

Колієнко А. Г., к. т. н., проф.

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

Частина 1. Нормування параметрів якості горючих газів для промислового комунально-побутового споживання

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

При вивченні 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 заміника природного газу, а з іншого — забезпечити основні принципи безпеки і ефективності використання сумішевого газу, а також мінімізації інвестицій, котрі необхідні для переходу газоспалювальних і топкових пристроїв з чистого природного газу, для якого вони були призначені, на горючу суміш природного газу і водню.

Важко розділити погляди деяких авторів [1], котрі стверджують про реальність і високу ефективність заміни природного газу водневими сумішами із вмістом водню 50% і вище в газових побутових приладах. Критерії, котрі вибирають автори для обґрунтування доцільності такого вибору, не корелюють з нормованими критеріями взаємозамінності, в основу яких покладено забезпечення сталої теплової потужності газових приладів, режимів їхньої роботи і принципів убезпечення від шкідливих явищ проскоку, відриву полум'я та неповноти згорання палива.

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 їхні суміші. Такою альтернативою може бути також водень або горючі суміші водню з іншими газами. На території нафтопереробних заводів, наприклад, існує практика використання нафтозаводського газу з високим вмістом водню в суміші із природним газом як палива для нафтопереробних печей і установок нафтопереробки. Для комунально-побутових споживачів в Україні

природний газ був і є основним і безальтернативним видом палива. Тому нормування взаємозамінності різних газів відображено в чинному вітчизняному законодавстві не на належному рівні.

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

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

- теплової потужності паливоспалювального агрегату, N , кВт;
- ефективності, або коефіцієнту корисної дії роботи агрегату, η , %;
- умов порушення стабільної роботи газопальникового пристрою у вигляді небажаного явища проскоку полум'я у корпус пальника, $X_{\text{пр}}$, % об. горючого у суміші з повітрям (окиснювачем);
- умов порушення стабільної роботи газопальникового пристрою у вигляді небажаного явища відриву полум'я від зрізу пальника і його погасання, $X_{\text{в}}$, % об. горючого у суміші з повітрям (окиснювачем);
- повноти згорання палива (забезпечення певної концентрації продуктів хімічного недопалу палива у продуктах згорання), мг/м^3 , або % об. продуктів хімічного недопалу;
- умов виникнення жовтих проблисків полум'я, що свідчить про процес утворення сажистих частинок у полум'ї із причин недостатньої кількості повітря на горіння (загального або первинного повітря).

Із практики спалювання горючих газів відомо, що стійке і ефективне згорання газу у потоці – 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 та ін.

Власне стійке положення фронту полум'я на зрізі пальника і відсутність таких шкідливих явищ як проскок і відрив полум'я є результатом хиткої тотожності величин швидкості розповсюдження (поширення) полум'я і швидкості газоповітряної суміші на виході із пальника. Стійкість фронту полум'я, відсутність явищ відриву і проскоку залежить від горючих

властивостей палива, ефективності процесів стабілізації факела і теплового навантаження пальника. Тому склад газу і його горючі фізико-хімічні властивості мають значний вплив на можливість взаємозамінності горючих газів і на сам процес горіння.

Відомо, що область ефективного і стабільного горіння обмежена зонами порушення стійкості факела (проскоку або відриву полум'я) і неефективного горіння (утворення продуктів хімічного недопалу). На діаграмі рис. 1 в осях «теплова потужність, N кВт – кількість первинного повітря, α_1 » розташування цих зон виглядає таким чином:

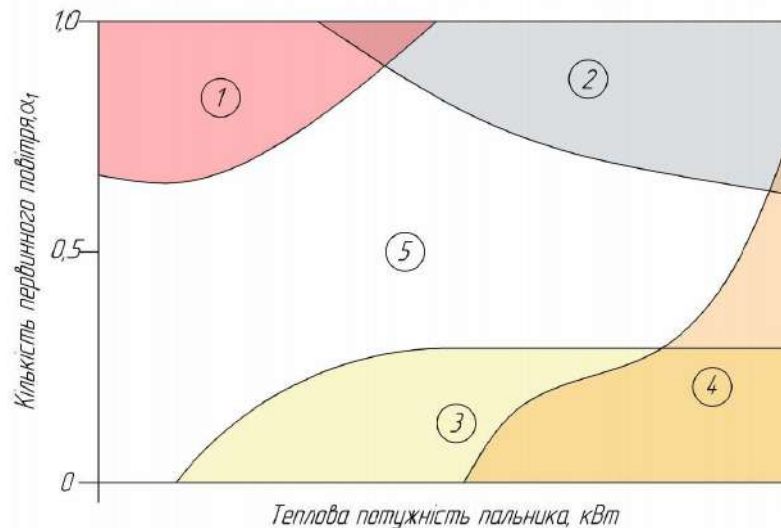


Рис. 1. Діаграма американської газової асоціації (AGA) ефективного згорання газу:

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 і ефективного згорання газу [2].

На іншій діаграмі (рис. 2), уже в координатах «швидкість газоповітряної суміші на виході із пальника — коефіцієнт надлишку первинного повітря α_1 », область стабільного і ефективного горіння також жорстко обмежена зонами відриву, проскоку, утворення продуктів хімічного недопалу і жовтих проблисків полум'я. Швидкість газоповітряної суміші опосередковано характеризує величини витрат газу і теплової потужності пальника.

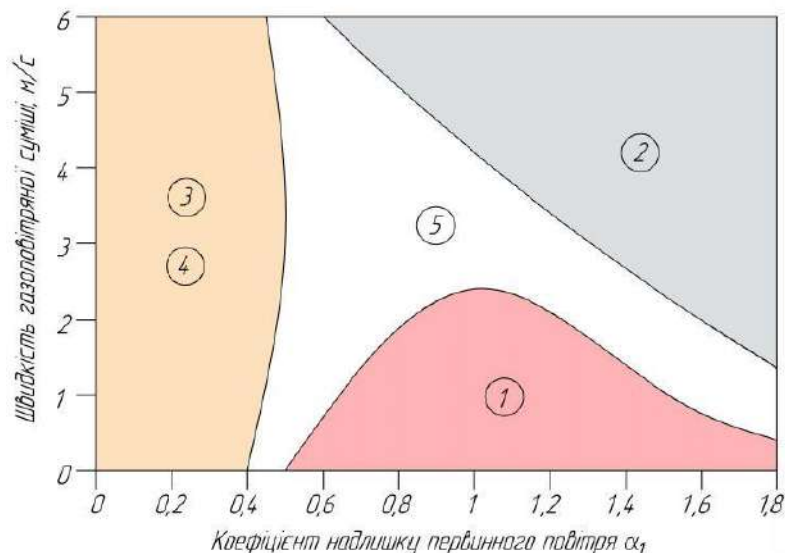


Рис. 2. Діаграма ефективної роботи газового пальника [3]

Таким чином, при вирішенні питання про можливість взаємозамінності двох газів – основного, для якого запроєктована робота пальника та паливоспалювальної установки, і альтернативного, який повинен замінити основний, — важливо забезпечити стійку і ефективну роботу пальника і установки не лише без змін конструкції і режиму роботи установки, а й з дотриманням проектної (паспортної) величини коефіцієнта регулювання пальника. Таким чином, високоефективна і стабільна робота пальника повинна бути забезпечена в усьому діапазоні регулювання його потужності від мінімальної до максимальної, що зазначені у паспортних характеристиках.

Відповідно до 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 у групи — вони мають аналогічні характеристики горіння і об'єднані за принципом тотожності у певному діапазоні величини (числа), що називають індексом Воббе.

Такий усталений діапазон індексу 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 з вимогами 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 з 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 індексу Воббе виконується згідно із залежністю:

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

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

d – відносна щільність горючого газу;

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

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

Згідно з вимогами ДСТУ ГОСТ EN 437:2014 для ефективної і безпечної експлуатації газовикористовуючого обладнання, що надходить споживачам, воно повинно пройти випробування шляхом спалювання певних випробувальних газів, кожен з 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.

Так, наприклад для горючих газів, що об'єднані групами L і E, такими випробувальними газами для виробників газового обладнання є:

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

Таблиця 1. Тип, склад і характеристики випробувальних газів

Група мережного горючого газу	Назва випробувальної 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 - 13% об. W _i =49,60 МДж/м ³ H _i =41,01 МДж/м ³

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

У розрізі практичного застосування ДСТУ не став в Україні 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 багатостраждальний для України норматив радянського, а потім російського походження скасовувався, а пізніше його чинність була поновлена.

Згідно з цим ГОСТом, із зазначених вище критеріїв взаємозамінності є лише один – критерій Воббе. Він повинен становити для мережевого

природного газу **41,2 – 54,5 МДж/м³** (у перерахунку на температуру 20°C), а допустиме відхилення цього критерія від номінального значення (встановленого угодою на постачання газу) для різних природних газів повинно становити не більше 5% як у більший, так і в менший бік 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 знаходитися у межах таких чисел: нижня межа спалахування – близько 5% об., верхня – близько 15% об. Для порівняння: для водню нижня теплота згорання становить 10,785 МДж/м³, а межі спалахування – 4% і 75%.

Таким чином, ГОСТ 5542-87 жорстко обмежує можливість постачання горючих газів лише одним видом – природним газом, що, власне, і відображається у назві ГОСТа.

Ще одним документом, у якому згадуються норми якості і фізико-хімічні показники природного газу, є Кодекс газотранспортної системи, який був створений Національною комісією, що здійснює державне регулювання у сфері енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП) 30.09.2015 р. (Постанова №2493). Для природного газу, що подається у газотранспортну систему, згідно з цим документом, вміст метану повинен становити не менше 90% об., етану – не більше 7% об., пропану – не більше 3% об., нижня теплота згорання повинна бути у межах **32,66 – 34,54 МДж/м³**, а до числа параметрів, котрі повинні контролюватися, відноситься і число Воббе без зазначення меж відхилення цього числа від номінальних значень.

І врешті-решт, ще один документ, що визначає порядок доступу до газотранспортної системи (ГТС) України — Наказ НАК Нафтогаз від 26.03.2001 №79 «Порядок доступу до газотранспортної системи». Згідно з цим документом, природний газ, що видобувається на території України та передається до ГТС та до газорозподільних мереж (ГРМ), повинен відповідати технічним вимогам ТУ У 320.001.58764-007-95 «Гази горючі природні, що подаються в магістральні газопроводи» та ТУ У 320.001.58764- 008-95 «Гази горючі природні, що подаються з родовищ в промислові газопроводи та окремим споживачам» та ГОСТу 5542-87.

Згідно з ТУ У 320. 00158764. 007 – 95, горючі гази, які видобуваються на території України і реалізуються споживачу з використанням магістральних газопроводів, повинні мати теплоту згорання не менше **32,5 МДж/м³**. Показників взаємозамінності різних газів у цьому документі немає. У документі йдеться виключно про природний газ.

Таким чином, наявною і 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 нижньої теплоти згорання такого газу повинна бути не менше 31,8 МДж/м³.

При цьому важливо відмітити, 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 компонента природного газу і водню. Передусім вибиралися горючі характеристики цих двох газів.

Таблиця 2. Деякі горючі характеристики метану, СН₄, і водню, Н₂ (t=20°C), [4]

Назва горючої характеристики	Од вим.	Величина характеристики	
		СН ₄	Н ₂
Нижча теплота згорання	МДж/м ³	35,88	10,79
Індекс Воббе (нижчий)	МДж/м ³	48,22	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)	°С	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 нижній межі спалахування		1,8	9,8
- на 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

Як свідчать дані таблиці, відмінність у горючих характеристиках метану і водню надзвичайно велика, що спричиняє повну відсутність їхньої 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 у 5%. Забезпечити перехід роботи пальника із природного газу на водень без змін у конструкції пальника і без втрати теплової потужності установки неможливо.

Інші нормативні індекси взаємозамінності, у тому числі ті, що визначають безпеку використання горючого газу, поки що не розглядаємо.

Таким чином, надзвичайної актуальності набуває питання використання не чистого водню, а суміші водню і природного газу і допустимого вмісту водню у такій горючій суміші для можливості безперешкодного 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 подано у таблиці 3 і на рисунках 3-5.

Таблиця 3. Горючі характеристики суміші природного газу і водню

Найменування характеристики суміші	Од. вим.	Уміст Н 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 нижньою 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 нижній межі спалахування		2,2	2,70	3,62
- на верхній межі спалахування		0,58	0,55	0,5
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, Н ₂ О		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

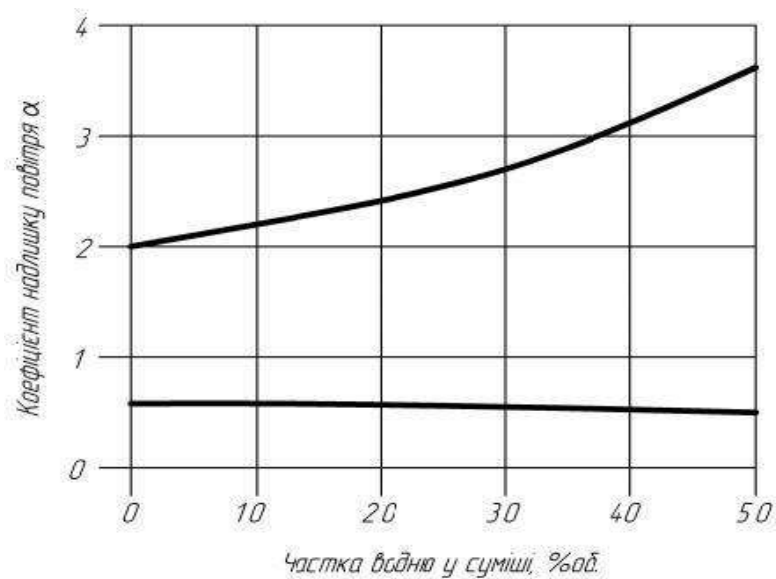


Рис. 3. Коефіцієнти надлишку повітря на нижній і верхній межах спалахування

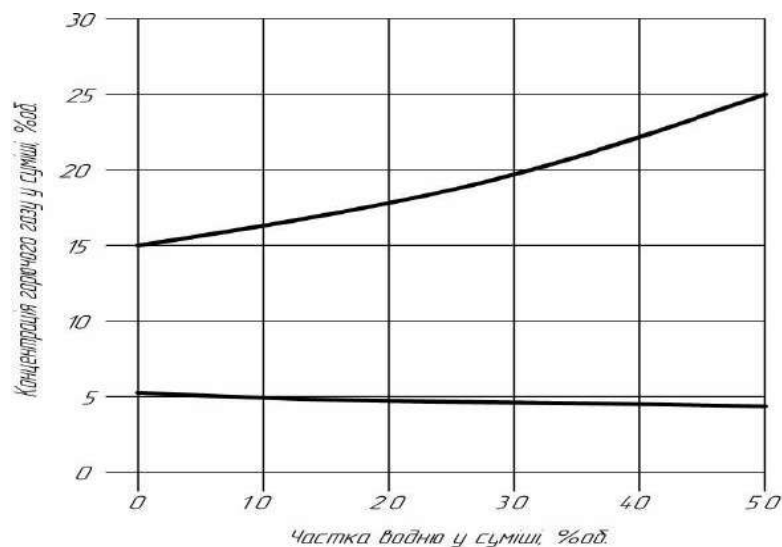


Рис. 4. Вміст горючого газу на нижній і верхній межах спалахування

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

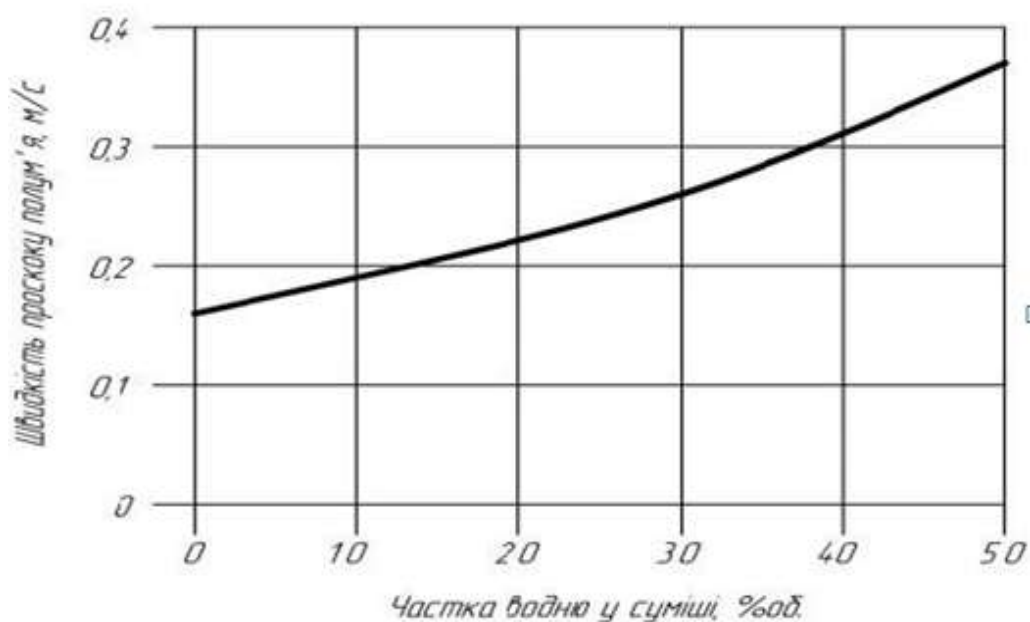


Рис. 5. Швидкість газоповітряної суміші у пальнику, при якій відбувається проскок полум'я

Як видно з даних табл. 3, нормативна вимога щодо 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 вмістом водню 20-25%. Таким чином, забезпечити перехід роботи пальника із природного газу на горючу суміш із вмістом водню більше за 20-25% без внесення змін у конструкцію пальника і режим його роботи, а також конструкцію і режим роботи тяго-дутьових пристроїв установки неможливо з міркувань забезпечення сталості теплової потужності і оптимальних параметрів роботи установки.

Вплив інших факторів на роботу пальника у разі заміни горючих газів (безпеки і ефективності спалювання газу) розглянемо після аналізу інших індексів — критеріїв взаємозамінності, прийнятих у міжнародних нормативах ДСТУ ISO 13686: 2015. Природний газ. Показники якості.

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

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

Об'єм і склад продуктів згорання при внесенні водню до горючої суміші буде змінюватися (див. табл. 3), інакше саме завдання використання водню не має сенсу. Так, наприклад, при переході на спалювання суміші із вмістом 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 вмісту CO_2 у складі продуктів згорання. Ці два фактори призведуть до погіршення теплообміну у топках теплогенерувальних агрегатів.

Проведені автором дослідження при спалюванні нафтозаводського газу на Кременчуцькому НПЗ зі змінною складовою водню від 20% до 54% об. свідчать про те, що спалювання газів зі значною кількістю водню призводить до кардинальних змін у роботі газопальникових пристроїв і масового переходу їхньої роботи в режим проскоку полум'я. Змінюється також емісійна тепловіддача факелів і конвективний теплообмін на поверхнях нагрівання.

Критерієм відмінностей процесу теплообміну може бути співвідношення кількості карбону і гідрогену в елементарному складі горючого газу C_p/H_p , що впливає на емісійну тепловіддачу факела (рис. 6).

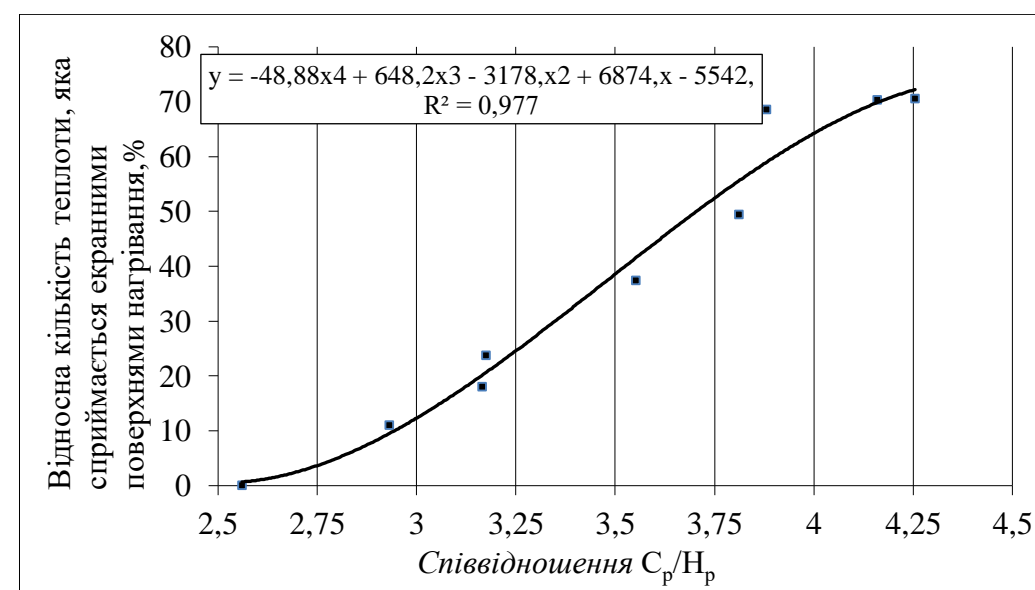


Рис. 6. Вплив складу газу на емісійну тепловіддачу у топковому просторі

Зменшення відношення C_p/H_p призводить до скорочення кількості теплоти, яка сприймається екранними поверхнями нагрівання, збільшення температури на виході з топки. Зазначене вище пояснюється впливом сажі, яка утворюється на проміжних стадіях горіння у факелі, на тепловіддачу випромінюванням.

На рис. 7 показана залежність вмісту водню у складі штучного газу на співвідношення C_p/H_p .

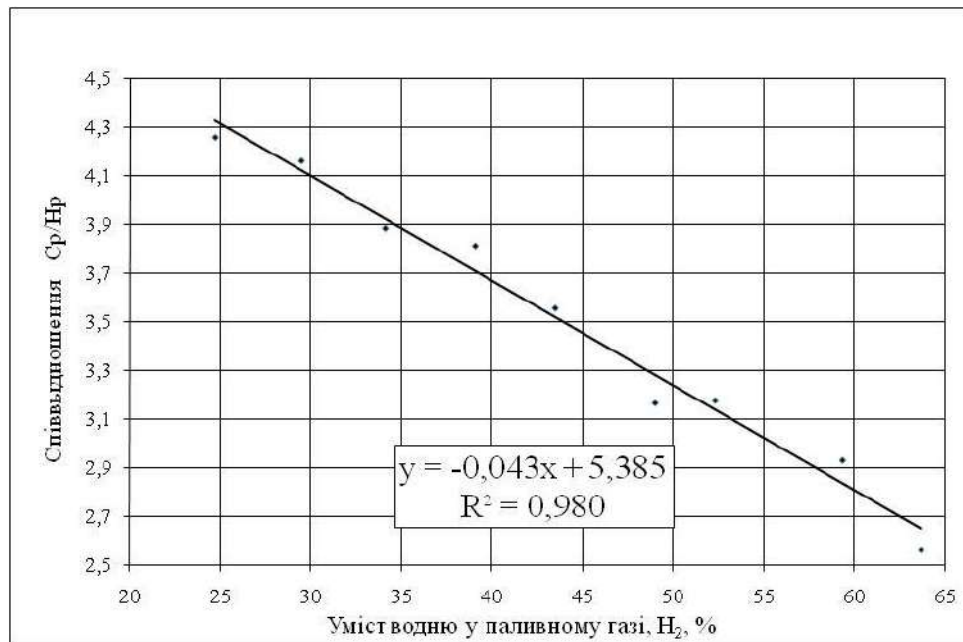


Рис. 7. Вплив кількості водню у складі горючого газу на співвідношення C_p/H_p в елементарному складі газу

Таким чином, використання горючих газів у вигляді суміші водню і природного газу вимагає коригування наявної методики теплового і аеродинамічного розрахунку котельних агрегатів і тепловикористовуючого обладнання (нормативного методу, розробленого Всесоюзним теплотехнічним науково-дослідним інститутом (ВТІ) і Центральним котлотурбінним інститутом (ЦКТІ) у 50-х роках ХХ століття).

Одним із можливих способів спалювання різних газів в одних газопальникових пристроях без суттєвої зміни їхньої конструкції і заміни іншого обладнання, що забезпечує роботу установки, 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. Крім того, необхідно, щоб дещо змінений варіант критерія взаємозамінності — розширений індекс Воббе — для замінюваного газу і газу-замінника не відрізнялися більше ніж на 5%. Розширений індекс Воббе, на відміну від простого, включає тиск газу перед пальником і визначається згідно із залежністю:

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

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 із вмістом

водню до 30% і характеристиками P_2 , ρ_2 , H_2 , обчислюється згідно із залежністю:

$$P_{Г_2} = P_{Г_1} \frac{\rho_2}{\rho_1} \left(\frac{H_1}{H_2} \right)^2,$$

Для комунально-побутових пристроїв номінальний паспортний тиск природного газу перед пальниками становить 1270 Па. Підтримання сталої теплової потужності при переході на спалювання газової суміші із вмістом водню 30% потребує, відповідно до наведеної залежності, збільшення цього тиску до 1500 Па. А для горючої суміші з часткою водню у 50%, що рекомендується 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 зі значним (більшим за 20...25% об.) вмістом 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 з 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 при роботі на горючій суміші із вмістом водню. А зміна тиску газу перед пальником забезпечить сталу теплову потужність.

У разі використання дуттьових пальників необхідна заміна конструкції пальників і їхніх стабілізаторів. При цьому доцільно використання наявного в Україні досвіду організації такого спалювання (зокрема, при спалюванні у промислових установках газів високо- і середньотемпературної перегонки твердого і рідкого палива, а також біогазу).

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

Висновок

Виконано огляд нормативної документації, яка регламентує якість горючого газу, що подається в газотранспортну систему і газові розподільні мережі в Україні. Виконано аналіз основних фізико-хімічних горючих характеристик горючих сумішей природного газу і водню. Проведено експериментальні дослідження спалювання горючих нафтозаводських газів з високим вмістом водню в печах нафтопереробного заводу.

Результати виконаних робіт свідчать про можливість спалювання горючих сумішей водню із природним газом за умови дотримання критеріїв взаємозамінності газів. Такі критерії включають показники забезпечення сталої теплової потужності газоспалюючих установок, відсутності продуктів хімічного недопалу і утворення сажі, відсутності явищ проскоку і відриву полум'я. У статті до розгляду прийнято лише один критерій – простий і розширений індекс Воббе.

Вміст водню у горючій суміші обмежений такими змінами горючих характеристик палива, котрі призводять до неможливості переходу роботи пальників і газоспалювальних установок із природного газу на суміш газів без змін у конструкції пальників, тягодуттьових пристроїв, теплообмінних поверхонь установок або в режимах їхньої роботи. Виходячи з одного з нормативних індексів взаємозамінності — індекса Воббе — граничним вмістом водню в горючій суміші є концентрація водню, що не перевищує 20...25% об.

Експериментальні дослідження інжекційних пальників, встановлених на установках для спалювання нафтозаводських газів з високим вмістом водню, свідчать про масовий перехід їхньої роботи в режим проскоку полум'я за умови збільшення концентрації водню вище 25% об. Це є результатом розширення діапазону між нижньою і верхньою межею горіння, а також значним збільшенням швидкості розповсюдження полум'я за умови збільшення вмісту водню в 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. Необхідні розрахунки для таких змін можуть бути виконані на основі залежностей для визначення індексу взаємозамінності Воббе.

Використання газів з високим вмістом водню вимагає перегляду нормативів з 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 зі значним вмістом водню доцільно

робити, можливо, після більш фундаментальних досліджень з урахуванням усіх факторів впливу і типу газопальникових пристроїв.

У другій частині статті буде розглянуто питання про взаємозамінність горючих газів, виходячи не лише із критерія Воббе, а з урахуванням усіх індексів взаємозамінності, що регламентовано вимогами ДСТУ ISO 13686:2015. Природний газ. Показники якості.

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. and 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. ГОСТ 5542-87 «Газы горючие природные для промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия».
6. Кодекс газотранспортної системи, Постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сфері енергетики та комунальних послуг №2493 від 30.09.2015 р. — <https://www.nerc.gov.ua/?id=18007>.
7. Порядок доступу до газотранспортної системи. Наказ НАК Нафтогаз від 26.03.2001 №79 <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0079376-01#Text>
8. ТУ У 320.001.58764-007-95 «Гази горючі природні, що подаються в магістральні газопроводи».
9. ТУ У 320.001.58764- 008-95 «Гази горючі природні, що подаються з родовищ в промислові газопроводи та окремим споживачам».
10. ДСТУ ISO 13686: 2015. Природний газ. Показники якості (ISO 13686:2013, IDT). ДП «УкрНДНЦ», 2016.
11. Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод). Под редакцией Гурвича А. М. — Л.: Государственное энергетическое издательство, 1957. – 232 с.
12. 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.