

**ВЗАЄМОЗАМІННІСТЬ ГОРЮЧИХ ГАЗІВ
ПРИ ВИКОРИСТАННІ ВОДНЮ**

**INTERMISSIBILITY OF COMBUSTIBLE GASES
WHEN USING HYDROGEN**

Колієнко А. Г., кандидат технічних наук, професор кафедри
теплогазопостачання, вентиляції та теплоенергетики

*Національний університет «Полтавська політехніка
імені Юрія Кондратюка», Україна*

Koliienko A. G., PhD, Professor at the Department for Heat and Gas Supply,
Ventilation and thermal power industry

National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Ukraine

Анотація. У роботі наведено результати досліджень, метою яких є обґрунтування можливості переходу на спалювання водню в системі газопостачання комунально-побутових та промислових споживачів без необхідності зміни конструкції пальників та режиму їх роботи. Для цього комплексно розглянуті критерії взаємозамінності природного газу та його сумішей із воднем. Визначено вплив вмісту водню на показники теплової потужності, вихід шкідливих речовин, а також явища проскоку та відриву полум'я. Вперше розглянуто вплив вмісту водню на показники променевого теплообміну у топках газовикористовуючого обладнання. Розроблено рекомендації щодо допустимого вмісту водню в суміші з природним газом, що забезпечує ефективне, безпечне та екологічне використання такого палива.

Annotation. The paper presents the results of research aimed at substantiating the possibility of switching to hydrogen combustion in the gas supply system of municipal and industrial consumers without the need to change the design of burners and their mode of operation. For this purpose, the criteria of interchangeability of natural gas and its mixtures with hydrogen are comprehensively considered. The influence of hydrogen content on the indicators of thermal power, yield of harmful substances, as well as the phenomenon of leakage and flame separation is determined. For the first time the influence of hydrogen content on the indicators of radiant heat exchange in the furnaces of gas-using equipment is considered. Recommendations on the permissible

hydrogen content in a mixture with natural gas, which ensures efficient, safe and environmentally friendly use of such fuel, have been developed.

Крім економічних чинників розвитку суспільства, ясно простежуються «зелені» тенденції сьогодення. Процеси декарбонізації стали трендами економічного розвитку країн Європейського Союзу. Україна прагне адаптуватися до Європейського «зеленого» курсу (European Green Deal) [1] і це передусім передбачає використання чистих джерел енергії. У цьому напрямку проекти використання водню у якості палива для комунально-побутових і промислових споживачів визивають значний інтерес.

Під взаємозамінністю розуміють можливість постійної, ефективної та безпечної роботи газопальникових пристроїв (ГПП) при заміні горючого газу, без внесення змін до конструкції пальника та іншого обладнання пристроїв, що використовують газ, а також без зміни режиму роботи та налаштувань роботи такого обладнання.

Таким чином, тільки для взаємозамінних газів існує можливість безперешкодного переходу з одного виду газового палива на інше із збереженням (або допустимими змінами) наступних характеристик обладнання:

- теплової потужності, N , кВт;
- коефіцієнта корисної дії, η , %;
- стабільної роботи ГГУ без явищ проскоку (light back) та відриву полум'я (flame lift);
- повноти згоряння палива (допустимої концентрації продуктів хімічного недопалу палива у продуктах згоряння), мг/м^3 , або % об.;
- відсутності жовтих «проблисків» полум'я (yellow tipping), що свідчать про перебіг піролітичних процесів та сажоутворення (sooting) у зв'язку з недостатнім надходженням повітря на горіння (загального або первинного).

Предметом дослідження, таким чином, є завдання ефективного та безпечного використання різних газів у промисловості та комунально-побутовому секторі з погляду дедалі ширшого використання водню та його сумішей. В роботі розглядається комплекс вимог до можливості заміни природного газу горючими газовими сумішами, що містять водень, за умови збереження параметрів роботи газоспалювальних установок без суттєвої зміни конструкції і режимів роботи газопальникових і топкових пристроїв, а також їх тягодуттєвого обладнання і газових мереж. Саме визначення принципів надійного нормування параметрів взаємозамінності горючих газів є метою дослідження.

Методом досліджень вибрано порівняльний критичний аналіз нормативної літератури та доступних результатів експериментальних

досліджень, а також власні теоретичні та експериментальні дослідження у вибраному напрямку.

Крім проблем, пов'язаних із відсутністю в Україні нормативної бази для використання водню і його транспортування; суттєвим викидом CO₂ у процесі каталітичного парового риформінгу вуглеводнів при отриманні водню; відсутністю достатньої кількості електричної енергії «зеленого» походження для електролізу води, що робить сумнівним тезу про «зелений» характер водню, виникають інші питання. І в першу чергу – це можливість спалювання водневих газів в існуючих газоспалювальних агрегатах.

Згідно чинного EN 437: 2003. «Test gases.-Test pressures.-Appliance categories». (в Україні-ДСТУ ГОСТ EN 437:2014, «Випробувальні гази. Випробувальний тиск. Категорії приладів») усі види горючих мережних газів, котрі подаються споживачам, класифікуються за різними категоріями (Gas family): першою другою і третьою; а також за різними групами (Group), наприклад: H, L, E. Кожна категорія, включає гази, котрі об'єднані в групи – вони мають аналогічні характеристики горіння і об'єднані по принципу тотожності у певному діапазоні величини (числа), що називають індексом Воббе.

Такий усталений діапазон індекса Воббе для різних газів, об'єднаних в одну групу, означає, що газові прилади, які використовують різні горючі гази у межах однієї групи (наприклад групи L) будуть ефективно і безпечно працювати за сталої потужності при спалюванні цих газів без будь яких змін у конструкції газопальникових і топкових пристроїв і без коригування режимних параметрів роботи газоспалювальної техніки.

На території України характерним є використання в основному горючого (природного газу) другої категорії групи L або E. Згідно вимог ДСТУ ГОСТ EN 437:2014, індекс Воббе за нижчою теплою згорання для газів групи L повинен мати значення від мінімального 39,1 МДж/м³ до максимального 44,8 МДж/м³ (приведених до умов: температура 15°C , тиск 1013,25 мбар). Виходячи із аналітичного виразу для визначення індексу Воббе теплота згорання такого газу повинна приблизно бути у межах від 34 до 54,6 МДж/м³. Газове обладнання на території України випускається, постачається і експлуатується саме для такої категорії газів.

Визначення індекса Воббе виконується згідно залежності:

$$W_i = \frac{H_i}{\sqrt{d}} = \frac{H_i}{\sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_{нов}}}};$$

де H_i – нижча теплота згорання горючого газу¹, МДж/м³;

d – відносна густина горючого газу;

$\rho_g, \rho_{пов.}$ – густина горючого газу і повітря на горіння за однакових умов, кг/м³;

Тотожність (точна або приблизна) одного із індексів взаємозамінності – індексу Воббе для двох газів свідчить про те, що теплова потужність паливоспалювальної установки при переході з одного виду газу на інший не буде суттєво змінюватись. Це гарантує отримання однакової кількості енергії від установки при переході з одного газу на інший.

Згідно вимог ДСТУ ГОСТ EN 437:2014 для ефективної і безпечної експлуатації газвикористовуючого обладнання, що надходить споживачам, воно повинно пройти випробування шляхом спалювання певних випробувальних газів, кожен із яких за своїм складом є критичним з точки зору забезпечення зазначених вище характеристик роботи обладнання. Таким чином, індекс Воббе є не єдиним критерієм взаємозамінності газів. Тотожність індексу Воббе для двох газів є необхідною, але не достатньою умовою для забезпечення взаємозамінності газів.

Таблиця 1. Тип, склад і характеристики випробувальних газів

Група мережного горючого газу	Назва випробувальної характеристики роботи обладнання		
	Проскок полум'я	Відрив полум'я	Повнота згорання, сажоутворення
Друга категорія, група L	-	G27 Склад: CH ₄ -82% об., C ₃ H ₈ -18% об., W _i =35,17 МДж/м ³ H _i =27,89 МДж/м ³	G26 Склад: CH ₄ -80% об., C ₃ H ₈ -7% об. N ₂ - 13%об. W _i = 40,52 МДж/м ³ H _i =33,36 МДж/м ³
Друга категорія, група E	G222 Склад: CH ₄ -77% об. N ₂ -23 % об. W _i =42,87 МДж/м ³ H _i =28,53 МДж/м ³	G231 Склад: CH ₄ -85% об. C ₃ H ₈ -15 % об. W _i =36,82 МДж/м ³ H _i =28,91 МДж/м ³	G21 Склад: CH ₄ -87% об. C ₃ H ₈ -13 % об. W _i =49,60 МДж/м ³ H _i =41,01 МДж/м ³

Як видно із таблиці 1, для випробування газового обладнання на наявність проскоку пропонується газова суміш з умістом водню до 23%. Таким чином, уміст водню у 23% у суміші з природним газом згідно з вимогами ДСТУ ГОСТ EN 437:2014 є критичним з точки зору втрати стабільності факелу і виникнення явища проскоку полум'я. І це важливо для теми, котра розглядається у цій статті.

¹ Можливим є також визначення індекса Воббе за величиною вищої теплоти згорання

Із точки зору практичного застосування ДСТУ не став в Україні основним документом, котрий визначає якість газу або критерії його взаємозамінності. На відміну від інших країн ЄС цей документ не адаптований повністю до умов українського газового ринку.

Навіть на сайті групи Нафтогаз України <https://www.naftogaz.com/www/3/nakweb.nsf/0/04FF98894B956A3FC2257F5000428F98?OpenDocument> при висвітленні питання про якість газу апелюють не до ДСТУ EN, а до ГОСТ 5542-87 «Газы горючие природные для промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия».

Цей норматив радянського, а потім російського походження відмінювався в Україні, а потім його дія була поновлена. Згідно з цим ГОСТом оцінка взаємозамінності газів виконується лише за одним критерієм – індексом Воббе. Він повинен становити для мережевого природного газу 41,2 – 54,5 МДж/м³ (у перерахунку на температуру 20°C). Допустиме відхилення цього критерія від номінального значення (встановленого угодою на постачання газу) для різних природних газів повинно становити не більше 5%, як в більшу так і в меншу сторону від номінальної величини. Таким чином забезпечується вимога сталої теплової потужності газоспалювального агрегату при переході з одного виду газу на інший. Інші вимоги щодо взаємозамінності газів у цьому документі відсутні.

Теплота згорання газу, котрий дозволено постачати промисловим і комунально-побутовим споживачам повинна становити не менше 31,8 МДж/м³. Концентраційні межі спалахування газу у суміші з повітрям повинні лежати у межах чисел: нижня межа спалахування – близько 5% об, верхня – близько 15% об. Для порівняння – для водню нижча теплота згорання становить 10,785 МДж/м³, а межі спалахування – 4% і 75%.

Таким чином, чинною в Україні основною нормативною документацією не передбачається використання в газотранспортній системі і газорозподільних мережах для промислових і комунально-побутових споживачів іншого горючого газу, ніж природний газ з теплою згорання, яка нормується різними документами у різних межах, але мінімальна величина нижчої теплоти згорання такого газу повинна бути не менше 31,8 МДж/м³.

Законом «Про внесення змін до Закону України «Про альтернативні види палива» щодо розвитку виробництва біометану, підтверджується аналогічний підхід до біометану, як альтернативного виду палива. Згідно з цим законом «біометан – біогаз, що за своїми фізико-технічними характеристиками відповідає вимогам нормативно-правових актів до природного газу для подачі до газотранспортної та газорозподільної системи або для використання в якості моторного палива».

Порівняння індексів взаємозамінності Воббе для метану і водню підтверджує факт неможливості переведення пальників на природному газі на водень – відмінність індекса Воббе для цих газів становить 15%, що у три рази перевищує нормовану величину у 5%. Тому актуальності набуває питання про використання не чистого водню а суміші водню і природного газу і про допустимий уміст водню у такій горючій суміші для можливості безперешкодного переходу роботи пальників із природного газу на газ, що містить водень. При цьому необхідно враховувати, що оцінка взаємозамінності газів на підставі лише одного індексу Воббе є недостатньою. Питання ефективності, екологічності та безпеки використання газового палива вимагають аналізу по ширшому колу показників взаємозамінності.

Критерії взаємозамінності горючих газів об'єднує міжнародний стандарт ISO 13686. В Україні чинним аналогом ISO є нормативні вимоги ДСТУ ISO 13686:2015. «Природний газ. Показники якості» [3].

Перелік основних індексів взаємозамінності згідно [3] наведено в таблиці 2. Кожен із них дає можливість аналізувати ті чи інші небажані явища, котрі виникають при переході з одного горючого газу на інший.

Таблиця 2. Перелік основних критеріїв взаємозамінності

Назва методики або індексу	Країна	Перелік контрольованих параметрів процесу горіння в паливоспалювальній установці
Індекс Ноя	ЄС	Теплова потужність установки
Критерії Даттона	Великобританія Австралія	Відрив полум'я Жовті проблиски полум'я (сажоутворення) Повнота згорання
Метод Вівера	США	Повнота згорання Відрив полум'я Проскок полум'я Жовті проблиски полум'я Теплова потужність установки Забезпечення необхідної величини витрат дуттьового повітря (коефіцієнту надлишку повітря)
Метод АГА ²	США	Відрив полум'я Проскок полум'я Жовті проблиски полум'я
Метод Дельбурга	Франція	Жовті проблиски полум'я Утворення сажі

Із огляду на те, що ДСТУ ISO 13686:2015 є національним стандартом України, котрий регламентує показники усіх горючих газів у статті виконано аналіз величин основних індексів взаємозамінності для природного газу і його суміші з воднем згідно із цим нормативом.

²АГА – американська газова асоціація

Індекс Ноя, (Кпоу). $J_{(K)}$ є одним із раних індексів взаємозамінності і варіацією індексу Воббе. Визначається згідно залежності, наведеної в [4, 5] і залежить від теплоти згорання газу і його щільності. Визначення індексу Кпоу у цій роботі виконувалось за величиною нижчої теплоти згорання. Величину вищої теплоти згорання доцільно використовувати лише у разі конденсації водяної пари, що утворюється при згоранні. Це можна досягти в обмеженій групі пристроїв конденсаційного типу. А в побутових газових плитах це в принципі неможливо. Згідно з [4], якщо для двох газів, індекс Кпоу відрізняється більше за 5%, то гази не є взаємозамінними.

Результати розрахунків показують, що для суміші водню і природного газу це має місце уже при умісті водню більше 20...25% об. Теплова потужність установки при збільшенні частки водню у горючому газі буде зменшуватись. Отже згідно індекса Кпоу гази з більш високим умістом водню, ніж 20...25% об є невазємозамінними з природним газом.

При цьому у якості базового природного газу приймали газ із нижчою теплоотою згорання 35,89 МДж/ м³; вища теплота згорання для такого газу становить 39,93 МДж/ м³; нижче число Воббе – 48,22 МДж/ м³; вище число Воббе – 53,67 МДж/ м³.

Постачання такого природного газу є характерним для систем газопостачання України. Згідно EN 437 і ДСТУ ISO 13686:2015 такий газ належить до групи Е. Діапазон зміни вищого критерія Воббе для газів групи Е становить $W_s = 40,9...54,7$ МДж/м³; (значення приведено до температури 15 °С та тиску 1013,25 мбар.

За умови підмішування до такого газу 10% водню отримаємо горючий газ з вищим числом Воббе $W_s = 52,18$ МДж/м³, за умови підмішування 30% водню – $W_s = 49,58$ МДж/ м³. Усі гази належать до групи Е, але відхилення від номінального значення критерія Воббе базового природного газу становить 7,6%, що більше за нормовані 5% і є свідченням того, що гази не взаємозамінні. Детальний аналіз видів газів наведено в першій частині статті [2]. У якості номінального значення критерія Воббе або Ноя приймають величину, що встановлена угодою на постачання газу.

Критерії Даттона [6]. До них належать: $J_{CF(D)}$ – індекс неповноти згорання, $J_{L(D)}$ – індекс відриву, $J_{S(D)}$ – індекс сажоутворення.

Індекс неповного згорання $J_{CF(D)}$ визначає вірогідність утворення продуктів хімічного недопалу при заміні основного газу газом-замінником. Нормативи вимагають, що для запобігання неповного згорання газу $J_{CF(D)}$ повинен становити нижче 0,48. Екстремальне значення для газу, що заміщає, становить 1,48. При спалюванні газів із більшим за 1,48 показником $J_{CF(D)}$ матиме місце утворення продуктів хімічного недопалу і зменшення ККД установки.

Розрахунок критерія показує, що збільшення умісту водню у природному газі не погіршує показник неповноти згорання і не є критичним для суміші, оскільки супроводжується зменшенням концентрації вуглеводнів у горючій суміші. За критерієм повноти згорання природний газ і його суміш з воднем є взаємозамінними за будь якої концентрації водню у суміші.

Індекс відриву полум'я J_{LD} оцінює можливість взаємозамінності горючих газів уже за критерієм стабільності процесу горіння – небезпеки виникнення явищ відриву або проскоку полум'я. Цей індекс визначається згідно залежності [7, 8]. Нормовані значення індексу відриву J_{LD} для взаємозамінних газів лежать у межах від 0 до 6. Значення індексу, що близькі до 6 свідчать про те, що відрив полум'я вірогідний, а якщо J_{LD} близький до 0, то спалювання газу не буде супроводжуватись відривом і втратою стабільності факелу. Перехід величин J_{LD} до від'ємних значить означає високу вірогідність іншого небезпечного явища – проскоку полум'я в корпус пальника повного попереднього перемішування, що супроводжується мікрровибухом, погасанням факелу, надходженням горючої суміші до топки або в атмосферу і неконтрольованим спалахуванням такої суміші (вибухом).

Результати розрахунку індекса для суміші природного газу з воднем наведено на рис. 1.

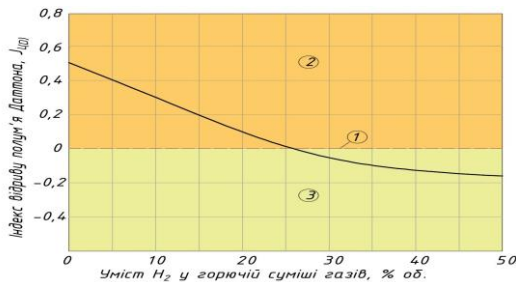


Рис.1. Індекс відриву полум'я Даттона, $J_{CF(D)}$. 1 – нормоване значення індекса $J_{CF(D)}$; 2 – область відриву полум'я; 3 – область проскоку полум'я

Аналіз таблиці показує, що при збільшенні об'ємної частки водню у суміші з природним газом більше 20...25% об. така суміш стає не взаємозамінною з природним газом. А спалювання такої суміші супроводжується небезпечним явищем проскоку полум'я.

Ще один індекс Даттона – **індекс сажоутворення J_{SD}** оцінює ризики і можливості переходу з одного виду газу на інший із точки зору безпеки протікання у полум'ї піролітичних процесів розкладу вуглеводнів і

утворення сажистих частинок, що забарвлюють полум'я у жовтий колір. Нормоване значення цього індексу становить 0,6. Збільшення величини $J_{S(D)}$ для газу, що заміняє основний вище 0,6 означає небезпеку сажоутворення і обмежені можливості взаємозамінності[8]. Результати розрахунку наведено на рис. 2. Вони свідчать, що введення водню до складу природного газу не загрожує сажоутворенням. Таким чином, за цим критерієм суміші природного газу і водню є взаємозамінними.

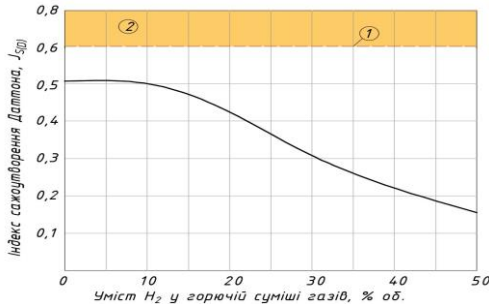


Рис.2. Індекс сажоутворення Даттона, $J_{S(D)}$. 1 – нормоване значення індекса $J_{S(D)}$. 2 – область небезпеки сажоутворення

Метод Вівера. Цей багато індексний метод досліджує можливість взаємозамінності газів у більш широкому і складному контексті. Згідно [9] підґрунттям для цього методу слугували десятки тисяч експериментів з 500 різними горючими газами, у ході яких досліджувались можливості переведення пальників в основному низького тиску з одного горючого газу на інший без втрати стабільності і ефективності горіння.

Суть цього методу полягає у визначенні відношення комплексу характеристик властивостей газу і процесу горіння для двох газів – основного(паспортного) і газу замітника і порівняння цих показників з граничним значенням. Якщо вимога виконується то гази вважаються взаємозамінними за певним критерієм. Перші три критерії мають граничне значення, рівне 1.

1. **Індекс сталой теплової потужності, $J_{H(w)}$** – це відношення критерія Воббе для газе – замітника, W_s і основного газу W_a :

$$J_{H(w)} = \frac{W_s}{W_a} \quad (1)$$

де W – критерій Воббе, що визначається згідно залежності.

Умовою взаємозамінності є $J_{H(w)} = 1,0(\pm 5\%)$. Більше відхилення не є допустимим за умовою недопустимої зміни теплової потужності. Також це може призвести до хімічного недопалу, збільшення втрат теплоти, зменшення ККД і порушення стабільності горіння.

Для досягнення взаємозамінності двох газів величина $J_{H(W)}$ повинна бути рівною $0,95 < J_{A(W)} < 1,05$ [9]. Перевищення верхньої межі означає нестачу повітря, що призводить до теплової потужності, що супроводжується, як правило, збільшенням втрат з відхідними газами, хімічним недопалом і зменшенням ККД установки. У разі, якщо $J_{H(W)} < 0,95$, то матиме місце дефіцит теплової потужності, що призведе до порушення технологічного процесу установки. Результати розрахунків величини $J_{H(W)}$ для суміші природного газу і водню наведено в таблиці 2.

Індекс забезпечення необхідною кількістю повітря на горіння, $J_{A(W)}$ включає теоретичну потребу у повітрі на горіння основного газу $V_{t.a}$ і газу замітника $V_{t.s}$ і їх відносну щільність – d_a , d_s , відповідно:

$$J_{H(W)} = \frac{V_{t.s} \sqrt{d_a}}{V_{t.a} \sqrt{d_s}}; \quad (2)$$

Умовою безперешкодного переведення роботи пальника з природного газу на суміш природного газу і водню індекс повинен становити $0,95 < J_{A(W)} < 1,05$ [10]. У разі перевищення допустимої величини має місце нестача повітря для повного згорання, що призводить до хімічного недопалу і зменшенню ефективності роботи установки. При зниженні встановленої величини $0,95$ і нижче будемо мати горіння при завищених коефіцієнтах надлишку повітря, що може призвести до відриву полум'я, збільшенню втрат теплоти з відхідними газами, зменшенню ККД установки і збільшенню утворення токсичних оксидів азоту у зоні горіння. Дійсні значення індекса за різного умісту водню у суміші наведено у таблиці 2.

Індекс відриву полум'я, $J_{L(W)}$. Схильність полум'я горючого газу до відриву чи проскоку визначається таким фізико-хімічним параметром процесу горіння, як швидкість поширення полум'я. Тому залежність для визначення індекса відриву полум'я включає в себе цей параметр для основного газу $S_{L.N.a}$ і газу замітника $S_{L.N.s}$ [10]:

Результати розрахунку індексу відриву наведено в таблиці 2. Газу з показником $J_{L(W)}$ більшими за одиницю схильні до відриву полум'я зі зрізу пальника, подальше збільшення такого показника свідчить про зростання такої небезпеки.

Індекс проскоку полум'я, $J_{F(W)}$ також залежить від швидкості розповсюдження полум'я. Явище проскоку виникає у разі, якщо швидкість розповсюдження полум'я буде більшим за швидкість газоповітряної суміші у пальнику. Якщо $J_{F(W)} > 0$, то згорання газу буде супроводжуватись проскоком полум'я, що загрожує виникненню аварійної ситуації у ході

експлуатації установки [10]. Значення величини $J_{F(W)}$ для газів з різним умістом водню наведено в таблиці 2.

Індекс жовтих проблисків полум'я, $J_{Y(W)}$ [11].

Наявність жовтих проблисків полум'я свідчить про погіршення якості горіння і утворення у полум'ї частинок сажі, котрі виникають внаслідок загального або локального дефіциту повітря для повного згорання, або внаслідок неякісного перемішування газу і повітря. Такі явища є вкрай небажаними при роботі газоспалювальної установки. Якщо $J_{Y(W)} > 0$, то згорання газу буде супроводжуватись утворенням сажі і жовтими проблисками полум'я. Збільшення показника $J_{Y(W)}$ означає зростання загрози утворення сажі. Значення величини $J_{Y(W)}$ для газів із різним умістом водню наведено в таблиці

Результати розрахунку індексу жовтих проблисків полум'я наведено в таблиці 2.

Індекс неповного згорання, $J_{I(W)}$

Цей індекс визначає можливість утворення газоподібних продуктів неповного згорання і в першу чергу монооксиду карбону при заміні основного газу – газом заміником. Таке явище виникає в результаті нестачі повітря на горіння, або внаслідок збільшення частки карбону у складі горючого газу. Якщо показник $J_{I(W)} > 0$, то це означає що взаємозамінність газу за цим показником відсутня, а згорання газу буде супроводжуватись хімічним недопалом, і як наслідок, – зниженням ефективності роботи газоспалювальної установки [11]. Результати розрахунків величини індексу неповного згорання також наведено в таблиці 2.

Аналіз за методом взаємозамінності Вівера показує що перехід із природного газу на суміш природного газу і водню у промислових і комунально-побутових паливоспалювальних установках призводить до наступних небажаних явищ, що виникають у процесі горіння:

- зменшення теплової потужності пальника і газоспалювального агрегату у разі збільшення частки водню у суміші вище 10% об. і вище;
- протікання процесу горіння при завищених коефіцієнтах надлишку повітря, що буде супроводжуватись зменшенням ККД газоспалювальної установки і схильністю пальників без попереднього змішування з повітрям до відриву полум'я (в разі збільшення частки водню у суміші до 20% об. і більше);
- проскоку полум'я в корпус пальників попереднього змішування, що супроводжується аварійною ситуацією з погасанням факелу (в разі збільшення частки водню у суміші до 20% об. і більше).

Таблиця 2. Характеристики індексів взаємозамінності горючих газів за методом Вівера

Назва індекса взаємозамінності	Позначення	Нормоване значення індекса	Концентрація водню у суміші з природним газом, % об			
			0	10	30	50
Індекс сталої теплової потужності	$J_{H(W)}$	1 ($\pm 5\%$)	1,0	0,95	0,92	0,87
Індекс забезпечення необхідною кількістю повітря на горіння	$J_{A(W)}$	1 ($\pm 5\%$)	1,0	0,96	0,90	0,83
Індекс відриву полум'я	$J_{L(W)}$	1 ($\pm 5\%$)	1,0	1,12	1,44	1,83
Індекс проскоку полум'я	$J_{F(W)}$	< 0,0	0,0	0,22	0,73	1,46
Індекс жовтих проблісків полуля	$J_{Y(W)}$	< 0,0	0,0	-0,04	-0,01	-0,18
Індекс неповноти згорання	$J_{I(W)}$	< 0,0	0,0	-1,2	-1,5	-1,9

Таким чином, за вищезазначеними критеріями і шкідливими явищами, що супроводжують процес горіння, природний газ і відповідні суміші його з воднем є невзаємозамінними.

У такому разі переведення газопальникових пристроїв з природного газу на суміш його з воднем повинно супроводжуватись обов'язковою реконструкцією газоспалювальної установки, тягодуттьових пристроїв, стабілізаторів горіння і режимів роботи пальників.

У той же час, за критеріями неповного згорання і жовтих проблісків полум'я, добавка водню до природного газу не призводить до явищ, що погіршують параметри процесу горіння.

Таким чином існуючі, добре досліджені і висвітлені в нормативній літературі методи оцінки взаємозамінності Кноу, Даттона і Вівера дають можливість детально розглянути наслідки, що виникають при заміні одних видів горючих газів іншими. Використання таких методів, є обов'язковим при розгляді можливості спалювання природного газу з воднем, як альтернатива природному газу.

Усі наведені критерії взаємозамінності відносяться безпосередньо до роботи газопальникових пристроїв.

Але крім цього, є ще одна складова цього питання. Це зміна характеру теплообміну у топкових пристроях, які будуть працювати на газах – заміниках із підвищеним умістом водню.

Об'єм і склад продуктів згорання при внесенні водню до горючої суміші змінюються [2]. Так, наприклад, при переході на спалювання суміші з умістом водню до 30% об. об'єм продуктів згорання зменшується з 11,95 м³/м³ до 7,59 м³/м³ із одночасним зменшенням умісту CO₂ у складі продуктів згорання. Ці два фактори призводять до погіршення теплообміну у топках теплогенерувальних агрегатів. Перший – вурезультаті зменшення швидкості продуктів згорання, а другий- внаслідок зменшення інтенсивності променевої складової теплообміну.

Дослідження, що проведені при спалюванні нафтозаводського газу на Кременчуцькому НПЗ із змінною складовою водню від 20% до 54% об. свідчать про те, що спалювання газів із значною кількістю водню призводить до масового переходу пальників теплових агрегатів у режим роботи з проскоком полум'я. Змінюється також емісійна тепловіддача факелів і конвективний теплообмін на поверхнях нагрівання.

Критерієм відмінностей процесу теплообміну може бути співвідношення кількості карбону і гідрогену у елементарному складі горючого газу C/H, що впливає на емісійну тепловіддачу факелу [12].

На рис. 3 представлено зміну відносної кількості теплоти, що сприймається променевими поверхнями нагрівання котла залежно від умісту водню у суміш горючих газів. Зменшення променевої складової теплообміну у топці переносить значну його частину в менш ефективну конвективну частину котла. Це неминуче збільшує температуру відхідних газів і зменшує ККД котла.

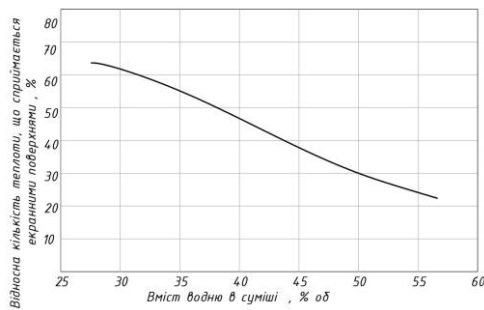


Рис. 3. Вплив складу газу на емісійну тепловіддачу у топковому просторі

Причиною такої ситуації є зміна згаданого раніше співвідношення умісту карбону та гідрогену в елементарному складі газу, C/H. Зміщення значення C/H у бік гідрогену призводить до зменшення «світимості» факелу, тобто зниження жовтої (вуглецевої) складової спектру і, як наслідок, ступеню чорноти топкового простору.

Важливо також підкреслити, що у процесі виконаних досліджень було підтверджено зниження стабільності роботи інжекційних газопальникових пристроїв. При значному умісті водню спостерігався неконтрольований режим проскоку полум'я, що вимагало негайного втручання операторів обладнання, щоб уникнути аварійної ситуації.

Таким чином, використання газів-замінників у вигляді суміші водню та природного газу, вимагає коригування існуючої методики теплового та

аеродинамічного розрахунку котельних агрегатів та іншого тепловикористовуючого обладнання.

Висновки

1. Використання сумішей природного газу з воднем є дієвим кроком у вирішенні задачі декарбонізації діяльності людини. Основним питанням при такому переході є допустимий вміст водню в суміші, що не змінює параметрів ефективності, екологічності та безпеки використання газового палива.

2. Виконаний аналіз та дослідження дозволяють стверджувати, що використання суміші природного газу з вмістом водню не більше 10% об. є допустимим для інжекційних пальників побутових газових плит та обладнання малої потужності без внесення конструктивних та режимних змін. У ряді випадків може бути більш високий вміст водню (до 15 ... 20% об.) Однак це вимагає додаткових випробувань і змін в режимах або конструкції газових приладів.

Досягти практичної можливості використання газоспалювальних установок, що призначені для природного газу, на горючих сумішах його з воднем у кількості, що перевищує 20...25% можна лише за умови зміни конструкції пальника і зміни тиску горючого газу перед пальником.

3. Дутьові газові пальники промислових установок за характером організації процесу горіння не схильні до явищ відриву та проскоку полум'я. В цьому випадку можна рекомендувати можливість безпечної роботи пристроїв на суміші з вмістом водню до 20-25% об. Але слід, зважати на супутнє зниження теплової потужності пристроїв (до 15...20%) і заздалегідь вивчити технічні можливості компенсації цього явища.

4. Можливість переходу газових приладів з газу однієї групи або сімейства на іншу групу або сімейство за класифікацією ДСТУ ISO 13686:2015 та EN 437, або для переходу з одного приєднувального тиску газу на інший повинно враховуватись ще на етапі виготовлення і випробування газових приладів.

У паспортних даних газових приладів необхідно наводити їх категорію, яка залежить від того на які групи і родини (згідно ДСТУ ISO 13686:2015) горючого газу розраховано роботу того чи іншого приладу. І лише за таких умов можна призначати заходи, які можна застосовувати для переведення приладу з газу одного сімейства або групи на інші, в тому числі й на суміші природного газу з воднем.

Так, наприклад, для приладів однієї категорії, призначених для використання газу лише одного сімейства або групи, втручання в конструкцію і налаштування приладу взагалі є неприпустимим, або можливим за рахунок лише зміни діаметра сопла пальника чи встановлення

дроселя. Це у повній мірі відноситься до приладів, призначених для спалювання горючих газів однієї групи Е.

Для інших категорій газових приладів, призначених для роботи на газах декількох сімейств, переналаштування приладів можливо за рахунок більш широкого переліку заходів. Серед них: заміна сопла, чи встановлення дроселя; налаштування витрат газу; налаштування витрат первинного повітря; зміна приєднувального тиску і режиму роботи регулятора тиску; відключення функції «малого полум'я». Але це повинно знайти своє відображення в конструкції таких приладів.

Вирішення широкого кола питань унормування загальних технічних вимог, методів випробування і ефективного використання горючого газу у газових приладах, а також їх виготовлення і класифікації необхідно вирішувати разом із рекомендаціями про використання водню у системах газопостачання України.

5. Виконані дослідження дозволили встановити істотний негативний вплив добавки водню до суміші на випромінювальні характеристики полум'я. Цей факт необхідно враховувати, поряд із падінням теплової потужності, у теплових установках, у яких променевиї теплообмін у топці є важливою технологічною складовою. До них належать, насамперед, котельні установки з екранованими топками, технологічні печі.

Використані інформаційні джерела:

1. European Commission (2019). Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the regions. The European Green Deal. Brussels, 11.12.2019. COM(2019) 640 final.

2. Колієнко А. Г. Використання суміші природного газу і водню у якості палива в комунально-побутових і промислових паливо-спалювальних теплогенеруючих установках // Нафтогазова галузь України. 2021. №4 (52). С. 25–30.

<http://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/10188>.

3. ДСТУ ISO 13686:2015. Природний газ. Показники якості.К.,2015.

4. Knoy M. F. Graphic Approach to the Problem of Interchangeability, A.G.A. Proc. 1953. Pp 938–47][Knoy, Frank, Combustion Experiments with Liquefied Petroleum Gases, Gas, vol. 17, p. 14-19, June 1941.

6. Briggs T. The combustion and interchangeability of natural gas on domestic burners. Ind Eng Lett 2014;4:67–87.

7. Dutton B. C. A New Dimension to Gas Interchangeability, Communication 1246, The Institute of Gas Engineers, 50th Autumn Meeting, 1984.

8. Lander D. UK situation regarding gas quality. Present to Marcogaz gas qual WG28th June 2002; 2002.

9. International Gas Union, BP International Company, GL Industrial Services UK.

10. Guidebook to Gas Interchangeability and Gas Quality; 2011. Ortíz JM. Fundamentos de la Intercambiabilidad del Gas Natural. Ciencia 2014:6–15.

11. Ferguson D. H. Fuel interchangeability considerations for gas turbine combustion. In: Fall 2007 east states sect meet combust inst, Charlottesville, Virginia. Pittsburgh (PA): Combustion Institute; 2007. P. 1–10.

12. Halchuk-Harrington R., Wilson RD. AGA bulletin #36 and weaver interchangeability methods: yesterday's research and today's challenges. In: 2006 Oper sect proc – gas assoc Boston, MA, United States; 2–4 May, 2006. P. 802–823.

<https://www.youtube.com/watch?v=QKNnIPTckTA>
<https://www.youtube.com/watch?v=QKNnIPTckTA>
at