



Нетрадиційні технології

Використання суміші природного газу і водню як палива в комунально-побутових промислових паливоспалювальних теплогенеруючих установках



Колієнко А.Г.
професор

Національний університет «Полтавська політехніка ім. Ю. Кондратюка»

Дослідження та розробки, що пов'язані з використанням водню як палива, нині є надзвичайно актуальними. Найбільш поширеною є ідея використання водню як палива у суміші з природним газом для забезпечення декарбонізації атмосфери та зменшення впливу на глобальні кліматичні зміни шляхом скорочення викидів CO_2 з продуктами згорання вуглеводневого палива. Збільшення концентрації водню у суміші з природним газом на кожні 10% дає можливість пропорційно зменшити коефіцієнт викидів CO_2 в атмосферу приблизно на ті ж 10%.

Під час вивчення практичної можливості використання таких горючих сумішей основним є питання про можливу і допустиму частку водню у таких горючих газах – сумішах. Вирішення цього питання є компромісом між намаганням, з одного боку, збільшити частку водню як замітника природного газу, а з іншого – забезпечити основні принципи безпеки й ефективності використання сумішевого газу, а також мінімізації інвестицій, котрі необхідні для переходу газоспалювальних і топкових пристроїв із чистого природного газу, для якого вони були призначені, на горючу суміш природного газу і водню.

Важко розділити думку деяких авторів [1], котрі стверджують про реальність заміни природного газу водневими сумішами з умістом водню 50% і вище в газових побутових приладах. Критерії, котрі вибирають автори для обґрунтування доцільності такого вибору, не корелюють із нормованими критеріями взаємозамінності горючих газів.

Для класичної теорії і практики спалювання горючого газу питання взаємозамінності двох різних горючих газів не є новим. У різних країнах до цього питання приходили тоді, коли виникала альтернатива використання основного горючого газу, наприклад природного. Такою альтернативною міг бути біогаз, генераторний газ, нафтозаводський газ, скраплений пропан-бутан, скраплений природний газ (LNG) і інші горючі гази та їх суміші. Такою альтернативою можуть бути також горючі суміші водню з іншими газами. На території нафтопереробних заводів, наприклад, існує практика використання нафтозаводського газу з високим умістом водню в суміші з природним газом як палива для нафтопереробних печей і установок нафтопереробки.

Звернемося до вимог нормативної документації, чинної в Україні, з питання щодо якості горючого газу і можливості його взаємозамінності. Під взаємозамінністю згідно з вимогами нормативів розуміють можливість сталої, ефективної і безпечної роботи газоспалювального обладнання при заміні одного горючого газу іншим без внесення будь-яких змін у конструкцію пальника й іншого обладнання паливовикористовуючої установки, а також без зміни режиму роботи і налаштувань роботи такого обладнання.

Таким чином, лише для взаємозамінних газів існує можливість безперешкодного і багаторазового переходу у часі з одного горючого газу або суміші газів на інший горючий газ із збереженням (або незначними допустимими змінами) таких характеристик процесу горіння:

- теплової потужності паливоспалювального агрегату, N , кВт;
- ефективності або коефіцієнту корисної дії роботи агрегату, η , %;
- стабільної роботи газопальникового пристрою із запобіганням явищам проскоку або відриву полум'я;
- повноти згорання палива (забезпечення допустимої концентрації продуктів хімічного недопалу палива у продуктах згорання);
- запобігання виникненню жовтих проблисків полум'я й утворенню сажистих частинок у полум'ї.

Із практики спалювання горючих газів відомо, що стійке й ефективне згорання газу у потоку – це процес, котрий суттєво залежить від режимних параметрів організації такого процесу. До таких параметрів відносяться: витрати газу і повітря для його окиснення, у тому числі первинного повітря (для інжекційних пальників комунально-побутових приладів), співвідношення між кількістю повітря і теоретичною потребою у ньому, яке називають коефіцієнтом надлишку повітря, α ; теплове навантаження на газоспалювальний агрегат, N , кВт; швидкість подачі газу і повітря тощо.

Відомо, що область ефективного і стабільного горіння будь-якого горючого газу обмежена зонами порушення стійкості факелу (проскоку або відриву полум'я) і не-ефективного горіння (утворення продуктів хімічного недопалу). На діаграмі (рис. 1) в осях «теплова потужність, N кВт – кількість первинного повітря, α » розташування цих зон виглядає таким чином:

Таким чином, під час вирішення питання про можливість взаємозамінності двох газів – основного, для якого запроектована робота пальника, й альтернативного, який повинен замінити основний, – важливо забезпечити стійку й ефективну роботу пальника й установки не лише без змін конструкції і режиму роботи установки, а й із дотриманням проектною (паспортною) величини коефіцієнта регулювання пальника [2].

Згідно з [4] на території України характерним є використання в основному природного газу другої категорії

Рис. 1

Діаграма американської газової асоціації (AGA) ефективного згорання газу:

- 1 – зона проскоку полум'я;
- 2 – зона відриву полум'я;
- 3 – зона утворення жовтих проблисків полум'я;
- 4 – зона утворення продуктів хімічного недопалу;
- 5 – зона стабільного й ефективного згорання газу [2, 3]



групи L або E. Індекс взаємозамінності Воббе за нижчою теплоотою 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 °С, тиск 1013,25 мбар), а теплота згорання 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 індексу Воббе виконується відповідно до залежності:

$$i_i = \frac{H_i}{\sqrt{d}} = \frac{H_i}{\sqrt{\frac{\rho_i \rho_{\text{повітря}}}{\rho_{\text{ос}}}}}$$

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

d – відносна щільність горючого газу;

$\rho_i, \rho_{\text{повітря}}$ – щільність горючого газу і повітря на горіння за однакових умов, кг/м³.

Тотожність (точна або приблизна) індексу Воббе $W_1 = W_2 \pm 5\%$ для двох газів означає, що газові прилади, які використовують різні горючі гази, будуть ефективно і безпечно працювати за сталої потужності під час спалювання цих газів без будь-яких змін у конструкції газопальникових і топкових пристроїв і без коригування режимних параметрів роботи газоспалювальної техніки.

Згідно з вимогами [4] для ефективної і безпечної експлуатації газовикористовуючого обладнання, що надходить споживачам, воно повинно пройти випробування шляхом спалювання певних випробувальних газів,

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

кожен із яких за своїм складом є критичним із погляду 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.

Так, наприклад, для горючих газів, що об'єднані групами L і E, такими випробувальними газами для виробників газового обладнання є такі (таб. 1).

Як видно із табл. 1, для випробування газового обладнання на наявність проскоку пропонується газова суміш зі вмістом водню до 23%. Таким чином, вміст водню 23% у суміші з природним газом згідно з вимогами ДСТУ ГОСТ ГН 437:2014 є критичним із погляду втрати ста-

більності факелу і виникнення явища проскоку полум'я. І це важливо для теми, котра розглядається у цій статті.

Важливо відзначити, що водень як горючий газ має різко відмінні характеристики від основного і єдиного легітимного згідно з нормативами України горючого газу – природного.

Нижче, у табл. 2, наведено порівняння фізико-хімічних властивостей метану як основного горючого компоненту природного газу і водню. Насамперед вибиралися горючі характеристики цих двох газів.

Як свідчать дані таблиці, відмінність у горючих характеристиках метану і водню надзвичайно велика, що спри-

Таблиця 1

Тип, склад і характеристики випробувальних газів

Група мережного горючого газу	Назви пробувальної характеристики роботи газоспалювального обладнання		
	Проскок полум'я	Відрив полум'я	Повнота згорання палива і сажоутворення (жовті пробіски полум'я)
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. H 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 -183% об. W _i =49,60 МДж/м ³ H _i =41,01 МДж/м ³

Таблиця 2

Деякі горючі характеристики метану, CH₄, і водню, H₂ (t = 20 °C), [3]

Назва горючої характеристики	Од. вим.	Величина характеристики	
		CH ₄	H ₂
Нижча теплота згорання	МДж/м	335,88	10,79
Індекс Воббе (нижчий)	МДж/м	348,22	41,02
Межі спалахування у суміші з повітрям:	% об.		
– нижча, X _н		5,0	4,0
– вища, X _в		15,0	75
Теоретичні витрати повітря на горіння	м ³ /м ³	9,52	2,38
Температура горіння (жаропродуктивність)	°C	2043	2235
Об'єм продуктів згорання (α = 1)	м ³ /м ³	10,52	2,88
Максимальна швидкість розповсюдження (поширення) полум'я	м/с	0,37	2,67
Коефіцієнт надлишку повітря α на межах спалахування:			
– нижній межі спалахування		1,8	9,8
– верхній межі спалахування		0,65	0,15
Теоретична потреба у повітрі для повного згорання (стехіометрична кількість повітря)	м ³ /м ³	9,52	2,38
Щільність	кг/м ³	0,71	0,089

чиняє повну відсутність їх взаємозамінності навіть без розгляду спеціальних критеріїв. Витрати повітря для повного згорання і об'єм продуктів згорання відрізняються у 4 рази, швидкість розповсюдження полум'я – у 7 разів, кількість первинного повітря, котре гарантує горіння без проскоку, відрізняється у 4 рази.

Порівняння індексів взаємозамінності Воббе для метану і водню підтверджує факт неможливості переведення пальників на природному газі на водень – відмінність індексу Воббе для цих газів становить 15%, що у 3 рази перевищує нормовану величину 5%. Забезпечити перехід роботи пальника із природного газу на водень без змін у конструкції пальника і без втрати теплової потужності установки неможливо.

Таким чином, надзвичайно актуальності набуває питання про використання не чистого водню, а суміші водню і природного газу, і про допустимий вміст водню у такій горючій суміші для можливості безперешкоди його переходу роботи пальників із природного газу на газ, що містить водень.

Для суміші природного газу і водню було виконано розрахунки основних горючих характеристик за умови різного вмісту водню у суміші. Результати розрахунків наведено у табл. 3 і на рис. 2–4.

Збільшення концентрації водню у складі суміші газів призводить до розширення діапазону між нижньою і верхньою межею горіння й ускладнює стабільний процес горіння без проскоку і відриву полум'я у пальнику. Суміш газу стає горючою у більш широкому діапазоні концентрацій.

Як видно із даних табл. 3, нормативна вимога про досягнення допустимих змін індексу Воббе для природного газу, що замінюється, і газу-замінника (суміші природного газу і водню) не дотримується уже для суміші з об'ємним умістом водню 20–25%. Таким чином, забезпечити перехід роботи пальника із природного газу на горючу суміш з умістом водню більше за 20–25% без внесення змін у конструкцію пальника і режим його роботи, а також конструкцію і режим роботи тягодуттєвих пристроїв установки неможливо з міркувань забезпечення сталості теплової потужності й оптимальних параметрів роботи установки.

Аналіз інших нормованих за [5] критеріїв і індексів взаємозамінності – індексів Кноу, Даттона, Вівера, методів АГА і Дельбурга – свідчить про факт відсутності взаємозамінності природного газу і його суміші з воднем за умови об'ємного вмісту водню більше 15–20% об.

Таблиця 3

Горючі характеристики суміші природного газу і водню [3]

Найменування характеристики суміші	Од. вим.	Вміст H ₂ у суміші, % об.		
		10	30	50
Щільність	кг/м ³	0,65	0,52	0,4
Теплота згорання нижча	МДж/м ³	33,38	28,36	23,33
Індекс Воббе за нижчою теплою згорання	МДж/м ³	46,95	44,37	41,81
Відмінність індексу Воббе суміші від індексу Воббе природного газу (48,22)	%	2,6	8,0	13,2
Межі спалахування:	% об.			
– нижня		4,9	4,6	4,4
– верхня		16,3	19,7	25,0
Коефіцієнт надлишку повітря на межах спалахування		2,2	2,70	3,62
– на нижній межі спалахування				
– на верхній межі спалахування				
Швидкість проскоку полум'я	м/с	0,19	0,26	0,37
Граничний коефіцієнт надлишку повітря на межі утворення жовтих проблисків полум'я	-	0,21	0,19	0,17
Теоретична потреба у повітрі для повного згорання (стехіометрична кількість повітря)	м ³ /м ³	8,8	7,4	5,9
Об'єм продуктів повного згорання ($\alpha = 1,15$)	м ³ /м ³	11,1	9,3	7,6
Склад продуктів повного згорання:	% об.			
– водяна пара, H ₂ O		167,1	18,2	19,8
– азот, N ₂		72,3	71,8	71,2
– кисень, O ₂		2,5	2,4	2,4
– діоксид вуглецю, CO ₂		8,1	7,5	6,6

Рис. 2

Коефіцієнт надлишку повітря на нижній і верхній межах спалахування

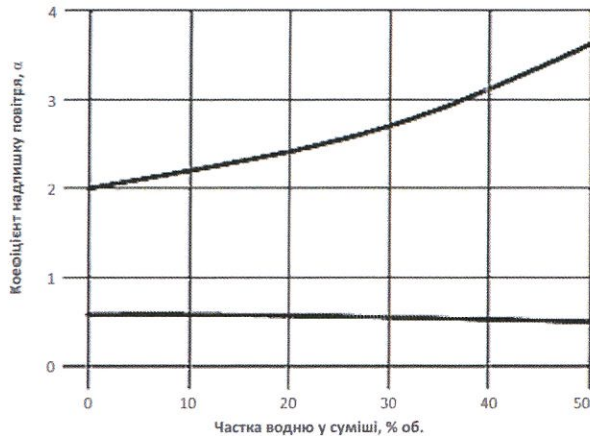


Рис. 3

Вміст горючого газу на нижній і верхній межах спалахування

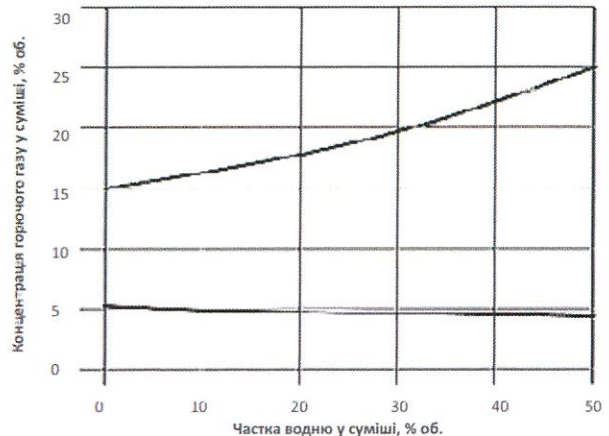
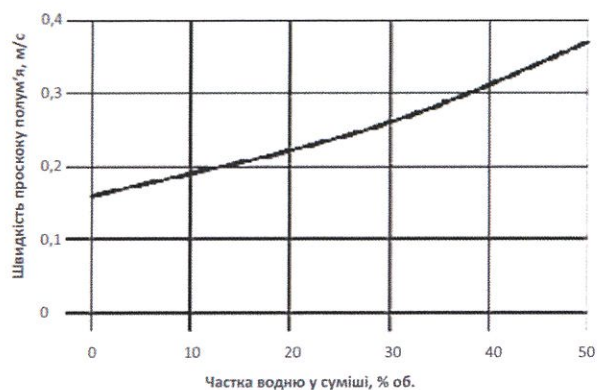


Рис. 4

Швидкість газоповітряної суміші у пальнику, за якої відбувається проскок полум'я



Дослідження, що проведені автором під час спалювання нафтозаводського газу на Кременчуцькому НПЗ із змінною складовою частиною водню від 20% до 54% об., підтверджують, що спалювання газів із значною кількістю водню (більше 20%) призводить до кардинальних змін у роботі газопальникових пристроїв і масового переходу їхньої роботи у режим проскоку полум'я. Змінюється також емісійна тепловіддача факелів і конвективний теплообмін на поверхнях нагрівання.

Об'єм і склад продуктів згорання під час внесення водню до горючої суміші також змінюються. Так, у разі переходу на спалювання суміші з умістом водню до 30% об. об'єм продуктів згорання зменшується з $11,95 \text{ м}^3/\text{м}^3$ до $7,59 \text{ м}^3/\text{м}^3$ з одночасним зменшенням умісту CO_2 у складі продуктів згорання. Ці два фактори призводять до погіршення теплообміну у топках теплогенерувальних агрегатів.

Одним із можливих способів спалювання різних газів в одних газопальникових пристроях без суттєвої зміни їх конструкції є зміна тиску газу перед пальником. Для реалізації переходу з одного горючого газу на інший необхідно перейти на інший тиск горючого газу перед пальником та змінити встановлені режимні параметри його роботи. Після цього дещо змінений варіант критерію взаємозамінності – розширений індекс Воббе для замінюваного газу і газу-замінника не повинен відрізнятися більш ніж на 5%. Розширений індекс Воббе, на відміну від простого, включає в себе тиск газу перед пальником і визначається згідно із залежністю [3, 7]:

$$W_i^p = H_i \times \sqrt{\frac{P_i}{d_i}}$$

де P_i – тиск газу перед пальником, кПа.

Тиск газу, котрий необхідно підтримувати для забезпечення сталої теплової потужності агрегату при заміні, наприклад, природного газу з характеристиками P_1, ρ_1, H_1 на суміш природного газу і водню з умістом водню до 30% і характеристиками P_2, ρ_2, H_2 обчислюється згідно із залежністю:

$$P_2 = P_1 \cdot \frac{\rho_2}{\rho_1} \left(\frac{H_1}{H_2} \right)^2$$

Для комунально-побутових пристроїв номінальний паспортний тиск природного газу перед пальниками становить 1270 Па. Підтримання сталої теплової потужності при переході на спалювання газової суміші з умістом водню, наприклад, 30% об. потребує згідно з наведеною залежністю збільшення цього тиску до 1500 Па. А для горючої суміші з часткою водню 50%, що реко-

мендується у роботі [1], тиск перед пальником повинен становити уже 1700 Па. Це буде вимагати корінних змін у роботі газорозподільних мереж і газорегуляторних пунктів.

Таким чином, забезпечення взаємозамінності природного газу і його суміші із значним (більшим за 20–25% об.) умістом водню без внесення змін у конструкцію і режим роботи пальника і газоспалювальної установки є проблематичним.

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.

Для інжекційних пальників низького тиску побутових газових приладів для цього необхідно змінити як діаметр сопла, так і тиск газу у газопроводах розподільних мереж, забезпечити технічну можливість фіксації небезпечної концентрації у газифікованих приміщеннях витоків газу із більш широкими межами спалахування.

Зміна діаметру сопла інжекційного пальника забезпечить інжекцію потрібної кількості первинного повітря на горіння до корпусу пальника, що гарантуватиме відсутність проскоку полум'я під час роботи на горючій суміші з умістом водню. А зміна тиску газу перед пальником забезпечить сталу теплову потужність.

У разі використання дуттьових пальників необхідна заміна конструкції пальників і їх стабілізаторів. При цьому доцільне використання наявного досвіду організації такого спалювання в Україні під час спалювання у промислових установках газів високо- і середньотемпературної перегонки твердого і рідкого палива, а також біогазу [6].

За умови отримання в результаті таких розрахунків прийнятних для газорозподільних мереж і конструкції пальника змін безпечного спалювання горючої газової суміші із збереженням теплової потужності можна досягти за умови підтримання сталого вмісту водню у суміші.

ВИСНОВОК

Заміна одного горючого газу іншим на наявному газоспалювальному обладнанні є складним інженерним процесом, який потребує детального й уважного розгляду. Питання зводиться до безпеки й ефективності використання горючого газу.

Аналіз нормованих в Україні критеріїв взаємозамінності й експериментальні дослідження спалювання горючих нафтозаводських газів із високим умістом водню в печах нафтопереробного заводу свідчать про можливість спалювання горючих сумішей водню з природним газом за умови дотримання забезпечення сталої теплової потужності газоспалюючих установок, відсутності продуктів хімічного недопалу й утворення сажі, відсутності явищ проскоку і відриву полум'я. Виходячи із нормативних індексів взаємозамінності, граничним умістом водню у горючій суміші із природним газом є

його вміст, що не перевищує 20–25% об.

Експериментальні дослідження інжекційних пальників, встановлених на установках для спалювання нафтозаводських газів із високим умістом водню, свідчать про масовий перехід їхньої роботи у режим проскоку полум'я за умови збільшення концентрації водню вище 20% об. Це є результатом розширення діапазону між нижньою і верхньою межею горіння, а також значного збільшення швидкості розповсюдження полум'я за умови збільшення вмісту водню у горючій суміші.

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.

Використання газів з високим умістом водню вимагає перегляду нормативів із розрахунку теплообміну на поверхнях нагрівання теплогенерувального обладнання. З огляду на вищезазначене, а також з урахуванням суттєвої небезпеки в умовах масової некваліфікованої експлуатації побутових газових приладів, висновки про можливість широкого застосування сумішей природного газу із значним умістом водню доцільно робити, можливо, після більш фундаментальних досліджень з урахуванням усіх факторів впливу і типу газопальникових пристроїв.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРА

1. **Сорока Б.С.**, П'яних К.Є., Згурський В.О., Горупа В.В., Кудрявцев В.С. Енергетичні та екологічні характеристики побутових газових приладів при використанні метано-водневої суміші, як паливного газу // Нафтогазова галузь України, № 6. – 2020; С. 3-14.
<https://www.naftogaz.com/files/journal/Journal-Naftogazova-galuz-06-2020.pdf>
2. **Halchuk-Harrington R.**, Wilson R. AGA Bulletin#36 and Weaver Interchangeability Methods: Yesterday's Research and Today's Challenges, AGA Gas Operations Conference, May 2-4, 2006.
3. **Стаскевич Н.Л.**, Северинец Г.Н., Видгорчик Д.Я. Справочник по газоснабжению и использованию газа. – Л.: Недра, 1990. – 762 с.
4. ДСТУ ГОСТ EN 437:2018. Випробувальні гази. Випробувальний тиск. Категорії приладів. ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»). – К.: 2018.
5. ДСТУ ISO 13686: 2015. Природний газ. Показники якості (ISO 13686:2013, IDT). ДП «УкрНДНЦ», 2016.
6. **Сигал И.Я.** Особенности горения и опыт сжигания биогаза в промышленных котлах [Электронный ресурс] / Сигал И.Я., Марасин А.В. // 10-а міжнародна конференція «Енергія біомаси», Київ, 23–24 вересня 2014 р. – К., 2014.
7. СТД ISO 6976: 2009 Природный газ. Расчет теплоты сгорания, плотности, относительной плотности и числа Воббе на основании компонентного состава (ISO 6976:1995/Cor/3:1999, IDT).