

ЕНЕРГЕТИКА

УДК 662.951.23

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/15>

Абдулін М.З.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Куник А.А.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВПЛИВ ДОМІШОК ВОДНЮ НА РОБОТУ КОМБІНОВАНИХ СТРУМЕНЕВО-НИШЕВИХ МОДУЛІВ ПРИ СПАЛЮВАННІ ПРОПАН-БУТАНУ

У статті представлені результати дослідження впливу домішок водню (до 50%) на всі стадії робочого процесу струменево-нишевих комбінованих пальникових модулів. Основна увага приділена аналізу змін характеристик горіння, ефективності процесу та екологічних аспектів при використанні водневих паливних сумішей.

На багатьох енергетичних об'єктах передбачено використання декількох видів палива, наприклад, природного газу як основного та мазуту як резервного. Наразі максимальна ефективність вогнетехнічного об'єкта досягається при використанні основного палива, тоді як перехід на резервне або аварійне паливо супроводжується зниженням ефективності технологічних процесів. Зокрема, спостерігається погіршення стабільності горіння, зменшення коефіцієнта корисної дії (ККД) на кілька відсотків, скорочення міжремонтного періоду та підвищення екологічного навантаження на навколишнє середовище.

Тривають активні роботи зі створення комбінованих пальникових пристроїв, здатних з приблизно однаковою ефективністю спалювати два або більше видів палива без необхідності змінювати конструкцію при переході з одного виду палива на інший. Включення водню до складу паливних сумішей є перспективним напрямком для підвищення ефективності та екологічної безпеки процесу горіння, оскільки водень має високу реакційну здатність та сприяє покращенню характеристик паливної суміші.

У статті виконано порівняльний аналіз експериментальних даних, отриманих при спалюванні на модулях різної потужності та конфігурації чистого пропан-бутану і його сумішей з воднем різної концентрації (до 50% водню). Виявлено вплив домішок водню на низку параметрів горіння, включаючи довжину факела, рівномірність температурного поля, інтенсивність тепловиділення та загальну реакційну здатність палива.

Результати дослідження вказують на те, що введення водню у паливні суміші сприяє підвищенню ефективності процесу горіння, зменшенню утворення шкідливих викидів та поліпшенню стабільності факела. Отримані дані можуть бути використані для подальшої оптимізації конструкцій пальникових пристроїв та розробки рекомендацій щодо їх експлуатації при використанні різних типів паливних сумішей.

Ключові слова: воднева енергетика, комбіновані пальники, струменево-нишева технологія, універсальна технологія спалювання, пальники, екологічність, пропан-бутан, реакційна здатність.

Постановка проблеми. У зв'язку з енергетичною та екологічною кризою у світі стрімко зростає необхідність підвищення ефективності використання палива. З точки зору технологічних процесів, надійності та економічності, вигідно мати можливість у будь-який момент тимча-

сово перейти на інший вид палива. Вже довгий час існують пальникові пристрої, що здатні спалювати два або більше види палива (природний газ, пропан, бутан та інші низькорекційні види палива). Проте, актуальною залишається необхідність створення комбінованих пальникових при-

строїв, здатних спалювати два або більше видів палива без зміни конструктивних параметрів. Такі пальникові пристрої наразі розробляються на основі різних технологій спалювання, зокрема струменево-нишевої технології.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження топкових процесів вогнетехнічних об'єктів для різних палив розглядаються в роботах таких учених, як Христич В.О., Сорока Б.С., Сігал І.Я., Абдулін М.З., Сірий О.А. та інших.

На сьогоднішній день максимальна ефективність будь-якого вогнетехнічного об'єкта досягається при використанні основного палива. При переході на використання резервного палива погіршується ефективність технологічних процесів, знижується коефіцієнт корисної дії (ККД), зменшується міжремонтний період та збільшується екологічне навантаження на навколишнє середовище.

Пропан-бутан, у порівнянні з іншими резервними видами палива, має значний потенціал завдяки своїм експлуатаційним характеристикам, які близькі до природного газу. Він є більш екологічно чистим ніж рідкі та тверді види палива, як і всі газоподібні види палива, та легко піддається автоматизації процесу спалювання. Однак, порівняно з природним газом, пропан-бутан має вищу теплоту згорання і подібну низьку реакційну здатність. Його розвинена інфраструктура забезпечує доступність, швидку доставку та зручність у використанні. Крім того, ціна на пропан-бутан не прив'язана безпосередньо до цін на основні види палива, а корелює з ринком нафтопродуктів, що дозволяє закуповувати його у вигідні періоди.

Ці переваги стимулюють використання пропан-бутану разом із природним газом, якщо не як рівноцінного основного палива, то принаймні як резервного чи аварійного. Від вибору технології спалювання залежить ефективна робота пальникового приладу на обох видах палива. При розробці комбінованих пальникових пристроїв особлива увага приділяється таким експлуатаційним характеристикам:

1. Можливість роботи при мінімальних значеннях коефіцієнта надлишку повітря ($\alpha_{\min}$);
2. Повнота згорання (η_z);
3. Мінімальний аеродинамічний опір ($\Delta p_{\text{п}}$, $\Delta p_{\text{о}}$);
4. Відповідність екологічним нормативам (CO , NO_x);
5. Ефективна робота в широкому діапазоні робочих навантажень ($K_p > 6$).

Однією з найбільш ефективних технологій, що відповідає цим вимогам, є струменево-нишева технологія. Її ключовою особливістю є забезпечення рівномірного розподілу палива в потоці окиснювача та інтенсивної турбулізації потоку струменями, що створює унікальний механізм спалювання – мікродифузійне горіння. Цей процес є проміжним між дифузійним і кінетичним горінням, забезпечує високоінтенсивне та повне згорання за мінімально можливого коефіцієнта надлишку повітря.

Постановка завдання. Дослідження впливу домішок водню на ефективність, економічність і екологічну безпеку процесів горіння в комбінованих струменево-нишевих пальникових модулях для вдосконалення технологій спалювання на основі використання водневих паливних сумішей.

Метод досліджень. Метод дослідження – комп'ютерне моделювання структури течії (утворення зон зворотного току, концентраційних полів окиснювача та палива) в зоні стабілізації горіння струменево-нишевого модуля та системі модулів. Експериментальне дослідження всіх аспектів робочого процесу горіння в лабораторних умовах на експериментальному стенді зі змінними струменево-нишевими модулями.

Об'єкт досліджень. Теплофізичні процеси в пальникових модулях та пристроях на базі струменево-нишевих систем (паливоподача, сумішоутворення, займання і т.д.).

Предмет досліджень. Характеристики всіх аспектів робочих процесів струменево-нишевого пальникового пристрою, при почерговій роботі на різних видах палива.

Виклад основного матеріалу. Струменево-нишева технологія створювалася насамперед для спалювання природного газу. Проводяться роботи з адаптації струменево-нишевого пальника для роботи на мазуті, пропан-бутані, генераторному, доменному та коксовому газах [1].

Важливою перевагою струменево-нишевої технології є надзвичайно низькі критичні значення коефіцієнтів надлишку повітря ($\alpha_{\text{кр}} = 1,02\text{--}1,03$, нижче яких з'являються викиди CO_x через недопал, у порівнянні з іншими технологіями, де $\alpha_{\text{кр}} = 1,15\text{--}1,25$).

Фізико-хімічні властивості природного газу визначають геометричні параметри пальникових модулів (див. рис. 1) на основі струменево-нишевих систем: кількість ($n_{\text{отв}}$), діаметр ($\varnothing_{\text{отв}}$) та крок ($s_{\text{отв}}$) отворів для роздачі газу, а також площу перерізу (F) повітропроводу, відстань між модулями, коефіцієнт захаращення (K_F) тощо. Крім того, ці

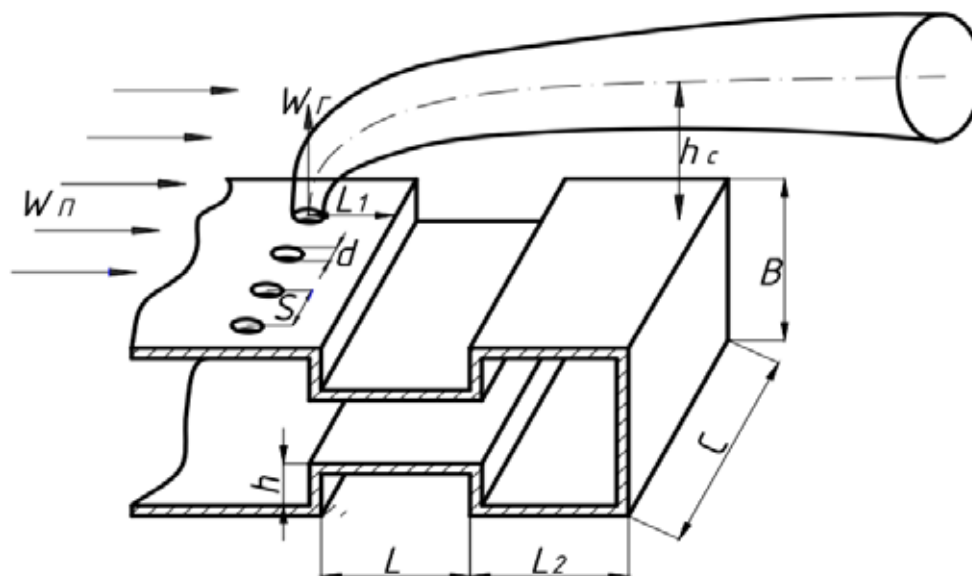


Рис. 1. Схема струменево-нишевого пальникового модуля – складової модульних пальникових приладів



а.)



б.)

Рис. 2. Спалювання пропан-бутану (а) та суміші пропан-бутану з воднем (б) на дослідному струменево-нишевому комбінованому модулі

властивості впливають на основні характеристики газорозподільної системи [2].

Аналіз літературних джерел вказує на те, що завдання спалювання різних видів палива в одному пальниковому пристрої є досить складним. Раціональним підходом є використання комбінованих пальникових пристроїв, які конструктивно та режимно налаштовані на граничні режими роботи для двох та більше видів палива, або застосування домішок водню для вирівнювання їх характеристик [3].

Потенційно перспективним рішенням є поєднання цих двох методів: попереднє зведення характеристик різних палив до схожих значень, шляхом домішування водню з наступним розра-

хунком конструктивних і режимних параметрів комбінованого пальникового пристрою.

Розпочато активну роботу над спалюванням водневих сумішей (див. рис. 2) із застосуванням струменево-нишевих пальникових модулів. Дослідження свідчать, що домішки водню здатні зближувати фізико-хімічні характеристики таких палив, як пропан-бутан і природний газ. Експериментальні дані демонструють, що струменево-нишева технологія ефективно забезпечує спалювання водневих паливних сумішей у широкому діапазоні масової концентрацій водню (до 50%) [4].

Струменево-нишеві пальникові прилади добре підходять до спалювання в них сумішей з воднем,

завдяки ефективності процесів перемішування палива та окиснювача, а також системі самоохолодження модуля, що попередньо підігрівас паливну суміш і т.д.

В рамках робіт по дослідженню комбінованих пальникових струменево-нишевих приладів, в лабораторії горіння НТУУ «КПІ» (див. рис. 3), визначалися оптимальні параметри струменево-нишевого комбінованого модуля при роботі як на природньому газі так і на пропан-бутані (та пропан-бутані з домішками водню) (див. табл. 1).

Важливою частиною експериментів є дослідження впливу домішків водню на емісію CO та NOx, довжину факелу, рівномірність температурного поля, а також реакційну здатність палива.

Порівняння проводилися на кількох варіантах струменево-нишевих комбінованих модулів, що за попередніми експериментами були визначені як найбільш ефективні для спалювання, як природного газу так і пропан-бутану. В таблиці (див. табл. 1) наводяться експериментальні дані найбільш ефективного модуля при максимальній тепловій потужності – 40кВт.

З графічного відображення результатів (див. рис. 4–5) видно, що струменево-нишеві комбіновані модулі забезпечують нижчі за нормативи викиди (при роботі на $\alpha \leq 2,5$). При цьому при додаванні водню до пропан-бутану фіксується значне зменшення викидів CO (як буде видно пізніше – через підвищення температури горіння), а викиди NOx зростають не настільки різким темпом і знаходяться в межах норми (не залежно від досліджуваного α)

Що стосується температурного поля, то як можна побачити з графіків (див. рис. 6–7) засто-

сування домішок водню, підвищує температуру факелу (та вихлопних газів) на всіх ділянках експериментального стенду. Цей ефект має більш значний на ділянках, що знаходяться ближче до модуля. Це зв'язано з тим, що домішки водню дещо скорочують довжину факелу, за рахунок швидшого вигорання палива.

Видно, що додавання домішок водню призводить до скорочення довжини факелу (див. рис. 8), це видно, по швидшому падінню рівню температури до рівня температури займання ($T_{\text{займ}} \sim 550^\circ\text{C}$). А також, по зниженню концентрації CO, що свідчить про те, що процес горіння палива вже закінчився.

Скорочення довжини факелу відбувається за рахунок кардинальної зміни структури факелу в струменево-нишевій системі. Завдяки домішкам водню розширюються межі факелу, за рахунок підпалу ділянок струменю з високою концентрацією паливної суміші, які раніше не займалися через низьку реакційну здатність пропан-бутану та природного газу (див. рис. 9).

Також помічено вплив домішок водню, на однорідність температурного поля не лише по довжині факелу, але й в поперечному розрізі. Що видно з графіку (див. рис. 10).

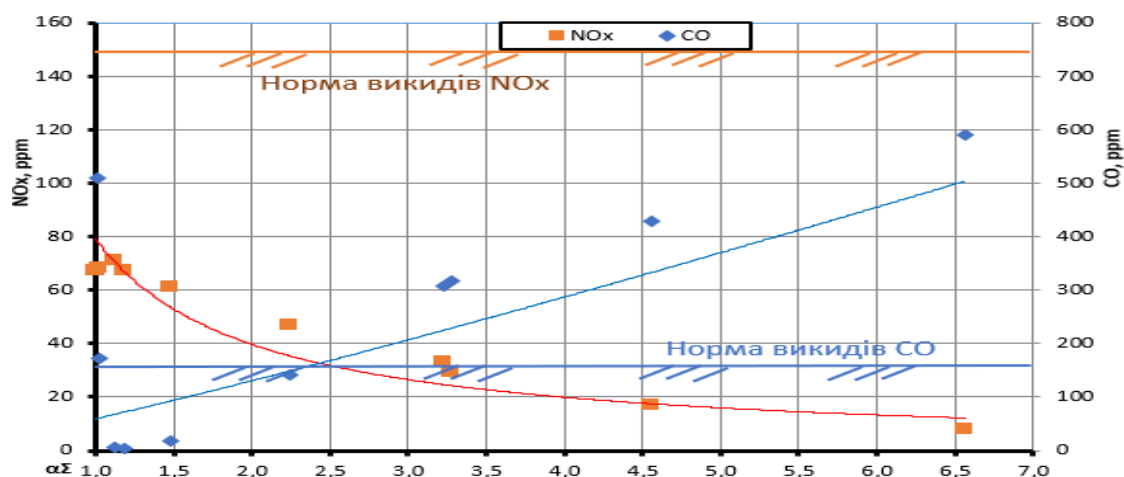
Висновки. Застосування домішок водню, є перспективним підходом до спалювання палив, особливо у випадку комбінованих пальникових приладів. За допомогою домішків водню, можна зменшувати теплотворну здатність більш висококалорійного палива, до рівня менш калорійного, зменшуючи при цьому коефіцієнт Воббе.



Рис. 3. Експериментальний стенд в лабораторії горіння НТУУ «КПІ»

Результати експериментальних досліджень струменево-нишевого модуля при роботі на пропан-бутані. Потужність модуля: 40 кВт

час		18:39	18:44	18:46	18:55	18:57	19:00	19:02	19:03	19:04	19:04
$t_{\text{проп}}$	°C	20	20,6	19,7	19,9	20,5	20,2	20,2	20,5	19,2	19,5
t_{air}	°C	20	20,2	20,2	20,6	20	20,2	20,2	20	20,5	20,2
t_{out}	°C	413	400	477	442	533	610	623	633	632	646
$t_{x=900}$	°C	452	433	515	497	593	690	723	735	745	755
$t_{x=700}$	°C	606	580	697	672	784	875	893	903	905	901
$t_{x=500}$	°C	857	812	949	690	1023	981	992	971	960	947
$t_{x=300}$	°C	1045	1000	1104	1096	1160	1147	1120	1106	1105	1086
$\Delta h_{\text{повітря}}$	мм	13	9	4	3	2	1,5	1,25	1,1	1	0,75
$h_{\text{повітря}}$	мм	50	40	30	20	10	10	10	9	8	7
$\Delta h_{\text{пропан}}$	мм	163	170	160	160	163	170	167	165	165	165
$h_{\text{пропан}}$	мм	240	260	250	235	235	245	240	240	240	240
Nox	ppm	8	17	33	29	47	61	67	71	67	67
CO	ppm	590	428	307	316	142	17	4	5	509	1212
O ₂	%	17,8	16,4	14,4	14,6	11,7	6,8	3,3	2,2	0,9	0,2
CO ₂	%	2	2,9	4,1	4,1	6	9,1	11,4	12,1	13,3	13,5
α		6,56	4,56	3,23	3,28	2,25	1,48	1,18	1,12	1,01	1
$\rho_{\text{проп}}$		2,11	2,11	2,11	2,11	2,11	2,11	2,11	2,11	2,12	2,11
$\rho_{\text{повітря}}$		1,199	1,197	1,195	1,193	1,194	1,193	1,193	1,194	1,192	1,193
W_{air}		6,52	5,43	3,62	3,14	2,56	2,22	2,03	1,90	1,81	1,57
$\Delta W_{\text{air} \rightarrow \text{га}}$	%	5,69	19,40	18,30	2,50	17,01	35,95	44,20	44,32	45,45	39,13
α		6,96	5,66	3,89	3,37	2,72	2,31	2,13	2,01	1,92	1,66
$\Delta \alpha$	%	6,03	24,07	22,40	2,56	20,50	56,13	79,20	79,59	83,32	64,28
N, кВт		19,54	19,95	19,34	19,36	19,56	19,95	19,78	19,67	19,63	19,64
W _{гс}		3,95	4,03	3,91	3,91	3,95	4,03	4,00	3,98	3,97	3,97
q		0,73	1,50	3,09	2,89	6,09	14,22	22,09	24,91	28,54	30,56

Рис. 4. Рівень викидів (NOx та CO₂) при спалюванні пропан-бутану на струменево-нишевому пальниковому модулі потужністю 40 кВт

Не залежно від того, чи пальниковий прилад є комбінованим, чи розрахований на один вид палива, застосування домішок водню призводить до:

1. Значне зниження викидів CO;
2. Скорочення довжини факелу (до 5%);
3. Підвищення реакційної здатності низькорекційних видів палива (більшість вуглеводнів).
4. Підвищення рівномірності температурного поля, як по довжині факелу так і в поперечному сеченні.

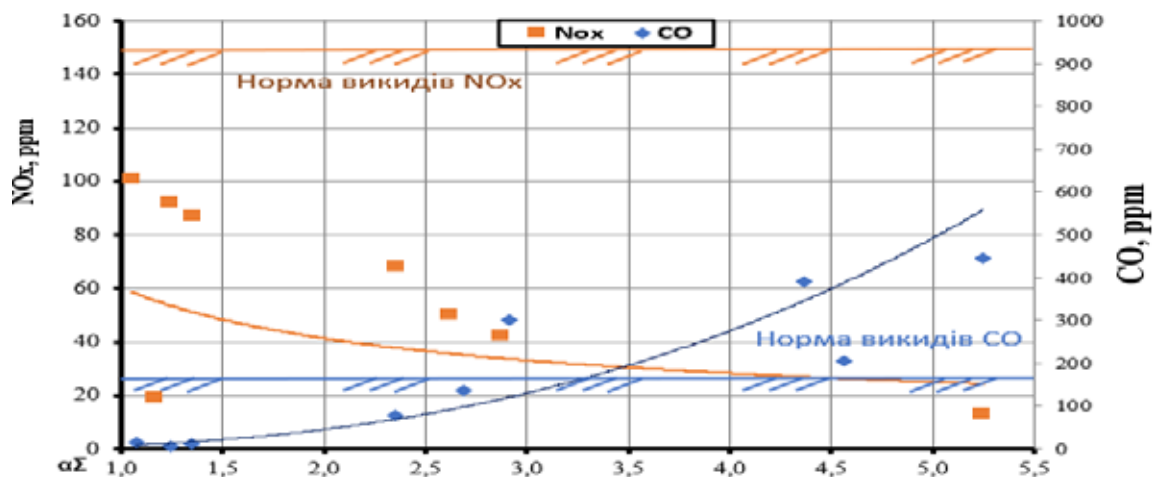


Рис. 5. Рівень викидів (NO_x та CO_2) при спалюванні пропан-бутану з домішками водню на струменево-нишевому пальниковому модулі

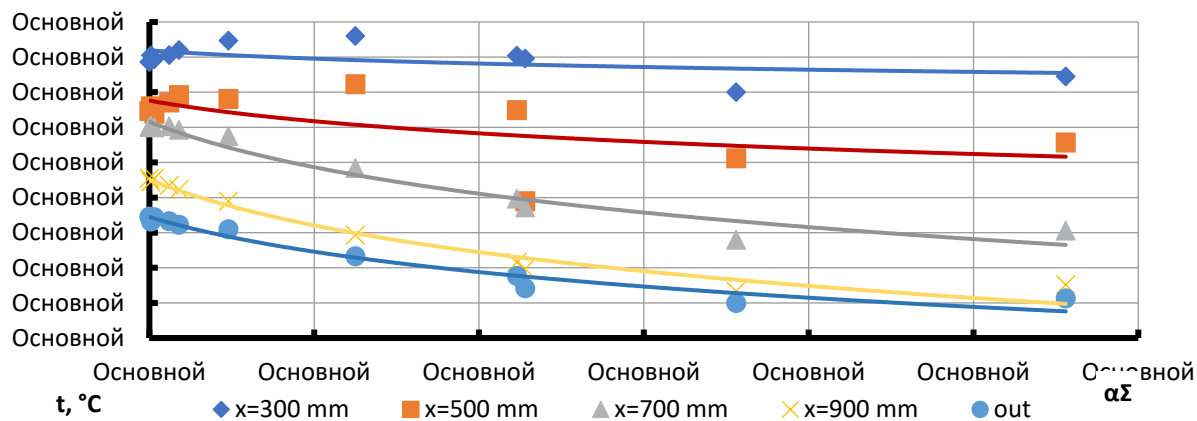


Рис. 6. Температура в різних участках робочої ділянки лабораторного стенду при спалюванні пропан-бутану

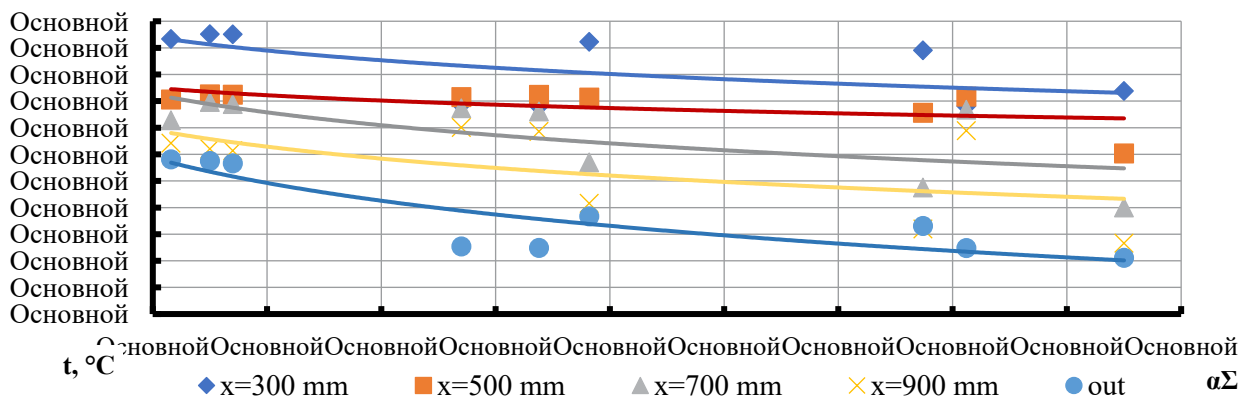


Рис. 7. Температура в різних участках робочої ділянки лабораторного стенду при спалюванні суміші пропан-бутану та водню

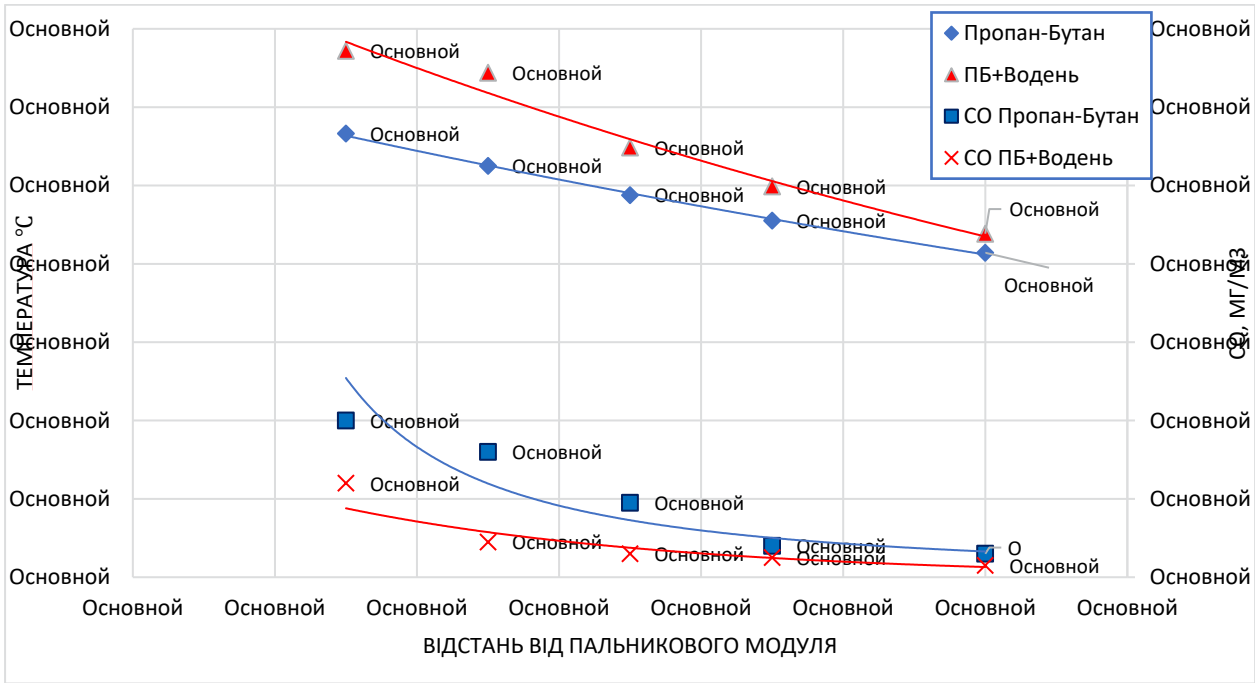


Рис. 8. Довжина факелу струменево-нишевого комбінованого пальникового модуля при роботі на пропан-бутані та його суміші з воднем

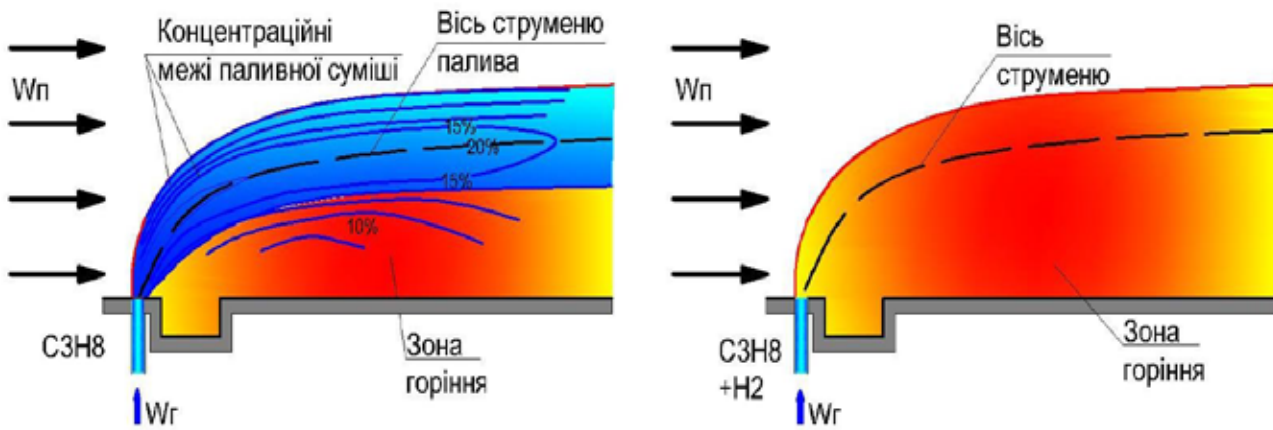


Рис. 9. Вплив домішок водню на структуру факелу

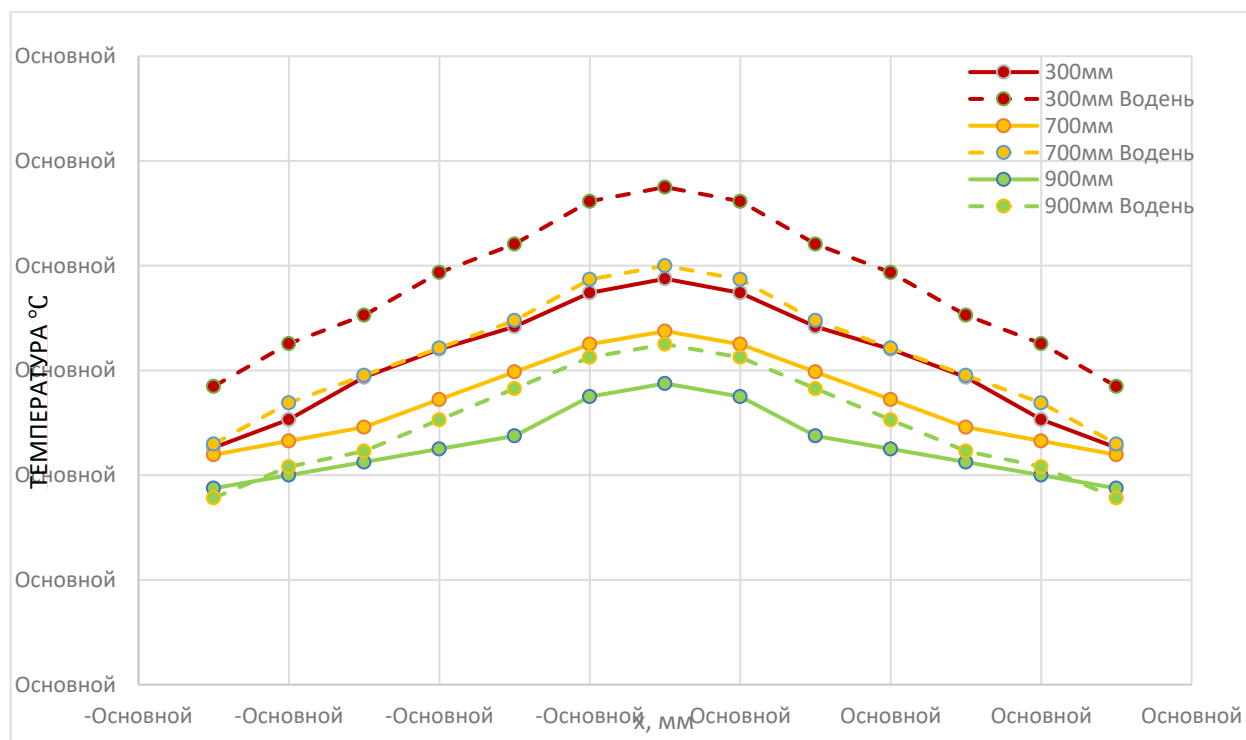


Рис. 10. Вплив домішок водню на температурне поле в поперечному січені робочої ділянки лабораторного стенду

Список літератури:

1. Куник А.А., Абдулін М.З. Шляхи створення універсальних та комбінованих пальникових приладів. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки Том 34 (73) № 5 2023 стр. 289-294 <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/44>
2. Фіалко Н. М., Шеренковський Ю.В., Майсон М.В., Абдулін М.З., Бутовський Л.С., Полозенко Н.П., Стрижеус С.М., Єніна А.О., Тимошенко О.Б. Математичне моделювання процесів сумішоутворення в пальниковому пристрої з циліндричним стабілізатором полум'я Мат. XXIII міжн. конф. «Проблеми екології і експлуатації об'єктів енергетики», Київ, 2013. – с. 149-152.
3. Абдулін М.З., Куник А.А., Сірій О.А. Підвищення реакційної здатності природного газу та пропан-бутану. Збірник праць: "Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики" Київ, 2023 р.
4. Сірій О.А., Кобилянська О.О., Шляхи покращення сталості горіння в стабілізаторних елементах прямооточних пальникових систем, Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні Науки, том 34 (73) № 5 2023 <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/47>
5. Абдулін М.З. Тепловий режим елементів мікродифузійного газогорілочного пристрою. М.З. Абдулін, Ібрагім Джамал. Наукові вісті НТТУ «КПІ», серія теплоенергетика. – 1997. – С. 111-113.

Abdulin M.Z., Kunyk A.A. INFLUENCE OF HYDROGEN ADMIXTURES ON THE OPERATION OF COMBINED JET-NICHE MODULES DURING PROPANE-BUTANE COMBUSTION

The article presents the results of a study on the impact of hydrogen additives (up to 50%) on all stages of the working process of jet-slot combined burner modules. The primary focus is on analyzing changes in combustion characteristics, process efficiency, and environmental aspects when using hydrogen fuel mixtures.

Many energy facilities are designed to use multiple types of fuel, such as natural gas as the primary fuel and fuel oil as a backup. Currently, maximum efficiency at a fire-technical facility is achieved when using the primary fuel, whereas switching to backup or emergency fuel leads to a decline in technological process efficiency. Specifically, there is a deterioration in combustion stability, a decrease in thermal efficiency (by several percentage points), a reduction in the inter-maintenance period, and an increase in environmental impact.

Active research is ongoing to develop combined burner devices capable of burning two or more types of fuel with approximately the same efficiency without requiring structural modifications when switching between fuel

types. Incorporating hydrogen into fuel mixtures is a promising approach to improving combustion efficiency and environmental safety, as hydrogen has high reactivity and enhances the characteristics of the fuel mixture.

The article provides a comparative analysis of experimental data obtained from combustion in modules of different power levels and configurations using pure propane-butane and its mixtures with hydrogen at varying concentrations (up to 50% hydrogen). The study identifies the effects of hydrogen additives on several combustion parameters, including flame length, temperature field uniformity, heat release intensity, and overall fuel reactivity.

The research results indicate that adding hydrogen to fuel mixtures enhances combustion efficiency, reduces harmful emissions, and improves flame stability. The obtained data can be used for further optimization of burner device designs and the development of operational recommendations for different types of fuel mixtures.

Key words: hydrogen energy, combined burners, jet-niche technology, universal combustion technology, burners, environmental friendliness, liquified petroleum gas, reactivity.