесская ТЭЦ»

Технический директор

Начальник КТЦ

Начальник ПТО

От ООО «НПО «СНТ»

Технический директор

Начальник отдела наладки

Шенгелевич А.И.

Ладо А.А.

Мединская Е.В.

Доманский О.В.

Порхун С.Ф.



ЧЕРНІГІВСЬКА ОБЛАСНА ДЕРЖАВНА АДМІНІСТРАЦІЯ
УПРАВЛІННЯ ЖИТЛОВО-КОМУНАЛЬНОГО ГОСПОДАРСТВА
14000, м. Чернігів, вул. Преображенська 12, тел. 7-08-10, факс 7-45-37

“03” 07 2002 р. № 01-02/573
На № _____ від _____

С п р а в к а

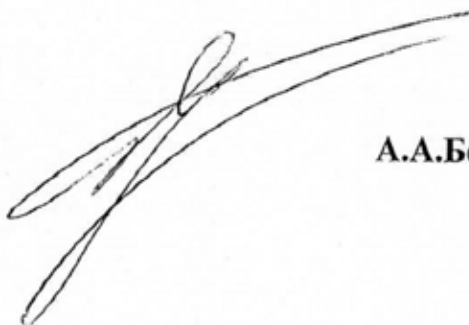
В настоящее время Управление жилищно-коммунального хозяйства Черниговской облгосадминистрации проводит широкомасштабные работы по модернизации котлоагрегатов (как паровых так и водогрейных) с целью повышения КПД и снижению вредных выбросов в окружающую среду.

Для решения этих задач было выбрано горелочное устройство разработки НТЦ “Флогистон” типа СНГ. Данные горелочные устройства хорошо зарекомендовали себя на котлах как с двухсветными экранами так и без, при этом позволили достичь ниже перечисленных результатов :

- возможности работы котлов на низких давлениях газа при малой чувствительности к колебаниям давления в сети;
- отказ от вентиляторов большой мощности и в отдельных случаях возможность работы на самотяге;
- работа горелок с коэффициентом избытка воздуха $\alpha = 1,05 \div 1,10$, что до 1,5 раз ниже, чем реальные α при использовании существующих горелок;
- снижение количества воздуха через котел;
- повышение радиационного теплообмена в зоне горения;

- снижение температуры уходящих газов на 20-50°C;
- повышение КПД котла от 3 до 10%;
- благодаря повышенной эффективности работы на частичных нагрузках и высокому коэффициенту регулирования ($K_p = 20$), достигается значительная экономия топлива (10-15%) во всем диапазоне нагрузок котлов;
- значительное снижение затрат электроэнергии за счет отказа от первичного воздуха высокого давления и уменьшение объема продуктов сгорания;
- увеличение межремонтного периода котла в 2-3 раза за счет равномерного распределения температур в объеме топки.

Начальник управления



А.А.Бельский

АКТ
сравнения характеристик работы обжиговой машины КМ-14 №2 (ГУ СНТ)
с работой обжиговых машин КМ-14 №1, 3, 4 (штатные ГУ)
аглофабрики ЧАО «ММК им. Ильича»

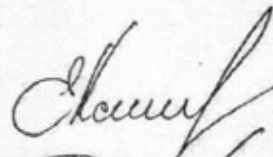
«02» октября 2017 г.

Настоящий акт составлен в том, что в период с 18.09.2017 по 22.09.2017 на машине КМ-14 №2 специалистами аглофабрики совместно со специалистами СНТ были проведены пусконаладочные работы (ПНР) на машине КМ-14 №2 после ее модернизации путем замены горна и штатной горелки с полупредварительным смешением на шесть горелочных устройств (ГУ), реализующих струйно-нишевую технологию сжигания газообразного топлива.

В результате проведения ПНР машина КМ-14 №2 выведена на штатную производительность с сохранением качества готового продукта. При этом расход потребляемого газа снижен примерно в 2 раза по сравнению с состоянием до модернизации и в сравнении с расходами не модернизированных машин и составил $120\div 130\text{ м}^3/\text{ч}$ против $245\div 270\text{ м}^3/\text{ч}$ на штатном ГУ. Во время ПНР скорость движения ленты и толщина слоя на всех машинах КМ-14 поддерживались идентичными.

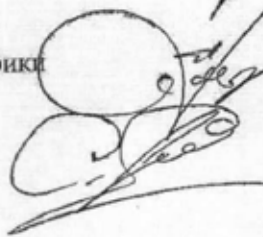
От аглофабрики ЧАО «ММК им.Ильича»:

Директор по аглодоменному производству –
Начальник аглофабрики



Е.А. Капшаров

Первый заместитель начальника аглофабрики



А.Е. Турбаба

Зам. начальника а/ф по инжинирингу

С.Е. Савинкин

От «Струйно-нишевая технология»:

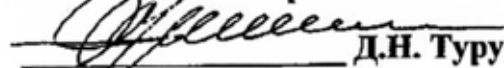
Технический руководитель программы СНТ



Г.Р. Дворцин

Директор по развитию

Н.Н. Чувашов

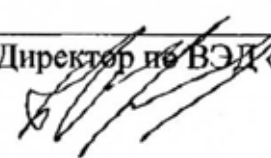
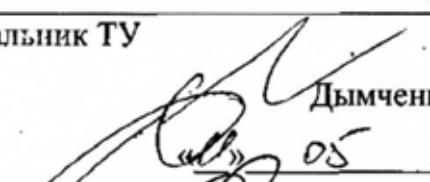
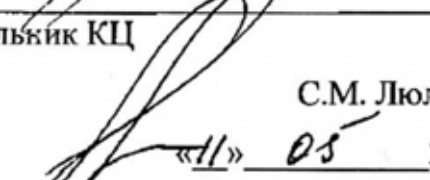

УТВЕРЖДАЮ:
Главный инженер ОАО «ЕМЗ»

Д.Н. Турунов
« 11 » 05 2010 г.
АКТ

о достигнутых результатах снижения расхода природного газа при внедрении СНТ на ГУР №4 КЦ ОАО «Енакиевский металлургический завод»

В результате выполнения работ по модернизации горизонтальной установки №4 для разогрева стальной ковшевой конверторного цеха ОАО «ЕМЗ» на основе струйно-нишевой технологии сжигания топлива (СНТ) по Договору № 80703/1-М достигнуто снижение расхода природного газа.

Достигнутая экономия потребления природного газа при разогреве стальной ковшевой на объекте оценивается на уровне 20,7 % (Протоколы совещаний по оценке эффективности внедрения СНТ от 29.12.09, 13.01.10 и 16.01.10, заключение Института технической теплофизики НАН Украины №267-06/01-10 от 30.04.10г.).

При этом в результате внедрения СНТ обеспечивается достаточный уровень разогрева при соблюдении необходимой равномерности температур днища и боковой поверхности ковшевой.

<u>От «НПО «СНТ»</u>	<u>От ОАО «ЕМЗ»</u>
Директор по ВЭД «НПО «СНТ»  П.П. Романов « 11 » 05 2010 г.	Зам. главного инженера по энергетике С.Д. Тайферов « » 2010 г.
	Начальник ГУ  Дымченко Е.Н. « 11 » 05 2010 г.
	Начальник КЦ  С.М. Люльчак « 11 » 05 2010 г.
	Начальник УЭТ с замещением:  И.В. Мурадян « 11 » 05 2010 г.



ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор з питань експлуатації
та технічної політики
ДК «Укртрансгаз»


І.В.Лохман
2006 р.

ПРОТОКОЛ
засідання приймальної комісії з питань розробки,
випробувань та впровадження струменево-нішових
пальників газу для підігрівачів газу

19 липня 2006 р.

м.Фастів

Комісія призначена наказом ДК «Укртрансгаз» від 12.01.04 р. за № 8 у складі:

Голова комісії -

Дрогомирецький М.М. - начальник управління експлуатації
магістральних газопроводів і
ГРС ДК «Укртрансгаз»

Члени комісії:

- | | |
|-----------------|--|
| Єгоров В.В. | - заступник начальника управління енергетики; |
| Педько Б.І. | - начальник управління науково-технічного прогресу; |
| Морозенко В.Г. | - начальник управління охорони праці, технічного нагляду та пожежної безпеки; |
| Семенов О.А. | - начальник управління раціонального використання ресурсів та екології; |
| Прищепо О.О. | - начальник управління організації обліку і нормування паливно-енергетичних ресурсів; |
| Опанасенко М.І. | - начальник відділу раціонального використання та обліку газу на технологічні потреби ОДУ «Укртрансгаз»; |
| Коваль Р.І. | - начальник відділу раціонального використання ресурсів та екології УМГ «Львівтрансгаз»; |
| Багрій Д.П. | - начальник служби КВП і А та метрології Бібрського ЛВУМГ УМГ «Львівтрансгаз»; |

З Вважати за необхідне: ВАТ «Факел», НТУУ «КПІ», «НДПАСУтрансгаз» до 1 жовтня 2006 року підготувати до дослідно-промислової експлуатації модернізованого підігрівача «Факел» ПГ-5 з струменово-нішовим пальником СНГ і системою автоматичного керування підігрівачем газу СКП-М на одній з ГРС ДК «Укртрансгаз».

Голова комісії

М.М.Дрогомирський

Члени комісії:

В.В.Єгоров

Б.І.Недько

В.Г.Морозенко

О.А.Семенов

О.О.Прищепо

М.І.Опанасенко

Р.І.Коваль

Д.П.Багрій

В.В.Вільчанський

А.О.Максименюк

А.М.Жученко

М.З.Абдулин

В.Б.Яблонський

Л.С.Бутовський

Додаток до протоколу попередніх приймальних випробувань зразка струменево-нішового пальника СНГ на підігрівнику „Факел ПГ-5”.

На вимогу протоколу від 30.12.04, додаткової угоди № 3 від 30.12.2005р. до договору № 11-447 (15/2.049) від 23.05.03р. та листа № 8021/16 від 06.07.2006 на ВАТ „Факел” проводились попередні приймальні іспити пальника СНГ на підігрівнику „Факел ПГ-5”. (До цього попередні випробування були проведені 01.06.05, 07.07.05, 12.07.05, 15.09.05)

Іспити проводились по затвердженій програмі і методиці проведення попередніх випробувань дослідного зразка пальника СНГ на підігрівнику газу ПГ-5.

При випробуваннях проводились заміри:

- витрати газу, G_r ($\text{м}^3/\text{год}$), по лічильнику газу G4 і секундоміру;
- температури води в підігрівнику $T_{\text{вод}}$ ($^{\circ}\text{C}$), ртутним термометром;
- температури навколишнього повітря $T_{\text{пов}}$ ($^{\circ}\text{C}$), ртутним термометром;
- номінального тиску повітря перед пальником $P_{\text{пов}}$ (КПа), тягонапороміром ТНМП 52-М1;
- номінального тиску газу перед пальником P_r (КПа), напороміром НМП-52-М2-У3;
- барометричного тиску $P_{\text{бар}}$ (мм.рт.ст), барометром;
- змісту продуктів згоряння, концентрацію NO_x ($\text{мг}/\text{м}^3$), CO (р.р.м), O_2 (%), CO_2 (%), коефіцієнту надлишку повітря α , температури продуктів згоряння та коефіцієнту використання палива по приладу DELTA-2000 CD.

По результатах проведених випробувань було встановлено наступне:

1. розпал пальника СНГ відбувається надійно, без вібрацій, при витратах газу, приблизно 1-2 % від номіналу.
2. пальник СНГ в складі підігрівника ПГ-5 працює стабільно, без відриву факела в діапазоні навантажень по витраті газу від 1,1 до 12 $\text{м}^3/\text{год}$ при коефіцієнті надлишку повітря: $\alpha = 1,09 - 1,10$ при навантаженні $G_r = 5,0 - 12,0 \text{ м}^3/\text{год}$ і $\alpha = 1,15 - 1,2$ при навантаженні $G_r = 1,1 - 5,0 \text{ м}^3/\text{год}$.
3. тиск повітря перед пальником на максимальному режимі становив $P_{\text{пов}} = 0,15$ КПа.
4. тиск газу перед пальником на максимальному режимі становив $P_r = 1,0$ КПа
5. во всьому дослідженому діапазоні зміст CO в продуктах згоряння не перевищував 35 р.р.м., зміст NO_x не перевищував $80 \text{ мг}/\text{м}^3$.
6. споживана електрична потужність електродвигуна вентилятора не перевищувала 80 Вт.
7. коефіцієнт використання палива (η), пальника СНГ у складі підігрівника газу ПГ-5, на номінальних режимах складав не менш 97,3%.

Науковий керівник роботи НТУУ „КПІ”,
заступник завідуючого каф. ТЕУ Т АЕС



Абдулін М.З.

Начальник Управління експлуатації
МГ і ГРС ДК „Укртрансгаз”



Дрогомирецький М.М.



Беларускі дзяржаўны
канцэрн па нафце і хіміі

**АДКРЫТАЕ АКЦЫЯНЕРНАЕ ТАВАРЫСТВА
"ЛАКАФАРБА" Г. ЛІДА**

вул. Ігнатава, 71, 231300, г. Ліда,
Гродзенская вобласць
тэл./факс (0154) 52 27 55
эл. пошта: support@lidaikm.by

23.05.2014 № 5/к
На № _____ ад _____

Белорусский государственный
концерн по нефти и химии

**ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
"ЛАКОКРАСКА" Г. ЛИДА**

ул. Игнатова, 71, 231300, г. Лида,
Гродненская область
тел./факс (0154) 52 27 55
эл. почта: support@lidaikm.by

Директору
ООО «Химтермосинтезбел»
Слепиковскому И.В.
223053, Минская область, Минский
район, пос. Опытный,
ул. Центральная, 1 «Б»,
литер В2/к, комн. 8
тел/факс 8017-505 -33-73

О горелочном устройстве СНТ32-ВРАД

Горелочное устройство СНТ32-ВРАД установлено на печи сжигания промышленных стоков участка синтетических смол производства №1 ОАО «Лакокраска» вместо смесительной горелки и введено эксплуатацию с октября 2013 года. Благодаря использованию данной горелки экономия природного газа достигает до 25-35% от прежнего расхода, в зависимости от режима работы печи. На практике экономия достигается за счёт того, что факел пламени струйно-нишевой горелки более компактен чем у смесительной горелки и создаёт более высокую температуру непосредственно в зоне сжигания отходов, а не распределяется по всему объёму печи. Горелка работает стабильно, без отрывов и проскоков пламени. Возможно плавное регулирование расхода газа на горелку в широком диапазоне, что также позволяет экономнее расходовать природный газ. В связи с технологическими особенностями печи, кирпичная кладка которой подвержена разрушению агрессивной средой продуктов горения и сжигаемыми материалами, большое значение имеет установка горелки в горелочном камне. Монтаж горелочного камня прост благодаря наличию встроенной системы крепления анкерными болтами и присоединительному фланцу, выполненному специально для горелки. При этом размеры камня были заранее оговорены в зависимости от толщины футеровки печи. Учитывая уже имеющийся опыт, на предприятии устанавливается и в скором времени будет введено в работу ещё одно горелочное устройство СНТ32-ВРАД.

Старший мастер участка
газоснабжения энергоцеха
ОАО «Лакокраска»

А.Н. Бусько

Бусько А. Н.
8(029) 88 70 108

МІНІСТЕРСТВО АГРАРНОЇ ПОЛІТИКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ ПРОДОВОЛЬСТВА

Державний концерн спиртової та лікєро-горілочаної промисловості
(Концерн "У К Р С П И Р Т")

Україна, 01001, м.Київ, вул. Б. Грінченка, 1; тел. / факс 228-58-02

" 6 " ЛЮТОВО 2006 р.

E-mail: admin@ukrspirt.kiev.ua

№ 16 - 02 - 3 - 1 / 8

Керівнику проекту
"Струйно-щілина технологія"
НТЦ "Флогістон"
Абдуліну М.З.

З метою економії природного газу концерном "Укрспирт" (за пропозиціями підприємств) розроблено план впровадження енергозберігаючих технологій.

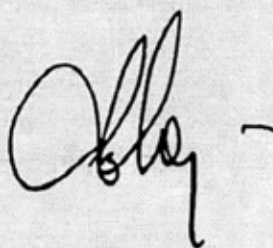
Одним із пунктів цього плану є впровадження цівково-нішевих пальників (СНГ 21...88), впровадження яких дає змогу зменшити витрату газу на 5-7 % на виробництво 1 Гкал. теплової енергії.

Станом на 1 січня 2006 року захід впроваджено на восьми підприємствах концерну.

У 2006 році планується впровадження на 27 підприємствах (Гайсинському, Мартинівському, Овечацькому, Бджільнянському, Триліському, Тхорівському, Брокському, Великолюбінському, Воютицькому, Гніздичівському, Лопатинському, Борщівському, Залозецькому, Зарубинському, Кобилівському, Ковалівському, Козлівському, Криківському, Чемерському, Наумівському, Новосуханівському, Стецьківському, Луцькому, Довжоцькому, Караванському, Зірненському, Шпанівському).

Термін окупності модернізації складає менше 1 року.

Перший заступник голови



В.В. Сосницький

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ПАО «Сумское НПО им. М. В. Фрунзе»



УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «НПО «Струйно-нишевая технология»



Акт

**Подтверждения экономической эффективности модернизации котла КВГМ-100 №4
на основе струйно-нишевой технологии
установленного в «КСПУ» ПАО «Сумское НПО им. М. В. Фрунзе»**

«20» декабря 2012 г.

В рамках совместно подготовленной программы сравнительных эколого-теплотехнических испытаний работы котла КВГМ-100 ст. №4 до и после модернизации, с целью определения экономической эффективности модернизации котла согласно п.9.7 договора №8/185 от 25.07.2011г., были проведены соответствующие испытания работы котла (программа прилагается). Замеры параметров работы котла до модернизации и после модернизации проводились соответственно 05.04.2011г. и 30.11.2012г. (акты проведения испытаний до модернизации и копия сводной ведомости из отчета по режимной наладке после модернизации к акту прилагаются). Измерения качества горения проводились переносным газоанализатором TESTO 330-1LL (свидетельство о гос. поверке прилагается). Измерения параметров работы котла проводились на штатно установленных котловых приборах.

Измерения расходов газа до и после модернизации проводились по штатному коммерческому узлу учета газа.

Сравнение экономических показателей работы выполнено на 2-х сходных режимах, и указано в таблице №1 на стр.2

Из приведенного следует, что модернизация котлоагрегата на основе струйно-нишевой технологии позволила снизить удельный расхода газа на выработку ГКал тепла в среднем на 4,58%.

Справочно:

1. Средневзвешенный расход топлива после модернизации – 149,37 кг.у.т./Гкал;
2. Экономия топлива, при работе на режиме 92,7 % КПД (нагрузка 47 Гкал/час) составит $(154,05-149,37)/154,05= 3,03\%$
3. Экономия топлива, при работе на режиме 89,76 % КПД (нагрузка 74 Гкал/час) составит $(159,10-149,37)/159,10= 6,11\%$
4. Усредненная Экономия удельного расхода топлива по модернизированному котлу составит $(3,03+6,11)/2 = 4,58 \%$.

После модернизации КПД котла во всём диапазоне нагрузок отклоняется на 0,43%, а до модернизации диапазон отклонения составлял 4,6%. Наблюдается работа котла при более КПД во всех нагрузках.

Кроме того применение струйно-нишевых горелочных устройств в комплексе с установленными частотными преобразователями на дутьевых механизмах позволяет значительно сократить потребление электроэнергии от 25% до 50%.

Также следует отметить, что в результате модернизации добились улучшения эксплуатационных характеристик котла, таких как:

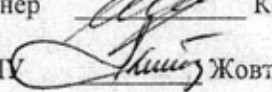
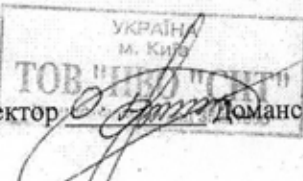
- безопасный, плавный розжиг;
- плавное изменение эксплуатационных нагрузок;
- расширенный диапазон регулирования рабочих нагрузок;
- увеличение уровня безопасности работы котла.

№ п/п	Наименование параметра	Единица измерения	2011 год - отчет			2012 год отчет				
			нагрузка %				нагрузка %			
			1-й режим	2-й режим	3-й режим	1-й режим	2-й режим	3-й режим	4-й режим	
			36	47	74	23	36	47	62	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Тепло										
1	Теплопродуктивность котла	Гкал/час	35,53	46,81	74,05	22,63	35,66	47,07	61,59	
2	Расход воды через котел	м3/час	1340	1340	1340	1393	1363	1391	1391	
3	Удельный вес воды (факт)	кг/м3	977	971,65	956	977,06	971,65	956	956	
4	Удельный вес воды (расчет)	кг/м3	917,8	917,8	917,8	917,8	917,8	917,8	917,8	
5	Массовый расход воды	тонн/час	1269	1265	1255	1291	1314	1303	1303	
6	Темпертура на входе в котел	С	44	44	45	45,8	49,7	49,8	50,2	
7	Темпертура на выходе из котла	С	72	81	104	65,1	78,2	87,1	97,6	
топливо										
1	Расход природного газа	м.куб./час	4671	6267	10239	2930	4600	6080	7980	
2	Теплотворная способность природного газа по сертификату	ккал/м.куб	8057	8057	8057	8090	8090	8090	8090	
3	Полученная теплота при 100% сжигании газа	Гкал/час	37,63	50,49	82,50	23,70	37,21	49,19	64,56	
Результаты газового анализа										
1	Содержание CO2	%	7,9	9,1	10,8	11,32	11,22	11,05	10,37	
2	Содержание O2	%	7,3	5,6	2,2	1,10	1,20	1,50	2,7	
3	Содержание CO	ppm	0,0	3,0	0,0	10,00	2,00	1,00	1	
5	Содержание NOx	ppm	70,0	90,0	128,0	107,00	129,00	145,00	164	
7	Коэффициент избытка воздуха α		1,53	1,36	1,11	1,15	1,08	1,06	1,06	
8	Температура дымовых газов	С	74	84	108	60,0	73,0	85,0	98	
Тепловой баланс котла										
1	Потери тепла с уходящими газами - q2	%	3,79	3,95	4,39	2,31	2,76	3,24	3,78	
2	Потери тепла с химическим недожогом - q3	%	0,001	0,001	0,001	0,00	0,00	0,00	0	
3	Потери тепла в окружающую среду - q5	%	1,79	3,35	5,85	2,22	1,41	1,07	0,82	
4	Сумма потерь	%	5,59	7,30	10,24	4,53	4,17	4,31	4,60	
5	КПД котла (прямой баланс)	%	94,41	92,70	89,76	95,47	95,83	95,69	95,40	
6	Удельный расход натурального топлива	кг/Гкал	131,41	133,84	138,23	129,42	128,94	129,13	129,52	
7	Удельный расход условного топлива	кг.у.т./Гкал	151,25	154,05	159,10	149,58	149,01	149,23	149,65	
8	Увеличение КПД брутто котла	%					1,50	3,23	6,25	
9	Экономия газа	%					1,88	3,52	6,36	
10	Экономия газа	кг/Гкал					2,23	4,82	9,41	

ПАО «Сумское НПО им. М.В. Фрунзе»

ООО «НПО «Струйно-нишевая технология»

Главный инженер  Козюля А.Д.

Директор КСПУ  Жовтобрюх Н.В. Технический директор  Доманский О.В.

2



ЕКАТЕРИНБУРГСКОЕ МУНИЦИПАЛЬНОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
ТЕПЛОВЫЕ СЕТИ

Адрес: Россия, 620085
Екатеринбург
ул. Агрономическая, 61а
Тел./факс: (343) 217-21-46
Директор: (343) 217-21-49

ИНН 6664033903 ОАО "Банк "Екатеринбург"
Расчетный счет: 40702810300030000481
Корр. счет: 30101810500000000904
ОКОНХ: 90215
ОКПО: 41728156
БИК: 046577904

Исх. № 1728
от «29» июня 2009 г.

Генеральному директору
ООО «УСК «Спецгазпром»
Г-ну Власову В.Н.

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ
О ВНЕДРЕНИИ СТРУЙНО-НИШЕВОЙ ГОРЕЛКИ СНГ-45
НА КОТЕЛЬНОЙ ЕМУП «ТЕПЛОВЫЕ СЕТИ» г. ЕКАТЕРИНБУРГ**

В 2008 году предприятие ЕМУП «Тепловые сети» выполнило работы по модернизации горелочного оборудования водогрейного котла ДЕВ-6,5 №1 котельной ЭР-2 по адресу ул. Бисертская, 132. Взамен штатно установленной горелки ГМ-7 в качестве горелочного устройства было принято решение установить на котле струйно-нишевую горелку СНГ-45 производства ООО «ЗПК «Спецгазпром» (Украина).

Главной задачей модернизации котла ставилось решение проблем последних лет связанных с затратами на топливо в летний и переходные периоды года, когда существующие возможности котлов не позволяли снизить нагрузку до минимальной. Эксплуатация котла в режиме включения-выключения нежелательна и приводит к снижению ресурса оборудования.

В мае 2008 года, после окончания режимно-наладочных работ (РНР) проведенных специалистами ООО «УСК «Спецгазпром» г.Екатеринбург, водогрейный котел ДЕВ-6,5 №1 был введен в эксплуатацию.

До модернизации согласно режимной карте работа котла №1 характеризовалась следующими параметрами: КПД в диапазоне нагрузок составлял 90,7-89,0%, диапазон регулирования от 28 до 82% от номинальной нагрузки. Фактически же котел не выдерживал установленные режимной картой параметры. Перед началом РНР сделанная «Фотография» работы котла показала, что КПД агрегата находится в диапазоне 85,2-86,3%. Максимально-возможная нагрузка котла составляла не более 49 %. Дальнейшее же увеличение нагрузки приводило к заклёстыванию факела в конвективную часть котла, что крайне нежелательно и приводит к перегару конвективных труб котловой части. Попытки работать на нагрузках ниже 30%, приводили к отрыву факела.

Установка горелки СНГ-45 повысила эффективность работы котла и возможности регулирования. Минимальная нагрузка котла составила 10% от номинальной нагрузки. Верхний уровень нагрузки котла составил 92%, при этом нет заклёстывания факела в конвективную часть котла. Учитывая короткий факел и большой угол его раскрытия происходит равномерное прогревание теплообменных поверхностей, в том числе и

фронтальной части котла. КПД котла был увеличен в целом на 3% при сопоставимых нагрузках с горелками ГМ-7. Низкое сопротивление горелки по воздуху позволило также снизить затраты на электроэнергию на привод дутьевого вентилятора.

В целом же, сопоставив данные по потреблению топлива котельной за 2007 год (с грелкой ГМ-7) и за 2008 год (с грелкой СНГ-45) в теплые месяцы (в период с июня по октябрь), экономия газа в среднем достигла 14%.

Задача обеспечения низких тепловых нагрузок была достигнута. Котел эксплуатируется больше года, успешно выполняя функции в переходные и летние периоды, а также отопительный период для сглаживания тепловых нагрузок. При этом можно отметить низкий уровень шума во всем диапазоне нагрузок, а также спокойный и надежный розжиг горелки.

В апреле-мае 2009 года на котел была установлена автоматика безопасности и регулирования агрегата на основе комплекта средств автоматизации производства «КБ АГАВА» г.Екатеринбург, что способствовало улучшению работы горелки.

Высокая эффективность использования топлива горелкой СНГ-45 на котле ДЕВ-6,5 и широкие возможности регулирования тепловых нагрузок привели к существенной экономии топлива, снижению себестоимости выработки тепловой энергии и, как следствие, к быстрой окупаемости вложенных в модернизацию средств – до 6 месяцев.

Внедрение струйно-нишевой горелки СНГ показало свою перспективность в использовании на водотрубных котлах данного типа и может быть рекомендовано к применению.

Технический директор

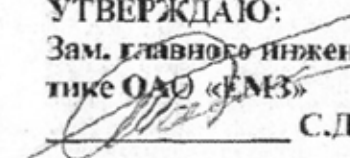
С.В.Жженых

Начальник котельной

А.В. Малых



УТВЕРЖДАЮ:

Зам. главного инженера по энергетике
ОАО «ЕМЗ»
С.Д. Тайферов

«30» 12 2009г.

Протокол

технического совещания по оценке применения СНТ для разогрева сталеразливочных ковшей на горизонтальной установке №4

«28» декабря 2009г.

г. Енакиево

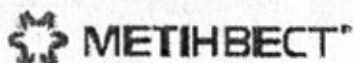
Присутствовали:от ОАО «ЕМЗ»: Тайферов С.Д., Мурадян И.В., Дымченко Е.Н.,
Куш С.В., Бутаков С.Г., Люльчак С.М.
от НПО «СНТ»: Абдулин М.З., Романов П.П., Ткаченко А.Г.**Обсуждали:**

На совещании рассмотрен массив данных по состоянию на 28. 12. 09г. разогреву сталеразливочных ковшей на горизонтальной установке №4 до проведения модернизации и после. Определены подходы для осуществления окончательной оценки экономической эффективности внедрения СНТ на установке.

Техническим управлением предоставлены обобщенные сравнительные данные разогрева сталеразливочных ковшей КЦ до и после модернизации установки.

1. По результатам разогрева 62 отобранных ковшей «с плавки на плавку» до проведения модернизации установки №4 средний расход газа, определенный по методике согласованной на прошлом совещании, составил 194,9 м³/ковш. В результате обработки трендов разогрева 29 отобранных ковшей «с плавки на плавку» после модернизации установки №4 средний расход газа составил 140,9 м³/ковш. Таким образом, предварительно отмечено снижение расхода природного газа на 54 м³/ковш (27,7%).
2. Со стороны специалистов КЦ не было предъявлено претензий к качеству разогрева стальной ковшей, разогревавшихся на основе СНТ.
3. Также на совещании представителями от ОАО «ЕМЗ» было высказано предложение выработать соответствующую методику и создать комиссию для определения равномерности разогрева стальной ковшей на ппчатных ГУ и на ГУ СНТ.

На основании вышеизложенного сделать окончательный вывод о результатах достижения экономического эффекта при внедрении СНТ на установке №4.



Приняты решения:

1. Определить комиссию в составе представителей ЦСИиТА, УЭСТ, ТУ, службы экономической безопасности, КЦ и НПО «СНТ» для определения результатов замеров.
2. Комиссии с 29-30 декабря т.г. при помощи переносного пирометра провести измерения равномерности нагрева футеровки по 8 точкам не менее 10 ковшей на установках №3 и №4.
3. По результатам полученных замеров составить акт, о равномерности разогрева футеровки сталеразливочных ковшей (днище, стены по всей высоте и диаметру).

От НПО «СНТ»:

Научный руководитель
программы «СНТ»

М.З.Абдуллин

От ОАО «ЕМЗ»:

Начальник ТУ

Е.Н. Дымченко

Начальник УЭСТ

И.В. Мурадян

Рішення науково-технічної ради Міністерства ЖКХ України


**МІНІСТЕРСТВО З ПИТАНЬ
ЖИТЛОВО-КОМУНАЛЬНОГО ГОСПОДАРСТВА УКРАЇНИ**

Рішення науково-технічної ради

26 10 2010 р. м. Київ № 16

Про впровадження вітчизняної енергозберігаючої струменево-нишової технології спалювання палива для модернізації котлів всіх типів різних потужностей виробництва ТОВ «НВО «Струменево-нишова технологія» на об'єктах житлово-комунального господарства

Розглянувши питання про впровадження вітчизняної енергозберігаючої струменево-нишової технології спалювання палива для модернізації котлів всіх типів різних потужностей виробництва ТОВ «НВО «Струменево-нишова технологія» на об'єктах житлово-комунального господарства науково-технічна рада

ВИРІШИЛА:

1. Схвалити впровадження вітчизняної енергозберігаючої струменево-нишової технології спалювання палива для модернізації котлів всіх типів різних потужностей виробництва ТОВ «НВО «Струменево-нишова технологія» на об'єктах житлово-комунального господарства.
2. Управлінню теплосергетики (О. М. Малежик) направити Міністерству житлово-комунального господарства АР Крим, обласним, Київській та Севастопольській міським державним адміністраціям інформаційні матеріали щодо впровадження вітчизняної енергозберігаючої струменево-нишової технології спалювання палива для модернізації котлів всіх типів різних потужностей виробництва ТОВ «НВО «Струменево-нишова технологія» на об'єктах житлово-комунального господарства з метою економії природного газу.
3. Управлінню нормотворчої та наукової діяльності розмістити інформацію ТОВ «НВО «Струменево-нишова технологія» на офіційній веб-сторінці Міністерства.
4. Контроль за виконанням рішення покласти на заступника Міністра С. Г. Зіміна.

Голова науково-технічної ради

 **О. Е. Хіврич**