

Міністерство освіти і науки України
Національний університет
«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Навчально-науковий інститут нафти і газу
Кафедра теплогазопостачання, вентиляції та теплоенергетики

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи
магістра

на тему: **“Використання альтернативних видів горючих газів
на об’єктах комунально-побутової і промислової
теплоенергетики”**

Виконав: студент гр. 601-НТ

спеціальності 144 Теплоенергетика

"22" 01 2025 р.  Панченко В.О.

Керівник

"22" 01 2025 р.  Колієнко А.Г.

Допустити до захисту:

завідувач кафедри "Теплогазопостачання,
вентиляції та теплоенергетики" _____

к.т.н., проф. Голік Ю.С.

"22" 01 2025 р.

Полтава - 2025

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут, факультет, відділення навчально-науковий інститут нафти і газу

Кафедра, циклова комісія кафедра теплогазопостачання, вентиляції та теплоенергетики

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр

Напрямок підготовки _____
(шифр і назва)

Спеціальність 144 «Теплоенергетика»
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри Голік Ю.С.

" 05 " 09 20 24 року

**ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ СТУДЕНТУ**

Панченко Володимир Олександрович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи): «Використання альтернативних видів горючих газів на об'єктах комунально-побутової і промислової теплоенергетики»

керівник проекту (роботи) Колієнко Анатолій Григорович, к.т.н., проф.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвержені наказом вищого навчального закладу № 818-ф.а. від "09" серпня 2024 року

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 20 січня 2025 року

3. Вихідні дані до проекту. Матеріали нормативів з питань якості горючих газів та взаємозамінності горючих газів. Статті з питань взаємозамінності газів. Склад природних, штучних і синтетичних газів, що використовуються в системах газопостачання. Наукова і методична література з тематики роботи.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити). Аналіз асортименту горючих газів, що використовуються в промисловості, комунальному господарстві України. Визначення горючих характеристик горючих газів. Огляд літератури з питань якості горючих газів і їх взаємозамінності. Розрахунки критеріїв взаємозамінності згідно з вимогами європейських нормативів, імплементованих в Україні. Аналіз горючих газів щодо їх взаємозамінності. Розрахунки процесів спалювання і тепловіддачі горючих газів. Оцінка впливу складу газу на процеси теплообміну в топковому просторі котлів. Розроблення рекомендацій щодо використання горючих газів різного складу в системах промислового і комунального газопостачання

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Ілюстрації виконаних досліджень.

1. Властивості горючих газів, котрі можуть використовуватись в паливоспалювальному обладнанні.
2. Розрахункова модель хімічних реакцій горіння та визначення складу димових газів.
3. Аналітичні залежності для визначення фізико-хімічних показників горючих газів та процесу горіння
4. Аналітичні залежності для визначення критеріїв взаємозамінності.
5. Класифікація критеріїв взаємозамінності за їх призначенням
6. Фізико-хімічні показники газів дослідження та процесів горіння, первинна оцінка взаємозаміни
7. Класифікації газів на основі порівняння з граничними газами стандарту EN 437. Аналіз роботи невідповідного обладнання.
8. Робота стандартних пальників з газовими сумішами, номограми змішування газів.
9. Схеми систем утворення паливних газових сумішей, пальник для газових сумішей.
10. Аналітичні залежності для оцінки теплообміну випромінюванням.
11. Графічні залежності зміни теплопередачі випромінюванням газів дослідження.
12. Зміни теплопередачі випромінюванням у топці котла БГ-35.

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
	-		

7. Дата видачі завдання 05.09. 2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналіз властивостей горючих газів. Визначення фізико-хімічних характеристик	10.24	
2	Розгляд критеріїв взаємозамінності їх класифікація і узагальнення	10.24	
3	Виконання розрахунків щодо можливості використання горючих газів, аналіз критеріїв взаємозамінності.	11.24	
4	Розрахунки процесів згорання і тепловіддачі різних газів у паливоспалювальному обладнанні	12.24	
5.	Розроблення рекомендацій щодо використання горючих газів різного складу в паливоспалювальному обладнанні.	01.24	

Студент



(підпис)

Керівник проекту
(роботи)



(підпис)

Панченко В.О.
(прізвище та ініціали)

Колієнко А.Г.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота магістра присвячена дослідженню використання альтернативних видів горючих газів на об'єктах комунально-побутової й промислової теплоенергетики.

У першому розділі проведений огляд розв'язків науково-технічної проблеми взаємозамінності газів, напрямків розв'язання проблеми та актуальності сьогодення. Другий розділ присвячений реалізації аналітичних методів визначення взаємозамінності газів. Третій розділ присвячений реалізації розрахункових методів визначення фізико-хімічних показників горючих газів, продуктів згорання та процесу горіння. У четвертому розділі проведено дослідження паливних газів на можливість взаємозаміни із застосуванням нових вимог європейського стандарту EN 437. П'ятий розділ присвячений дослідженню утворення сумішей невзаємозамінних горючих газів у випадку застосування стандартних пальників. Шостий розділ присвячений дослідженню використання альтернативних видів горючих газів з оцінкою процесів теплопередачі в теплоенергетичному обладнанні. У сьомому розділі запропоновані заходи підняття енергоефективності роботи котлового обладнання при використанні альтернативного палива, виконано економічне обґрунтування заходів модернізації.

Ключові слова: взаємозаміна газів, число Воббе, індекси взаємозаміни, EN 437, біогаз, біометан, генераторний газ, теплопередача випромінюванням.

ABSTRACT

The qualification work of the master's degree is devoted to the study of the use of alternative types of combustible gases in municipal, residential, and industrial heat power facilities.

In the first chapter, a review of scientific and technical solutions to the problem of gas interchangeability, approaches to solving the issue, and its current relevance is conducted. The second chapter focuses on the implementation of analytical methods for determining gas interchangeability. The third chapter is dedicated to the development of computational methods for determining the physicochemical properties of combustible gases, combustion products, and the combustion process.

In the fourth chapter, a study is conducted on the interchangeability of fuel gases using the new requirements of the European standard EN 437. The fifth chapter investigates the formation of non-interchangeable combustible gas mixtures in cases of using standard burners. The sixth chapter explores the use of alternative types of combustible gases with an assessment of heat transfer processes in thermal power equipment. In the seventh chapter, measures to improve the energy efficiency of boiler equipment using alternative fuels are proposed, and the economic justification for modernization measures is provided.

Keywords: gas interchangeability, Wobbe index, interchangeability indices, EN 437, biogas, biomethane, producer gas, radiant heat transfer.

ЗМІСТ

ВСТУП	3
1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	
1.1 Аналіз проблематики взаємозамінності газів	5
1.2 Аналіз методик визначення взаємозамінності паливних газів.....	10
1.3 Вибір газів дослідження	15
1.4 Постановка задач досліджень	23
2 АНАЛІТИЧНІ МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ВЗАЄМОЗАМІННОСТІ ГАЗІВ	
2.1 Критерії сталості теплової потужності газоспалювального устаткування	25
2.2 Аналіз розрахункових методів взаємозаміни газів, індекси взаємозамінності газів	29
2.3 Реалізація методики отримання еквівалентної суміші для методу Даттона	42
2.4 Аналіз обмежень щодо застосування методів взаємозамінності.....	44
2.5 Класифікація індексів згідно з характеристиками взаємозаміни	46
3 АНАЛІТИЧНІ МЕТОДИ АНАЛІЗУ ПРОЦЕСІВ ГОРІННЯ ГАЗІВ	
3.1 Побудова розрахункової моделі реакцій горіння та визначення складу димових газів	50
3.2 Розрахункові методи визначення фізико-хімічних показників горючих газів та процесу горіння	53
3.3 Методи аналітичних розрахунків температур горіння газів.....	59
3.4 Аналітичний метод уточненого розрахунку тепломісткості газів.....	62
4 ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОЗАМІННОСТІ ГАЗІВ	
4.1 Аналіз фізико-хімічних показників горіння газів	64
4.2 Аналіз стандарту EN 437. Класифікація газів дослідження згідно з числом Воббе.....	67
4.3 Оцінка взаємозаміни газів на основі простого числа Воббе.....	74
4.4 Оцінка взаємозаміни газів на основі розширеного числа Воббе.....	75

					601-НТ-11393643-МР			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Використання альтернативних видів горючих газів на об'єктах комунально-побутової і промислової теплоенергетики	Літ.	Арк.	Аркуші
Розроб.	Панченко В.О.						1	139
Перевір.	Колієнко А.Г.					Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», кафедра ТГВ та Т		
Зав. кафедри	Голік Ю.С.							

ВСТУП

Використання газоподібного палива завжди породжує низку інженерних і наукових проблем щодо можливості взаємної заміни. Навіть використання одного типу палива, такого як природний газ, пов'язане з проблемами змін в процесі горіння газу на деякому обладнанні при зміні родовища походження газу. Історично розвиток теплоенергетичної галузі завжди був пов'язаний з розв'язанням даної проблеми. Сучасний стан технічного розвитку теплоенергетики вимагає удосконалення приладів газового спалення, забезпечення гарантованої якісної роботи на заданому класі паливних газів. Крім використання класичного природного газу йшов і продовжується розвиток сфери використання різноманітних газів штучного походження, таких як біогаз та різноманітні види генераторного газу. Розвиток «зеленої енергетики» порушує питання можливості використання водню на базі сучасної газотранспортної системи та чинного газоспалювального обладнання. Отже, питання взаємної заміни паливних газів, можливості побудови газових сумішей з необхідними фізико-хімічними показниками являються актуальними в наступний час в самих різноманітних сферах теплоенергетики.

Проблеми взаємозамінності газів можна розглядати окремо згідно з особливостями використання як на об'єктах комунально-побутової, так і на об'єктах промислової теплоенергетики. Для комунально-побутової сфери характерно використання саме природних газів і актуальним являється гарантоване якісне та безпечне використання приладів як на побутовому рівні, так і на підприємствах комунального призначення. Промислова теплоенергетика може дозволити собі пошук альтернативних видів газового палива, розвиток необхідних технологій для його використання із забезпеченням необхідних систем контролю із залучанням спеціалістів необхідного технічного рівня. Таке розширення альтернатив газового палива в кінцевому результаті стає показником розвитку теплоенергетичних технологій країни та забезпечення її енергонезалежності. Але чи то простота, безпека та якість використання газоспалювального обладнання в комунально-побутовій сфері, або технологічний розвиток у сфері промисловій -

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						3
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

можуть забезпечуватися лише рівнем науки та інженерії в питаннях взаємозамінності газів.

Перед Україною розкриваються можливості перспективного розвитку галузі виробництва біогазу та біометану, і це обумовлює необхідність науково-технічного пошуку в питаннях використання альтернативного газового палива. До недавнього часу Україна в цих питаннях спиралася на стандарти радянських часів, але шлях до Європейського союзу вимагає переходу і саме втілення його стандартів. І ці стандарти підіймають вимоги безпеки щодо роботи газоспалювального обладнання, його енергоефективності та високого рівня екологічності.

На даний час в Україні вже реалізовані проекти щодо виробництва біогазів та біометанів. Вже є досвід інтеграції підприємств з виробництва біометану в газотранспортну мережу. Біогази вже знаходять використання на об'єктах промислової теплоенергетики. Таке використання являється лише першим вітчизняним досвідом і вимагає пошуку рішень щодо підняття енергоефективності роботи обладнання. Також в Україну постачаються газові прилади, що випускаються згідно з європейськими стандартами, і виникає актуальне питання їх застосування в умовах паливних газів України.

Отже, розробка питань та проведення досліджень в напрямку оцінки можливості та умов використання альтернативних видів горючих газів на об'єктах комунально-побутової та промислової теплоенергетики являється актуальною науково-технічною задачею.

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1 Аналіз проблематики взаємозамінності газів

Використання газових паливних сумішей на об'єктах комунально-побутової і промислової теплоенергетики актуалізують перелік питань щодо ефективності спалювання, меж допустимості в різноманітності складу, забезпечення стабільності та безпеки роботи паливоспалювального обладнання, мінімізації негативного впливу на екологію.

Історично класичним і найпоширенішим паливом в комунально-побутовій та промисловій теплоенергетиці зазвичай був і є природний газ. Але проблема полягає в тому, що не існує фіксованого хімічного з'єднання газу, а є лише суміш, до складу якої входять вуглеводні: метан (CH_4), етан (C_2H_6), пропан (C_3H_8), бутан (C_4H_{10}), пентан (C_5H_{12}), баластні домішки - зазвичай азот (N_2) та невеликі домішки двоокисі вуглецю CO_2 , також невеликі домішки водню (H_2) та інертних газів (He). Найбільшим і головним компонентом природного газу є метан. Але історично досвід використання природного газу вказував на суттєвий вплив цих домішок на процес горіння, а отже, ефективність роботи обладнання, стабільність, безпечність, екологічні показники. Тобто зміна родовища могла привести до неможливості використання паливоспалювального обладнання. Це порушувало технічні питання і створювало наукову проблему оцінки можливості застосування приладів на газах різних родовищ і головне - розробки приладів для роботи на газах рідних родовищ. Так, з 40 років минулого сторіччя починають розроблятися методи оцінки можливості взаємозаміни паливних газів, в той час найбільше для родовищ газів природних. Ці методи розвивалися науковцями та газовими компаніями країн Європи та США. У світі природний газ став основним паливом комунально-побутової сфери теплоенергетики.

Але природний газ не є єдиним можливим паливом в теплоенергетиці. Видобуток нафти і газу, перероблення нафти приводили до можливості отримання газів в яких метан вже не був головним газом, а лише домішкою. Щобільше, розвиток промисловості привів до можливості отримання різноманітних штучних газів: генераторний, коксовий, доменний, заводський нафтовий. Далі в

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

агропромислового секторі з'являється біогаз. Отже, технології металургії, перероблення нафти, перероблювання міських сміттєвих відходів, а також відходів агропромислового виробництва дали можливість отримання самих різноманітних газових паливних сумішей. Але слід зазначити, що ці гази вже розглядаються здебільш паливом саме промислового сектора, де на відміну від сектору комунально-господарського можуть бути застосовані прилади контролю технологічного процесу спалювання та залучений відповідний інженерний персонал.

Слід зазначити що процес отримання газових сумішей не зупиняється. Так, в майбутньому, після розробки технології промислового добування водню очікується використання сумішей на його основі, про що свідчать наукові публікації з дослідження властивостей газів з цією домішкою [1]. При цьому метою використання «зеленого водню» є забезпечення непрямої акумуляції електроенергії та зниження інтенсивності викидів діоксиду вуглецю в атмосферу. В цьому напрямку розглядаються питання транспортування воднево-газових сумішей без зміни чинної інфраструктури трубопроводів, роботу різних типів енергетичного обладнання.

Що стосується історії розв'язання наукової проблеми взаємозамінності, то склалася ситуація коли та чи інша країна мала свої підходи або системи оцінки взаємозаміни газів, або асоціація газових компаній пропонувала свої розробки в цій сфері. Але так чи інакше в цьому досвіді народилася ідея розділення всього спектру газів на три сімейства: сімейство газів з вищими вуглеводнями як основним компонентом, сімейство сумішей природних газів з метаном як основним компонентом, та сімейство сумішей водню, оксиду вуглецю лише з деякою домішкою метану. Був вироблений і загальний універсальний підхід щодо можливості заміни паливних газів. При цьому головним критерієм був обраний критерій забезпечення сталої теплової потужності теплового устаткування на основі числа Воббе, який об'єднав такий показник як калорійність спалювання та відносну густину газу. Рівність чисел Воббе для різних газів давала підтримку сталої потужності устаткування при переході з одного газу на інший. Але такий підхід не вирішував всіх проблем взаємозаміни. Тому науково-технічні пошуки

										Арк.
										6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

601-НТ-11393643-МР

компаній та різноманітних науковців привели до пропонування так званих індексів взаємозаміни [2]. На розгляд були поставлені питання недопустимих явищ в пальниках, таких як:

- відрив полум'я, що приводив до погіршення якості горіння або взагалі зникнення полум'я в пальнику;
 - повернення полум'я, а пальник (проскок), що приводив взагалі до руйнації пальника;
 - неповне згорання газу з виділенням отруйної речовини монооксиду вуглецю, або явища сажоутворення, що було небезпечним для здоров'я, призводило до екологічного забруднення, знижувало ККД установки, приводило до необхідності ремонту чи додаткового технічного обслуговування обладнання.
- Індекси взаємозаміни з однієї сторони вказували на наявність тенденції відповідного явища при заміні газу, з іншої сторони - давали можливість підтвердження безпечного переходу з одного газу на інший згідно з обраним критерієм.

Єдиним універсальним рішенням в Європі стала розробка стандарту взаємозаміни газів EN 437:2003 «Test gases.-Test pressures. Appliance categories». Стандарт акумулював накопичений досвід і ввів розділення всього спектру газів на три сімейства. При цьому два сімейства були розбиті на частини, так звані групи. Розбивка була здійснена згідно з величиною числа Воббе. Стандарт указав, що прилад спалювання газу відповідної групи повинен підтримувати можливість якісного та безпечного спалювання всіх газів даної групи. Також стандарт ввів систему штучних граничних газів з вказанням їх складу. Стандарт зобов'язав розробників приладів виконувати тестування виробів на штучних граничних газах для підтвердження можливості ефективної та безпечної роботи на всіх газах, що належать відповідній групі.

Що стосується досвіду України, то країна спочатку перейняла досвід СРСР. В Україні для комунально-побутових споживачів природний газ був і є основним видом палива. Питання взаємозаміни природних газів ще до недавнього часу регламентувалися технічними умовами ГОСТ 5542-87 [3]. Стандарт встановлює мінімальну допустиму межу нижчої теплоти згорання на рівні 31,8 МДж/нм³ (7600

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ккал/м³), границі області чисел Воббе вищої теплоти згоряння 41,2-54,5 МДж/м³ (9850-13000 ккал/м³) та допустимість відхилення числа Воббе при переході з номінального газу на інший на рівні 5% числа Воббе. Отже, згідно ГОСТ 5542 – 87 критерієм взаємозамінності горючих газів є число Воббе. При цьому газу вважаються взаємозамінними без внесення змін у роботу пальників за умови рівності для них чисел Воббе, які характеризують як теплову потужність, так і аеродинамічні параметри пальників при постійному тиску газу. Але слід зазначити, що ГОСТ взагалі більш ніяк не розглядає інші проблеми та питання взаємозаміни природних газів. Другим нормативним документом щодо якості і фізико-хімічних показників газу є Кодекс газотранспортної системи. Згідно з документом [4] вимога подачі газу у газотранспортну систему вимагає мінімально допустимий вміст метану на рівні 90% об, а максимально допустимі концентрації вищих вуглеводів: 7%об для етану, 3%об для пропану. Нижча теплота згорання повинна лежати у межах 32,66 – 34,54 МДж/м³. Документ вказує на необхідність контролю числа Воббе без зазначення допустимих меж відхилень.

У 2014 році Україна прийняла європейський стандарт, який став ДСТУ ГОСТ EN 437:2014 «Випробувальні газу. Випробувальний тиск. Категорії приладів». Але важливо зазначити, що втілення цього стандарту знаходиться на початковому етапі і представляється подальшою справою науково - технічного розвитку теплоенергетичної галузі. Як зазначається в [5], на відміну від інших країн ЄС цей документ не адаптований повністю до умов українського газового ринку. Отже, в теперішній час є актуальним питання набуття практичного досвіду в застосування цього стандарту, як у сфері експлуатації та випробувань газових приладів спалювання, так і у сфері проєктування цих приладів, коли насамперед відсутні методики використання стандарту для проєктних розрахунків.

Отже, щодо проблематики використання різних типів газів на одному обладнанні можна визначити наступне [2]: що під взаємозамінністю газів необхідно розуміти можливість сталої, безпечної та ефективної роботи газоспалювального обладнання при заміні одного горючого газу на інший газ без внесення в конструкцію пальника або іншого обладнання установки використання палива будь-яких змін, а також без зміни налаштувань режиму роботи такого

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обладнання. При цьому можливість безперешкодного та неодноразового переходу з одного горючого газу (або суміші газів) на інший газ зі збереженням основних характеристик процесу горіння (з прийнятими допусками) існує тільки для категорії взаємозамінних газів.

Іншою технічною проблемою при переході з деякого базового газу на альтернативний газ є зміни в процесах теплообміну в самому газоспалювальному обладнанні. Отже, якщо забезпечити незмінність теплової потужності роботи пальника та забезпечити критерії ефективності та безпеки процесу спалювання то постає питання яким чином новий склад димових газів відобразиться на протіканні теплообміну в обладнанні. Так, відбудуться зміни в складі газів факела, а отже, зміниться величина передачі тепла випромінюванням в топці (у випадку котла). Це призведе до зміни ентальпії газів і відповідно до змін в процесі теплообміну на конвективних поверхнях передачі тепла подальших блоків котлового обладнання. Так чи інакше це призведе до змін в параметрах вихідного теплоносія, погіршення ККД обладнання внаслідок відхилень від умов паспортного режиму роботи.

Так в [5] розглядаються питання щодо застосування зокрема і сумішей горючого газу і водню. При цьому отриманий новий склад продуктів згоряння приводить до зменшення емісійної тепловіддачі факела. При цьому вказано на можливість виконання оцінки зменшення тепловіддачі гідно параметру C_p/H_p , як відношення мас вуглецю та водню еквівалентної складу паливної суміші. Отримані залежності вказують на тенденцію погіршення теплопередачі випромінюванням при зменшенні величини C_p/H_p паливного газу, а отже, застосування такого альтернативного палива призведе до зниження як теплопродуктивності устаткування, так і до погіршення ККД теплогенераційного обладнання загалом.

Отже, виникає питання який характер будуть набувати зміни в теплообміні й до яких наслідків це призведе при переході з одного паливного газу на інший. Відповідно актуальним питанням постає отримання критерію взаємозамінності газів саме з огляду на зміни в процесах теплообміну.

В [6] вказується про неможливість безпосередньої заміни природного газу на генераторний, нафтозаводський або біогаз. Але використання цих газів цілком

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

можливо при утворенні сумішей з природним газом, коли штучний газ подається лише в невеличкій частці. Отже, виникає питання дослідження вимог до утворення таких сумішей для можливості їх використання в паливоспалювальному обладнанні згідно з критеріями взаємозаміни.

1.2 Аналіз методик визначення взаємозамінності паливних газів

Науково-технічний пошук розв'язку проблем взаємозаміни привів до розробки різноманітних теоретичних методик оцінки якості та безпеки роботи обладнання при його переході з одної паливної газової суміші на іншу. Можна виділити два базових підходи при розв'язанні цього питання.

1. Визначення основних фізико-хімічних властивостей паливних газів та оцінка можливостей взаємозаміни на основі порівняння визначених показників.

2. Використання систем індексів взаємозаміни.

У випадку порівняння фізико-хімічних властивостей визначаються та порівнюються такі показники як:

- теплота згорання палива;
- теоретичні витрати повітря на горіння;
- об'єм продуктів згорання;
- максимальна швидкість розповсюдження полум'я;
- максимальна швидкість розповсюдження полум'я з врахуванням баластних домішок;
- концентрації меж спалахування газової суміші (верхня та нижня межі);
- коефіцієнт надлишку повітря на межах спалахування;
- температура горіння газу.

У [5] проводиться аналіз цих показників для метану, водню та їх сумішей різних пропорцій. На основі результатів порівняння даються висновки щодо умов допустимої складу альтернативної паливної суміші та можливих негативних наслідків та ризиків при переході на альтернативне паливо на основі домішки водню.

Інший підхід - застосування систем індексів взаємозаміни, котрі почали розроблятися ще в сорокових роках ХХ сторіччя і являється актуальними в

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сьогоднішній час. Аналіз літературних джерел вказує на процеси модернізації цих методик під потреби сучасного обладнання та нових альтернативних паливних газових сумішей. Індекси - розрахункові показники фізико-хімічних властивостей паливних газових сумішей з використанням емпіричних залежностей та констант. Аналізу призначень, особливостей застосування присвячені публікації: [2], [7], [8], [9].

Критерій Воббе. Найпоширенішим критерієм взаємозаміни є критерій рівності чисел Воббе. Така рівність для основної паливної суміші та альтернативного виду палива вказує на можливість взаємозаміни газів згідно з критерієм забезпечення сталої теплової потужності газоспалювального обладнання. При цьому допускається 5% відхилення цих чисел. При різності більше цієї величини для забезпечення сталої потужності обладнання при переході на інший газ необхідно вже штучно змінювати величину подачі палива і в тому числі за допомогою модернізації пальника. В цьому випадку застосовується підхід з порівнянням так званого розширеного числа Воббе. Але крім цього енергетичного критерію взаємозаміни газів постають інші питання пов'язані з якістю процесу горіння, безпеки роботи газоспалювального обладнання. І для оцінки можливості взаємозаміни згідно з іншими критеріями були розроблені системи на основі застосування різноманітних індексів. Ці розрахункові показники представляють потужний теоретичний інструмент дослідження властивостей різноманітних паливних сумішей, про що свідчать приклади такого їх застосування. Так, в [10] інструментарій індексів застосований для оцінки можливих паливних альтернатив самих різноманітних видів газового палива від піролізного розкладання пластикових відходів. В [11] за допомогою цього інструментарію проводиться вивчення властивостей нових сумішей та можливостей їх застосування при змішуванні природного газу з сумішшю газів вугільних пластів Китаю, котрі самі по собі не можуть бути використані в газоспалювальному обладнанні і вимушені викидатися в атмосферу.

До цього інструментарію індексів можна віднести наступні найпоширеніші критерії визначення взаємозаміни паливних газів.

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Дельбург стверджує, що гази з різних сімей не можуть бути взаємозамінними, а перехід від одного газу до іншого вимагає щонайменше заміни інжекторів пальника. Отже, вважається, що проблема взаємозамінності обмежується газами однієї й тієї ж сім'ї. Це твердження підкреслює, що різні сім'ї газів (наприклад, гази першої, другої та третьої сім'ї, як описано в методі Дельбурга) мають свої специфічні характеристики, які не дозволяють їх взаємозамінність без необхідних адаптацій або змін у системі згорання.

Індекси метода Дельбурга: модифікований індекс Воббе - показник можливості заміни з огляду на підтримку теплової потужності, потенціал згорання C - характеристика швидкості згорання палива, число жовтих кінчиків I_j , число сажі I_s .

Проблема універсалізації підходів. З розробкою методів виникла ситуація, коли різні країни приймали для офіційного нормативного використання різні методи. При цьому методи для випадків розгляду тих чи інших паливних газів можуть давати результати з деякими відхиленнями показників. І це завжди породжує дискусію стосовно того, який метод в якій ситуації дає більш точні та кращі в практиці результати. Огляд публікацій вказує, що для розв'язання задач взаємозаміни використовуються усі методи, після чого проводиться порівняння результатів. Отже, всі методи використовуються як інструментарій вивчення властивостей газів і ніякий з них не може претендувати на якийсь всесвітній норматив. Але проблема відмінностей підходів при розробці обладнання для спалювання поглиблювалася завдяки тому, що різні країни на основі прийнятого нормативного методу ставили свої вимоги щодо допустимих діапазонів значень індексів прийнятих ними методик. Отже, допустимі до експлуатації прилади в одній країні могли стати недопустимими для експлуатації в іншій з огляду як на вимогу якості спалювання, так і на величини індексів прийнятих розрахункових методів.

Для розв'язання проблем сумісності й створення єдиного універсального підходу в розробці приладів для спалювання різноманітних паливних газів і був розроблений європейський стандарт EN 437:2003. Але замість критеріїв взаємозаміни газів він пропонує не методики розрахунків, а граничні гази. Кожен

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

прилад повинен пройти реальне випробовування на відповідних граничних газах. Кожному небезпечному явищу процесу горіння відповідає свій граничний газ. І саме граничні гази стають критеріями допустимих тих чи інших альтернативних газів для газоспалювального обладнання.

Задачею даного дослідження ставимо оцінку властивостей самих граничних газів методами взаємозаміни. Оцінку можливості використання отриманих показників індексів для граничних газів при розв'язку питань щодо класифікації паливних газів України і визначення відповідних сімейств і груп приладів в системі стандарту для альтернатив палива у сферах комунально-побутової та промислової теплоенергетики.

1.3 Вибір газів дослідження

Для подальшого розгляду питання використання альтернативних видів горючих газів та можливої їх взаємозаміни виконаємо аналіз природних та штучних паливних газів України.

В [14] надається перелік деяких газових та газоконденсатних родовищ України - Таблиця 1.1.

Таблиця 1.1 - Газові та газоконденсатні родовища України

Родовище	Складові природних газів, % об							
	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	CO ₂	H ₂ S	N ₂
Свидницьке	98.3	0.14	-	-	-	0.2	-	1.4
Дашавське	97.6	0.39	0.18	0.13	0.15	0.1	-	1.4
Битківське	91.8	4.3	1.74	0.64	0.29	0.2	-	1.1
Рудківське	95.5	0.6	0.48	0.3	0.17	0.1	-	2.9
Велико - Мостівське	92.6	2.73	0.25	-	-	0.1	-	3.92
Радченки	86.09	0.20	0.15	0.05	-	0.17	0.001	13.13
Пролетарське	87.0	5.26	2.40	2.02	1.39	0.45	-	1.42
Шебелинське	92.8	3.97	0.97	0.29	0.35	0.1	-	1.46
Гнідинцівське	77.46	11.55	4.60	1.65	1.04	1.48	-	2.17
Зах Октябрське	71.68	9.82	8.16	4.31	1.57	0.1	-	1.14
Джанкойське	96.23	0.31	0.1	-	-	0.8	-	2.46

Отже, можна побачити різноманіття концентрацій компонентів. Ці компоненти природних газів можна класифікувати на три головні категорії:

- а) головний компонент - метан з коливанням вмісту в межах 71,7-98,3%об;
- б) вищі вуглеводні - з коливаннями вмісту в межах 0,34% - 24%;
- в) баластні домішки азоту та діоксиду вуглецю - з коливаннями вмісту в межах 0,1% - 24%.

Для створення переліку газів дослідження оберемо показникові приклади з досить суттєвою різницею теплоти згоряння, також оберемо біогази з суттєвими різницями вмісту метану.

Згідно з аналізом таблиці 1.1 газ найменшої калорійності буде відповідати суміші з мінімальною кількістю вуглеводів та максимум інертних газів. У переліку газових і газоконденсатних родовищ таким представником являється природний газ родовища Радченки. Газ найбільшої калорійності, це газ з мінімумом інертних домішок та максимумом вуглеводів вищих порядків. В цьому переліку прикладом може бути газ родовища Зах. Октябрське. Такий газ може бути використаний при потребі на промислових об'єктах і без подачі його в газотранспортну систему з причини низького вмісту метану. Варіантом газу дослідження з можливістю його подачі в газотранспортну систему на об'єкти комунально-побутової теплоенергетики може бути обраний газ родовища Битківське. Також оберемо газ з усередненою величиною вмісту метану родовища Рудківське.

Перелік відповідного складу представимо у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 - Вибірка природних газів граничних характеристик, % об

Родовище	CH ₄ , % об	C ₂ H ₆ , % об	C ₃ H ₈ , % об	C ₄ H ₁₀ , % об	C ₅ H ₁₂ , % об	CO ₂ , % об	H ₂ S, % об	N ₂ , % об
Радченки	86,09	0,20	0,15	0,05	-	0,17	0,001	13,13
Рудківське	95,45	0,6	0,48	0,3	0,17	0,1	-	2,9
Битківське	91,8	4,3	1,74	0,64	0,64	0,2	-	1,03

Примітка: сумарна концентрація компонентів в джерелах може не дорівнювати 100%. Можливо причиною є невказані домішки. В такому випадку будемо проводити нормалізацію величин концентрацій.

Вибір природних газів дослідження Полтавського регіону. Скористаємося паспортами фізико-хімічних показників природного газу ГПУ Полтавагазвидобування від лабораторії ПК "Веє-UGV". Дані представлені в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 - Лабораторні дані молярного складу природних газів Полтавського регіону (2024 рік)

Родовище	Метан, % моль	Етан, % моль	Пропан, % моль	Ізо-бутан, % моль	Н-бутан, % моль	Н-С4 ізо-пентан, % моль	І-С5 н-пентан, % моль	Н-С5 нео-пентан, % моль	Нео-С5 гексани та вищі, С6+, % моль	Кисень, % моль	Азот, % моль	Діоксид вуглецю, % моль	Водень, % моль	Гелій, % моль
УКПНГ	93,206	3,3912	0,7907	0,137	0,2894	0,0667	0,1088	0,0046	0,2347	0,0029	1,5836	0,1842	-	-
ВРГ Котелевської УСП	86,285	5,9627	2,4485	0,3334	0,6119	0,1483	0,136	0,0047	0,2254	0,0055	1,1288	2,7094	-	-
ВРГ Копилівської ТДПУ	90,513	3,8102	1,237	0,1804	0,3044	0,0956	0,0871	0,0049	0,2711	0,0036	3,3232	0,1691	-	-
Тимофіївської УКПГ (В.Будища)	85,04	7,91	0,8192	0,0278	0,0563	0,0688	0,3531	0,0006	0,7991	0,0082	3,3153	1,5347	0,002	0,0652
АГРС Гадяч	87,038	6,4242	0,8357	0,0353	0,0713	0,0776	0,3098	0,0004	0,2672	0,0078	3,4515	1,4126	0,0018	0,0664
ВРГ Михайлівської УКПГ	97,017	0,2599	0,019	0,0058	0,0044	0,002	0,0011	0,0023	0,0031	0,0146	2,5088	0,1624	-	-
ПВВГ УКПГ Машівка	89,532	3,8869	1,0997	0,1608	0,2281	0,0898	0,0711	0,0059	0,1363	0,01	4,4879	0,2914	-	-
УКПГ Березівка на Солоху	89,34	4,314	1,4658	0,1744	0,3437	0,0826	0,0739	0,0028	0,0696	0,0024	0,6969	3,434	-	-
УКПГ Опішня на Дельбао	91,225	3,0515	0,8955	0,1034	0,2133	0,0564	0,0547	0,003	0,2424	0,0074	0,5196	3,6283	-	-
ВРГ Яблунівської УКПГ (ВРГ Шеки)	84,249	6,1127	2,277	0,2403	0,5458	0,1239	0,1341	0,0041	0,2108	0,0067	1,0353	5,0145	0,0043	0,042
ВРГ Комишнянської УКПГ (ВРГ Попівка)	92,699	1,8543	0,2163	0,0319	0,043	0,0126	0,0062	0,0042	0,0167	0,0033	0,2082	4,9043	-	-

При дослідженні питання взаємозамінності газів окрему увагу звернемо на момент постачання в Україну газоспалювального обладнання групи L згідно з класифікацією стандарту EN 437. Отже, постає питання відповідності природних газів України цій групі приладів.

Представимо графічно склад деяких газових родовищ.

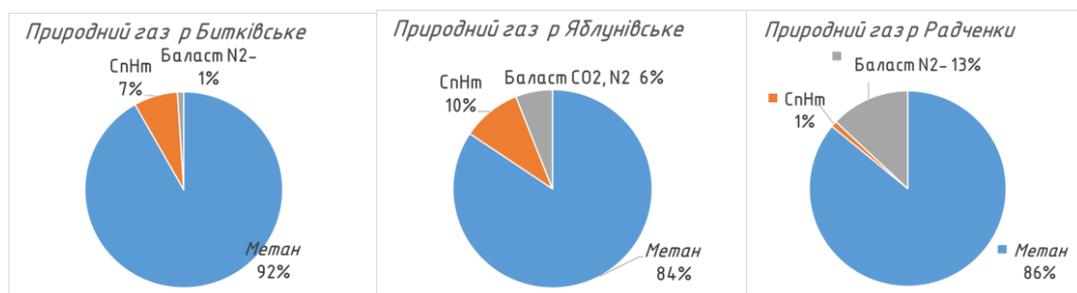


Рисунок 1.1 – Графічне представлення складу деяких газових родовищ

Вибір варіацій біогазів. Галузь виробництва та застосування біогазу являється перспективною енергетичною галуззю промисловості України, а саме її агропромислового сектору. Біогаз являє собою альтернативу традиційному природному газу з огляду на достатньо високу ціну на європейському ринку та частих явищ високого коливання рівня цін. Світова практика розвитку галузі виробництва біогазу являє собою приклад розв'язання екологічних проблем утилізації відходів агропромислового комплексу. Так, наприклад, в агропромисловому секторі виробництва цукру завжди існувала проблема утилізації жому цукрових буряків. Без утилізації зберігання сирого жому великих обсягів призводить до закисання ґрунтів та отруєння атмосферного повітря кислотними виділеннями.

При розв'язанні екологічної проблеми жомових відходів існує шлях сушіння і грануляції, що перетворює відходи в сухий кормовий продукт. Друге розв'язання проблеми – створення комплексів бродіння жомової суміші. Виходом процесу бродіння являється метан в складі біогазової суміші та неорганічне природне добриво. Біогази після осушення та очищення від домішок сірководню мають використання в промисловому та агропромисловому комплексі підприємств України. Концентрація складників біогазу залежить від умов сировини та особливостей протікання процесу бродіння біомаси. В [15] приводиться таблиця концентрацій компонентів біогазу.

Отже, дані свідчать, що об'ємна частка головного паливного компонента - метану в біогазі може коливатися в межах 45 - 70%. Тоді як другим за величиною частки компонентом являється діоксид вуглецю CO₂ з вмістом до 50%. Загальний вміст баластних домішок лежить в межах 27 - 55%. Також для біогазу характерна невеликий вміст водню - до 3% об. Для подальшого аналізу візьмемо граничні склади з огляду на калорійність - таблиця 1.4. Також оберемо склад умовного усередненого газу. Величини концентрацій задаємо як середні значення граничних складів.

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.4 - Вибірка складу біогазу граничних характеристик, % об

Найменування	CH ₄ , % об	C ₂ H ₆ , % об	C ₃ H ₈ , % об	C ₄ H ₁₀ , % об	C ₅ H ₁₂ , % об	H ₂ , % об	CO ₂ , % об	N ₂ , % об
Біогаз 1	70	-	-	-	-	3	26	1
Біогаз 2 (усереднений склад)	57,5	-	-	-	-	1,5	38	3
Біогаз 3	45	-	-	-	-	-	50	5

Представимо графічно склад обраних біогазів.

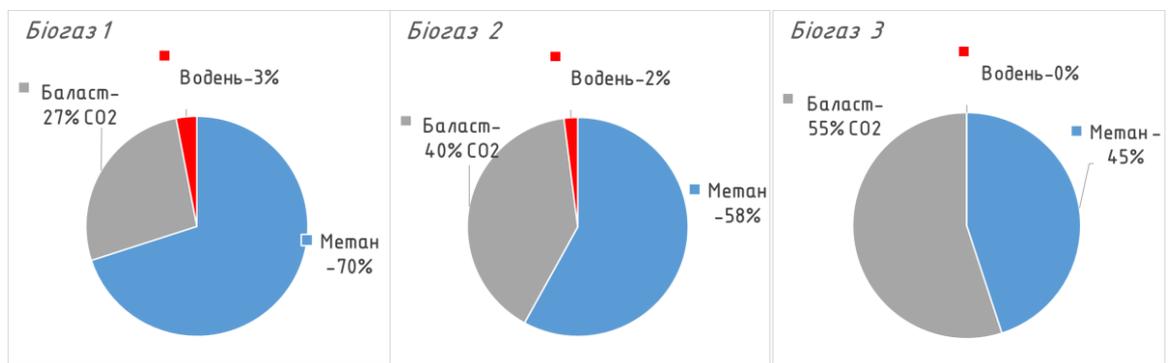


Рисунок 1.2 – Графічне представлення складу обраних біогазів

Вибір варіацій біометанів. В теперішній час у світі, і зокрема в країнах ЄС розвивається виробництво біометану. Як відомо, біометан є біогазом з якістю, доведеною до рівня природного газу. Згідно, [16] сумарне виробництво біометану та біогазу у 2030 році має становити 42 млрд м³, а у 2050 році вже 125 млрд м³. Очікується, що вже у 2030 році частка біометану має перевищити 80% у загальному виробництві біогазу і біометану. Серед країн ЄС найбільшу кількість біометанових установок має Німеччина – 242, за нею йдуть Франція та Велика Британія. За деякими оцінками виробництво біометану в Україні може досягти 1 млрд м³ в рік до 2030 року за сприятливих умов.

Вимоги до виробництва та використання біометану варіюються залежно від країни, враховуючи національні стандарти якості газу, технологічні процеси та механізми державної підтримки. Так, стандарти якості країни ЄС мають різні вимоги до складу біометану. Наприклад, у Нідерландах та Франції вміст метану

Технічні аспекти інтеграції. Для подачі біометану в газотранспортну систему України необхідно забезпечити відповідність якості біометану стандартам природного газу, що може вимагати додаткового очищення від домішок, таких як кисень. Також вимагається встановлення комерційного вузла обліку при приєднанні об'єктів газовидобувних підприємств та виробників біометану. Встановлені прилади повинні забезпечувати безперервний контроль фізико-хімічних показників газу (хроматограф, потоковий густиномір, вимірювач точки роси тощо) з можливістю дистанційного їх контролю та передачі даних та відключення подачі неякісного газу до газотранспортної системи.

Інтеграція біометану в газотранспортну систему України є стратегічно важливим кроком для забезпечення сталого розвитку енергетичного сектору, що вимагає подальшого вдосконалення законодавчої бази, технічної інфраструктури та залучення інвестицій.

Вибір біометанів дослідження. Отже, залежно від вимог і якості очищення вміст метану в газовій суміші може варіюватися в межах 86 – 98%. Інші два основних компоненти - вуглекислий газ та азот. Отже, прийемо для загального аналізу склад якісного біометану: CH₄ - 98%, CO₂ - 1,5%, N₂ - 0,5 %.

Окремим напрямком досліджень розглянемо застосування біометанів можливих варіацій згідно з складом – таблиця 1.5.

Таблиця 1.5 - Вибірка складу біометанів, % об

Складова	Біометан №1, % об	Біометан №2, % об	Біометан №3, % об	Біометан №4, % об	Біометан №5, % об	Біометан №6, % об	Біометан №7, % об
CH ₄	98	96	94	92	90	88	86
CO ₂	1,5	3,4	5,3	7,2	9,1	11	12,9
N ₂	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1

Вибір варіацій складів генераторних газів. Генераторний газ, також відомий як синтез-газ, є сумішшю газів, що утворюється в результаті газифікації вугілля, деревини, біомаси або інших органічних матеріалів. Він містить переважно водень

(H_2), оксид вуглецю (CO), діоксид вуглецю (CO_2), метан (CH_4), азот (N_2) та інші гази у менших кількостях. Генераторний газ використовується як паливо або як проміжна речовина у виробництві хімічних речовин.

Склад генераторного газу може змінюватися залежно від сировини, процесу газифікації та умов реакції. Однак можна виділити типові діапазони вмісту основних компонентів: водень (H_2): 10-30%; оксид вуглецю (CO): 20-30%; діоксид вуглецю (CO_2): 5-15%; метан (CH_4): 0-5%; азот (N_2): 40-60%; водяна пара (H_2O): 0-10%. Ці відсотки є орієнтовними й можуть варіюватися залежно від конкретних умов та сировини.

Отже, в генераторному газі основний паливний компонент - водень та монооксид вуглецю з загальним вмістом в межах 30 - 55% об. Баластні домішки разом з водяною парою можуть сягати - 60 % об.

Приклад типового складу генераторного газу для різних типів сировини згідно з відкритими електронними джерелами приведені у таблиці 1.6.

Таблиця 1.6 - Приклади складу генераторного газу, % об

Газифікація вугілля	Газифікація деревини	Газифікація біомаси
H_2 : 10-20%	H_2 : 15-25%	H_2 : 15-30%
CO: 20-30%	CO: 20-30%	CO: 20-25%
CO_2 : 5-15%	CO_2 : 10-15%	CO_2 : 10-15%
CH_4 : 1-5%	CH_4 : 1-5%	CH_4 : 1-3%
N_2 : 40-50%	N_2 : 40-50%	N_2 : 40-50%
H_2O : 0-5%	H_2O : 0-10%	H_2O : 0-10%

При використанні генераторного газу як палива необхідно провести його осушення з причини досить суттєвого компонента водяної пари, на що і будемо орієнтуватися в подальших енергетичних розрахунках при виборі складу генераторного газу.

Розділимо генераторні гази на дві умовні категорії. Перша категорія - з мінімальними концентраціями горючих домішок. Друга - з максимальними концентраціями. При цьому відношення концентрацій азоту до двоокису вуглецю

залишимо на усередненому рівні в межах 2,5 - 4. Для обраних граничних характеристик розрахуємо також усереднений склад суміші, як деякого умовного еталона генераторних газів.

Таблиця 1.7 - Вибірка складу генераторних газів граничних характеристик, % об

Найменування	CH ₄ ,	H ₂	CO,	N ₂ ,	CO ₂ ,
	% об	% об	% об	% об	% об
Генераторний газ 1	1	10	20	50	19
Генераторний газ 2 (усереднений склад)	2	17,5	22,5	43,5	14,5
Генераторний газ 3	3	25	25	37	10

Представимо графічно склад обраних генераторних газів.

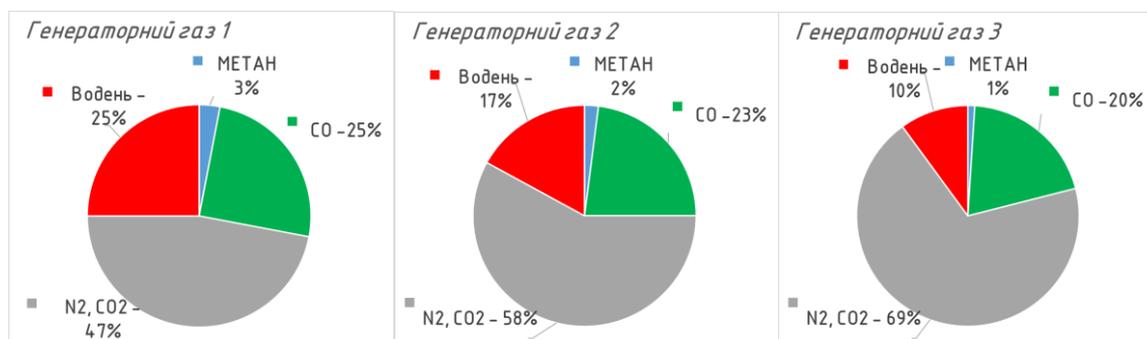


Рисунок 1.3 – Графічне представлення складу генераторних газів

Таким чином нами були отримані дві групи газів дослідження. Перша група: природні гази. Друга: біогази та генераторні гази. Перша група - представники паливних газів на об'єктах комунально-побутової та промислової теплоенергетики, друга - представники використання саме теплоенергетики промислової.

1.4 Постановка задач досліджень

Аналіз літературних джерел при вивченні питань щодо використання альтернативних видів горючих газів на об'єктах комунально-побутової та промислової теплоенергетики вказали на актуальність пошуку розв'язання науково-технічної проблеми взаємозамінності газів.

Для пошуку рішень ставимо наступні задачі:

- вивчення та реалізація аналітичних методів оцінки взаємозаміни паливних газів;
- оцінка взаємозамінності природних газів України;
- вивчення особливостей стандарту ДСТУ ГОСТ EN 437:2014 для його застосування в класифікації паливних газів України: природних газів та біометанів
- в комунально-побутовій сфері теплоенергетики, штучних газів - в промисловій сфері; проведення оцінки використання природних газів України та біометанів в системі Європейських вимог при спалюванні на приладах відповідних груп;
- дослідження властивостей граничних газів стандарту ДСТУ ГОСТ EN 437:2014 та використання отриманих результатів при виборі газоспалювального обладнання на об'єктах комунально-побутової та промислової теплоенергетики України;
- оцінка наслідків спалювання газів на невідповідному обладнанні;
- розробка системи та обґрунтування правила змішування газів для газоспалювального обладнання при використанні невзаємозамінних газів;
- дослідження можливості розширення критеріїв взаємозаміни газів з огляду на забезпечення якості теплообмінних процесів у паливоспалювальному обладнанні.

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 АНАЛІТИЧНІ МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ВЗАЄМОЗАМІННОСТІ ГАЗІВ

2.1 Критерії сталості теплової потужності газоспалювального устаткування

Проаналізуємо критерії взаємозаміни паливних газів. Виконаємо аналіз аналітичних методик та побудуємо розрахунковий апарат виконання оцінки можливості взаємозаміни газів.

Найпоширеніший і найпростіший критерій визначення взаємозамінності паливних газів - критерій Воббе. Критерій визначає можливість застосування альтернативного газового палива при умові забезпечення сталої теплової потужності устаткування.

Грубий - W_s та чистий індекс Воббе - W_i . Найпоширеніший та найпростіший метод визначення можливості взаємозаміни газів - порівняння чисел Воббе. Число Воббе для паливного газу розраховується згідно з наступної формули:

$$W = \frac{H}{\sqrt{d}}, \quad (2.1)$$

де H - вища або нижча теплота згорання палива. При цьому чистий індекс відповідає нижчій теплоті згорання, а грубий - відповідно вищій теплоті, МДж/нм³;
 d – відносна густина горючого газу.

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 горючого газу на інший. Таким чином умова взаємозамінності згідно індексу Воббе:

$$W_{i1} = W_{i2} = \text{const} \pm 5\%. \quad (2.2)$$

$$W_{s1} = W_{s2} = \text{const} \pm 5\%. \quad (2.3)$$

де W_{i1} , W_{i2} – нижнє число Воббе для першого та другого газів відповідно;

W_{s1} , W_{s2} – вище число Воббе для першого та другого газів відповідно.

Тип числа Воббе може обиратися з огляду на тип теплоти використання (нижча або вища).

									601-НТ-11393643-МР	Арк.
										25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

Індекс Кноу, J(K) є варіацією індексу Воббе і застосовує оцінку сталості теплової потужності зі зміщенням величини. Визначається згідно з формулою [12]:

$$J(k) = \frac{H_i - 175}{\sqrt{d}}, \quad (2.4)$$

де H_i – вища теплота згорання горючого газу, BTU/SCF;

d - відносна щільність газу (відношення щільності газу до щільності сухого повітря).

Формула для знаходження індексу Кноу може бути представлена для розрахунку в стандартних одиницях [7].

$$J(k) = \frac{H_i - 0,67 \cdot 10^7}{\sqrt{d}}, \quad (2.5)$$

де H_i – вища теплота згорання горючого газу, Дж/нм³.

Аналогічно критерію Воббе, якщо для двох газів, індекс Кноу відрізняється більше за 5%, то гази не є взаємозамінними. Тобто при спалюванні газозамінника, для якого індекс Кноу перевищує на 5% відповідний показник для замінного газу, вважається, що теплова потужність установки вже не є сталою.

Якщо критерій Воббе для двох газів відрізняється більше ніж на 5% то забезпечення остійної теплової потужності для невзаємозамінних газів може здійснюватися тільки внаслідок зміни витрат газу. Виділяють два напрямки для реалізації зміни витрат:

- 1) зміна діаметра отвору пальника;
- 2) зміна тиску газу перед пальником.

Для зміни отвору потрібно змінити площу перетину газового сопла інжекційного пальника або площу перетину вогневих отворів дугтвового пальника. Перерахунок указаної площі необхідно виконувати за наступною залежністю (за умови збереження сталого тиску перед пальником $P_{Г1} = P_{Г2} = \text{const}$ і у системі газопостачання):

$$f_2 = f_1 \frac{Q_{H_1}^p}{Q_{H_2}^p} \times \sqrt{\frac{\rho_{Г2}}{\rho_{Г1}}}; \quad (2.5)$$

де f_1, f_2 – площа перетину газових отворів для першого і другого газів

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відповідно, м²;

$P_{Г1}$, $P_{Г2}$ – номінальний тиск газу перед пальником для першого та другого газів відповідно, кПа.

Діаметр газового сопла пальника при переході з одного на другий невзаємозамінний газ при сталому тискові $P_{Г1} = P_{Г2}$ може бути визначеним за наступною залежністю:

$$d_2 = d_1 \sqrt{\frac{W_1}{W_2}}, \quad (2.6)$$

де d_1, d_2 – діаметри сопел для першого і другого сопел відповідно, мм.

Шлях зміни діаметру - це шлях втручання в конструктив пальника, з необхідністю його переробки. Отже метод є економічно затратним і головне не є гнучким, бо неможливо технічно постійно змінювати діаметри при зміні складу газу.

Підтримання сталої теплової потужності пальника при переході на інший газ можливе при зміні тиску горючого газу перед пальником. Це гнучкий метод, особливо при застосуванні автоматичних систем регулювання тиску на газоспалювальному обладнанні.

Тиск газу, котрий необхідно встановити для підтримання сталої теплової потужності при зміні характеристик палива, обчислюється за залежністю:

$$P_{Г2} = P_{Г1} \frac{\rho_{Г2}}{\rho_{Г1}} \left(\frac{Q_{Н1}^P}{Q_{Н2}^P} \right)^2, \quad (2.7)$$

де $P_{Г1}$, $\rho_{Г1}, Q_{Н1}$ – тиск, густина і теплота згорання відповідно для першого горючого газу, для якого були встановлені режимні паспортні характеристики роботи пальника та визначені паспортні розміри вогневих отворів;

$P_{Г2}$, $\rho_{Г2}, Q_{Н2}$ – тиск, густина і теплота згорання горючого газу, використання котрого не було передбачене паспортними й режимними характеристиками, але подача такого газу на пальник здійснюється з тих чи інших причин.

Можливість взаємозамінності газу при зміні його тиску перед пальником перевіряється за рівністю розширених чисел Воббе, які встановлюються за залежностями:

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$W'_1 = W_1 \cdot \sqrt{P_1}, \quad (2.8)$$

$$W'_2 = W_2 \cdot \sqrt{P_2}, \quad (2.9)$$

Або з одночасним врахуванням зміни діаметра:

$$W'_1 = W_1 \cdot \sqrt{P_1} \cdot D_1^2 \quad (2.10)$$

$$W'_2 = W_2 \cdot \sqrt{P_2} \cdot D_2^2 \quad (2.11)$$

Гази вважаються взаємозамінними за умови:

$$W'_1 = W'_2 = \text{const} \pm 5\%. \quad (2.12)$$

Для інжекційних пальників існує технічна особливість, бо важливо не тільки забезпечити сталу потужність пальника при переході з одного на інший газ, але і витримати умови за яких в пальник буде інжектуватись необхідна кількість первинного повітря. А це залежить як від діаметра газового сопла пальника, так і тиску газу перед соплом. Тому при перерахунку інжекційного пальника на інший горючий газ, для якого не виконується умова взаємозамінності, діаметр сопла визначається за наступними залежностями:

- за умови відомого тиску для нового паливного газу

$$d_2 = d_1 \sqrt{\frac{Q_{H_1}^P}{Q_{H_2}^P} \sqrt{\frac{P_{Г1} \rho_{Г2}}{P_{Г2} \rho_{Г1}}}}; \quad (2.13)$$

- за умови невідомого тиску для нового паливного газу:

$$d_2 = d_1 \sqrt{\frac{(1 + \alpha_1 V_{T1}) \cdot \left(1 + \alpha_1 V_{T1} \frac{\rho_{П}}{\rho_{Г1}}\right)}{(1 + \alpha_2 V_{T2}) \cdot \left(1 + \alpha_2 V_{T2} \frac{\rho_{П}}{\rho_{Г2}}\right)}}. \quad (2.14)$$

Недоліком шляху зміни тиску являється неможливість його реалізації коли необхідно навпаки підняти величину. І це відбувається коли тиск визначається газотранспортною системою. Отже, з погляду практичної реалізації простіше знизити тиск для забезпечення сталої теплової потужності чим навпаки шукати шлях його підняття, коли це технічно проблематично. Але в деяких ситуаціях найкращим рішенням щодо зміни числа Воббе може бути рішення саме комбіноване.

										Арк.
										28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	601-НТ-11393643-МР					

Таким чином, критерій Воббе - найпростіший і розповсюдженіший показник щодо взаємозаміни горючих газів. Але він враховує лише аспект сталості енергетичної потужності. Аспекти якості горіння, ефективності використання тепла, екологічної та технічної безпеки потребують застосування додаткових систем оцінок. Перехід від рівності простого числа Воббе до рівності розширеного числа може супроводжуватися значними змінами фізико-хімічних характеристик і складу горючих газів, змінами особливостей протікання процесу горіння, відхиленням температури продуктів згорання від необхідного технологічного рівня, змінами в умовах роботи газоповітряного тракту, розмірів факела й в самому процесі теплопередачі у топковому просторі. При цьому зміна складу палива може приводити до погіршення повноти його згорання, зміни коефіцієнта надлишку повітря у продуктах згорання і погіршення ККД теплоенергетичного обладнання. Отже, виникає потреба застосування інших критеріїв взаємозаміни. При цьому цілком можлива ситуація, що інші критерії взагалі можуть заборонити взаємозаміну різних за складом паливних сумішей при рівності розширених чисел Воббе. Всі ці питання можуть бути розв'язані за допомогою різноманітних додаткових методів.

2.2 Аналіз розрахункових методів взаємозаміни газів, індекси взаємозамінності газів

Виконаємо аналіз розрахункових виразів методів взаємозаміни газів. Розв'яжемо задачу реалізації методів у вигляді розрахункової системи для комп'ютерного обчислення відповідних показників.

Критерій Даттона. Індекс неповного згорання JCF(D).

$$J_{ICF(D)} = \frac{W_i - 50,73 + 0,03E_{PN}}{1,56} - \frac{\Omega_{H_2}}{100}, \quad (2.15)$$

де W_i - індекс Воббе при температурі 60°F, МДж/м³;

Ω_{H_2} - об'ємний вміст водню в газі, % об;

E_{PN} - сумарний вміст пропану та азоту в еквівалентній суміші, % моль [8].

Величину $1/1,56 = 0,641 = \alpha$ в літературних джерелах називають коефіцієнтом неповного згорання [8].

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Індекс неповного згорання JCF(D) визначає вірогідність утворення продуктів хімічного недопалу при заміні основного газу газозамінником. Правила газової безпеки Великобританії вимагають, що для запобігання неповного згорання газу JCF(D) повинен становити нижче 0,48. Екстремальне значення для газу, що заміщає індекс неповноти згорання не повинен перевищувати 1,48. При спалюванні газів із більшим за 1,48 показником JCF(D) буде відбуватися утворення продуктів хімічного недопалу, погіршення умов експлуатації устаткування, погіршення екологічних показників роботи й зменшення ККД установки.

Індексу відриву полум'я JLI(D).

$$J_{LI(D)} = 3.25 - 2.41 \arctan \left\{ \frac{(0.122 + 0.0009 \Omega_{H_2}) \cdot \left[(W_i - 36.8 - 0.0019 E_{PN}) + \right]}{(0.755 - 0.118 E_{PN}^{0.33}) \Omega_{H_2}} \right\}, \quad (2.16)$$

Нормовані значення індексу відриву JL(D) для взаємозамінних газів лежать у межах від 0 до 6. Коли JL(D) дорівнює нулю, немає видимого відриву основи полум'я від пальника [1]. Коли JLI(D) = 6, це означає повний відрив 50–100% полум'я. [7]. В [12] вказується на допустиму межу величини індексу - 1,16. Слід зазначити, що індекс JL(D) може нести опосередковану інформацію щодо вірогідності іншого небезпечного явища – проскоку полум'я в корпус пальника при набуванні їм відносно малих або від'ємних величин.

Індекс сажоутворення JSI(D). Визначення величини JS(D) виконується згідно формулою:

$$JSI(D) = 0,896 \cdot \arctan(0,0255 \cdot E_{PN} - 0,0091 \cdot \Omega_{H_2} + 0,617).. \quad (2.17)$$

Індекс оцінює ризики і можливості переходу з одного виду газу на інший, з 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 [12]. Збільшення величини JS(D) для газу, що заміняє основний вище 0,6 означає небезпеку сажоутворення і обмежені можливості взаємозамінності.

Для можливості використання приведених залежностей необхідно виконати розрахунок складу еквівалентної суміші. Згідно [19] Даттон висунув підхід до

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Перший вираз дозволяє отримати величину необхідного відношення концентрацій метану до пропану в еквівалентній суміші. Другий вираз по суті являється умовою забезпечення сталої величини індексів Воббе між оригінальною газовою сумішшю та сумішшю трикомпонентною еквівалентною. Третій вираз - контроль величин концентрацій в еквівалентній суміші, це також необхідне для здійснення розв'язку трете рівняння системи.

Для одержання першого виразу системи для довільного переліку суміші різних вуглеводів необхідно забезпечити принцип сталого відношення C/H. При цьому кожний вуглеводний компонент суміші розкладається на суміш двох компонентів: метану та пропану. Відношення атомів C/H в базовому вуглеводі й в отриманій суміші двох компонентів повинно бути сталим. В [8] приводиться розрахунковий вираз для випадку насичених вуглеводів згідно з яким можна виконати розкладання 1 молю компонента вищих вуглеводів і знайти кількість речовини метану та пропану еквівалентної суміші (2.19).

$$C_n H_{(2n+2)} = \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{2}(n-2) \right] \cdot CH_4 + \frac{1}{2}(n-1) \cdot C_3H_8 \quad (2.19)$$

Метод AGA. Індекс неповне згорання палива C(A).

$$C(A) = \frac{H_s \cdot B_s \cdot d_a}{H_a \cdot B_a \cdot d_s} + \left(\frac{H_a \cdot B_a}{5000 \cdot E_a \cdot F_{ekva}} - \frac{H_s \cdot B_s}{5000 \cdot E_s \cdot F_{ekvs}} \right), \quad (2.20)$$

де C(A) - індекс неповного згорання палива або індекс зміни продуктивності обладнання;

H - вища теплота згорання газу, BTU/SCF;

B - теоретично необхідний об'єм повітря на одиницю об'єму газу (теоретичні витрати повітря на горіння);

d - відносна густина газу;

E - тепловміст продуктів згорання від 60°F до 1600°F, BTU/SCF;

Fekv - сума добутоків масової частки й константи для кожного компонента палива, перетвореного на еквівалент вільного водню;

a і s - індекси для базового еталонного газу (adjustment gas) і газу замітника відповідно (substitute gas), тобто формули застосовують показники газу еталона так і показники газу замітника і потребують визначення статусу для газів порівняння.

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В [12] пропонується графічна залежність $E=f(t)$ для визначення розрахункової величини E . Отже, для визначення тепловмісту можна скористатися графіком і отримати наступні величини - таблиця 2.1.

Таблиця 2.1 - Тепловміст продуктів згорання для методики AGA

Складова відхідних газів	CO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂	H ₂	CO
НС - тепловміст, BTU/SCF (60 - 1600°F)	47,2	37	30,5	31,6	28,6	30,5

Відповідно величина тепловмісту на 1 кубічний фут відхідного газу може бути знайдена із наступного співвідношення:

$$E = (V_{CO_2} \cdot HC_{CO_2} + V_{H_2O} \cdot HC_{H_2O} + V_{N_2} \cdot HC_{N_2} + V_{O_2} \cdot HC_{O_2} + V_{H_2} \cdot HC_{H_2} + V_{CO} \cdot HC_{CO}) / (V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{O_2} + V_{H_2} + V_{CO}), \quad (2.21)$$

де V_i - об'єм відповідного компонента відхідних газів, SCF;

HC_i - тепловміст відповідного складника відхідних газів, BTU/SCF.

Для знаходження суми добутоків масової частки й константи щодо еквівалента вільного водню для кожного компонента палива побудуємо наступну розрахункову залежність:

$$F = \sum(\omega_i \cdot CH_i), \quad (2.22)$$

де ω_i - масова частка відповідного компонента газової суміші;

CH_i - константи щодо еквівалента вільного водню для відповідного компонента суміші.

Величини констант CH можна отримати з довідникових даних. Для деяких компонентів газового палива величини констант приведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 Величини констант CH для різних речовин

Речовина	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₃ H ₆	H ₂	CO	H ₂ S	N ₂	CO ₂	H ₂ O	O ₂	SO ₂
CH	1	1,8	2,5	3,2	4	0,92	1,26	1,92	0,5	0,7	2,5	0,7	0,9	1	1	2

Для задовільних характеристик газу-замінника C має бути в діапазоні між 0,85 і 1,15. Взагалі значення більші за одиницю вказують на тенденцію до більш м'якого полум'я і неповного згорання. Також в [12] зазначається що рівняння для знаходження індексу C було розроблено для газів з калорійністю більше ніж 800 BTU/SCF.

Індекс відрив полум'я $IL(A)$.

$$IL(A) = \frac{K_a}{\frac{f_a \cdot a_s}{f_s \cdot a_a} \cdot \left(K_s - \log \left(\frac{f_a}{f_s} \right) \right)}, \quad (2.23)$$

де K - константа межі відриву;

f - коефіцієнт первинного повітря;

a - кількість повітря в стехіометричній реакції горіння, котре необхідно для отримання 100 BTU енергії, scf.

$$a_a = 100 \cdot Va/Na; \quad a_s = 100 \cdot Bs/Hs. \quad (2.24)$$

$$fa = 1000 \cdot da^{0,5}/Na; \quad fs = 1000 \cdot ds^{0,5}/Hs; \quad (2.25)$$

$$Ka = Fa/da; \quad Ka = Fs/ds, \quad (2.26)$$

де F_a, F_s - константи коефіцієнта відриву.

$$Fa = \sum(v_i \cdot Fa_i); \quad Fs = \sum(v_i \cdot Fs_i), \quad (2.27)$$

де v_i - об'ємна доля компонента газової суміші, % об;

F_{a,s_i} - константа коефіцієнта відриву компонента газової суміші.

Згідно [12] константа коефіцієнта відриву може бути знайдена згідно з графічними залежностями $Fi = f(v_i\%)$, де $v_i\%$ - об'ємний вміст компонента у паливі.

Згідно з цими графіками можна отримати величини констант для $v_i = 100\%$ і вже виконувати перерахунок для заданих величин об'ємної долі компонента v_i згідно з залежністю:

$$Fi = K_F \cdot v_i, \quad (2.28)$$

де v_i - об'ємної частки компонента палива;

K_F - константа коефіцієнта відриву відповідного компоненту.

Результати визначення констант коефіцієнта відриву для $v_i = 100\%$ приведемо в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 - Величини констант коефіцієнта відриву для $v_i = 100\%$

Речовина	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₂ H ₄	C ₃ H ₆
K _F	0,670	1,419	1,931	2,550	1,767	2,056
Речовина	H ₂	CO	N ₂	CO ₂	O ₂	
K _F	0,583	1,400	0,688	1,080	2,827	

Індекс відриву полум'я для газу замітника повинен відповідати умові $IL \leq 1$.

Індекс проскоку полум'я $IF(A)$. Індекс оцінює ризику зворотного спалаху, що створює небезпеку аварійної ситуації.

$$IF(A) = \frac{K_s \cdot f_s}{K_a \cdot f_a} \cdot \sqrt{\frac{H_s}{1000}} \quad (2.29)$$

Умовою можливості використання газу замітника є $IF \leq 1.18$.

Слід зауважити, що порівнюючи джерела [12] та [13] можна знайти відмінність в виразах відносно деяких індексів. Відмінність полягає в відсутності множника $\sqrt{H_s/1000}$. Цей множник в методиці AGA змінює початкову величину IF для базового газу в залежності від величини калорійності H . Можна припустити, що цей множник був введений розробниками методу для обмежень використання розрахункового виразу для газів певних рівнів калорійності. Порівнюючи гази з метою лише виявлення тенденції набуття явища проскоку згідно з методом AGA скористаємося спрощеним виразом:

$$IF(A)^* = \frac{K_s \cdot f_s}{K_a \cdot f_a} \quad (2.30)$$

Індекс сажоутворення $IY(A)$.

$$IY(A) = \frac{f_s \cdot a_s \cdot Y_a}{f_a \cdot a_a \cdot Y_s} \quad (2.31)$$

де Y - це максимальне первинне повітря на межовій кривій жовтих кінчиків, % об.

Розрахунковий параметр Y визначається згідно з формулою [13]:

$$Y = \frac{\sum(T_i \cdot V_i)}{B + 7C - 26,3O_2} \quad (2.32)$$

де V_i - об'ємна частка відповідного компоненту газу, %об;

T_i - це експериментально визначена кількість кубічних футів первинного повітря, необхідного для усунення жовтих кінчиків на кожен кубічний фут газу;

C - загальна частка N_2 і CO_2 від загального об'єму газової суміші (відносні одиниці).

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

O_2 - частка кисню від загального об'єму газової суміші (відносні одиниці);

Згідно [12] величини T_i можна знайти із довідникових даних.

Умовою можливості використання газу замітника згідно з цим критерієм:
 $IY \geq 1$.

Метод Вівера. Індекс співвідношення теплової потужності $JH(W)$ (heat rate ratio). Співвідношення теплової потужності - це відношення між індексом Воббе для замінного газу та індексом Воббе для базового регульовального газу W_a :

$$JH(W) = \frac{W_s}{W_a}, \quad (2.33)$$

де W_s - число Воббе газу замітника;

W_a - число Воббе базового регульовального газу.

Слід зазначити, що розрахунковий вираз індексу $JH(W)$ може використовувати як нижній так і вищий індекс Воббе залежно від технічної особливості устаткування.

Гази можуть вважатися взаємозамінними при величині $JH(W)$ в межах 0,95 - 1,05.

Індекс первинного повітря $JA(W)$ (primary air ratio) - співвідношення між теоретично необхідною кількістю повітря для згорання для кожного газу.

$$JA(W) = \frac{V_s \cdot \sqrt{d_a}}{V_a \cdot \sqrt{d_s}}, \quad (2.34)$$

де V_a - теоретична потреба у повітрі на горіння основного газу;

V_s - теоретична потреба у повітрі на горіння газу замітника;

d_a, d_s - відносна густина основного газу та газу замітника.

Для можливості переведення пальника з базового газу на газ замітник індекс повинен знаходитися в межах $0,95 < JA(W) < 1,05$.

Слід зазначити, що концепція побудови всіх інших індексів у Вівера орієнтована на використання цього показника, коли він впливає на величини інших індексів.

Індекс відриву полум'я $JL(W)$ (lifting index). Індекс визначається швидкістю розповсюдження полум'я обох газів, а також об'ємною часткою кисню в них.

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$JL(W) = JA(W) \cdot \frac{S_s}{S_a} \cdot \frac{100 - \Omega_{O_2s}}{100 - \Omega_{O_2a}}, \quad (2.35)$$

де $\Omega_{O_2a}, \Omega_{O_2s}$ - об'ємна частка кисню у складі газової суміші відповідно для базового газу та газу замітника, % об;

S_a, S_s - максимальна швидкість дефлаграції газоповітряної суміші, виражена як частка швидкості ламінарної дефлаграції для водню, відносні одиниці [12]. Дефлаграція - це процес повільного горіння, під час якого полум'я поширюється через суміш палива та окисника із субзвуковою швидкістю, тобто нижчою за швидкість звуку в середовищі. Це вид горіння, при якому згорання відбувається з відносно низькою швидкістю і без ударної хвилі, на відміну від детонації, де горіння відбувається з надзвуковою швидкістю та з утворенням ударної хвилі. Параметр S визначається згідно з формулою [12], [13]:

$$S = \frac{\sum(SF_i \cdot V_i)}{B + 5C - 18,8O_2 + 1}, \quad (2.36)$$

V_i - об'ємна частка відповідного компонента газу, відносні одиниці;

SF_i - фактор швидкості полум'я (flame speed factor). Визначається із довідникових даних для різних паливних газів [12], [13] і представлений у таблиці 2.4. Слід зазначити що коефіцієнти знаменника виразу визначення швидкості дефлаграції були отримані емпіричним шляхом [13];

C - загальна об'ємна частка N_2 і CO_2 від загального об'єму газової суміші (відносні одиниці).

O_2 - частка кисню від загального об'єму газової суміші (відносні одиниці).

Таблиця 2.4 - Величини факторів швидкості полум'я для паливних газів

Речовина	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_2H_2
SF	148	301	398	513	776
Речовина	C_2H_4	C_3H_6	H_2	CO	
SF	454	674	339	61	

Для можливості взаємозаміни газу індекс відриву полум'я JL повинен знаходитися в межах $0,95 < JL(W) < 1,05$. Газ замітник із значенням $JL > 1$ буде схильний до підйому (відриву) полум'я.

Перші три індекси Вівера мають початкове значення що дорівнюють одиниці (випадок однакового базового газу та газу замітника) і взаємозамінність згідно з ними класично визначається 5% відхиленням в обидві сторони. Наступні три індекси будуть мати нульові початкові значення і свідчити про взаємозамінність або вірогідність негативної тенденції.

Індекс зворотного полум'я JF(W) (flashback index).

$$JF(W) = \frac{S_s}{S_a} - 1,4JA(W) + 0,4. \quad (2.37)$$

Умова застосування газу замітника: $JF(W) \leq 0$. Але найкращим показником щодо відсутності схильності до зворотного полум'я (проскоку полум'я) і взаємозаміни газів в цілому буде випадок коли $JF(W) = 0$, через те, що ступінь відхилення показника у від'ємну область може негативно відобразитися на індексі JL.

Індекс жовтого кінчика полум'я JY(W) (yellow tipping index).

$$JY(W) = JA(W) - 1 + \frac{N_{cs} - N_{ca}}{110}, \quad (2.38)$$

де N_c - це кількість атомів вуглецю, “легко звільнених” внаслідок згорання ста молекул газу [12]. В методиці Вівера “легко звільнені” атоми вважаються причиною утворення жовтих коничків полум'я і відносно них введена наступна система підрахунку: усі атоми вуглецю ненасичених і циклічних вуглеводнів, а також усі атоми, крім одного на молекулу насичених вуглеводнів вважаються “легко звільненими”.

Таким чином можна отримати розрахунковий вираз для визначення параметра N:

$$N = 100 \cdot \sum (C_{лзв_i} \cdot v_i), \quad (2.39)$$

де v_i - об'ємна частка відповідного компонента газової суміші, відносні одиниці;

$C_{лзв_i}$ - кількість “легко звільнених атомів” вуглецю відповідного компонента газової суміші.

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для реалізації розрахунку створимо розрахункову таблицю кількості «легко звільнених атомів» вуглецю - таблиця 2.5.

Таблиця 2.5 Кількості “легко звільнених атомів” вуглецю для деяких паливних газів

Речовина	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂
Слзв	0	1	2	3	4
Речовина	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₃ H ₆	H ₂	CO
Слзв	2	2	3	0	0

Примітка: джерела вказують на порядок розрахунку кількості “легко звільнених атомів” саме вуглеводнів. Монооксид вуглецю не входить взагалі до цього класу. Але метод AGA при розрахунку цього самого індексу відносить CO до одного класу з воднем, тобто не вважає його взагалі причиною утворення жовтих кінчиків полум’я. Тому параметр Слзв для монооксиду вуглецю приймемо із нульовим значенням.

Умова можливості застосування газу замітника згідно з індексом жовтих кінчиків: $JY \leq 0$.

Індекс неповного згорання $J(W)$ (incomplete combustion index).

$$J(W) = JA(W) - 0,366 \frac{R_s}{R_a} - 0,634, \quad (2.40)$$

де R_a , R_s - це співвідношення між кількістю атомів водню в паливному газі та кількістю атомів вуглецю в вуглеводнях (виключаючи монооксид вуглецю) для базового газу та газу замітника.

Розрахунковий параметр R для газової суміші можна знайти з врахуванням концентрації кожного компонента:

$$R = \frac{\sum(m_i \cdot v_i)}{\sum(n_i \cdot v_i)}, \quad (2.41)$$

де n_i - кількість атомів вуглецю в паливних компонентах: C_nH_m , C_nO ;

m_i - кількість атомів водню в паливних компонентах: C_nH_m , H_m , H_mS .

Умова можливості застосування газу замітника згідно з індексом неповного згорання: $J \leq 0$. Якщо результат розрахунку покаже, що показник $J > 0$, то це означає що взаємозамінність газу за цим показником відсутня, а згорання газу буде

									Арк.
									39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

601-НТ-11393643-МР

супроводжуватись хімічним недопалом, і як наслідок, – зниженням ефективності роботи газоспалювальної установки.

Метод Дельбурга. У методі Дельбурга основними показниками взаємозамінності є: модифікований індекс Воббе W' та потенціал згорання S . Також метод використовує вторинні показники взаємозамінності: число жовтих кінчиків (для газів другої сім'ї) та число сажі (для газів першої сім'ї).

Скоригований індекс Воббе W' використовує два коригувальних коефіцієнти. Перший коригувальний коефіцієнт - для врахування впливу в'язкості певних газових сумішей на коефіцієнт витрати через отвір інжектора. Другий корегувальний коефіцієнт - для врахування впливу кисню на процес горіння для першої групи газів і вуглекислого газу для другої групи.

Скориговане число Воббе $W'(De)$ визначається наступним виразом:

$$W'(De) = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot H_s}{\sqrt{d}}, \quad (2.42)$$

де k_1, k_2 - коригувальні коефіцієнти;

H_s - вища теплота згорання суміші, МДж/м³.

Для газів першої сім'ї:

$$k_1 = f(H_2 - C_n H_m - 2CO_2), \quad (2.43)$$

де H_2, CO_2 - об'ємний вміст водню та діоксиду вуглецю, %об;

$C_n H_m$ - об'ємний вміст вуглеводнів крім метану, %об

$$k_2 = f(4,18 \cdot O_2 / H_s), \quad (2.44)$$

де H_s - вища теплота згорання, МДж/м³;

O_2 - об'ємний вміст кисню у паливній суміші, % об.

Для газів другої сім'ї:

$$k_1 = f(\beta / 4,18), \quad (2.45)$$

де β - вища теплота згорання вуглеводнів суміші крім метану, МДж/м³.

$$k_2 = f(4,18 \cdot (CO - 4O_2 - 0,5CO_2) / H_s), \quad (2.46)$$

де CO, O_2, CO_2 - вміст відповідного компонента, % об.

Функції визначається графічною залежністю [12].

Потенціал згорання $S(De)$. Потенціал згорання це число, яке характеризує швидкість згорання. Показник визначається за наступною формулою:

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$C(De) = u \cdot \frac{H_2 + 0,7 \cdot CO + 0,3 \cdot CH_4 + v \cdot \sum(a \cdot C_n H_m)}{\sqrt{d}}, \quad (2.47)$$

де H_2 , CO , CH_4 , - концентрації речовин суміші, % об;

$C_n H_m$ - концентрації вуглеводнів суміші (крім метану [12]), %об;

a , u , v - розрахункові коефіцієнти.

Для газів першої сім'ї:

$$u = f(H_2; 4,18 \cdot O_2/H_s). \quad (2.48)$$

$$v = f(H_2). \quad (2.49)$$

Для газів другої сім'ї:

$$u = f(4,18 \cdot O_2/H_s). \quad (2.50)$$

$$v = f(W'/4,18). \quad (2.51)$$

Розрахункові коефіцієнти та функції визначається згідно з довідниковими даними [12].

Число жовтих кінчиків $I_j(De)$ – характеризує відкладення вуглецю. Показник використовується найчастіше для газів другої групи, і виражається наступним чином:

$$I_j(De) = \frac{\sum(j \cdot v_i)}{\sqrt{d}} \cdot (1 - 0,418 \frac{O_2}{H_s}), \quad (2.52)$$

де I_j - це число жовтих кінчиків;

j - коефіцієнт кожного вуглеводню суміші;

v_i - вміст кожного вуглеводню в газі, % об;

O_2 - вміст кисню в газі, % об;

H_s - вища калорійність згорання, кДж/м³.

Коефіцієнт j визначається згідно з довідниковими даними [12].

Умова задовільної роботи обладнання на газі дослідження $I_j < 170$).

Число сажі $I_c(De)$ - використовується лише для газів першої групи, характеризує схильність газу до відкладення вуглецю на сенсорних елементах запальних пристроїв та інших пристроях для гасіння полум'я. Для визначення числа застосовується наступний вираз:

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$I_c(De) = \frac{1 + 0,01 \cdot H_2 + 0,01 \cdot CO}{\sqrt{d}} \cdot \sum (b \cdot v_i \cdot (1 - 0,013 \cdot O_2)), \quad (2.53)$$

де b - розрахунковий коефіцієнт для відповідного компонента суміші.

Коефіцієнт b визначається згідно з довідниковими даними згідно [12].

Умова задовільної роботи обладнання на газі дослідження $I_c < 170$.

Зведемо умови взаємозамінності методів у таблицю 2.6.

2.3 Реалізація методики отримання еквівалентної суміші для методу Даттона

Розв'язок система рівнянь (2.18) дозволяє отримати склад еквівалентної суміші для газу дослідження при використанні оцінки взаємозаміни газів згідно з методом Даттона. Але слід зазначити, що система містить нелінійне рівняння, а отже проблематичним здається пошук аналітичного виразу для знаходження розв'язку. Тому оберемо шлях застосування саме чисельного методу розв'язку. Побудуємо та надалі реалізуємо його алгоритм. При цьому метод орієнтований на поступовий підбір необхідних концентрацій для забезпечення трьох базових умов системи.

1. Відношення концентрації метану до пропану повинно бути сталим.
2. Число Воббе еквівалентної суміші повинно бути однаковим з числом Воббе базового газу.
3. Сума концентрацій трьох компонентів: CH_4 , C_3H_8 та N_2 повинно складати 100 %. Створимо етапи алгоритму розв'язку.
4. Знаходження початкового пошукового вмісту метану та пропану в еквівалентній суміші.
5. Знаходження відношення концентрацій метану до пропану в еквівалентній суміші.
6. Знаходження початкового пошукового вмісту азоту в еквівалентній суміші.
7. Розрахунок числа Воббе для отриманого вмісту компонентів трьох компонентної суміші.
8. Порівняння величини числа Воббе з числом Воббе базового газу. Знаходження коефіцієнта перерахунку щодо концентрацій паливних компонентів.

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

9. Перерахунок концентрацій метану та пропану згідно з коефіцієнтом перерахунку при збереженні сталим величини відношення концентрацій.

10. Перерахунок пошукового вмісту азоту в еквівалентній суміші.

11. Повернення до п.4

Кількість етапів перерахунку задається з умови точності наближення числа Воббе еквівалентної суміші до числа Воббе базового газу. Після остаточного отримання величин концентрацій можна знайти розрахункові величини Ω_{H_2} та E_{PN} для розрахунку індексів Даттона.

Окремо розглянемо питання знаходження величини відношення концентрацій метану до пропану. В першому розділі був розглянутий вираз для розкладання 1 молю складової вищих насичених вуглеводів до метану і пропану еквівалентної суміші. Розглянемо питання отримання розрахункового виразу щодо довільного вуглеводу та отримання виразу для знаходження відношення концентрацій пропана і метана. Для цього необхідно розв'язати задачу з отримання коефіцієнтів концентрацій метану та пропану при збереженні сталої величини співвідношення кількості атомів вуглецю та гідрогену.

$$1 \cdot C_nH_m = Prop \cdot C_3H_8 \text{ екв} + CH_4 \text{ екв}, \quad (2.54)$$

де $C_3H_8 \text{ екв}$ - кількість речовини еквівалентного пропану на одиницю речовини вуглеводного компонента C_nH_m ;

$CH_4 \text{ екв}$ - кількість речовини еквівалентного метану на одиницю вуглеводного компонента C_nH_m ;

n - кількість атомів вуглецю в молекулі вуглеводу;

m - кількість атомів гідрогену в молекулі вуглеводу.

Створимо систему рівнянь для умови розкладання газу:

$$\begin{cases} n = C_3H_8 \text{ екв} \cdot 3 + CH_4 \text{ екв} \cdot 1; \\ m = C_3H_8 \text{ екв} \cdot 8 + CH_4 \text{ екв} \cdot 4. \end{cases} \quad (2.55)$$

Розв'язком системи рівнянь будуть наступні вирази:

$$C_3H_8 \text{ екв} = n - m/4. \quad (2.56)$$

$$CH_4 \text{ екв} = 3/4 \cdot m - 2 \cdot n. \quad (2.57)$$

										601-НТ-11393643-МР	Арк.
											43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							

Отже, вирази дозволяють знайти кількість речовин еквівалентної суміші на одиницю відповідного компонента C_nH_m . Для розрахунку концентрацій отримані величини повинні бути приведені до концентрації компонента C_nH_m у газі. При отриманні від'ємних значень $CH_4_{екв}$ відповідна приведена молярна концентрація еквівалентного метану повинна бути віднята від концентрації метану базового газу. Відповідно і приведена молярна концентрація еквівалентного пропану повинна бути додана до концентрації пропану в базовому газі. Для спрощення розрахунку можна застосувати тотожність між молярними та об'ємним концентраціями речовин (підхід до газу як ідеального).

Отже, тоді отримаємо наступні розрахункові вирази:

$$Z_{CH_4_{екв}} = Z_{CH_4} + z_i \cdot CH_4_{екв}, \quad (2.58)$$

де $Z_{CH_4_{екв}}$ - молярна концентрація метану в еквівалентній суміші;

z_i - молярна концентрація відповідного компонента C_nH_m ;

Z_{CH_4} - молярна концентрація метану в базовій суміші.

Або для спрощеного розрахунку:

$$r_{CH_4_{екв}} = r_{CH_4} + r_i \cdot CH_4_{екв}, \quad (2.59)$$

де r_i - це об'ємна концентрація відповідного компонента C_nH_m в газі,

r_{CH_4} - об'ємна концентрація метану в базовій суміші.

Відповідно будується вираз і для знаходження концентрації пропану.

$$Z_{C_3H_8_{екв}} = Z_{C_3H_8} + z_i \cdot C_3H_8_{екв}. \quad (2.60)$$

$$r_{C_3H_8_{екв}} = X_{C_3H_8} + x_i \cdot C_3H_8_{екв}. \quad (2.61)$$

Таким чином далі вже і знаходиться необхідна величина відношення концентрацій метану до пропану: $r_{CH_4_{екв}} / r_{C_3H_8_{екв}}$.

2.4 Аналіз обмежень щодо застосування методів взаємозамінності

При застосуванні методів до тих чи інших паливних газів виникає питання сфери дієвості цих методів. Так, той чи інший метод при його розробці орієнтувався на певні фізичні характеристики та особливості хімічного складу, а отже буде мати межі свого застосування. Проведемо аналіз та класифікацію методів на можливі обмеження при їх використанні. Надалі ці висновки будемо враховувати при проведенні досліджень щодо взаємозамінності газів.

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.6 - Класифікація критеріїв взаємозамінності з їх призначенням і умовами за якими критерії оцінюються

Назва критерія	Позначення, посилання на формулу	Призначення	Методика оцінки відповідності двох газів за критерієм
Показники взаємозаміни згідно з тепловою потужністю - енергетичний критерій			
Простий критерій Воббе; Методика Вівера, USA	W_i (2.1), (2.2), (2.3) $JH(W)$ (2.33)	Теплова потужність установки	Числа Воббе не повинні відрізнятися для двох газів на величину більшу $\pm 5\%$. Тип числа Воббе - вище (валове) або нижче (чисте) обирається з огляду на технічну особливість устаткування. Індекс теплової потужності для газу, для якого виготовлено пальник і для газу замітника $JH(W): 0,95 < JH(W) < 1,05$
Розширений критерій Воббе	W' (2.8 - 2.12)	Теплова потужність установки	Розширенні числа Воббе не повинні відрізнятися для двох газів на величину понад $\pm 5\%$ з урахуванням зміни діаметра газового отвору і тиску газу
Кноу (ЕС)	$J(K)$ (2.5)	Теплова потужність установки	Величина Кноу не повинна відрізнятися для двох газів на величину понад $\pm 5\%$
Метод Вівера, USA	$JA(W)$ (2.34)	Забезпечення необхідної величини витрат дуттьового повітря (коефіцієнту надлишку повітря);	Індекс первинного повітря порівнюючи газ замітник з газом приладу повинен бути в межах $0,95 < JA(W) < 1,05$. $JA(W) < 1$ - надлишок первинного повітря $JA(W) > 1$ - нестача повітря
Показники взаємозаміни згідно з явищем неповноти згорання			
Метод Даттона (D), GB (порівняння з метаном)	$JCF(D)$ (2.15)	Неповнота згорання	Величина індексу неповного згорання повинна бути нижче граничної величини. Правила газової безпеки Великобританії: $JCF(D) < 0,48$; $JCF(D) < 1,48$ (екстремальний випадок)
Метод AGA, USA (природні гази)	$C(A)$ (2.20)	Неповнота згорання	Індекс неповного згорання порівнюючи газ замітник з

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

601-НТ-11393643-МР

Арк.

47

	(для природних газів)		газом приладу повинен бути в межах $0,85 \leq C(A) \leq 1,15$ $C(A) > 1,15$ - тенденція хімічного недопалу
Метода Вівера (W), USA	$J(W)$ (2.40)	Неповнота згорання	Індекс неповного згорання порівнюючи газ замітник з газом приладу повинен бути: $J(W) \leq 0$. $J(W) > 0$ - тенденція хімічного недопалу
Метод Даттона (D), GB (порівняння з метаном)	$JSI(D)$ (2.17)	Жовті пробіски полум'я (сажоутворення)	Величина індексу сажоутворення повинна бути нижче граничної величини: $JSI(D) < 0,6$
Метод AGA, USA (природні гази)	$IY(A)$ (2.31)	Жовті пробіски полум'я	Індекс сажоутворення порівнюючи газ замітник з газом приладу повинен бути $IY \geq 1$. $IY(A) < 1$ - тенденція сажоутворення
Метод Вівера (W), USA	$JY(W)$ (2.38)	Жовті пробіски полум'я	Індекс жовтого кінчика полум'я порівнюючи газ замітник з газом приладу повинен бути $JY(W) \leq 0$ $JY(W) > 0$ - тенденція сажоутворення
Метод Дельбурга (Delb), Fr (природні гази)	$Ij(De)$ (2.52)	Жовті пробіски полум'я	«Число жовтих кінчиків» повинно бути $Ij(De) < 170$ (для газів другої сім'ї методу)
Метод Дельбурга (Delb), Fr (штучні гази)	$Ic(De)$ (2.53)	Утворення сажі	«Число сажі» повинно бути $Ic(De) < 170$ (для газів першої сім'ї методу)
Показники взаємозаміни згідно з явищем відриву полум'я			
Метод Даттона (D), GB (порівняння з метаном)	$JL(D)$ (2.16)	Відрив полум'я	Величина індексу відриву полум'я повинна бути нижче граничної величини. $JL(D) < 1,16$. Зростання $JL(D)$ - тенденція відриву
Метод AGA, USA (природні гази)	$IL(A)$ (2.23)	Відрив полум'я	Індекс відриву полум'я порівнюючи газ замітник з газом приладу повинен бути: $IL(A) \leq 1$. $IL(A) > 1$ тенденція до відриву полум'я

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

Метод Вівера (W), USA	JL(W) (2.35)	Відрив полум'я	Індекс відриву полум'я порівнюючи газ замітник з газом приладу повинен бути в межах $0,95 < JL(W) < 1,05$. JL(W) < 1 - тенденція відриву полум'я
-----------------------	-----------------	----------------	--

Показники взаємозаміни згідно з явищем проскоку полум'я

Метод AGA, USA (природні газ)	IF(A) (2.29) (2.30)	Проскок полум'я	Індекс проскоку полум'я порівнюючи газ замітник з газом приладу повинен бути $IF(A) \leq 1,18$ $IF^*(A) > 1$ - тенденція проскоку
-------------------------------	------------------------	-----------------	--

Метод Вівера (W), USA	JF(W) (2.37)	Проскок полум'я	Індекс зворотного (проскоку) полум'я порівнюючи газ замітник з газом приладу повинен бути $JF(W) \leq 0$. $JF(W) > 0$ - тенденція проскоку
-----------------------	-----------------	-----------------	--

концентрації компонентів з підходом до газів як до ідеальних можуть бути знайдені з наступних співвідношень.

Об'ємна концентрація діоксиду вуглецю:

$$V_{CO_2} = N_{CO_2} / N_{пз} \quad (3.11)$$

Об'ємна концентрація водяної пари:

$$V_{H_2O} = N_{H_2O} / N_{пз} \quad (3.12)$$

Об'ємна концентрація трьохатомних складових димових газів:

$$V_{CO_2+H_2O} = (N_{CO_2} + N_{H_2O}) / N_{пз} \quad (3.13)$$

Згідно з системою стехіометричних рівнянь реакцій на 1 моль горючого компонента кількість необхідного повітря дорівнює відповідному коефіцієнту k : $k \cdot (O_2 + 3,76N_2) = k \cdot 4,76$ моль. Тоді кількість необхідного сухого повітря на 1 моль паливного газу:

$$N_{сп\ стех} = (2 \cdot CH_4 + 3,5 \cdot C_2H_6 + 5 \cdot C_3H_8 + 6,5 \cdot C_4H_{10} + 8 \cdot C_5H_{12} + 0,5 \cdot H_2 + 0,5 \cdot CO + 1,5 \cdot H_2S) + 3,76 \cdot (2 \cdot CH_4 + 3,5 \cdot C_2H_6 + 5 \cdot C_3H_8 + 6,5 \cdot C_4H_{10} + 8 \cdot C_5H_{12} + 0,5 \cdot H_2 + 0,5 \cdot CO + 1,5 \cdot H_2S).$$

$$N_{сп\ стех} = 9,52 \cdot CH_4 + 16,66 \cdot C_2H_6 + 23,8 \cdot C_3H_8 + 30,94 \cdot C_4H_{10} + 38,08 \cdot C_5H_{12} + 2,38 \cdot H_2 + 2,38 \cdot CO + 7,14 \cdot H_2S \quad (3.14)$$

Слід зазначити, що це кількість речовини саме сухого повітря, при обліку реального повітря його потреба збільшиться з огляду на величину вологості. Але для розв'язання задач взаємозаміни газів і спрощення розрахунків приймемо припущення застосування саме повітря сухого.

В подальших розрахунках для перевірки точності результатів будемо використовувати також значення мас речовини і виконувати перевірку розрахунків згідно з законом збереження мас. Отже, маси на відміну від кількості речовини залишаються незмінними. Величину об'ємів речовин будемо знаходити з використанням довідникових значень густини для нормальних умов.

Молярну масу сухого повітря отримаємо із наступного складу: O_2 - 21% об, N_2 - 79%. Саме такий склад розповсюджений для різноманітних розрахункових виразів реакцій горіння.

Для переходу від кількості речовини N хімічних реакцій, моль, до об'єму V , m^3 , можна застосувати наступну формулу:

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$V = N \cdot M / \rho, \quad (3.15)$$

де M - молярна маса компонента суміші, кг/моль;

ρ - густина компонента суміші, кг/м³.

В цьому випадку кожний компонент суміші буде розглядатися як реальний газ. В цьому випадку результати розрахунків не будуть мати похибок уявлення реальних газів як газів ідеальних.

Таким чином ми побудували системи рівнянь хімічних реакцій горіння паливних газових сумішей. На основі рівнянь були отримані розрахункові вирази для визначення складу димових газів та концентрацій компонентів як для стехіометричних реакцій, так і для випадків надлишку повітря $\alpha > 1$. Всі подальші гази дослідження будемо приводити до визначеної системи рівнянь горіння.

3.2 Розрахункові методи визначення фізико-хімічних показників горючих газів та процесу горіння

Вирішення питання взаємозамінності газів ґрунтується на порівнянні фізико-хімічних показників поливої суміші. Сам розрахунок властивостей газів ґрунтується на використанні властивості кожної складової, складання величин до суми з використанням коефіцієнта концентрації.

Густина газової суміші - $\rho_{гсi}$, кг/м³.

Густина газової суміші знаходиться згідно формули:

$$\rho_{гс} = \sum \rho_{гсi} \cdot r_{гсi}, \quad (3.16)$$

де $\rho_{гсi}$ - густина i -го компонента,

$r_{гсi}$ - об'ємна доля i -го компонента.

Відносна густина. Багато розрахункових виразів d в тому числі стандарт EN437 оперує відношенням густини газу до густини сухого повітря до при заданій температурі - відносною густиною d .

$$d = \rho_{гс} / \rho_{сп}, \quad (3.17)$$

де $\rho_{сп}$ - густина сухого повітря, кг/м³.

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Стандарт EN437 широко використовує параметри паливних газових сумішей при температурі 15 °С. При цьому прийємо для даної температури густину сухого повітря $\rho_{\text{СП}} = 1,2255 \text{ кг/м}^3$. Відмітимо, що визначена величина відносної густини газової суміші не залежить від температури.

Густина газової суміші при довільній температурі t °С знаходиться з виразу:

$$\rho = \rho_{\text{ну}} \frac{273,15}{273,15 + t}, \quad (3.18)$$

де $\rho_{\text{ну}}$ - густина газу для нормальних умов.

Вміст паливного компонента. Знаходимо як загальну долю паливних компонентів в суміші - $\eta_{\text{пал}}$.

$$\eta_{\text{пал}} = \text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_6 + \text{C}_3\text{H}_8 + \text{C}_4\text{H}_{10} + \text{C}_5\text{H}_{12} + \text{H}_2 + \text{CO} + \text{H}_2\text{S} \quad (3.19)$$

Нижча теплота згоряння суміші - H_i , МДж/м³. Знаходиться із виразу.

$$H_i = \sum H_{\text{гсі}} \cdot r_{\text{гсі}}, \quad (3.20)$$

де $H_{\text{гсі}}$ теплота згоряння i -го компонента, МДж/м³.

Вища теплота згоряння суміші - H_s , МДж/м³ знаходиться із виразу:

$$H_s = \sum H_{\text{сгі}} \cdot r_{\text{сгі}}, \quad (3.21)$$

де $H_{\text{сгі}}$ - вища теплота згоряння i -го компонента, МДж/м³.

Слід зазначити, що величина теплоти згорання залежить від температури паливного газу. Перехід для визначення величин теплоти H при довільній температурі t °С і атмосферному тиску 101,3 кПа, знаходиться з виразу:

$$H = H_{\text{ну}} \frac{273,15}{273,15 + t},$$

де $H_{\text{ну}}$ – теплота згорання газу для нормальних умов.

Коефіцієнт надлишку повітря - α . Знаходиться згідно з наступним виразом.

$$\alpha = \sum \alpha_{\text{гсі}} \cdot v_{\text{гсі}}, \quad (3.22)$$

де $\alpha_{\text{гсі}}$ - коефіцієнт надлишку повітря для спалювання i -го компонента.

Концентрація меж спалахування суміші. Для розрахунку концентрації необхідно використовувати довідникові дані щодо меж спалахування для кожного компонента - таблиця 3.1.

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.1 - Концентрації меж спалахування газових складових

Хімічна формула	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	H ₂	CO	H ₂ S
LEL, нижня межа, %	5	3	2,1	1,8	1,4	4	12,5	4,3
UEL, верхня межа, %	15	12,5	9,5	8,4	7,8	75	74	45

Для розрахунку відповідної межі EL суміші використаємо наступний розрахунковий вираз:

$$EL = 1 / \sum (r_{гсі} / EL_{гсі}), \quad (3.23)$$

де $EL_{гсі}$ - концентрація межі спалахування компонента.

Даний вираз описує ситуацію, коли паливний компонент складає 100%.

Якщо в суміші присутній баласт, то необхідно провести нормалізацію згідно з виразом.

$$EL = 1 / \sum (r_{гсі} / EL_{гсі}) \cdot \eta_{пал}. \quad (3.24)$$

Але слід зауважити, що отримане значення буде відповідати фактично лише самій паливній частині суміші, тоді коли оцінка загального впливу баластних домішок на величину концентрації буде потребувати окремих розрахункових корекцій.

Коефіцієнти надлишку повітря α на межах спалахування. Відповідно для нижньої межі спалахування - α_{LEL} , та межі верхньої - α_{UEL} .

$$\alpha_{EL} = \frac{1 - EL}{EL \cdot V_T}, \quad (3.25)$$

де V - теоретично необхідний об'єм повітря на одиницю об'єму паливного газу в стехіометричній реакції (теоретичні витрати повітря на горіння).

Слід зауважити, що отримана величина надлишку буде коректною для суміші, що складається на 100% з палива. При наявності баластних домішок величина α_{EL} буде відповідати лише паливній частині, а для всієї суміші буде мати умовний характер.

Визначення елементарного складу газу. Кожний паливний газ можна розкласти на елементарні елементи. Для обраних газів дослідження цими елементами будуть речовини: C, H, O, N, S. Для кожної речовини можна обчислити її масову частину в загальній масі одиниці палива: C^p, H^p, O^p, N^p, S^p . Побудуємо

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розрахункову таблицю де спочатку представимо кількість атомів в кожному компоненті суміші - таблиця 3.2.

Таблиця 3.2 - Кількість атомів речовини елементарного складу в компонентах газових сумішей

Елемент	Кількість атомів										
	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	H ₂	CO	H ₂ S	N ₂	CO ₂	O ₂
С	1	2	3	4	5	0	1	0	0	1	0
Н	4	6	8	10	12	2	0	2	0	0	0
С	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
О	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	2
Н	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0

Відповідно сумарна атомарна маса відповідної речовини ΣAr :

$$\Sigma Ar(C) = Ar(C) \cdot (CH_4 + 2C_2H_6 + 3C_3H_8 + 4C_4H_{10} + 5C_5H_{12} + CO + CO_2), \quad (3.26)$$

$$\Sigma Ar(H) = Ar(H) \cdot (4CH_4 + 6C_2H_6 + 8C_3H_8 + 10C_4H_{10} + 12C_5H_{12} + 2H_2 + 2H_2S), \quad (3.27)$$

$$\Sigma Ar(S) = Ar(S) \cdot H_2S, \quad (3.28)$$

$$\Sigma Ar(O) = Ar(O) \cdot (CO + 2CO_2 + 2O_2), \quad (3.29)$$

$$\Sigma Ar(N) = Ar(N) \cdot 2N_2, \quad (3.30)$$

де $Ar(C)$ - атомарна маса вуглецю, 12,011;

$Ar(H)$ - атомарна маса гідрогену, 1,00784;

$Ar(S)$ - атомарна маса сірки, 32,066;

$Ar(O)$ - атомарна маса кисню, 15,9994;

$Ar(N)$ - атомарна маса азоту, 14,00674.

Тоді знайдемо вирази для масових частин речовини в загальній масі одиниці палива:

$$C^p = \Sigma Ar(C) / (\Sigma Ar(C) + \Sigma Ar(H) + \Sigma Ar(S) + \Sigma Ar(O) + \Sigma Ar(N)) \quad (3.31)$$

$$H^p = \Sigma Ar(H) / (\Sigma Ar(C) + \Sigma Ar(H) + \Sigma Ar(S) + \Sigma Ar(O) + \Sigma Ar(N)) \quad (3.32)$$

$$S^p = \Sigma Ar(S) / (\Sigma Ar(C) + \Sigma Ar(H) + \Sigma Ar(S) + \Sigma Ar(O) + \Sigma Ar(N)) \quad (3.33)$$

$$O^p = \Sigma Ar(O) / (\Sigma Ar(C) + \Sigma Ar(H) + \Sigma Ar(S) + \Sigma Ar(O) + \Sigma Ar(N)) \quad (3.34)$$

$$N^p = \Sigma Ar(N) / (\Sigma Ar(C) + \Sigma Ar(H) + \Sigma Ar(S) + \Sigma Ar(O) + \Sigma Ar(N)) \quad (3.35)$$

											Арк.
											56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							

601-НТ-11393643-МР

Визначення елементарного складу паливної частини газу.

Запропонуємо альтернативний підхід в визначенні елементарного складу. Оскільки в величину C^p буде входити вуглець CO_2 , що є по суті вже відпрацьованим паливом, то введемо альтернативну систему обрахунку. Будемо вважати за 100% робочої маси палива - уміст без CO_2 . Введемо систему позначень для показників: $C_{бв}$ (без вуглецю), $H_{бв}$, $S_{бв}$, $Обв$, $N_{бв}$. При цьому компонентом CO_2 в суміші - знехтуємо.

Відношення мас С/Н.

У подальшому вивченні властивостей газових сумішей застосуємо розповсюджений параметр відношення C^p/H^p . При цьому будемо використовувати також і параметр $C_{бв}/H_{бв}$ для випадків вивчення властивостей саме газових сумішей, а не продуктів згорання, де CO_2 відіграє важливу роль.

Швидкість розповсюдження полум'я. Для складних газоподібних палив за правилом адитивності визначається сумарний уміст горючих газів в суміші з повітрям C^{max} , % об. Сумарний уміст відповідає максимальній швидкості поширення полум'я.

$$C^{max} = \frac{r_1 + r_2 + \dots + r_n}{\frac{r_1}{C_1^{max}} + \frac{r_2}{C_2^{max}} + \dots + \frac{r_n}{C_n^{max}}} = \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{\sum_{i=1}^n \frac{r_i}{C_i^{max}}}, \quad (3.36)$$

де r_i - уміст горючих компонентів на умовно горючий склад газоподібного палива, % об;

C_i^{max} – уміст окремих індивідуальних компонентів в суміші з повітрям, при яких швидкість розповсюдження полум'я має максимальне значення.

Значення максимальної нормальної швидкості поширення полум'я u_H^{max} , м/с, для суміші складного газоподібного палива з повітрям визначається за наступною формулою:

$$u_H^{max} = C^{max} \frac{\frac{r_1^2}{C_1^{max}} u_{H1} + \frac{r_2^2}{C_2^{max}} u_{H2} + \dots + \frac{r_n^2}{C_n^{max}} u_{Hn}}{r_1^2 + r_2^2 + \dots + r_n^2} = C^{max} \frac{\sum_{i=1}^n \frac{r_i^2}{C_i^{max}} u_{Hi}}{\sum_{i=1}^n r_i^2}, \quad (3.37)$$

									Арк.
									57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

601-НТ-11393643-МР

де, u_{hi} -- максимальне значення нормальної швидкості поширення полум'я для окремих горючих компонентів складного газу в суміші з повітрям, м/с. Величини C_i^{\max} та u_{hi} обираються з довідникових даних (Додаток А)

Вирази (3.36) і (3.37) справедливі тільки у разі, якщо всі компоненти, що входять до складу складного газу, мають однакову хімічну природу, як приклад - природні і скраплені гази будь-якого складу. Для сумішей природних і штучних газів вони дають тільки наближений результат. Вирази непридатні для газів з умістом значної кількості баластних домішок (N_2 , CO_2). Ці домішки знижують швидкість поширення полум'я. Для газів з баластними домішками нормальну швидкість поширення полум'я u_n^{δ} , м/с, можна розрахувати з наступної залежності:

$$u_n^{\delta} = u_n^{\max} (1 - 0,01 \cdot N_2 - 0,012 \cdot CO_2), \quad (3.38)$$

де N_2 і CO_2 - концентрації відповідних баластних домішок, % об.

В літературних джерелах вказується, що на швидкість поширення полум'я значний вплив має попередній підігрів газоповітряної суміші. Значення нормальної швидкості, м/с, при абсолютній температурі суміші, К, можна приблизно визначити за згідно з наступною залежністю:

$$u_n^{T_2} = u_n^{293} \left(\frac{T_2}{293} \right)^2, \quad (3.39)$$

де u_n^{293} - значення нормальної швидкості поширення полум'я при температурі 20°C приймається із довідниковими даними (Додаток А).

Швидкість відриву полум'я. Згідно з [20] визначити швидкість відриву полум'я $w_{\text{відр}}$, м/с, для многофакельних інжекційних пальників з вогневими каналами діаметром від 2 до 6 мм можна згідно наступної формули:

$$w_{\text{відр}} = 3,6 \cdot 10^{-3} d T^2 \frac{1 + V_B^T}{1 + \alpha_1 V_B^T}, \quad (3.40)$$

де: d – діаметр вогневих каналів, м;

V_B^T – теоретична потреба в повітрі, m^3/m^3 газу;

α_1 – коефіцієнт надлишку первинного повітря;

T – абсолютна температура стінок вогневих каналів, К.

Швидкість проскоку полум'я. Згідно [20] при спалюванні в топці з керамічним

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

тунелем швидкість проскоку $w_{пр}$, м/с, може бути розрахована згідно наступної формули:

$$w_{пр} = 7,75 \cdot 10^{-3} \cdot u_n \cdot d / a, \quad (3.41)$$

де d - діаметр вогневого каналу пальника, м;

u_n - нормальна швидкість поширення полум'я, м/с;

a - коефіцієнт температуропровідності газоповітряної суміші, m^2/s .

Згідно [20] для суміші природного газу з повітрям (при $\alpha_1 = 1,0$; $t = 20^\circ C$) значення коефіцієнта температуропровідності становить приблизно $20 \cdot 10^{-6} m^2/s$.

Отже, нами були обрані показники фізико-хімічних властивостей газів та процесу горіння. Надалі використаємо обраний математичний розрахунковий апарат для вивчення питань взаємозаміни газів.

3.3 Методи аналітичних розрахунків температур горіння

Побудуємо розрахункову систему для визначення температур горіння паливних газів. Як відомо, в теоретичних розрахунках використовують температуру жаропродуктивності $t_{ж}$, калориметричну температуру t_k , теоретичну температуру горіння при адіабатичних умовах - t_a .

Температура $t_{ж}$ - максимальна температура продуктів повного згорання газу в адіабатичних умовах з коефіцієнтом надлишку повітря $\alpha = 1,0$ та при температурі газу та повітря, що дорівнює $0^\circ C$. Калориметрична температура горіння t_k відрізняється від жаропродуктивності тим, що температура газу і повітря, а також коефіцієнт надлишку повітря приймаються за їх дійсними значеннями. Теоретична температура горіння при адіабатичних умовах t_a - максимальна температура, яка визначається аналогічно калориметричній t_k , але з поправкою на ендотермічні (що потребують теплоти) реакції дисоціації діоксиду вуглецю та водяної пари.

Температура жаропродуктивності може бути знайдена згідно з наступною формулою:

$$t_{ж} = \frac{Q_H^P}{V_{CO_2} \cdot C_{CO_2}^P + V_{H_2O} \cdot C_{H_2O}^P + V_{N_2} \cdot C_{N_2}^P + V_{SO_2} \cdot C_{SO_2}^P}, \quad (3.42)$$

де Q_H^P - нижня теплота згорання палива, МДж/м³;

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

V - об'єм відповідного компонента диму, м^3 ;

C^P - ізобарна теплоємність відповідного компонента диму, $\text{МДж}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{м}^3)$.

Калориметрична температура може бути знайдена згідно з наступною формулою:

$$t_k = \frac{Q_H^P + Q_{\text{фіз}}}{V_{\text{CO}_2} \cdot C_{\text{CO}_2}^P + V_{\text{H}_2\text{O}} \cdot C_{\text{H}_2\text{O}}^P + V_{\text{N}_2} \cdot C_{\text{N}_2}^P + V_{\text{SO}_2} \cdot C_{\text{SO}_2}^P}, \quad (3.43)$$

де $Q_{\text{фіз}}$ - кількість теплоти, що вноситься в топку з паливними газами та повітрям $\text{МДж}/\text{м}^3$ (палива).

Як відомо, при температурі до 1600°C ступінь дисоціації може не враховуватися. При вищій температурі ступінь дисоціації може істотно знижувати температуру у робочому просторі і вносити зміни в кінцевий склад димових газів. Як відомо з довідникових даних температура жаропродуктивності компонентів природного газу значно перевищує рівень 1600°C . Це свідчить про необхідність врахування ендотермічних реакцій дисоціації діоксиду вуглецю та водяної пари. Важливо зазначити, що реакції змінюють концентрації триатомних газів у диму, а також збільшують і сам об'єм димових газів. При цьому в димових газах з'являється кисень O_2 та оксид вуглецю CO .

Теоретична температура горіння при адіабатичних умовах та може бути знайдена згідно з формулою:

$$t_a = \frac{Q_H^P + Q_{\text{фіз}} - Q_{\text{енд}}}{V_{\text{CO}_2} C_{\text{CO}_2}^P + V_{\text{H}_2\text{O}} C_{\text{H}_2\text{O}}^P + V_{\text{N}_2} C_{\text{N}_2}^P + V_{\text{SO}_2} C_{\text{SO}_2}^P + V_{\text{CO}} C_{\text{CO}}^P + V_{\text{O}_2} C_{\text{O}_2}^P + V_{\text{H}_2} C_{\text{H}_2}^P}, \quad (3.44)$$

де $Q_{\text{енд}}$ - величина теплоти ендотермічної реакції дисоціації, $\text{МДж}/\text{м}^3$ (палива).

$V_{\text{CO}} V_{\text{O}_2} V_{\text{H}_2}$ - об'єми компонентів продуктів дисоціації.

Як відомо хімічні формули реакцій дисоціації мають вигляд та наступні величини поглинання енергії;



					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ступінь дисоціації речовини виражається через коефіцієнти α та β , що знаходяться з довідникових даних (Додаток Б). Величини визначаються з огляду на парціальні тиски та величини температури димових газів. Парціальні тиски можуть бути знайдені як добуток об'ємних концентрацій (відповідно CO_2 та H_2O) на величину тиску нормальних умов = 101,3 кПа.

Побудуємо розрахункову модель для визначення температури горіння з врахуванням явища дисоціації у вигляді системи рівнянь:

$$\begin{aligned}
 t_a &= \frac{Q_H^P + Q_{\text{фіз}} - (Q_{\text{CO}} + Q_{\text{H}_2})}{V_{\text{CO}_2}^\beta \cdot C_{\text{CO}_2}^P + V_{\text{H}_2\text{O}}^\alpha \cdot C_{\text{H}_2\text{O}}^P + V_{\text{O}_2}^{\alpha, \beta} \cdot C_{\text{O}_2}^P + V_{\text{CO}}^\beta \cdot C_{\text{CO}}^P + V_{\text{N}_2} \cdot C_{\text{N}_2}^P + V_{\text{SO}_2} \cdot C_{\text{SO}_2}^P}; \\
 Q_{\text{CO}} &= 12,64 \cdot \beta \cdot N_{\text{CO}_2} \cdot M_{\text{CO}_2} / \rho_{\text{CO}_2}; \\
 Q_{\text{H}_2} &= 10,79 \cdot \alpha \cdot N_{\text{H}_2\text{O}} \cdot M_{\text{H}_2\text{O}} / \rho_{\text{H}_2\text{O}}; \\
 V_{\text{CO}_2}^\beta &= N_{\text{CO}_2} \cdot (1 - \beta) \cdot M_{\text{CO}_2} / \rho_{\text{CO}_2}; \\
 V_{\text{H}_2\text{O}}^\alpha &= (1 - \alpha) \cdot N_{\text{H}_2\text{O}} \cdot M_{\text{H}_2\text{O}} / \rho_{\text{H}_2\text{O}}; \\
 V_{\text{O}_2}^{\alpha, \beta} &= \frac{\alpha}{2} \cdot N_{\text{CO}_2} \cdot M_{\text{CO}_2} / \rho_{\text{CO}_2} + \frac{\beta}{2} \cdot N_{\text{H}_2\text{O}} \cdot M_{\text{H}_2\text{O}} / \rho_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{O}_2}; \\
 V_{\text{CO}}^\beta &= \beta \cdot N_{\text{CO}_2} \cdot M_{\text{CO}_2} / \rho_{\text{CO}_2}; \\
 \alpha &= f(P_{\text{H}_2\text{O}}; t_a); \\
 \beta &= f(P_{\text{CO}_2}; t_a),
 \end{aligned} \tag{3.47}$$

де β - ступінь дисоціації двоокисі вуглецю, відносні одиниці;

α - ступінь дисоціації водяної пари, відносні одиниці;

N_{CO_2} - кількість речовини CO_2 при згоранні 1 нм^3 палива, моль;

$N_{\text{H}_2\text{O}}$ - кількість речовини H_2O при згоранні 1 нм^3 палива, моль;

M_{CO_2} , $M_{\text{H}_2\text{O}}$ - молярні маси CO_2 та H_2O , кг/моль;

ρ_{CO_2} , $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ - густина CO_2 та H_2O , кг/ нм^3 ;

Q_{CO} - величина теплоти ендотермічної реакції дисоціації CO_2 , МДж/ нм^3 ;

Q_{H_2} - величина теплоти ендотермічної реакції дисоціації H_2O , МДж/ нм^3 ;

$V_{\text{CO}_2}^\beta$ - об'єм CO_2 з врахуванням ступеня дисоціації β , нм^3 ;

										Арк.
										61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	601-НТ-11393643-МР					

$V_{H_2O}^\alpha$ - об'єм H_2O з врахуванням ступеня дисоціації α , nm^3 ;

$V_{O_2}^{\alpha, \beta}$ - об'єм O_2 з врахуванням ступенів дисоціації α та β , а також власного об'єму кисню в димових газах V_{O_2} , nm^3 ;

V_{CO}^β - об'єм CO з врахуванням ступеня дисоціації β ;

P_{H_2O} та P_{CO_2} - парціальні тиски водяної пари та діоксиду вуглецю димових газів.

Величина та не може бути знайдена прямим розрахунком і потребує реалізації систему поетапних обчислень. Реалізуємо ітераційну розрахункову систему обчислень в Microsoft Excel.

3.4 Аналітичний метод уточненого розрахунку теплоємності газів

Прямий аналітичний розрахунок теплоємності - проблематичний, бо теплоємність сама являється функцією температури. Тому для обчислення при використанні електронних таблиць Microsoft Excel використаємо режим ітераційних обчислень, тобто режим розрахунків методом наближень за заданим алгоритмом.

Відомо також, що теплоємність є величиною диференційною $c = \delta Q / \delta T$, а отже при розрахунку енергії речовини необхідно проводити інтегрування залежності теплоємності по температурі згідно з наступним співвідношенням:

$$Q = m \int_{T_0}^{T_i} c(T) dT, \quad (3.48)$$

Для знаходження її середньої величини - $c_{сер}$ на невеликій ділянці температур залежність $c(T)$ з досить малою похибкою можна представити лінією, тоді на ділянці температур $T_0 - T_1$ можна використати наступне співвідношення:

$$c_{сер} = \frac{c_{T1} + c_{T2}}{2}. \quad (3.49)$$

Але для великих температурних ділянок забезпечення точності розрахунків вимагає врахування нелінійного характеру зміни теплоємності. Через те, що довідникові дані оперують саме табличними значеннями теплоємності для

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОЗАМІННОСТІ ГАЗІВ

4.1 Аналіз фізико-хімічних показників горіння газів

Визначимо основні фізико-хімічні властивості паливних газів. Виконаємо аналіз щодо показників нижчої теплоти згорання при нормальних умовах - H_i (3.20), елементарного складу (C, H, N, O) (3.31-3.35) елементарного складу без врахування вуглецю в газах баласту (Сбв, Нбв, Nбв, Обв), величин об'ємних концентрацій складових продуктів згорання (r_{CO_2} , r_{H_2O} , r_{N_2}) (3.11–3.12), величини об'єму продуктів згорання $V_{пз}$ (3.4, 3.15), теоретичної кількості необхідного повітря в стехіометричній реакції горіння - V_T (3.14, 3.15), температуру жаропродуктивності - $t_{ж}$ (3.42), температуру горіння (адиабатичні умови)- $t_{г}$ (3.44). Результати розрахунків для газів комунально-побутової та промислової сфер приведемо в таблиці 4.1.

Обрані гази України мають межі теплоти згорання в діапазоні 31,38 - 38,54 МДж/нм³. Для подальшої кількісної оцінки ширини діапазонів тих чи інших показників використаємо показник відхилення максимальної величини від середнього значення граничних показників $|D\%_{гр}|$:

$$|D\%_{гр}| = \left| \frac{x_{\max} - \bar{x}_{гр}}{\bar{x}_{гр}} \right| = \left| \frac{x_{\min} - \bar{x}_{гр}}{\bar{x}_{гр}} \right|, \quad (4.1)$$

де $\bar{x}_{гр}$ - середнє значення для газів з граничними величинами;

x_{\max} , x_{\min} - максимальне та мінімальне значення показника.

Відхилення від середнього для вибірки теплоти згорання складає 10,40%. Для стехіометричної реакції діапазон необхідного повітря складає 8,31 - 10,20 м³/м³ ($|D\%_{гр}| = 10,22\%$). Об'єм продуктів згорання коливається в межах 8,31-10,2 ($|D\%_{гр}| = 9,45\%$). $|D\%_{гр}|$ для показника Сбв складає 11,34%. Концентрація діоксиду вуглецю в продуктах згорання має для газів більш групований характер з величиною $|D\%_{гр}| = 1,94\%$. Температура горіння знаходиться в межах 2027 - 2046°C. Температура жаропродуктивності значно перевищує температуру горіння, що свідчить про вплив на величину максимальної температури явищ дисоціації водяної пари та діоксиду вуглецю.

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 4.1 - Фізико-хімічні показники газів дослідження

Показник	Одиниця виміру	Родовища Битківське	Родовище Рудківське	Біометан	Родовище Радченки	Біогаз 1	Біогаз 2	Біогаз 3	Генера-торний газ 1	Генера-торний газ 2	Генера-торний газ 3
		CH ₄ =91,8 C ₂ H ₆ =4,3 C ₃ H ₈ =1,74 C ₄ H ₁₀ =0,64 C ₅ H ₁₂ =0,29 N ₂ =1,1 CO ₂ =0,2	CH ₄ =95,45 C ₂ H ₆ =0,6 C ₃ H ₈ =0,48 C ₄ H ₁₀ =0,3 C ₅ H ₁₂ =0,17 N ₂ =2,9 CO ₂ =0,1	CH ₄ =98 N ₂ =0,5 CO ₂ =1,5	CH ₄ =86,3 C ₂ H ₆ =0,2 C ₃ H ₈ =0,15 C ₄ H ₁₀ =0,05 N ₂ =13,16 CO ₂ =0,17	CH ₄ =70 H ₂ =3 N ₂ =1 CO ₂ =26	CH ₄ =57,5 H ₂ =1,5 N ₂ =3 CO ₂ =38	CH ₄ =45 N ₂ =5 CO ₂ =50	CH ₄ =3 H ₂ =25 CO=25 N ₂ =37 CO ₂ =10	CH ₄ =2 H ₂ =17,5 CO=22,5 N ₂ =43,5 CO ₂ =14,5	CH ₄ =1 H ₂ =10 CO=20 N ₂ =50 CO ₂ =19
HI	МДж/нм ³	38,55	35,72	35,16	31,28	25,44	20,79	16,15	6,93	5,45	3,97
C	% мас	0,743	0,714	0,723	0,592	0,500	0,427	0,372	0,201	0,184	0,170
H	% мас	0,236	0,236	0,239	0,198	0,125	0,087	0,059	0,027	0,017	0,009
N	% мас	0,017	0,048	0,008	0,207	0,012	0,031	0,046	0,455	0,476	0,493
O	% мас	0,004	0,002	0,029	0,003	0,362	0,454	0,523	0,317	0,323	0,328
C бв	% мас	0,745	0,715	0,742	0,593	0,727	0,684	0,627	0,183	0,154	0,126
H бв	% мас	0,238	0,236	0,249	0,198	0,249	0,233	0,210	0,034	0,023	0,012
N бв	% мас	0,017	0,048	0,009	0,208	0,024	0,083	0,162	0,565	0,636	0,701
Сбв/Нбв		3,136	3,027	2,979	2,991	2,917	2,941	2,979	5,380	6,787	10,423
r CO ₂	м ³ /м ³	0,097	0,095	0,096	0,094	0,124	0,146	0,179	0,170	0,200	0,240
r H ₂ O	м ³ /м ³	0,186	0,188	0,190	0,187	0,185	0,179	0,170	0,139	0,111	0,072
r N ₂	м ³ /м ³	0,717	0,717	0,714	0,719	0,691	0,674	0,650	0,691	0,689	0,687
V пз	м ³ /м ³	11,250	10,483	10,334	9,306	7,724	6,505	5,286	2,224	1,941	1,658
Vт	м ³ /м ³	10,20	9,47	9,34	8,31	6,74	5,51	4,29	1,48	1,14	0,81
tж	С	2218	2207	2203	2182	2113	2038	1930	1986	1791	1530
tr	С	2046	2040	2038	2027	1973	1921	1843	1886	1740	1520

Біогази мають значні відмінності в показниках з порівняння. Маємо значне зменшення теплоти згорання. Майже у два рази зменшується потреба у повітрі, відповідно це відображається і на продуктах згорання з аналогічним зменшенням їх величини. Біогази мають значно нижчу температуру горіння. Навіть попередній аналіз цих показників вже ставить під питання можливість взаємозаміни природного газу біогазом. Генераторні гази являють групу з кардинально відмінними показниками теплоти згорання, а також теоретичної кількості необхідного повітря і продуктів згорання. Тобто група штучних газів має кардинальні відмінності не тільки з порівняння с природними газами, а і з біогазами. Так, наприклад показник Сбв/Нбв - досягає величини 10,4 тоді коли для природних газів його величина знаходиться на рівні 3. Отже, для отримання тієї самої величини теплової потужності буде необхідна повна заміна технологічного обладнання для збільшення величини подачі газу. При цьому це не вплине на

					601-НТ-11393643-МР						Арк.
											65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							

показник Сбв/Нбв, а отже можна очікувати, що процес горіння та теплопередачі буде мати суттєві відмінності від випадку застосування природного газу і навіть біогазу.

Приведемо розрахункові дані для газів Полтавського регіону. Попередньо спростимо склад газів до прийнятих хімічних рівнянь. Різновиди бутанів представимо загальним складом бутану, різновиди пентанів та гексанів представимо узагальненим складом пентану. Перейдемо від молярних концентрацій до об'ємних, виконаємо нормалізацію отриманих даних. Знехтуємо компонентами не більшими ніж 0,1% об. Отримані результати представимо у таблиці 4.2

Таблиця 4.2 - Фізико-хімічні показники природних газів Полтавського регіону

Показник	Одиниця виміру	УКПНГ Розпашівка	ВРГ Котелевської УСП	ВРГ Копилівської ТДПУ Ду150	АГРС Тимофіївської УКПГ (В.Будища)	АГРС Гадяч	ВРГ Михайлівської УКПГ	ПВВГ УКПГ Машівка	УКПГ Березівка на Солоху	УКПГ Опішня на Дельбао	ВРГ Яблунівської УКПГ (ВРГ Шеки)	ВРГ Комишянської УКПГ (ВРГ Попівка)
		CH ₄ =93,26 C ₂ H ₆ =3,36 C ₃ H ₈ =0,77 C ₄ H ₁₀ =0,43 C ₅ H ₁₂ =0,42 N ₂ =1,59 CO ₂ =0,18	CH ₄ =86,4 C ₂ H ₆ =5,91 C ₃ H ₈ =2,39 C ₄ H ₁₀ =0,95 C ₅ H ₁₂ =0,52 N ₂ =1,13 CO ₂ =2,7	CH ₄ =90,58 C ₂ H ₆ =3,78 C ₃ H ₈ =1,21 C ₄ H ₁₀ =0,48 C ₅ H ₁₂ =0,46 N ₂ =3,33 CO ₂ =0,17	CH ₄ =85,19 C ₂ H ₆ =7,85 C ₃ H ₈ =0,8 C ₄ H ₁₀ =0,08 C ₅ H ₁₂ =1,22 N ₂ =3,32 CO ₂ =1,53	CH ₄ =87,18 C ₂ H ₆ =6,37 C ₃ H ₈ =0,82 C ₄ H ₁₀ =0,11 C ₅ H ₁₂ =0,66 N ₂ =3,46 CO ₂ =1,41	CH ₄ =97,03 C ₂ H ₆ =0,26 C ₃ H ₈ =0,02 C ₄ H ₁₀ =0,39 C ₅ H ₁₂ =0,01 N ₂ =2,51 CO ₂ =0,16	CH ₄ =89,6 C ₂ H ₆ =3,85 C ₃ H ₈ =1,07 C ₄ H ₁₀ =0,39 C ₅ H ₁₂ =0,3 N ₂ =4,5 CO ₂ =0,29	CH ₄ =89,43 C ₂ H ₆ =4,28 C ₃ H ₈ =1,43 C ₄ H ₁₀ =0,52 C ₅ H ₁₂ =0,23 N ₂ =0,7 CO ₂ =3,42	CH ₄ =91,29 C ₂ H ₆ =3,02 C ₃ H ₈ =0,87 C ₄ H ₁₀ =0,32 C ₅ H ₁₂ =0,36 N ₂ =0,52 CO ₂ =3,61	CH ₄ =84,41 C ₂ H ₆ =6,07 C ₃ H ₈ =2,23 C ₄ H ₁₀ =0,79 C ₅ H ₁₂ =0,47 N ₂ =1,04 CO ₂ =5	CH ₄ =92,75 C ₂ H ₆ =1,84 C ₃ H ₈ =0,21 C ₄ H ₁₀ =0,07 C ₅ H ₁₂ =0,04 N ₂ =0,21 CO ₂ =4,88
НІ	МДж/м ³	37,520	39,012	37,373	38,385	37,303	35,024	36,583	37,172	36,469	37,980	34,812
С	% мас	0,734	0,719	0,716	0,707	0,702	0,715	0,700	0,710	0,707	0,696	0,691
Н	% мас	0,237	0,219	0,229	0,218	0,221	0,239	0,225	0,220	0,221	0,208	0,218
О	% мас	0,026	0,017	0,052	0,049	0,053	0,043	0,070	0,011	0,008	0,015	0,003
С бв	% мас	0,736	0,749	0,718	0,723	0,717	0,717	0,703	0,749	0,749	0,749	0,748
Н бв	% мас	0,238	0,234	0,230	0,226	0,228	0,240	0,226	0,240	0,242	0,234	0,248
О бв	% мас	0,026	0,018	0,052	0,051	0,054	0,043	0,071	0,012	0,009	0,017	0,004
Сбв/Нбв		3,095	3,205	3,120	3,193	3,143	2,985	3,106	3,123	3,088	3,199	3,021
г CO ₂	м ³ /м ³	0,096	0,100	0,097	0,099	0,098	0,095	0,097	0,100	0,099	0,102	0,100
г H ₂ O	м ³ /м ³	0,187	0,183	0,186	0,183	0,185	0,190	0,186	0,185	0,186	0,183	0,188
г N ₂	м ³ /м ³	0,717	0,716	0,718	0,717	0,717	0,716	0,718	0,715	0,714	0,715	0,712
V пс	м ³ /м ³	10,966	11,378	10,931	11,197	10,914	10,298	10,723	10,884	10,688	11,104	10,246
Vт	м ³ /м ³	9,93	10,30	9,89	10,13	9,86	9,30	9,68	9,84	9,66	10,03	9,24
tж	С	2215	2217	2214	2218	2212	2204	2210	2209	2207	2210	2197
tr	С	2045	2044	2044	2046	2042	2039	2042	2040	2038	2040	2033

Діапазони величин характеристик має меншу величину з порівняння з діапазоном переліку обраних газів України.

|D%гр| теплоти згорання = 5,69%.

|D%гр| необхідного повітря = 5,45%.

												Арк.
												66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	601-НТ-11393643-МР							

$|D\%_{гр}|$ продуктів згорання = 5,23%.

$|D\%_{гр}|$ відношення мас вуглецю та водню = 3,55%.

Таким чином проведений аналіз вказує на суттєву різницю фізико-хімічних показників газів сфери комунально-побутової теплоенергетики та теплоенергетики промислової. Отримані показники вже заперечують можливість простої технічної заміни природного газу біогазом, і тим паче - генераторним газом. Отже, сфера альтернативних газів теплоенергетики промислових об'єктів буде потребувати пошуку відповідних технічних рішень. Аналіз показує наявність різноманітності показників в групі самих природних газів, що потребує подальшого вивчення. Група обраних природних газів Полтавського регіону мають більш схожі показники, про що свідчать їх величини показника відхилення ($|D\%_{гр}|$).

Далі перейдемо до розгляду питання порівняння підходів стандартів відносно класифікації газів та допустимих їх характеристик для використання в газоспалювальному обладнанні.

4.2 Аналіз стандарту EN 437. Класифікація газів дослідження згідно з числом Воббе.

Стандарт ДСТУ ГОСТ EN 437:2014 проводить класифікацію паливних сумішей згідно з сімействами (Gas family). Сімейство - група горючих газів з деякими загальними фізико-хімічними властивостями з приналежністю деякому діапазону чисел Воббе. В рамках сімейства передбачається внутрішня класифікація згідно з групою (Group). Діапазони величин чисел для класифікації приведені в таблиці №1 стандарту. Стандарт для проведення класифікації використовує грубий індекс Воббе - Ws . Але стандартом передбачається також і класифікація на основі величин чистого індексу.

Стандарт передбачає універсальну класифікацію приладів спалювання. Прилад групи повинен підтримувати якість горіння для всіх газів даної групи. Кожна група кожного сімейства має деякий базовий еталонний газ: «reference gas». Кожна група має граничні характеристики згідно з показниками якості та безпеки горіння. Але характеристики задаються не індексами, а саме граничними газами. Граничні гази мають конкретні склади й мають кодифіковані назви. Стандарт

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вимагає від розробників приладів газоспалювання тестування саме на граничних газах і вказує на допуски щодо можливих відхилень в складі граничних газів випробування.

До першого сімейства стандарту EN437 відносяться гази з воднем як основним компонентом суміші. Другим компонентом згідно з умістом являється метан та баластний газ. Сімейство пропонує суміші граничних властивостей, що кодуються як G110 та G112. Сімейство має єдину групу А. Перше сімейство орієнтовано на деякі штучні гази, з воднем як головним компонентом суміші. Всі різновиди природних газів та їх можливі замітники належать до газів другого сімейства. Друге сімейство розділено на три групи: Н, L, Е. Для третього сімейства характерні суміші пропану, пропілену та різновиди бутанів.

Далі більш детально проаналізуємо особливості груп саме другого сімейства. Для другого сімейства характерні суміші найбільшої концентрації метану що відповідає варіаціям природного газу та його можливі комбінації з воднем. При цьому до метану, як до базового компонента, поступово може додаватися інша домішка. Цією домішкою може виступати: а) пропан, б) гідроген, в) азот. Саме від величин добавки буде залежати приналежність випробувальної суміші до групи. Зростання концентрації домішки фактично переводить газ до іншої групи. Чистий метан (код G 20) являється базовим еталоном для групи Н. Суміш G21 ($CH_4=87$, $C_3H_8=13$) являє граничний випадок при додаванні вищого вуглеводу - пропану згідно з критерієм неповного згорання та сажоутворення. Суміш G 222 ($CH_4=77$, $N_2=23$) являє граничний випадок при додаванні гідрогену згідно з критерієм проскоку полум'я. G 23 ($CH_4 = 92,5$, $N_2 = 7,5$) являє граничний випадок в рамках приладів групи при додаванні азоту до метану згідно з критерієм відриву полум'я.

Група L базовим еталоном використовує суміш метану та домішки азоту. Суміш G 25 ($CH_4 = 86$, $N_2 = 14$) з використанням метану з домішкою азоту являється базовим еталоном групи L. При цьому ця суміш сама являється граничною згідно з критерієм проскоку полум'я. Суміш цієї ж групи G 26 ($CH_4=80$, $C_3H_8=7$, $N_2=13$) являє приклад додаткової домішки до газу еталона G25 - вищого вуглеводню, пропану з граничним випадком неповного згорання та сажоутворення. Суміш подальшого збільшення вмісту азоту G27 ($CH_4=82$, $N_2=18$) являється граничною

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

згідно з критерієм відриву полум'я. Прилади групи L орієнтовані на природні гази із суттєвим умістом газу баласту, наприклад, біогаз з підвищеним рівнем метану. Граничні гази групи не містять гідрогену.

Група приладів E також використовує метан як базовий газ приладу. Аналогічно як і для приладів H Суміш G 21 ($\text{CH}_4=87$, $\text{C}_3\text{H}_8=13$) являє граничний випадок згідно з критерієм неповного згорання та сажоутворення. Аналогічно і суміш G222 являє граничний випадок при додаванні гідрогену згідно з критерієм проскоку полум'я для цієї групи. Але суміш і з умістом гідрогену G231 ($\text{CH}_4=85$; $\text{H}_2=15$) являє граничний випадок для приладів групи E згідно з критерієм відриву полум'я.

Якщо представите графічне відображення діапазонів індексів Воббе від нуля до максимального значення стандарту, то отримаємо наступну картину представленою рисунком 4.1, де прямокутні горизонтальні фігури відображають ступінь покриття сімействами діапазону індексів Воббе (довжини по горизонталі).

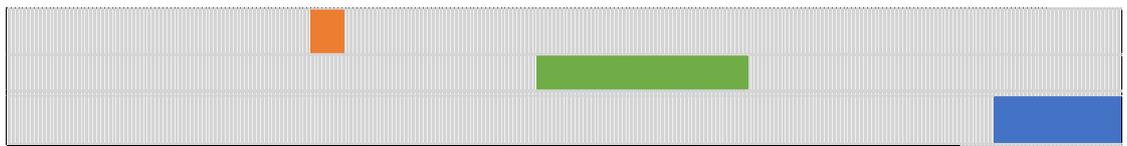


Рисунок 4.1 - Покриття сімейств простору індексів Воббе

Можна побачити, що три сімейства закривають лише три невеличкі зони простору значень індексів. Тому при проведенні подальших класифікацій крім стандартних позначень: family first, family second, family third введемо позначення для інших діапазонів індексів, а саме: F1/2; F3/2; F5/2. Ці діапазони будемо використовувати для розуміння розташування газів дослідження в системі стандарту коли відбувається вихід значення числа Воббе газу за визначені межі.

Виконаємо розрахунок теплоти згорання граничних газів сімейств A та B, чисел Воббе для прийнятих температур стандарту, а також чисел Воббе для температур стандартних умов. Виконаємо порівняння з вимогами щодо взаємозаміни згідно ГОСТ 5542-87. Результати представимо у таблиці 4.3.

										601-НТ-11393643-МР	Арк.
											69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							

Таблиця 4.3 - Теплота згорання та індекси Воббе граничних газів стандарту

EN437

Показник	Одиниця вимірюв	G21; sooting lim, incomplete combustion - H, E	G23; flame lift - H	G222; light back - H	G24; overheating limit H,E	G20; REF GAS H,E	G21; sooting lim, incomplete combustion - H, E	G222; light back - H, E	G231; flame lift - E	G24; overheating limit H,E	G25; REF GAS L; light back - L	G26; sooting lim, incomplete combustion - L	G27; flame lift - L	G110; REF GAS A; sooting lim, flame lift, incomplete	G112; light back - A
		CH ₄ =87 C ₃ H ₈ =13	CH ₄ =92,5 N ₂ =7,5	CH ₄ =77 H ₂ =23	CH ₄ =68 C ₃ H ₈ =12 H ₂ =20	CH ₄ =100	CH ₄ =87 C ₃ H ₈ =13	CH ₄ =77 H ₂ =23	CH ₄ =85 H ₂ =15	CH ₄ =68 C ₃ H ₈ =12 H ₂ =20	CH ₄ =86 N ₂ =14	CH ₄ =80 C ₃ H ₈ =7 H ₂ =13	CH ₄ =82 N ₂ =18	CH ₄ =26 H ₂ =50 N ₂ =24	CH ₄ =17 H ₂ =59 N ₂ =24
Група		H	H	H	H	H, E	E	E	E	E	L	L	L	A	A
d		0,685	0,585	0,443	0,578	0,554	0,685	0,443	0,482	0,578	0,612	0,679	0,629	0,411	0,367
H _i , 15 C	МДж/м ³	41,07	31,46	28,54	35,77	34,01	41,07	28,54	30,44	35,77	29,25	33,39	27,89	13,96	11,82
H _s , 15 C	МДж/м ³	45,31	34,92	31,85	39,60	37,75	45,31	31,85	33,90	39,60	32,46	36,91	30,95	15,86	13,55
W _i , 15 C	МДж/м ³	49,61	41,12	42,89	47,04	45,68	49,61	42,89	43,86	47,04	37,38	40,54	35,17	21,77	19,49
W _s , 15 C	МДж/м ³	54,73	45,63	47,85	52,07	50,69	54,73	47,85	48,84	52,07	41,49	44,81	39,03	24,73	22,35
H _i , 20 C	МДж/м ³	40,37	30,92	28,06	35,16	33,43	40,37	28,06	29,93	35,16	28,75	32,82	27,41	13,72	11,62
W _s , 20 C	МДж/м ³	53,80	44,86	47,03	51,18	49,83	53,80	47,03	48,01	51,18	40,78	44,05	38,37	24,31	21,97
W _i (0 C)	МДж/м ³	52,34	43,38	45,24	49,62	48,19	52,34	45,24	46,27	49,62	39,44	42,76	37,10	22,96	20,56

Мінімальна допустима межа нижчої теплоти згорання H_i (20 °C) на рівні 31,8 МДж/м³ (ГОСТ 5542-87) відповідає одночасно приладам груп H,E та L. Нижня границя діапазону чисел Воббе 41,2 МДж/м³ для природних газів згідно ГОСТ 5542-87 відповідає приладам групи L, а вища теплота згорання ГОСТ 54,5 МДж/м³ виходить взагалі за допустимі верхні межі груп H та E.

Діапазон чисел Воббе W_s (20 °C) для природних газів згідно ГОСТ 5542-87: 41,2-54,5 МДж/м³, ширина діапазону - 13,3 МДж/м³, |D%_{гр}| = 13,90%.

Діапазон чисел Воббе W_s (20 °C) для природних газів згідно EN437: 38,37 - 53,80 МДж/м³, ширина діапазону - 15,43 МДж/м³, |D%_{гр}| = 16,74%. Але слід зауважити, що там присутня ділянка без класифікації.

Отже, стандарт EN437 згідно з граничними значеннями чисел Воббе охоплює більшу ділянку діапазону чисел, але з неї випадають деякі висококалорійні гази й навпаки входять гази меншої калорійності. Також важливо зазначити, що в стандарті EN437 є ділянка чисел між групами L та H, гази якої взагалі не підпадають під класифікацію. При більшому охопленні різновидів газів стандарт EN437 пропонує три типи пальників для цих різновидів з огляду на якість спалювання, безпеку та енергоефективність. Три види обладнання для спалювання згідно EN437 враховують різноманітність складу паливних газів тому розділяють

																			Арк.
																			70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата															

601-НТ-11393643-МР

гази на три групи з індивідуальним підходом, тоді як для ГОСТ 5542-87 є лише одна загальна група природних газів. Якщо згідно ГОСТ 5542-87 природні гази вважаються сумісними, то EN 437 буде проводити більш детальну градацію та заперечувати сумісність всього цього газового спектра. Отже, EN437 являє інший підхід з врахуванням властивостей газових сумішей, має більш жорсткі вимоги щодо енергоефективності, екологічної чистоти, безпеки роботи газоспалювального обладнання.

Приведемо графічне представлення розташування ділянок.

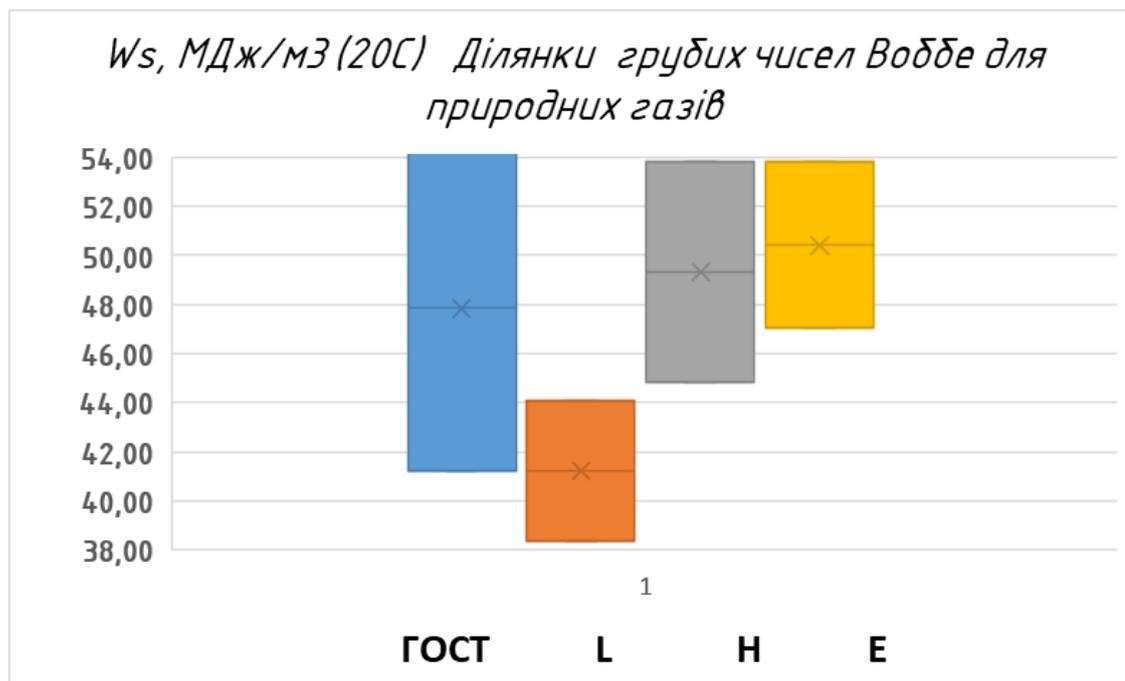


Рисунок 4.1 – Ділянки груби чисел Воббе для природних газів, порівняння ГОСТ з EN437.

Надалі оцінено наслідки ситуації, коли той чи інший газ підпадає на ділянку між групами L та H з невизначеністю щодо приналежності.

Слід зробити зауваження щодо помилкового розрахунку чисел Воббе в стандарті EN для газу G231, що вплинуло і на межі визначення чисел Воббе групи.

Проведемо класифікацію природних газів згідно з групами, для цього виконаємо розрахунок чисел Воббе для газів дослідження. Результати представимо у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 - Класифікація природних газів згідно з групами стандарту EN437 на основі чисел Воббе

Показник	Одиниця вимірювання	Родовища Битківське	Родовища Рудківське	Біометан	Родовища Радченки	Біогаз 1	Біогаз 2 (усереднений)	Біогаз 3	Генераторний газ 1	Генераторний газ 2 (усереднений)	Генераторний газ 3
		CH ₄ =91,8 C ₂ H ₆ =4,3 C ₃ H ₈ =1,74 C ₄ H ₁₀ =0,64 C ₅ H ₁₂ =0,29 N ₂ =1,1 CO ₂ =0,2	CH ₄ =95,45 C ₂ H ₆ =0,6 C ₃ H ₈ =0,48 C ₄ H ₁₀ =0,3 C ₅ H ₁₂ =0,17 N ₂ =2,9 CO ₂ =0,1	CH ₄ =98 N ₂ =0,5 CO ₂ =1,5	CH ₄ =86,3 C ₂ H ₆ =0,2 C ₃ H ₈ =0,15 C ₄ H ₁₀ =0,05 N ₂ =13,16 CO ₂ =0,17	CH ₄ =70 H ₂ =3 N ₂ =1 CO ₂ =26	CH ₄ =57,5 H ₂ =1,5 N ₂ =3 CO ₂ =38	CH ₄ =45 N ₂ =5 CO ₂ =50	CH ₄ =3 H ₂ =25 CO=25 N ₂ =37 CO ₂ =10	CH ₄ =2 H ₂ =17,5 CO=22,5 N ₂ =43,5 CO ₂ =14,5	CH ₄ =1 H ₂ =10 CO=20 N ₂ =50 CO ₂ =19
d		0,615	0,583	0,571	0,614	0,797	0,930	1,062	0,787	0,883	0,980
Hi, 15 C	МДж/м ³	36,54	33,86	33,33	29,66	24,12	19,71	15,31	6,57	5,17	3,76
Hs, 15 C	МДж/м ³	40,44	37,54	36,99	32,91	26,79	21,89	16,99	7,15	5,57	3,98
Wi, 15 C	МДж/м ³	46,61	44,35	44,11	37,86	27,01	20,44	14,85	7,41	5,50	3,80
Ws, 15 C	МДж/м ³	51,58	49,18	48,95	42,01	30,00	22,70	16,48	8,06	5,92	4,02
Hi, 20 C	МДж/м ³	35,92	33,28	32,76	29,15	23,70	19,37	15,04	6,46	5,08	3,70
Ws, 20 C	МДж/м ³	50,70	48,34	48,11	41,29	29,48	22,31	16,20	7,92	5,82	3,95
Wi, (0 C)	МДж/м ³	49,17	46,78	46,53	39,94	28,49	21,56	15,66	7,82	5,80	4,01
Family (Wi)		Second	Second	Second	Second	F3/2	First	F1/2	F1/2	F1/2	F1/2
Group		H or E	H or E	H or E	L		A				

Всі обрані гази дослідження об'єктів комунально-побутової теплоенергетики розподілені між трьома групами другого сімейства. Три природних гази згідно з величиною числа Воббе можуть бути віднесені до двох груп одночасно. Тому такі випадки вимагають додаткових досліджень властивостей для визначення приналежності групі. Але попередньо можна припустити, що природні гази відповідають саме групі Н. Таке припущення ґрунтується на особливостях складу граничних газів групи Е, яким притаманна повна відсутність баластних домішок, тоді коли природним газам характерна варіація цих домішок і випробування приладу на граничному газі з баластними домішками, та випробування приладу групи Е на явище відриву полум'я на штучному газі з водородом, тоді коли в природних газах дослідження водород відсутній взагалі. Але це припущення необхідно перевірити при проведенні класифікації газів згідно з індексами взаємозаміни.

Гази сфери промислової теплоенергетики мають труднощі при класифікації. Тільки біогаз 2 усередненого складу згідно з числом Воббе може належати до

першого сімейства. Всі інші гази не підпадають під діапазони класифікації, а отже стандарт не передбачає універсальних приладів для їх спалювання. Також важливо зазначити, що газ родовища Радченки не може бути прийнятий до споживання згідно ГОСТ 5542-87, бо має недопустимо малу калорійність $29,15 \text{ МДж/м}^3 < 31,8 \text{ МДж/м}^3$, але стандарт EN437 таким чином виділяє групу L саме для спалювання малокалорійних природних газів зі значними баластними домішками.

Виконаємо розрахунок чисел Воббе для природних газів Полтавського регіону. Результати представимо у таблиці 4.5.

Отже, природні гази Полтавського регіону згідно з чистим числом Воббе належать до груп H або E. (Попередньо припускаємо належність саме групі H) Для подальшого вивчення актуалізуємо задачу особливостей спалювання цих газів на невідповідному обладнанні групи L (випадок невірною підбору обладнання).

Таким чином було попередньо проведено класифікацію газів дослідження в системі EN 437 на основі порівняння числа Воббе. Було виконано порівняння підходів до природних газів згідно з європейським стандарту та ГОСТ та зроблено висновок про більш жорсткі вимоги до підбору газоспалювального обладнання в стандарті EN 437, коли такий підхід передбачає покращену енергоефективність роботи обладнання, безпеку роботи та екологічні показники.

Таблиця 4.5 - Класифікація природних газів Полтавського регіону згідно з групами стандарту EN437 на основі чисел Воббе

Показник	Одиниця вимірювання	УКПГ Розпашівка	ВРГ Котельвської УСП	ВРГ Копилівської ТДПУ Ду150	АГРС Тимофіївської УКПГ	АГРС Гадяч	ВРГ Михайлівської УКПГ	ПВВГ УКПГ Машівка	УКПГ Березівка на Солоху	УКПГ Опішня на Дельбао	ВРГ Яблунівської УКПГ (ВРГ)	ВРГ Комішнянської УКПГ (ВРГ Полівка)
		CH ₄ =93,26 C ₂ H ₆ =3,36 C ₃ H ₈ =0,77 C ₄ H ₁₀ =0,43 C ₅ H ₁₂ =0,42 N ₂ =1,59 CO ₂ =0,18	CH ₄ =86,4 C ₂ H ₆ =5,91 C ₃ H ₈ =2,39 C ₄ H ₁₀ =0,95 C ₅ H ₁₂ =0,52 N ₂ =1,13 CO ₂ =2,7	CH ₄ =90,58 C ₂ H ₆ =3,78 C ₃ H ₈ =1,21 C ₄ H ₁₀ =0,48 C ₅ H ₁₂ =0,46 N ₂ =3,33 CO ₂ =0,17	CH ₄ =85,19 C ₂ H ₆ =7,85 C ₃ H ₈ =0,8 C ₄ H ₁₀ =0,08 C ₅ H ₁₂ =1,22 N ₂ =3,32 CO ₂ =1,53	CH ₄ =87,18 C ₂ H ₆ =6,37 C ₃ H ₈ =0,82 C ₄ H ₁₀ =0,1 1 C ₅ H ₁₂ =0,01 C ₅ H ₁₂ =0,6 6 N ₂ =3,46 CO ₂ =1,44	CH ₄ =97,03 C ₂ H ₆ =0,26 C ₃ H ₈ =0,02 C ₄ H ₁₀ =0,01 C ₅ H ₁₂ =0,01 N ₂ =2,51 CO ₂ =0,16	CH ₄ =89,6 C ₂ H ₆ =3,85 C ₃ H ₈ =1,07 C ₄ H ₁₀ =0,39 C ₅ H ₁₂ =0,3 N ₂ =4,5 CO ₂ =0,29	CH ₄ =89,43 C ₂ H ₆ =4,28 C ₃ H ₈ =1,43 C ₄ H ₁₀ =0,52 C ₅ H ₁₂ =0,23 N ₂ =0,7 CO ₂ =3,42	CH ₄ =91,29 C ₂ H ₆ =3,02 C ₃ H ₈ =0,87 C ₄ H ₁₀ =0,32 C ₅ H ₁₂ =0,36 N ₂ =0,52 CO ₂ =3,61	CH ₄ =84,41 C ₂ H ₆ =6,07 C ₃ H ₈ =2,23 C ₄ H ₁₀ =0,79 C ₅ H ₁₂ =0,47 N ₂ =1,04 CO ₂ =5	CH ₄ =92,75 C ₂ H ₆ =1,84 C ₃ H ₈ =0,21 C ₄ H ₁₀ =0,07 C ₅ H ₁₂ =0,04 N ₂ =0,21 CO ₂ =4,88
d		0,601	0,663	0,617	0,655	0,636	0,568	0,617	0,638	0,627	0,681	0,616
Hi, 15 C	МДж/м ³	35,57	36,98	35,43	36,39	35,36	33,20	34,68	35,24	34,57	36,00	33,00
Hs, 15 C	МДж/м ³	39,39	40,88	39,22	40,23	39,13	36,84	38,40	39,01	38,29	39,80	36,60
Wi, 15 C	МДж/м ³	45,86	45,43	45,11	44,96	44,32	44,05	44,14	44,11	43,65	43,64	42,05
Ws, 15 C	МДж/м ³	50,79	50,22	49,94	49,71	49,04	48,88	48,87	48,82	48,35	48,25	46,63
Hi, 20 C	МДж/м ³	34,96	36,35	34,82	35,77	34,76	32,63	34,09	34,64	33,98	35,39	32,44
Ws, 20 C	МДж/м ³	49,92	49,36	49,09	48,86	48,21	48,04	48,04	47,99	47,53	47,42	45,83
Wi, (0 C)	МДж/нм ³	48,38	47,93	47,59	47,43	46,76	46,46	46,56	46,53	46,05	46,04	44,36
Family (Wi)		Second	Second	Second	Second	Second	Second	Second	Second	Second	Second	Second
Group		H or E	H or E	H or E	H or E	H or E	H or E	H or E	H or E	H or E	H or E	H

Далі перейдемо до розгляду питання взаємозаміни паливних газів на основі конкретних критеріїв.

4.3 Оцінка взаємозаміни газів на основі простого числа Воббе

Головний та найпоширеніший критерій взаємозаміни газів - енергетичний критерій на основі аналізу відхилення числа Воббе. Перевіримо чи попадає діапазон чисел Воббе в діапазон критерія: $\pm 5\%$.

Розглянемо вибірку чистих чисел Воббе стандартних умов - W_i , МДж/нм³.

Природні гази Полтавського регіону:

Діапазон: 44,36 - 48,38 МДж/нм³, $|D\%_{гр}| = 4,34\%$.

Отже, згідно з критерієм енергетичної сумісності обрані гази можна вважати взаємозамінними.

Природні гази родовищ України:

діапазон: 39,94 - 49,17 МДж/нм³, $|D\%_{гр}| = 10,36\%$.

Отже, природні гази вибірки не є взаємозамінними з погляду на енергетичний критерій. Використання можливе лише при застосуванні технічних засобів щодо зміни тиску або діаметру сопел.

Біогази: діапазон: 15,66 - 28,49 МДж/нм³, $|D\%_{гр}| = 29,04\%$.

Отже, біогази вибірки не є взаємозамінними з погляду енергетичного критерію. Можливість використання зі сталою тепловою потужністю можлива лише із додатковими технічними засобами щодо вирівнюванням розширених чисел Воббе. Тим паче біогази не можуть вважатися можливими для заміни природних газів.

Генераторні гази:

Діапазон: 4,01 - 7,82 МДж/нм³, $|D\%_{гр}| = 32,24\%$.

Взаємозамінність в рамках групи можлива лише із реалізацією технічних засобів із вирівнюванням розширених чисел Воббе. Тим паче генераторний газ не може вважатися заміником як для біогазів, так і для газів природних.

Розглянемо гази стандарту EN 437.

Гази групи Н.

Діапазон: 43,38 - 52,34 МДж/нм³, $|D\%_{гр}| = 9,36\%$.

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Гази групи E.

Діапазон: 45,24 - 52,34 МДж/нм³, $|D\%_{гр}| = 7,27\%$.

Гази групи L.

Діапазон: 37,10 - 42,76 МДж/нм³, $|D\%_{гр}| = 7,08\%$.

Гази групи A.

Діапазон: 20,56 - 22,96 МДж/нм³, $|D\%_{гр}| = 5,51\%$.

Отже, стандарт EN437 передбачає взаємозаміну газів згідно з якістю й безпеки спалювання палива, але при цьому не забезпечується сталість теплової потужності. Тобто стандарт передбачає необхідність застосування технічних засобів щодо зміни тиску перед пальником для забезпечення сталої теплової потужності при спалюванні газів групи з рівністю розширених чисел Воббе. Таблиця 6 та 7 стандарту вказує на необхідні діапазони підтримки тисків газових приладів. Отже, прилади повинні гарантовано підтримувати роботу в межах заданих тисків, а отже це дозволяє отримати необхідні розширені числа Воббе і забезпечити сталу теплову потужність устаткування для газів групи.

4.4 Оцінка взаємозаміни газів на основі розширеного числа Воббе

Розглянемо питання забезпечення сталої теплової потужності устаткування для газів дослідження за допомогою технічних засобів з вирівнюванням розширеного числа Воббе при використанні газоспалювального обладнання ISO. Якщо природні гази України представлені газами груп H та L, то виникає питання особливостей їх спалювання на одному і тому ж обладнанні однієї групи.

Розглянемо варіант забезпечення сталої теплової потужності при спалюванні вибірки природних газів України на приладі групи H.

Розрахуємо та проаналізуємо наступні показники. Число Воббе (чисте, норм умови), $W_i 0 \text{ } ^\circ\text{C}$. Число Воббе (чисте, газ приладу), $W_i 0 \text{ } ^\circ\text{C}$. Критерій Воббе - результат порівняння чистого числа Воббе газу для нормальних умов з числом Воббе приладу (Reference gas). Розширене число Воббе газу при тиску в газотранспортній системі на рівні 1.27 кПа. Відповідно розширене число Воббе газу приладу при тиску в газотранспортній системі на рівні 1.27 кПа . Необхідний тиск перед пальником для забезпечення вирівнювання чисел. Необхідний діаметр

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

отвору (відносні одиниці) пальником для забезпечення вирівнювання чисел. Результати розрахунків представимо в таблиці 4.6.

Отже, природні газу групи Н не вимагають ніяких додаткових засобів при спалюванні для забезпечення сталої теплової потужності, бо прості числа Воббе знаходяться в межах $\pm 5\%$ від числа газу приладу. Але спалювання газу групи L - родовище Радченки буде вимагати збільшення тиску (вище ніж є в газотранспортній системі), або збільшенням діаметра газових отворів пальника в 1,10 раз.

Таблиця 4.6 - Дослідження критерію сталої теплової потужності, вибірка природних газів України, прилад групи Н.

Назва характеристик газу і критерія взаємозамінності	Розмірність	Родовище Битківське	Родовище Рудківське	Біометан	Родовище Радченки
Склад газу	% об	CH ₄ =91,8 C ₂ H ₆ =4,3 C ₃ H ₈ =1,74 C ₄ H ₁₀ =0,64 C ₅ H ₁₂ =0,29 N ₂ =1,1 CO ₂ =0,2	CH ₄ =95,45 C ₂ H ₆ =0,6 C ₃ H ₈ =0,48 C ₄ H ₁₀ =0,3 C ₅ H ₁₂ =0,17 N ₂ =2,9 CO ₂ =0,1	CH ₄ =98 N ₂ =0,5 CO ₂ =1,5	CH ₄ =86,3 C ₂ H ₆ =0,2 C ₃ H ₈ =0,15 C ₄ H ₁₀ =0,05 N ₂ =13,16 CO ₂ =0,17
Число Воббе (чисте, норм умови), Wi OC	МДж/нм ³	49,17	44,35	44,11	37,86
Число Воббе (чисте, газ приладу), Wi OC	МДж/нм ³	48,19	48,19	48,19	48,19
Критерій Воббе	%	2,03%	-2,91%	-3,44%	-17,12%
Число Воббе (розшир, 1.27 кПа)	МДж/нм ³	55,41	52,72	52,43	45,01
Число Воббе (розшир, 1.27 кПа, газ приладу)	МДж/нм ³	54,30	54,30	54,30	54,30
Необхідний тиск перед пальником	кПа	1,22	1,35	1,36	1,85
Необхідний діаметр отвору	в.о.	0,99	1,01	1,02	1,10

Розглянемо варіант забезпечення сталої теплової потужності при спалюванні вибірки природних газів України на приладі групи L. Результат представимо в таблиці 4.7.

4.5 Розгляд газів стандарту EN на основі критеріїв повноти згорання, відриву та проскоку полум'я

Отже, нами був проведений аналіз можливості взаємозаміни газів на основі енергетичного критерію з використанням індексу Воббе з порівняння простих та розширених чисел. Далі актуальним постає питання можливості дослідження взаємозаміни газів на основі інших критеріїв, а саме - повноти згорання палива, відриву та проскоку полум'я.

Для розв'язання цієї задачі спочатку застосуємо індекси взаємозаміни для самих граничних газів стандарту EN437. Таке застосування дозволить дати відповіді на ряд важливих питань.

1. Які зміни відбулися в критеріях взаємозаміни газів при впровадженні стандарту EN437 при умові, що розробка методів Даттона, АГА, Вівера, Дельбурга орієнтувалася на актуальні проблеми побудови пальників свого часу.

2. Які зміни приніс стандарт EN437 до деяких чинних вимог щодо взаємозаміни газів.

3. Які існують межі використання тих чи інших методик та відповідних індексів.

Виконаємо розрахунок індексів для граничних газів груп Н та Е. Результати розрахунків представимо у таблиці 4.9. Індекси згрупуємо згідно з визначеними трьома напрямками показників взаємозаміни.

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 4.9 - Індекси взаємозаміни граничних газів груп H та E

Назва характеристики газу і критерія взаємозамінності	Розмірність	G21; sooting lim, incomplete combustion - H, E	G23; flame lift - H	G222; light back - H	G24; overheating limit H, E	G20; REF GAS H, E	G21; sooting lim, incomplete combustion - H, E	G222; light back - H, E	G231; flame lift - E	G24; overheating limit H, E
		CH ₄ =87 C ₃ H ₈ =13	CH ₄ =92,5 N ₂ =7,5	CH ₄ =77 H ₂ =23	CH ₄ =68 C ₃ H ₈ =12 H ₂ =20	CH ₄ =100	CH ₄ =87 C ₃ H ₈ =13	CH ₄ =77 H ₂ =23	CH ₄ =85 H ₂ =15	CH ₄ =68 C ₃ H ₈ =12 H ₂ =20
JICF(D)		2,84	-3,10	-2,06	0,91	0,00	2,84	-2,06	-1,34	0,91
C (A) (0,85...1,15)		1,14	0,82	0,90	1,04	1,00	1,14	0,90	0,93	1,04
Jl(W) (≤0)		0,12	-0,10	-0,13	0,02	0,00	0,12	-0,13	-0,08	0,02
JSI(D)		0,68	0,61	0,35	0,57	0,50	0,68	0,35	0,40	0,57
IY(A) (>=1)		0,76	1,18	1,16	0,84	1,00	0,76	1,16	1,10	0,84
JY(W) (≤0)		0,32	-0,10	-0,07	0,24	0,00	0,32	-0,07	-0,05	0,24
Ij(De)		180,5	120,9	115,7	165,2	134,3	180,5	115,7	122,5	165,2
JLI(D)		0,50	1,26	0,05	0,14	0,75	0,50	0,05	0,20	0,14
IL(A) (<=1)		0,94	1,13	0,87	0,86	1,00	0,94	0,87	0,92	0,86
JL(W) >=1 (0,95...1,05)		1,11	0,86	1,42	1,44	1,00	1,11	1,42	1,27	1,44
IF(A) (<=1,18)		1,03	1,02	1,19	1,15	1,01	1,03	1,19	1,12	1,15
IF*(A) (<=1)		0,93	1,05	1,29	1,12	1,00	0,93	1,29	1,17	1,12
JF(W) (≤0)		-0,08	0,10	0,64	0,39	0,00	-0,08	0,64	0,40	0,39
H ₅	BTU/SCF	1043	799	725	908	864	1043	725	773	908

Виконаємо аналіз результатів. Критерії взаємозаміни вказали на характерні явища щодо характеристик граничних газів. При цьому встановлені межі критеріїв в більшості вказують на невзаємозамінність граничних газів з газом приладу. Прикладами підтвердження взаємозаміни являється метод AGA для явища неповного згорання газу G21 на рівні 1,14, а також всі методики щодо взаємозамінності граничного газу G231. Момент невзаємозамінності граничних газів з газом приладу свідчать про вимогу стандарту EN437 щодо розробки приладів з можливістю застосування ширшого спектра газів, ніж було встановлено під час розробки методів для відповідних тоді приладів.

Наприклад, якщо метод Даттона встановлює допустиму екстремальну величину індексу неповного згорання JCF(D) на рівні 1,48, то ISO вимагає від розробників приладів використання такого газу, для якого допустима величина індексу згідно з методикою Даттона буде тепер на рівні 2,84. Гранична величина індексу сажоутворення JS(D) збільшується зі значення 0,6 до 0,68. Гранична величина індексу відриву полум'я JL(D) збільшується із значення 1,16 до 1,26. Метод Дельбурга встановлює умову для величини числа жовтих кінчиків Ij(De) < 170. Але для граничного газу G21 це число складає 180,5, тобто в системі EN437

										Арк.
										80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

601-НТ-11393643-МР

гранична величина збільшилася, стандарт змінив вимогу: $I_j(De)_{EN} < 180,5$ і розширив спектр використання газів. Тобто для оцінки взаємозамінності в приладах ISO необхідно змінити встановлені межі відхилення величин індексів. Але можна також побачити, що граничні гази G23 та G231 двох груп H та E мають різні межі цих відхилень, що робить підхід корекції - проблематичним. Тому запропонуємо інший підхід, коли той чи інший газ дослідження для проведення класифікації в стандарті EN будемо надалі порівнювати не з базовим газом приладу, а саме з граничними газами. Індеси своєю чергою вкажуть на положення газу дослідження відносно граничного газу. Умовою приналежності газу до групи й можливості якісного спалювання газу на приладі групи буде підтвердження всіх індексів відносно граничних газів. Винятком такої методології будуть методи Даттона та Дельбурга, які не мають можливості зміни напрямку в порівнянні газів. Так, метод Даттона завжди порівнює всі гази з метаном і для цього методу необхідно застосовувати визначення меж величини індексів. Аналогічно і метод Дельбурга, орієнтований на визначенні критичного значення чисел жовтих кінчиків або сажі для деякого еталона кожного сімейства. Виконаємо аналогічний розрахунок індексів для газів групи L. Результати представимо у таблиці 4.10.

Величина індекса неповного згорання Даттона $JCF(D)$ знаходиться взагалі не в межах смислового змісту. Метод може бути використаний лише опосередковано, бо базовий газ для групи це G25, тоді коли Даттон веде порівняння з метаном. Метод Дельбурга встановлює умову для величини числа жовтих кінчиків приладу: $I_j(De)_{EN} < 137,9$.

Виконаємо розрахунок індексів для газів групи A. Результат представимо у таблиці 4.11. Таблицю представимо в двох варіантах. Ліворуч - порівняння граничного газу G 112 з граничним газом G110. Праворуч - порівняння газу G 110 з граничним газом G 112 згідно з критерієм проскоку.

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						81
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 4.10 Індеси взаємозаміни граничних газів групи L

Назва характеристики газу і критерія взаємозамінності	Розмірність	G25; REF GAS L; light back - L	G26; sooting lim, incomplete combustion - L	G27; flame lift - L
		CH ₄ =86 N ₂ =14	CH ₄ =80 C ₃ H ₈ =7 H ₂ =13	CH ₄ =82 N ₂ =18
JICF(D)		-5,64	-3,39	-7,13
C (A) (0,85...1,15)		1,00	1,15	0,89
Jl(W) (≤ 0)		0,00	0,11	-0,06
JSI(D)		0,69	0,76	0,74
IY(A) (≥ 1)		1,00	0,80	1,10
JY(W) (≤ 0)		0,00	0,21	-0,06
Ij(De)		109,9	137,9	103,4
JLI(D)		2,00	1,39	2,61
IL(A) (≤ 1)		1,00	0,93	1,06
JL(W) ≥ 1 (0,95...1,05)		1,00	1,12	0,91
IF(A) (≤ 1,18)		0,93	0,94	0,94
IF*(A) (≤ 1)		1,00	0,94	1,04
JF(W) (≤ 0)		0,00	-0,08	0,05
Hs	BTU/SCF	743	848	708

Таблиця 4.11 Індеси взаємозаміни граничних газів групи A

Назва характеристики газу і критерія взаємозамінності	Розмірність	G110; REF GAS A; sooting lim, flame	G112; light back - A	Назва характеристики газу і критерія взаємозамінності	Розмірність	G110; REF GAS A; sooting lim, flame lift, incomplete	G112; light back - A
Порівняння з газом приладу		CH ₄ =26 H ₂ =50 N ₂ =24	CH ₄ =17 H ₂ =59 N ₂ =24	Порівняння з газом G112		CH ₄ =26 H ₂ =50 N ₂ =24	CH ₄ =17 H ₂ =59 N ₂ =24
JICF(D)		-16,69	-18,31	JICF(D)		-16,69	-18,31
C (A) (0,85...1,15)		1,00	0,79	C(A) ≤ 1		1,00	0,79
Jl(W) (≤ 0)		0,00	-0,27	Jl(W) ≤ 0		0,10	-0,13
JSI(D)		0,59	0,54	JSI(D)		0,59	0,54
IY(A) (≥ 1)		1,00	1,54	IY(A) ≥ 1		1,00	1,54
JY(W) (≤ 0)		0,00	-0,13	JY(W) ≤ 0		0,00	-0,13
Ij(De)		60,8	44,6	Ij(De)		60,8	44,6
JLI(D)		0,93	0,72	JLI(D)		0,93	0,72
IL(A) (≤ 1)		1,00	1,01	IL(A) ≤ 1		1,00	1,01
JL(W) ≥ 1 (0,95...1,05)		1,00	1,06	JL(W) ≥ 1 (0,95...1,05)		0,82	0,87
IF(A) (≤ 1,18)		0,65	0,74	IF(A) < IF(A) rp		0,53	0,60
IF*(A) (≤ 1)		1,00	1,22	IF*(A) ≤ 1		0,82	1,00
JF(W) (≤ 0)		0,00	0,39	JF(W) ≤ 0		-0,18	0,18
Hs	BTU/SCF	354	300	Hs	BTU/SCF	354	300

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------

601-HT-11393643-MP

Арк.

82

Порівняння G 112 з газом приладу G110 вказує на взаємозаміну згідно з критерієм неповноти згорання та відриву (G 112 - являється граничним згідно з цими явищами). Індокси вказують на наявність проскоку, що і є характеристикою газу G 112. Треба зауважити, що індекс $IF(A)=0,74$ з умовою порівняння з величиною 1,18 втрачає працездатність. Це вірогідно і вв'язано зі значенням H_s , що набагато менше граничної величини роботи методу - 800 BTU/SCF. Тому цей індекс не буде нами використовуватися в розрахунках для низькокалорійних газів, замість нього будемо використовувати відносний індекс $IF^*(A)$, що підтверджує свою працездатність на низькому рівні калорійності газів. Також визначимо згідно з розрахунком межі для величини числа жовтих кінчиків приладу метода Дельбурга: $I_j(De)_{EN} < 60,8$. Отримані величини граничних значень індексів Даттона та Дельбурга для граничних газів груп H, E, L та A представимо у таблиці 4.12.

Таблиця 4.12 - Граничні величини індексів Даттона та Дельбурга

	JICF(D)гр	JSI(D)гр	JLI(D)гр	Ij(De)гр
Група H	2,840	0,680	1,265	180,459
Група E	2,840	0,680	0,201	180,459
Група L	-3,398	0,753	2,610	137,899
Група A	-16,695	0,589	0,923	60,825

Таким чином нами був виконаний розрахунок індексів взаємозаміни для газів стандарту EN437. Було виявлено, що граничні гази груп стандарту EN 437 вносять корекції щодо визначення допустимих меж величин індексів взаємозаміни для приладів ISO. Був зроблений висновок щодо недоцільності корекції всіх меж з огляду на їх залежність від груп та складу самих газів. Було запропоновано розв'язувати питання приналежності газу дослідження до групи приладів методом порівняння з граничними газами цієї групи. Така методологія може запропонувати універсальний метод класифікації газів.

Було відмочено, що методи Даттона та Дельбурга працюють тільки в напрямку порівняння газів відносно заданому еталону. Тоді коли інші методи дозволяють виконувати порівняння газів при вільному виборі напрямку. При цьому метод Даттона є доцільним у використанні тільки для газів групи H, коли для інших випадків він може нести корисну інформацію лише опосередкованого змісту. Були розраховані граничні значення чисел Делбурга для різних груп з врахуванням вже

вимог стандарту EN437 до випробування та функціонування приладів. Також було встановлено обмеження щодо використання індексу методу AGA IF(A) для газів низької калорійності.

4.6 Оцінка взаємозамінності газів дослідження на основі критеріїв повноти згорання, відриву та проскоку полум'я.

Застосуємо метод порівняння газів дослідження з граничними газами та порівняння індексів Даттона та Дельбурга з граничними значеннями. Розв'яжемо питання щодо приналежності групі природних газів України. Порівняємо газу різних родовищ з граничними газами груп H, E та L. Результати представимо у вигляді таблиць 4.13.

Згідно з результатом порівняння газ родовища Битківське, як представник газів України та в підтвердження попередній класифікації належить групі H. Прилад групи E не відповідає згідно з критерієм відриву полум'я. Газ родовища Радченки являє повну сумісність з приладом групи L. Аналіз порівняння з приладом групи H вказує на зменшення теплової потужності обладнання, погіршення загальної якості спалювання внаслідок надмірної кількості повітря, набуття явища відриву полум'я.

Біогаз усередненого складу при належності до групи A згідно з числом Воббе все-таки являє несумісність згідно з критерієм відриву. Критерій неповного згорання та сажоутворення вірогідно вказує також на несумісність. Вірогідність результату обумовлена знаходженням значень на межі визначення. Позитивний результат визначення індексу C(A) може бути не врахований з причини низької калорійності газу за межами правдивості методу, коли методика не розроблялася для газів такого класу. Приклад біогазу цікавий тим, що являє приклад збігу чисел Воббе внаслідок багатокомпонентного складу, в той час, коли головні компоненти складу газу – різні й мають відповідно різні фізико-хімічні показники горіння. Для базового газу групи A - це водень, а для біогазу - це метан.

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						84
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 4.13 - Порівняння газу родовища Битківське з граничними газами групи Н.

Назва, число Воббе та склад газу пред-ставника групи	Назва граничного газу, властивості	Склад граничного газу	Критерій	Величина індекса		Аналіз	
				визначена величина	контрольний параметр		
Група Н. Діапазон числа Воббе (Wi, 15 °C), МДж/м3				41,12 ... 49,61		Число Воббе належить діапазону	
Родовища Битківське	Показники взаємозаміни згідно теплопродуктивності та загальної якості горіння						
	G20; REF GAS H,E	CH ₄ =100	Теплова потужність установки	Індекс Вівера JH(W)	1,020	0,95...1,05	Підтвердження показника
			Забезпечення повітрям	Індекс Вівера JA(W)	1,016	0,95...1,05	
	Показники взаємозаміни згідно явища неповноти згорання						
	G20	CH ₄ =100	Неповнота згорання	Індекс Даттона JCF(D)	0,695	<2,84(EN)	Підтвердження показника, сумісність з приладами групи
	G21; sooting lim, incomplete combustion	CH ₄ =87; C ₃ H ₈ =13		Індекс неповного згорання C(A)	0,905	≤ 1	
				Індекс Вівера JI(W)	-0,082	≤ 0	
	G20	CH ₄ =100	Жовті проблиски полум'я (сажеутворення)	Індекс Даттона JSI(D)	0,598	<0,68(EN)	
	G21; sooting lim, incomplete combustion	CH ₄ =87; C ₃ H ₈ =13		Індекс сажеутворення IY(A)	1,203	≥ 1	
				Індекс Вівера JY(W)	-0,202	≤ 0	
				Індекс Дельбурга Ij(De)	152	<180,5(EN)	
	Показники взаємозаміни згідно явища відриву полум'я						
	G20	CH ₄ =100	Відрив полум'я	Індекс Даттона JLI(D)	0,683	<1,26(EN)	Підтвердження показника
	G23; flame lift	CH ₄ =92,5; N ₂ =7,5		Індекс відриву IL(A)	0,889	≤ 1	
				Індекс Вівера JL(W)	1,186	≥ 1	
Показники взаємозаміни згідно явища проскоку полум'я							
G222; light back	CH ₄ =77; H ₂ =23	Проскок полум'я	Індекс проскоку IF*(A)	0,756	≤ 1	Підтвердження показника	
			Індекс Вівера JF(W)	-0,484	≤ 0		

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

601-НТ-11393643-МР

Арк.

85

Таблиця 4.14 - Порівняння газу родовища Битківське з граничними газами групи Е.

Назва, число Воббе та склад газу представника групи	Назва граничного газу, властивості	Склад граничного газу	Критерій	Величина індекса		Аналіз	
				визначена величина	контрольний параметр		
Група Е. Діапазон числа Воббе (Wi, 15 °C), МДж/м3				42,89 ... 49,61		Число Воббе належить діапазону	
Показники взаємозаміни згідно теплопродуктивності та загальної якості горіння							
Родовища Битківське	G20; REF GAS H,E	CH ₄ =100	Теплова потужність установки	Індекс Вівера JH(W)	1,020	0,95...1,05	Потреба зміни тиску або діаметру отвору пальника
			Забезпечення повітрям	Індекс Вівера JA(W)	1,016	0,95...1,05	
Показники взаємозаміни згідно явища неповноти згорання							
Wi, (15 °C), МДж/м3 = 46,61 CH ₄ =91,8 C ₂ H ₆ =4,3 C ₃ H ₈ =1,74 C ₄ H ₁₀ =0,64 C ₅ H ₁₂ =0,29 N ₂ =1,1 CO ₂ =0,2	G20	CH ₄ =100	Неповнота згорання	Індекс Даттона JCF(D)	0,695	<2,84(EN)	Підтвердження показника, сумісність з приладами групи
	G21; sooting lim, incomplete combustion	CH ₄ =87; C ₃ H ₈ =13		Індекс неповного згорання C(A)	0,905	≤ 1	
				Індекс Вівера JI(W)	-0,082	≤ 0	
	G20	CH ₄ =100	Жовті пробіски полум'я (сажеутворення)	Індекс Даттона JSI(D)	0,598	<0,68(EN)	
	G21; sooting lim, incomplete combustion	CH ₄ =87; C ₃ H ₈ =13		Індекс сажеутворення IY(A)	1,203	≥ 1	
				Індекс Вівера JY(W)	-0,202	≤ 0	
			Індекс Дельбурга Ij(De)	152	<180,5(EN)		
Показники взаємозаміни згідно явища відриву полум'я							
G20	CH ₄ =100	Відрив полум'я	Індекс Даттона JLI(D)	0,683	<0,2(EN)	Показник НЕ підтверджено, газ не сумісний з приладами групи	
G231; flame lift	CH ₄ =85; H ₂ =15		Індекс відриву IL(A)	1,090	≤ 1		
			Індекс Вівера JL(W)	0,806	≥ 1		
Показники взаємозаміни згідно явища проскоку							
G222; light back	CH ₄ =77; H ₂ =23	Проскок полум'я	Індекс проскоку IF*(A)	0,756	≤ 1	Підтвердження показника	
			Індекс Вівера JF(W)	-0,484	≤ 0		

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

601-НТ-11393643-МР

Арк.

86

Таблиця 4.16 - Порівняння газу родовища Радченки з граничними газами групи Н

Назва, число Воббе та склад газу пред-ставника групи	Назва граничного газу, властивості	Склад граничного газу	Критерії	Величина індекса		Аналіз	
				визначена величина	контрольний параметр		
Група Н. Діапазон числа Воббе (Wi, 15 °C), МДж/м3				41,12 ... 49,61			
Родовище Радченки Wi, (15 °C), МДж/м3 = 37,86 CH4=86,3 C2H6=0,2 C3H8=0,15 C4H10=0,05 N2=13,16 CO2=0,17	Показники взаємозаміни згідно теплопродуктивності та якості горіння						
	G20; REF GAS H,E	CH4=100	Теплова потужність установки	Індекс Вівера JH(W)	0,829	0,95...1,05	Газ не сумісний, потреба зміни тиску або діаметру отвору пальника
			Забезпечення повітрям	Індекс Вівера JA(W)	0,829	0,95...1,05	
	Показники взаємозаміни згідно явища неповноти згорання						
	G20	CH4=100	Неповнота згорання	Індекс Даттона JCF(D)	-5,310	<2,84(EN)	Підтвердження показника, сумісність з приладами групи
	G21; sooting lim, incomplete combustion	CH4=87; C3H8=13		Індекс неповного згорання C(A)	0,635	≤ 1	
				Індекс Вівера JI(W)	-0,275	≤ 0	
	G20	CH4=100	Жовті пробіски полум'я (сажеутворення)	Індекс Даттона JSI(D)	0,689	<0,68(EN)	
	G21; sooting lim, incomplete combustion	CH4=87; C3H8=13		Індекс сажеутворення IY(A)	1,743	≥ 1	
				Індекс Вівера JY(W)	-0,470	≤ 0	
				Індекс Дельбурга Ij(De)	112	<180,5(EN)	
	Показники взаємозаміни згідно явища відриву полум'я						
	G20	CH4=100	Відрив полум'я	Індекс Даттона JLI(D)	1,886	<1,26(EN)	Показник НЕ підтверджено, газ не сумісний з приладами групи
	G23; flame lift	CH4=92,5; N2=7,5		Індекс відриву IL(A)	1,340	≤ 1	
				Індекс Вівера JL(W)	0,603	≥ 1	
Показники взаємозаміни згідно явища проскоку полум'я							
G222; light back	CH4=77; H2=23	Проскок полум'я	Індекс проскоку IF*(A)	0,857	≤ 1	Підтвердження показника, сумісність з приладами групи	
			Індекс Вівера JF(W)	-0,254	≤ 0		

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

601-НТ-11393643-МР

Арк.

88

Таблиця 4.17 - Порівняння біогазу з граничними газами групи А

Назва, число Воббе та склад газу представника групи	Назва граничного газу, властивості	Склад граничного газу	Критерії	Величина індекса		Аналіз	
				визначена величина	контрольний параметр		
Група А. Діапазон числа Воббе (Wi, 15 °C), МДж/м ³				19,49 ... 21,77			
Біогаз 2 (усереднений склад) Wi (15 °C), МДж/м ³ = 20,44 CH ₄ =57,5 H ₂ =1,5 N ₂ =3; CO ₂ =38	Показники взаємозаміни згідно теплопродуктивності та загальної якості горіння						
	G110; REF GAS A	CH ₄ =26; H ₂ =50; N ₂ =24	Теплова потужність установки	Індекс Вівера JH(W)	0,939	0,95...1,05	Потреба зміни тиску або діаметру отвору пальника
			Забезпечення повітрям	Індекс Вівера JA(W)	1,000	0,95...1,05	Підтвердження показника
	Показники взаємозаміни згідно явища неповноти згорання						
	G110; sooting lim, incomplete combustion	CH ₄ =26; H ₂ =50; N ₂ =24	Неповнота згорання	Індекс неповного згорання C(A)	0,906	≤ 1	Показник підтверджено (проблема достовірності)
				Індекс Вівера LJ(W)	0,252	≤ 0	Показник НЕ підтверджено
				Індекс сажеутворення IY(A)	0,709	≥ 1	Показник НЕ підтверджено
				Індекс Вівера JY(W)	-0,0002	≤ 0	Показник підтверджено (на межі границі)
				Індекс Дельбурга Ic(Delb)	60,5	<60,8(EN)	Показник підтверджено (на межі границі)
	Показники взаємозаміни згідно явища відриву полум'я						
	G110; flame lift	CH ₄ =26; H ₂ =50; N ₂ =24	Відрив полум'я	Індекс відриву IL(A)	1,661	≤ 1	Показник НЕ підтверджено, газ не сумісний з приладами групи
				Індекс Вівера JL(W)	0,297	≥ 1	
	Показники взаємозаміни згідно явища проскоку						
	G112; light back	CH ₄ =17; H ₂ =59; N ₂ =24	Проскок полум'я	Індекс проскоку IF*(A)	0,630	≤ 1	Підтвердження показника
				Індекс Вівера JF(W)	-0,961	≤ 0	

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

601-НТ-11393643-МР

Арк.

89

Виконаємо порівнянні всіх газів дослідження з граничними газами відповідних груп.

Таблиця 4.18 - Індекси взаємозаміни з порівняння природних газів дослідження з граничними газами групи Н

Індекс, умова приналежності групі Н	% об	Родовища Битківське	Родовище Рудківське	Біометан	Родовище Радченки
		Явище	CH ₄ =91,8 C ₂ H ₆ =4,3 C ₃ H ₈ =1,74 C ₄ H ₁₀ =0,64 C ₅ H ₁₂ =0,29 N ₂ =1,1 CO ₂ =0,2	CH ₄ =95,45 C ₂ H ₆ =0,6 C ₃ H ₈ =0,48 C ₄ H ₁₀ =0,3 C ₅ H ₁₂ =0,17 N ₂ =2,9 CO ₂ =0,1	CH ₄ =98 N ₂ =0,5 CO ₂ =1,5
LICF(D) <1,26	Неповнота згорання	0,69	-0,89	-1,07	-5,31
C(A) ≤1		0,91	0,84	0,83	0,63
LI(W) ≤ 0		-0,08	-0,14	-0,14	-0,27
JSI(D) <0,68	Саже-утворення	0,60	0,57	0,54	0,69
IY(A) ≥=1		1,20	1,35	1,38	1,74
IY(W) ≤ 0		-0,20	-0,32	-0,35	-0,47
Ij(De) <180,5		152,1	134,9	129,7	112,2
LI(D) <1,26	Відрив полум'я	0,68	0,87	0,89	1,89
IL(A) <=1		0,89	0,93	0,93	1,09
IL(W) ≥=1 (0,95...1)		1,19	1,11	1,11	0,89
IF*(A) <=1	Проскок полум'я	0,76	0,78	0,79	0,86
IF(W) ≤ 0		-0,48	-0,43	-0,42	-0,25

Таблиця 4.19 Індекси взаємозаміни з порівняння природних газів Полтавського регіону з граничними газами групи Н.

Індекс, умова приналежності групі Н	% об	УКПНГ Розпашівка	ВРГ Котельвської УСП	ВРГ Копилівської ТДШу Ду150 АГРС	Тимофіївськ ої УКПНГ	АГРС Гадяч	ВРГ Михайлівськ ої УКПНГ	ПВВГ УКПНГ Машівка	УКПНГ Березівка на Солуху	УКПНГ Опішня на Дельбао	ВРГ Яблунівської УКПНГ (ВРГ)	ВРГ Комишанськ ої УКПНГ (ВРГ)
		Явище	CH ₄ =93,26 C ₂ H ₆ =3,36 C ₃ H ₈ =0,77 C ₄ H ₁₀ =0,43 C ₅ H ₁₂ =0,42 N ₂ =1,59 CO ₂ =0,18	CH ₄ =86,4 C ₂ H ₆ =5,91 C ₃ H ₈ =2,39 C ₄ H ₁₀ =0,95 C ₅ H ₁₂ =0,52 N ₂ =1,13 CO ₂ =2,7	CH ₄ =90,58 C ₂ H ₆ =3,78 C ₃ H ₈ =1,21 C ₄ H ₁₀ =0,48 C ₅ H ₁₂ =0,46 N ₂ =3,33 CO ₂ =0,17	CH ₄ =85,19 C ₂ H ₆ =7,85 C ₃ H ₈ =0,8 C ₄ H ₁₀ =0,08 C ₅ H ₁₂ =1,22 N ₂ =3,32 CO ₂ =1,53	CH ₄ =87,18 C ₂ H ₆ =6,37 C ₃ H ₈ =0,82 C ₄ H ₁₀ =0,11 C ₅ H ₁₂ =0,66 N ₂ =3,46 CO ₂ =1,41	CH ₄ =97,03 C ₂ H ₆ =0,26 C ₃ H ₈ =0,02 C ₄ H ₁₀ =0,01 C ₅ H ₁₂ =0,01 N ₂ =2,51 CO ₂ =0,16	CH ₄ =89,6 C ₂ H ₆ =3,85 C ₃ H ₈ =1,07 C ₄ H ₁₀ =0,39 C ₅ H ₁₂ =0,3 N ₂ =4,5 CO ₂ =0,29	CH ₄ =89,43 C ₂ H ₆ =4,28 C ₃ H ₈ =1,43 C ₄ H ₁₀ =0,52 C ₅ H ₁₂ =0,23 N ₂ =0,7 CO ₂ =3,42	CH ₄ =91,29 C ₂ H ₆ =3,02 C ₃ H ₈ =0,87 C ₄ H ₁₀ =0,32 C ₅ H ₁₂ =0,36 N ₂ =0,52 CO ₂ =3,61	CH ₄ =84,41 C ₂ H ₆ =6,07 C ₃ H ₈ =2,23 C ₄ H ₁₀ =0,79 C ₅ H ₁₂ =0,47 N ₂ =1,04 CO ₂ =5
LICF(D) <1,26	Неповнота згорання	0,17	-0,06	-0,33	-0,39	-0,85	-1,11	-1,00	-1,00	-1,33	-1,28	-2,45
C(A) ≤1		0,88	0,86	0,85	0,84	0,83	0,83	0,82	0,82	0,81	0,80	0,76
LI(W) ≤ 0		-0,10	-0,09	-0,11	-0,11	-0,12	-0,15	-0,13	-0,12	-0,13	-0,12	-0,17
JSI(D) <0,68	Саже-утворення	0,58	0,67	0,62	0,67	0,65	0,54	0,63	0,65	0,63	0,71	0,62
IY(A) ≥=1		1,27	1,23	1,29	1,33	1,34	1,38	1,33	1,30	1,36	1,30	1,44
IY(W) ≤ 0		-0,24	-0,18	-0,25	-0,20	-0,25	-0,35	-0,27	-0,26	-0,30	-0,23	-0,37
Ij(De) <180,5		145,8	154,4	145,8	151,7	145,1	130,0	141,3	142,7	138,2	147,8	127,2
LI(D) <1,26	Відрив полум'я	0,74	0,78	0,81	0,83	0,88	0,90	0,90	0,91	0,95	0,96	1,14
IL(A) <=1		0,91	0,93	0,93	0,97	0,96	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,99
IL(W) ≥=1 (0,95...1)		1,15	1,03	1,01	0,98	0,98	0,99	0,99	1,00	0,97	0,97	0,94
IF*(A) <=1	Проскок полум'я	0,76	0,75	0,76	0,74	0,76	0,79	0,78	0,78	0,78	0,77	0,80
IF(W) ≤ 0		-0,47	-0,45	-0,45	-0,45	-0,43	-0,42	-0,42	-0,41	-0,40	-0,40	-0,36

Зробимо висновки. Обрані природні гази дослідження родовищ України згідно з критеріями якості процесу спалювання належать до групи Н. Газ родовища Радченки належить до групи L і при спалюванні його на приладі Н буде набувати явище відриву полум'я. Також, на межі границі для цього газу перебуває індекс сажоутворення $ISI(D)$. Отже, газ не може бути спаленим на приладі групи L без погіршення якості спалювання. Ступінь небезпеки може бути оцінена за допомогою окремих оцінок. Найгіршим випадком при такій оцінці може бути висновок про повний відрив полум'я від пальника, а отже, його згасання полум'я. Менш критичні випадки - незначне погіршення процесу згорання.

Природні гази Полтавського регіону належать групі Н. Із всього спектру індексів лише два вказали на можливість набуття небезпечних явищ, але це можна пояснити граничними випадками значень та проявою окремих похибок самих методів, що і відмічене в літературних джерелах.

Розглянемо питання спалювання природних газів на невірному обраному для них обладнанні групи L. Результати представимо в таблиці 4.20.

Результат розрахунків свідчить, що в такій ситуації процес горіння буде проходити з тенденціями до явищ недопалу газового палива та сажоутворення.

Проаналізуємо ситуацію спалювання біогазів та генераторних газів на приладах групи Н. Результати розрахунків представимо у таблиці 4.21.

Результат розрахунку вказує на набуття явищ відриву та проскоку полум'я при спалюванні біогазів та генераторних газів на приладах групи Н. Опосередкована інформація індексу Даттона вказує на тенденцію щодо сажоутворення, хоча інші методи цього не підтверджують.

Отже, біогази та генераторні гази не можуть бути використані на газоспалювальному обладнанні групи Н. Технічне рішення щодо використання цих газів може полягати у двох напрямках:

- 1) розробка індивідуального пальника для обраного типу газів;
- 2) утворення сумішей паливних газів з природним газом з подальшим використанням на стандартному пальнику.

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						91
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 4.20 - Індекси взаємозаміни з порівняння природних газів дослідження родовищ України з граничними газами групи L

Індекс, умова приналежності групі L	% об	Родовища Битківське	Родовище Рудківське	Біометан	Родовище Радченки
		Явище	CH ₄ =91,8 C ₂ H ₆ =4,3 C ₃ H ₈ =1,74 C ₄ H ₁₀ =0,64 C ₅ H ₁₂ =0,29 N ₂ =1,1 CO ₂ =0,2	CH ₄ =95,45 C ₂ H ₆ =0,6 C ₃ H ₈ =0,48 C ₄ H ₁₀ =0,3 C ₅ H ₁₂ =0,17 N ₂ =2,9 CO ₂ =0,1	CH ₄ =98 N ₂ =0,5 CO ₂ =1,5
LICF(D) < LICF(D)гр	Неповнота згорання	0,69	-0,89	-1,08	-5,32
C(A) ≤ 1		1,31	1,20	1,19	0,89
L(W) ≤ 0		0,14	0,07	0,07	-0,09
JSI(D) < JSI(D)гр	Саже-утворення	0,60	0,57	0,53	0,68
IY(A) ≥ 1		0,84	0,95	0,97	1,22
IY(W) ≤ 0		0,12	-0,01	-0,04	-0,19
Ij(De) < Ij(De)гр		152,1	134,9	129,7	112,2
LI(D) < LI(D)гр	Відрив полум'я	0,68	0,87	0,89	1,89
IL(A) ≤ 1		0,75	0,79	0,79	0,93
IL(W) ≥ 1 (0,95...1)		1,49	1,39	1,39	1,12
IF*(A) ≤ 1	Проскок полум'я	0,88	0,90	0,91	0,99
IF(W) ≤ 0		-0,24	-0,19	-0,17	-0,01

Таблиця 4.21- Індекси взаємозаміни з порівняння біогазів та генераторних газів з граничними газами групи H

Індекс, умова приналежності групі H	% об	Біогаз 1	Біогаз 2	Біогаз 3	Генера-торний газ 1	Генера-торний газ 2	Генера-торний газ 3
		Явище	CH ₄ =70 H ₂ =3 N ₂ =1 CO ₂ =26	CH ₄ =57,5 H ₂ =1,5 N ₂ =3 CO ₂ =38	CH ₄ =45 N ₂ =5 CO ₂ =50	CH ₄ =3 H ₂ =25 CO=25 N ₂ =37 CO ₂ =10	CH ₄ =2 H ₂ =17,5 CO=22,5 N ₂ =43,5 CO ₂ =14,5
LICF(D) < LICF(D)гр	Неповнота згорання	-12,65	-16,97	-20,64	-26,62	-27,67	-28,55
C(A) ≤ 1		0,37	0,25	0,18	0,12	0,11	0,11
L(W) ≤ 0		-0,39	-0,47	-0,53	-0,68	-0,66	-0,64
JSI(D) < JSI(D)гр	Саже-утворення	0,87	0,98	1,05	0,93	1,01	1,07
IY(A) ≥ 1		2,87	4,48	7,64	168	376	1212
IY(W) ≤ 0		-0,70	-0,83	-0,94	-1,12	-1,15	-1,18
Ij(De) < Ij(De)гр		80,7	60,5	43,7	5,1	3,0	1,3
LI(D) < LI(D)гр	Відрив полум'я	4,75	5,75	6,12	6,26	6,38	6,44
IL(A) ≤ 1		1,52	1,94	2,51	4,25	5,75	8,22
IL(W) ≥ 1 (0,95...1)		0,61	0,39	0,22	0,23	0,12	0,05
IF*(A) ≤ 1	Проскок полум'я	1,06	1,27	1,63	4,52	5,52	7,39
IF(W) ≤ 0		0,09	0,21	0,29	1,21	0,95	0,72

4.7 Дослідження використання біометанів

Проведемо класифікацію біометанів згідно з групами, для цього виконаємо розрахунок чисел Воббе. Результати представимо у таблиці 4.22.

Біометани розподілені між двома групами другого сімейства: H та L. Отже, в газотранспортну систему при чинній вимозі умісту метану не менше 90%об можуть попадати гази двох різних сімейств одночасно. Біометан №3 взагалі не відповідає ні одній з груп, бо його число Воббе знаходиться на невизначеній ділянці (між групами H та L).

Таблиця 4.22 - Класифікація біометанів згідно з групами стандарту EN437 на основі чисел Воббе

Показник	Одиниця вимірювання	Біометан №1	Біометан №2	Біометан №3	Біометан №4	Біометан №5	Біометан №6	Біометан №7
		CH ₄ =98 N ₂ =0,5 CO ₂ =1,5	CH ₄ =96 N ₂ =0,6 CO ₂ =3,4	CH ₄ =94 N ₂ =0,7 CO ₂ =5,3	CH ₄ =92 N ₂ =0,8 CO ₂ =7,2	CH ₄ =90 N ₂ =0,9 CO ₂ =9,1	CH ₄ =88 N ₂ =1,0 CO ₂ =11	CH ₄ =86 N ₂ =1,1 CO ₂ =12,9
d		0,571	0,590	0,609	0,628	0,647	0,666	0,685
H _i , 15 C	МДж/м ³	33,33	32,65	31,97	31,29	30,61	29,93	29,25
H _s , 15 C	МДж/м ³	36,99	36,24	35,48	34,73	33,97	33,22	32,46
W _i , 15 C	МДж/м ³	44,11	42,51	40,97	39,49	38,06	36,68	35,35
W _s , 15 C	МДж/м ³	48,95	47,17	45,47	43,82	42,24	40,71	39,23
H _i , 20 C	МДж/м ³	32,76	32,09	31,43	30,76	30,09	29,42	28,75
W _s , 20 C	МДж/м ³	48,11	46,37	44,69	43,08	41,52	40,02	38,56
W _i , (0 C)	МДж/нм ³	46,53	44,84	43,22	41,66	40,15	38,70	37,29
Family (W _i)		Second	Second	Second	Second	Second	Second	Second
Group		H or E	H	?	L	L	L	L

Діапазон чисел Воббе: 37,29 - 46,53 МДж/нм³, |D%гр|=11,02%.

Діапазон чисел Воббе (газотранспортна система): 40,15 – 46,53 МДж/нм³ |D%гр|=7,36%. Отже, взаємозамінність в рамках групи біометанів можлива лише із реалізацією технічних засобів із вирівнюванням розширених чисел Воббе.

Виконаємо класифікацію біометанів згідно з індексами взаємозаміни.

Групі приладів H відповідають біометани складу №1 та №2. Біометани інших складів при спалюванні на приладах групи H будуть мати проблеми із якістю горіння згідно з явищем відриву полум'я. Згідно з кодексом газотранспортної

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						93
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

системи в мережу не повинні подаватися біометани з умістом метану меншим ніж 90%об. Але біометан з умістом 94% вже буде мати проблеми пов'язані з відривом полум'я від пальника при використанні на пальнику групи Н.

Таблиця 4.23 - Індеси взаємозаміни з порівняння біометанів з граничними газами групи Н

Індекс, умова приналежності групи Н	частка об'ємного газу	Біометан №1	Біометан №2	Біометан №3	Біометан №4	Біометан №5	Біометан №6	Біометан №7
		Явище	CH ₄ =98 N ₂ =0,5 CO ₂ =1,5	CH ₄ =96 N ₂ =0,6 CO ₂ =3,4	CH ₄ =94 N ₂ =0,7 CO ₂ =5,3	CH ₄ =92 N ₂ =0,8 CO ₂ =7,2	CH ₄ =90 N ₂ =0,9 CO ₂ =9,1	CH ₄ =88 N ₂ =1,0 CO ₂ =11
LICF(D) < LICF(D)гр	Неповнота згорання	-1,08	-2,18	-3,23	-4,24	-5,21	-6,14	-7,04
C(A) ≤ 1		0,83	0,78	0,73	0,68	0,64	0,60	0,56
L(W) ≤ 0		-0,14	-0,17	-0,19	-0,21	-0,24	-0,26	-0,27
JSI(D) < JSI(D)гр	Сажеутворення	0,53	0,56	0,59	0,63	0,66	0,69	0,72
IY(A) ≥ 1		1,38	1,45	1,53	1,61	1,70	1,79	1,89
IY(W) ≤ 0		-0,35	-0,38	-0,41	-0,44	-0,47	-0,50	-0,53
Ij(De) < Ij(De)гр		129,7	125,0	120,5	116,1	111,9	107,8	103,9
LI(D) < LI(D)гр	Відрив полум'я	0,89	1,07	1,29	1,54	1,84	2,18	2,56
IL(A) ≤ 1		0,93	0,97	1,01	1,06	1,10	1,14	1,19
IL(W) ≥ 1 (0,95...1)		1,00	0,95	0,91	0,86	0,82	0,78	0,74
IF*(A) ≤ 1	Проскок полум'я	0,79	0,80	0,81	0,83	0,84	0,86	0,88
IF(W) ≤ 0		-0,42	-0,37	-0,33	-0,29	-0,25	-0,21	-0,17
Число Воббе (чисте)	МДж/нм ³	46,53	44,84	43,22	41,66	40,15	38,70	37,29
Критерій Воббе	%	-3,44%	-6,94%	-10,31%	-13,55%	-16,68%	-19,69%	-22,61%

Таблиця 4.24 - Індеси взаємозаміни з порівняння біометанів з граничними газами групи L

Індекс, умова приналежності групи L	частка об'ємного газу	Біометан №1	Біометан №2	Біометан №3	Біометан №4	Біометан №5	Біометан №6	Біометан №7
		Явище	CH ₄ =98 N ₂ =0,5 CO ₂ =1,5	CH ₄ =96 N ₂ =0,6 CO ₂ =3,4	CH ₄ =94 N ₂ =0,7 CO ₂ =5,3	CH ₄ =92 N ₂ =0,8 CO ₂ =7,2	CH ₄ =90 N ₂ =0,9 CO ₂ =9,1	CH ₄ =88 N ₂ =1,0 CO ₂ =11
LICF(D) < LICF(D)гр	Неповнота згорання	-1,08	-2,18	-3,23	-4,24	-5,21	-6,14	-7,04
C(A) ≤ 1		1,19	1,11	1,03	0,96	0,90	0,84	0,78
L(W) ≤ 0		0,07	0,04	0,01	-0,02	-0,05	-0,08	-0,10
JSI(D) < JSI(D)гр	Сажеутворення	0,53	0,56	0,59	0,63	0,66	0,69	0,72
IY(A) ≥ 1		0,97	1,02	1,07	1,13	1,19	1,26	1,33
IY(W) ≤ 0		-0,04	-0,08	-0,12	-0,15	-0,19	-0,22	-0,26
Ij(De) < Ij(De)гр		129,7	125,0	120,5	116,1	111,9	107,8	103,9
LI(D) < LI(D)гр	Відрив полум'я	0,89	1,07	1,29	1,54	1,84	2,18	2,56
IL(A) ≤ 1		0,79	0,82	0,86	0,90	0,93	0,97	1,01
IL(W) ≥ 1 (0,95...1)		1,31	1,25	1,19	1,13	1,08	1,02	0,97
IF*(A) ≤ 1	Проскок полум'я	0,91	0,93	0,94	0,96	0,98	1,00	1,02
IF(W) ≤ 0		-0,17	-0,12	-0,08	-0,04	0,00	0,04	0,08
Число Воббе (чисте)	МДж/нм ³	46,53	44,84	43,22	41,66	40,15	38,70	37,29
Критерій Воббе	%	17,98%	13,71%	9,59%	5,63%	1,81%	-1,88%	-5,44%

Групі приладів L відповідають біометани складу №4 та №5. Біометани складу №6 та №7 не відповідають стандартним групам взагалі згідно з явищем проскоку полум'я. Біометан №3 взагалі не відповідає ні одній з груп. При спалюванні на приладі групи L буде відбуватися неякісне спалювання з явищем неповного згорання.

Зробимо висновок. Біометани мають розподіл між приладами груп H та L. Існує такий склад, який не відповідає ніякій групі приладів взагалі. До нього відноситься склад з метаном на рівні 94% об. Спалювання газу на приладі групи L, буде відбуватися з явищем неповного згорання. Біометани з рівнем метану меншим ніж 90% об будуть мати проблеми з явищем проскоку полум'я, при спалюванні на приладі групи L, або відриву – при спалюванні на приладі групи H.

Отже, зробимо важливий висновок, що якісне використання біометану зі складом газів №3, №6, №7 можливо лише при створенні сумішей з природними газами. Це свідчить про необхідність обов'язкового постійного контролю за складом біометану перед подачею в газорозподільну мережу. Склад газу повністю визначається ефективністю технологічних процесів очищення біогазу. З огляду на це завжди можливим є зміна складу біометану.

4.8 Визначення взаємозамінності паливних газів на основі фізико-хімічних показників

Як вже було відмічено, індекси взаємозаміни являють собою розрахункові показники фізико-хімічних властивостей паливних газових сумішей. При цьому побудова аналітичних залежностей для визначення індексів використовують емпіричні залежності та константи. Індекси розроблялися у свій час під певний клас пальників, при цьому є тенденція машинального використання індексів для будь-якого обладнання без врахування його особливостей. Розглянемо питання визначення взаємозамінності газів з огляду на фізико-хімічні показники. Застосуємо розрахунок цих показників для граничних газів. Оберемо чотири природних газів дослідження, порівняємо фізико-хімічні показники цих газів з відповідними показниками граничних газів групи H.

Зробимо висновки.

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						95
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4) Температура горіння адіабатичних умов визначає граничний газ G24 з небезпечним явищем перегріву. Адіабатична температура горіння G24 складає 2081 °С. Всі гази дослідження мають температуру нижчу ніж у G24, а отже являються взаємозамінними згідно з показником фізичного перегріву обладнання.

Отже, фізико-хімічні показники газів та процесу горіння являють собою альтернативу відомих індексів взаємозаміни. Але розроблення системи оцінки взаємозаміни на основі цих показників являє собою окремий перспективний напрямок вивчення і потребує проведення додаткових досліджень.

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						97
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5 УТВОРЕННЯ ПАЛИВНИХ ГАЗОВИХ СУМІШЕЙ

5.1 Дослідження властивостей газових сумішей зі штучними газами для їх спалювання на обладнанні природних газів

Як було встановлено, штучні гази, а також деякі різновиди біометанів не можуть бути використані на стандартних пальниках. Розглянемо питання умов спалювання штучних газів на газоспалювальному обладнанні природних газів при створенні сумішей штучного газу та природного газу. Утворення суміші можливе в автоматизованій системі процесу створення суміші. При цьому система управління може контролювати число Воббе газової суміші та формувати сигнали управління на робі органи змішування.

Число Воббе суміші $W_{\text{сум}}$ може бути орієнтовно визначене згідно з виразом:

$$W_{\text{сум}} = W_{\text{штг}} \cdot r_1 + W_{\text{пг}} \cdot (1 - r_1), \quad (5.1)$$

де $W_{\text{штг}}$ – число Воббе штучного газу, МДж/нм³;

r_1 – концентрація штучного газу в суміші;

$W_{\text{пг}}$ - число Воббе природного газу, МДж/нм³.

Орієнтовний розрахунок обумовлений припущенням лінійної залежності між числом Воббе газу та його концентрацією.

Тоді необхідна концентрація штучного газу може бути знайдена згідно з наступним співвідношенням.

$$r_1 = \frac{W_{\text{сум}} - W_{\text{пг}}}{W_{\text{штг}} - W_{\text{пг}}}. \quad (5.2)$$

Попередньо числом Воббе суміші може бути обрано число газу приладу. Далі, після визначення величини концентрації штучного газу повинна бути перевірена створена суміш на показники горіння.

Суміш може бути спалена на приладі самого природного газу – Н, але при цьому цілком можна припустити, що величина r_1 буде мати деяке невелике значення, що не змінить значною мірою число Воббе газу. При спалюванні сумішей з більшими концентраціями штучного газу необхідно обирати прилад іншої групи, наприклад, групи L. Візьмемо за основу природний газ родовища Розпашнівка ($W_{\text{пг}}=48,38$ МДж/нм³), а біогаз - усередненого складу ($W_{\text{штг}}=21,56$ МДж/нм³)

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						98
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При спалюванні суміші на приладі Н ($W=48,19\text{МДж/нм}^3$), величина концентрації r_1 : $r_1 = (0,95 \cdot 48,19 - 48,38)/(21,56-48,38) = 0,097$.

При спалюванні суміші на приладі L ($W=39,44\text{МДж/нм}^3$), величина концентрації r_1 : $r_1 = (0,95 \cdot 39,44 - 48,38)/(21,56-48,38) = 0,407$.

Перевіримо можливості використання сумішей на стандартних пальниках.

Таблиця 5.1 Індеси взаємозаміни при спалюванні біогазової суміші на пальнику групи Н

Індекс, умова приналежності групи Н	частка об'ємного газу	$r_1 = 0$	$r_1 = 0,02$	$r_1 = 0,04$	$r_1 = 0,06$	$r_1 = 0,08$	$r_1 = 0,1$	$r_1 = 0,12$	$r_1 = 0,14$	$r_1 = 0,16$	$r_1 = 0,18$	$r_1 = 0,2$
		Явище	$\text{CH}_4=93,26$ $\text{C}_2\text{H}_6=3,37$ $\text{C}_3\text{H}_8=0,78$ $\text{C}_4\text{H}_{10}=0,43$ $\text{C}_5\text{H}_{12}=0,42$ $\text{H}_2=0$ $\text{N}_2=1,59$	$\text{CH}_4=92,55$ $\text{C}_2\text{H}_6=3,3$ $\text{C}_3\text{H}_8=0,76$ $\text{C}_4\text{H}_{10}=0,42$ $\text{C}_5\text{H}_{12}=0,41$ $\text{H}_2=0,03$ $\text{N}_2=1,62$	$\text{CH}_4=91,83$ $\text{C}_2\text{H}_6=3,23$ $\text{C}_3\text{H}_8=0,75$ $\text{C}_4\text{H}_{10}=0,41$ $\text{C}_5\text{H}_{12}=0,4$ $\text{H}_2=0,06$ $\text{N}_2=1,65$	$\text{CH}_4=91,12$ $\text{C}_2\text{H}_6=3,16$ $\text{C}_3\text{H}_8=0,73$ $\text{C}_4\text{H}_{10}=0,41$ $\text{C}_5\text{H}_{12}=0,4$ $\text{H}_2=0,09$ $\text{N}_2=1,68$	$\text{CH}_4=90,4$ $\text{C}_2\text{H}_6=3,1$ $\text{C}_3\text{H}_8=0,72$ $\text{C}_4\text{H}_{10}=0,4$ $\text{C}_5\text{H}_{12}=0,39$ $\text{H}_2=0,12$ $\text{N}_2=1,7$	$\text{CH}_4=89,69$ $\text{C}_2\text{H}_6=3,03$ $\text{C}_3\text{H}_8=0,7$ $\text{C}_4\text{H}_{10}=0,39$ $\text{C}_5\text{H}_{12}=0,38$ $\text{H}_2=0,15$ $\text{N}_2=1,73$	$\text{CH}_4=88,97$ $\text{C}_2\text{H}_6=2,96$ $\text{C}_3\text{H}_8=0,68$ $\text{C}_4\text{H}_{10}=0,38$ $\text{C}_5\text{H}_{12}=0,37$ $\text{H}_2=0,18$ $\text{N}_2=1,76$	$\text{CH}_4=88,26$ $\text{C}_2\text{H}_6=2,89$ $\text{C}_3\text{H}_8=0,67$ $\text{C}_4\text{H}_{10}=0,37$ $\text{C}_5\text{H}_{12}=0,36$ $\text{H}_2=0,21$ $\text{N}_2=1,79$	$\text{CH}_4=87,54$ $\text{C}_2\text{H}_6=2,83$ $\text{C}_3\text{H}_8=0,65$ $\text{C}_4\text{H}_{10}=0,36$ $\text{C}_5\text{H}_{12}=0,35$ $\text{H}_2=0,24$ $\text{N}_2=1,82$	$\text{CH}_4=86,83$ $\text{C}_2\text{H}_6=2,76$ $\text{C}_3\text{H}_8=0,64$ $\text{C}_4\text{H}_{10}=0,35$ $\text{C}_5\text{H}_{12}=0,35$ $\text{H}_2=0,27$ $\text{N}_2=1,85$
LICF(D) < LICF(D)гр	Неповнота згорання	0,17	-0,28	-0,73	-1,17	-1,60	-2,03	-2,45	-2,86	-3,27	-3,68	-4,08
C(A) ≤ 1		0,88	0,86	0,84	0,82	0,79	0,77	0,75	0,73	0,72	0,70	0,68
L(W) ≤ 0		-0,10	-0,11	-0,12	-0,13	-0,14	-0,15	-0,16	-0,17	-0,18	-0,19	-0,20
JSI(D) < JSI(D)гр		0,58	0,59	0,60	0,61	0,62	0,63	0,64	0,65	0,66	0,67	0,69
IY(A) ≥ 1	Сажеутворення	1,27	1,30	1,32	1,35	1,38	1,41	1,44	1,47	1,50	1,53	1,57
JY(W) ≤ 0		-0,24	-0,26	-0,27	-0,29	-0,30	-0,32	-0,33	-0,34	-0,36	-0,37	-0,38
Ij(De) < Ij(De)гр		145,8	143,6	141,4	139,3	137,1	135,0	132,9	130,9	128,8	126,8	124,8
LI(D) < LI(D)гр	Відрив полум'я	0,74	0,79	0,85	0,92	0,98	1,05	1,13	1,21	1,30	1,40	1,50
IL(A) ≤ 1		0,91	0,92	0,94	0,95	0,97	0,99	1,00	1,02	1,04	1,05	1,07
L(W) ≥ 1 (0,95...1)		1,15	1,02	1,00	0,98	0,96	0,95	0,93	0,91	0,89	0,88	0,86
IF*(A) ≤ 1	Проскок полум'я	0,76	0,76	0,77	0,77	0,78	0,79	0,79	0,80	0,80	0,81	0,82
JF(W) ≤ 0		-0,47	-0,45	-0,43	-0,41	-0,39	-0,38	-0,36	-0,34	-0,32	-0,31	-0,29
Число Воббе (чисте)	МДж/нм ³	48,38	47,69	47,01	46,33	45,67	45,01	44,36	43,72	43,09	42,46	41,84
Критерій Воббе	%	0,40%	-1,03%	-2,45%	-3,85%	-5,23%	-6,59%	-7,94%	-9,27%	-10,58%	-11,88%	-13,17%

Отже, розрахунок індесів обмежує максимальну концентрацію біогазу на рівні 0,08 з причини появи тенденції до явища відриву полум'я. Число Воббе $W_{\text{сум}} = 45,67 \text{ МДж/нм}^3$.

Розрахунок індесів взаємозаміни вказує на обмеження максимальної концентрації суміші біогазу на рівні $r_1=0,24$ з причини появи тенденції до явища проскоку полум'я. Число Воббе $W_{\text{сум}} = 40,62 \text{ МДж/нм}^3$.

Знайдемо необхідну концентрацію генераторного газу при спалюванні суміші на приладі L ($W=39,44\text{МДж/нм}^3$), величина концентрації r_1 :

$$r_1 = (0,95 \cdot 39,44 - 48,38)/(5,8-48,38) = 0,256.$$

Таблиця 5.2 Індеси взаємозаміни при спалюванні біогазової суміші на пальнику групи L

Індекс, умова приналежності групи L	частка об'ємного газу	r1											
		0	0,04	0,08	0,12	0,16	0,2	0,24	0,28	0,32	0,36	0,4	
	Явище	CH ₄ =93,26 C ₂ H ₆ =3,37 C ₃ H ₈ =0,78 C ₄ H ₁₀ =0,43 C ₅ H ₁₂ =0,42 H ₂ =0 N ₂ =1,59	CH ₄ =91,83 C ₂ H ₆ =3,23 C ₃ H ₈ =0,75 C ₄ H ₁₀ =0,41 C ₅ H ₁₂ =0,4 H ₂ =0,06 N ₂ =1,65	CH ₄ =90,4 C ₂ H ₆ =3,1 C ₃ H ₈ =0,72 C ₄ H ₁₀ =0,4 C ₅ H ₁₂ =0,39 H ₂ =0,12 N ₂ =1,7	CH ₄ =88,97 C ₂ H ₆ =2,96 C ₃ H ₈ =0,68 C ₄ H ₁₀ =0,38 C ₅ H ₁₂ =0,37 H ₂ =0,18 N ₂ =1,76	CH ₄ =87,54 C ₂ H ₆ =2,83 C ₃ H ₈ =0,65 C ₄ H ₁₀ =0,36 C ₅ H ₁₂ =0,35 H ₂ =0,24 N ₂ =1,82	CH ₄ =86,11 C ₂ H ₆ =2,69 C ₃ H ₈ =0,62 C ₄ H ₁₀ =0,35 C ₅ H ₁₂ =0,34 H ₂ =0,3 N ₂ =1,87	CH ₄ =84,68 C ₂ H ₆ =2,56 C ₃ H ₈ =0,59 C ₄ H ₁₀ =0,33 C ₅ H ₁₂ =0,32 H ₂ =0,36 N ₂ =1,93	CH ₄ =83,25 C ₂ H ₆ =2,42 C ₃ H ₈ =0,56 C ₄ H ₁₀ =0,31 C ₅ H ₁₂ =0,3 H ₂ =0,42 N ₂ =1,99	CH ₄ =81,82 C ₂ H ₆ =2,29 C ₃ H ₈ =0,53 C ₄ H ₁₀ =0,29 C ₅ H ₁₂ =0,29 H ₂ =0,48 N ₂ =2,04	CH ₄ =80,39 C ₂ H ₆ =2,16 C ₃ H ₈ =0,5 C ₄ H ₁₀ =0,28 C ₅ H ₁₂ =0,27 H ₂ =0,54 N ₂ =2,1	CH ₄ =78,96 C ₂ H ₆ =2,02 C ₃ H ₈ =0,47 C ₄ H ₁₀ =0,26 C ₅ H ₁₂ =0,25 H ₂ =0,6 N ₂ =2,16	
JICF(D) < JICF(D)гр	Неповнота згорання	0,17	-0,73	-1,60	-2,45	-3,27	-4,08	-4,86	-5,63	-6,37	-7,10	-7,82	
C(A) ≤ 1		1,27	1,20	1,14	1,08	1,02	0,96	0,91	0,86	0,81	0,77	0,73	
J(W) ≤ 0		0,12	0,09	0,06	0,04	0,01	-0,01	-0,03	-0,05	-0,08	-0,10	-0,12	
JSI(D) < JSI(D)гр	Сажеутворення	0,58	0,60	0,62	0,64	0,66	0,69	0,71	0,73	0,75	0,76	0,78	
JY(A) ≥ 1		0,89	0,93	0,97	1,01	1,05	1,10	1,15	1,20	1,26	1,31	1,38	
JY(W) ≤ 0		0,07	0,04	0,00	-0,03	-0,06	-0,09	-0,13	-0,16	-0,19	-0,22	-0,25	
Ij(De) < Ij(De)гр		145,8	141,4	137,1	132,9	128,8	124,8	120,9	117,1	113,4	109,7	106,1	
JLI(D) < JLI(D)гр	Відрив полум'я	0,74	0,85	0,98	1,13	1,30	1,50	1,72	1,97	2,25	2,56	2,88	
IL(A) ≤ 1		0,77	0,80	0,82	0,85	0,88	0,91	0,94	0,97	1,00	1,03	1,06	
JL(W) ≥ 1 (0,95...1)		1,45	1,31	1,27	1,22	1,18	1,13	1,09	1,05	1,01	0,97	0,93	
IF*(A) ≤ 1	Проскок полум'я	0,88	0,89	0,90	0,92	0,93	0,95	0,96	0,98	0,99	1,01	1,03	
JF(W) ≤ 0		-0,23	-0,19	-0,15	-0,11	-0,08	-0,04	-0,01	0,03	0,06	0,09	0,12	
Число Воббе (чисте)	МДж/нм ³	48,38	47,01	45,67	44,36	43,09	41,84	40,62	39,43	38,27	37,13	36,01	
Критерій Воббе	%	22,68%	19,20%	15,80%	12,49%	9,26%	6,10%	3,01%	-0,01%	-2,96%	-5,85%	-8,68%	

Таблиця 5.3 Індеси взаємозаміни при спалюванні генераторної суміші на пальнику групи L

Індекс, умова приналежності групи L	частка об'ємного газу	r1										
		0,1	0,12	0,14	0,16	0,18	0,2	0,22	0,24	0,26	0,28	0,3
	Явище	CH ₄ =84,14 C ₂ H ₆ =3,03 C ₃ H ₈ =0,7 C ₄ H ₁₀ =0,39 C ₅ H ₁₂ =0,38 H ₂ =1,75 N ₂ =5,78	CH ₄ =82,31 C ₂ H ₆ =2,96 C ₃ H ₈ =0,68 C ₄ H ₁₀ =0,38 C ₅ H ₁₂ =0,37 H ₂ =2,1 N ₂ =6,62	CH ₄ =80,49 C ₂ H ₆ =2,89 C ₃ H ₈ =0,67 C ₄ H ₁₀ =0,37 C ₅ H ₁₂ =0,36 H ₂ =2,45 N ₂ =7,46	CH ₄ =78,66 C ₂ H ₆ =2,83 C ₃ H ₈ =0,65 C ₄ H ₁₀ =0,36 C ₅ H ₁₂ =0,35 H ₂ =2,8 N ₂ =8,3	CH ₄ =76,84 C ₂ H ₆ =2,76 C ₃ H ₈ =0,64 C ₄ H ₁₀ =0,35 C ₅ H ₁₂ =0,34 H ₂ =3,15 N ₂ =9,14	CH ₄ =75,01 C ₂ H ₆ =2,69 C ₃ H ₈ =0,62 C ₄ H ₁₀ =0,35 C ₅ H ₁₂ =0,34 H ₂ =3,5 N ₂ =9,97	CH ₄ =73,19 C ₂ H ₆ =2,63 C ₃ H ₈ =0,61 C ₄ H ₁₀ =0,34 C ₅ H ₁₂ =0,33 H ₂ =3,85 N ₂ =10,81	CH ₄ =71,36 C ₂ H ₆ =2,56 C ₃ H ₈ =0,59 C ₄ H ₁₀ =0,33 C ₅ H ₁₂ =0,32 H ₂ =4,2 N ₂ =11,65	CH ₄ =69,54 C ₂ H ₆ =2,49 C ₃ H ₈ =0,58 C ₄ H ₁₀ =0,32 C ₅ H ₁₂ =0,31 H ₂ =4,55 N ₂ =12,49	CH ₄ =67,71 C ₂ H ₆ =2,42 C ₃ H ₈ =0,56 C ₄ H ₁₀ =0,31 C ₅ H ₁₂ =0,3 H ₂ =4,9 N ₂ =13,33	CH ₄ =65,88 C ₂ H ₆ =2,36 C ₃ H ₈ =0,55 C ₄ H ₁₀ =0,3 C ₅ H ₁₂ =0,3 H ₂ =5,25 N ₂ =14,17
JICF(D) < JICF(D)гр	Неповнота згорання	-3,22	-3,88	-4,53	-5,17	-5,81	-6,44	-7,06	-7,68	-8,29	-8,90	-9,50
C(A) ≤ 1		1,02	0,98	0,93	0,89	0,85	0,81	0,78	0,74	0,70	0,67	0,64
J(W) ≤ 0		0,01	-0,02	-0,04	-0,06	-0,08	-0,10	-0,12	-0,14	-0,16	-0,18	-0,20
JSI(D) < JSI(D)гр	Сажеутворення	0,64	0,66	0,67	0,68	0,69	0,70	0,72	0,73	0,74	0,75	0,76
JY(A) ≥ 1		1,06	1,09	1,13	1,18	1,22	1,27	1,32	1,38	1,44	1,50	1,57
JY(W) ≤ 0		-0,06	-0,08	-0,11	-0,13	-0,16	-0,18	-0,21	-0,23	-0,26	-0,28	-0,30
Ij(De) < Ij(De)гр		128,5	125,2	121,8	118,5	115,3	112,0	108,8	105,7	102,5	99,4	96,3
JLI(D) < JLI(D)гр	Відрив полум'я	1,17	1,29	1,42	1,56	1,72	1,90	2,09	2,31	2,54	2,78	3,03
IL(A) ≤ 1		0,85	0,86	0,88	0,90	0,92	0,93	0,95	0,97	0,99	1,01	1,04
JL(W) ≥ 1 (0,95...1)		1,30	1,19	1,16	1,14	1,11	1,08	1,05	1,03	1,00	0,98	0,95
IF*(A) ≤ 1	Проскок полум'я	0,96	0,98	1,00	1,02	1,04	1,07	1,09	1,11	1,14	1,16	1,19
JF(W) ≤ 0		-0,04	0,00	0,04	0,07	0,11	0,14	0,18	0,22	0,25	0,29	0,32
Число Воббе (чисте)	МДж/нм ³	43,24	42,25	41,26	40,28	39,31	38,35	37,40	36,46	35,53	34,60	33,68
Критерій Воббе	%	9,65%	7,13%	4,62%	2,14%	-0,31%	-2,75%	-5,16%	-7,55%	-9,91%	-12,26%	-14,58%

Розрахунок індесів взаємозаміни вказує на обмеження максимальної концентрації суміші генераторного газу на рівні r1=0,12 з причини появи тенденції до явища проскоку полум'я. Число Воббе W_{сум} = 42,25 МДж/нм³. аке значне обмеження і розбіжність щодо теоретичних розрахунків обумовлені значною відмінністю складу генераторного газу від базового газу приладу L, коли фізико-

хімічні показники горіння не дозволяють використання суміші згідно з визначеною величиною числа Воббе. При цьому робота з меншими концентраціями можлива, але з погіршенням якості спалювання щодо неповного згорання.

Таким чином, нами було розв'язане питання щодо визначення концентрацій біогазу в суміші з природним газом при роботі на пальниках груп Н та L, та концентрацій генераторного газу в суміші з природним газом при роботі на пальниках груп L. Були знайдені величини чисел Воббе для регулювання процесу змішування автоматизованою системою змішування газів. Під час вивчення питання був виявлений момент обмеження допустимих концентрацій з причини появи тенденцій до погіршення якості спалювання альтернативного газового палива.

5.2 Побудова номограм змішування газів

Отже, нами була розрахована величина числа Воббе суміші та величина необхідної концентрації штучних газів заданого складу у суміші з природним газом при роботі на пальниках груп Н та L. Отримана суміш була перевірена за допомогою індексів взаємозаміни й в отриманий теоретичний результат щодо величини концентрації була внесена необхідна корекція. Але виникає питання щодо роботи зі штучними газами саме довільного складу. Найпоширеніший метод контролю властивостей паливної газової суміші – контроль числа Воббе. Отже, автоматична система буде здатна проводити вимірювання чисел Воббе штучного та природного газу, та визначати необхідну концентрацію штучного газу з контролем величини числа Воббе суміші.

Діапазон чисел Воббе паливних газів групи Н: 43-53 МДж/нм³; діапазон чисел Воббе біогазів: 15-30 МДж/нм³; та діапазон чисел Воббе генераторних газів: 10–15 МДж/нм³. Необхідна величина числа Воббе суміші з біогазом для приладу групи Н складає 45,67 МДж/нм³. Необхідна величина числа Воббе суміші з біогазом для приладу групи L складає 40,62 МДж/нм³. Необхідна величина числа Воббе суміші з генераторних газів для приладу групи L складає 42,25 МДж/нм³.

Для розрахунку необхідної концентрації штучного газу з довільним числом Воббе у суміші з природним газом скористаємося залежністю (5.2). Але попередньо

					<i>601-НТ-11393643-МР</i>	Арк.
						101
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

виконаємо перевірку впливу припущення лінійності залежності між числом Воббе та концентрації штучного газу на результат розрахунку необхідної величини концентрації $r_{1\text{теор}}$. Також виконаємо розрахунок коефіцієнта корекції концентрації $K_{\text{кор}} = r_{1\text{необх}} / r_{1\text{теор}}$.

Результати розрахунку представимо у таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 - Визначення коефіцієнта корекції концентрації штучного газу у суміші

Група приладу	Штучний газ	W пг МДж/нм ³	W шг МДж/нм ³	W сум МДж/нм ³	r1 необх	r1 теор	Kкор
H	біогаз	48,38	21,56	45,67	0,08	0,101	0,792
L	біогаз	48,38	21,56	40,62	0,24	0,289	0,829
L	ген газ	48,38	5,800	42,25	0,12	0,144	0,834

Отже, для приладу групи H $K_{\text{кор}}=0,79$.

Для приладу групи L $K_{\text{кор}}=0,83$ для обох видів штучних газів.

Таким чином розрахунковий вираз для знаходження r_1 буде мати вигляд:

$$r_1 = \frac{W_{\text{сум}} - W_{\text{пг}}}{W_{\text{шг}} - W_{\text{пг}}} \cdot K_{\text{кор}}$$

Виконаємо розрахунок r_1 , результати представимо у вигляді таблиць.

Таблиця 5.5 - Розрахунок концентрацій біогазу у суміші для приладу H

W сум, МДж/нм ³		Числа Воббе природних газів, МДж/нм ³										
45,67		43,00	44,00	45,00	46,00	47,00	48,00	49,00	50,00	51,00	52,00	53,00
Числа Воббе штучних газів, МДж/нм ³	15,00	0,0%	0,0%	0,0%	0,9%	3,3%	5,6%	7,8%	9,9%	11,8%	13,7%	15,4%
	16,50	0,0%	0,0%	0,0%	0,9%	3,5%	5,9%	8,2%	10,3%	12,4%	14,3%	16,1%
	18,00	0,0%	0,0%	0,0%	0,9%	3,7%	6,2%	8,6%	10,8%	12,9%	14,9%	16,8%
	19,50	0,0%	0,0%	0,0%	1,0%	3,9%	6,5%	9,0%	11,4%	13,5%	15,6%	17,5%
	21,00	0,0%	0,0%	0,0%	1,1%	4,1%	6,9%	9,5%	11,9%	14,2%	16,3%	18,3%
	22,50	0,0%	0,0%	0,0%	1,1%	4,3%	7,3%	10,1%	12,6%	15,0%	17,2%	19,2%
	24,00	0,0%	0,0%	0,0%	1,2%	4,6%	7,8%	10,7%	13,3%	15,8%	18,1%	20,2%
	25,50	0,0%	0,0%	0,0%	1,3%	4,9%	8,3%	11,3%	14,1%	16,7%	19,1%	21,3%
	27,00	0,0%	0,0%	0,0%	1,4%	5,3%	8,9%	12,1%	15,1%	17,8%	20,3%	22,6%
	28,50	0,0%	0,0%	0,0%	1,5%	5,8%	9,6%	13,0%	16,1%	19,0%	21,5%	23,9%
30,00	0,0%	0,0%	0,0%	1,6%	6,3%	10,4%	14,0%	17,3%	20,3%	23,0%	25,5%	

Таблиця 5.6 - Розрахунок концентрацій біогазу у суміші для приладу L

W сум, МДж/нм ³		Числа Воббе природних газів, МДж/нм ³										
40,62		43,00	44,00	45,00	46,00	47,00	48,00	49,00	50,00	51,00	52,00	53,00
Числа Воббе штучних газів, МДж/нм ³	15,00	7,1%	9,7%	12,1%	14,4%	16,5%	18,6%	20,5%	22,2%	23,9%	25,5%	27,0%
	16,50	7,5%	10,2%	12,8%	15,1%	17,4%	19,4%	21,4%	23,2%	25,0%	26,6%	28,2%
	18,00	7,9%	10,8%	13,5%	15,9%	18,3%	20,4%	22,4%	24,3%	26,1%	27,8%	29,4%
	19,50	8,4%	11,5%	14,3%	16,9%	19,3%	21,5%	23,6%	25,5%	27,4%	29,1%	30,7%
	21,00	9,0%	12,2%	15,1%	17,9%	20,4%	22,7%	24,8%	26,8%	28,7%	30,5%	32,1%
	22,50	9,6%	13,0%	16,2%	19,0%	21,6%	24,0%	26,2%	28,3%	30,2%	32,0%	33,7%
	24,00	10,4%	14,0%	17,3%	20,3%	23,0%	25,5%	27,8%	29,9%	31,9%	33,7%	35,4%
	25,50	11,3%	15,2%	18,6%	21,8%	24,6%	27,2%	29,6%	31,8%	33,8%	35,6%	37,4%
	27,00	12,3%	16,5%	20,2%	23,5%	26,5%	29,2%	31,6%	33,8%	35,9%	37,8%	39,5%
	28,50	13,6%	18,1%	22,0%	25,5%	28,6%	31,4%	33,9%	36,2%	38,3%	40,2%	41,9%
	30,00	15,2%	20,0%	24,2%	27,9%	31,1%	34,0%	36,6%	38,9%	41,0%	42,9%	44,7%

Таблиця 5.7 - Розрахунок концентрацій генераторного газу у суміші для приладу L

W сум, МДж/нм ³		Числа Воббе природних газів, МДж/нм ³										
42,25		43,00	44,00	45,00	46,00	47,00	48,00	49,00	50,00	51,00	52,00	53,00
Числа Воббе штучних газів, МДж/нм ³	10,00	1,9%	4,3%	6,5%	8,6%	10,7%	12,6%	14,4%	16,1%	17,7%	19,3%	20,8%
	10,50	1,9%	4,3%	6,6%	8,8%	10,8%	12,7%	14,6%	16,3%	17,9%	19,5%	21,0%
	11,00	1,9%	4,4%	6,7%	8,9%	11,0%	12,9%	14,7%	16,5%	18,2%	19,7%	21,2%
	11,50	2,0%	4,5%	6,8%	9,0%	11,1%	13,1%	14,9%	16,7%	18,4%	20,0%	21,5%
	12,00	2,0%	4,5%	6,9%	9,2%	11,3%	13,3%	15,1%	16,9%	18,6%	20,2%	21,8%
	12,50	2,0%	4,6%	7,0%	9,3%	11,4%	13,4%	15,3%	17,2%	18,9%	20,5%	22,0%
	13,00	2,1%	4,7%	7,1%	9,4%	11,6%	13,6%	15,6%	17,4%	19,1%	20,8%	22,3%
	13,50	2,1%	4,8%	7,2%	9,6%	11,8%	13,8%	15,8%	17,6%	19,4%	21,0%	22,6%
	14,00	2,1%	4,8%	7,4%	9,7%	11,9%	14,0%	16,0%	17,9%	19,6%	21,3%	22,9%
	14,50	2,2%	4,9%	7,5%	9,9%	12,1%	14,2%	16,2%	18,1%	19,9%	21,6%	23,2%
	15,00	2,2%	5,0%	7,6%	10,0%	12,3%	14,5%	16,5%	18,4%	20,2%	21,9%	23,5%

На основі отриманих величин концентрацій отримаємо номограми щодо визначення концентрацій штучних газів у суміші з природним газом для різних приладів.

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		103

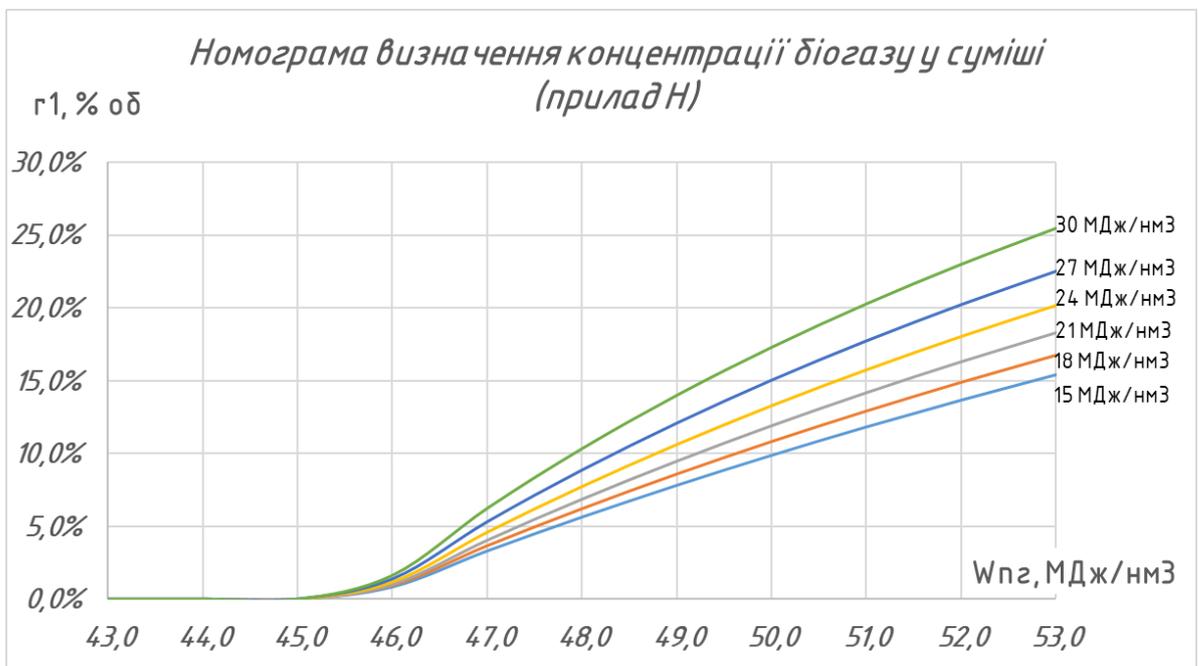


Рисунок 5.1 - Номограма концентрації біогазу у суміші (прилад Н)

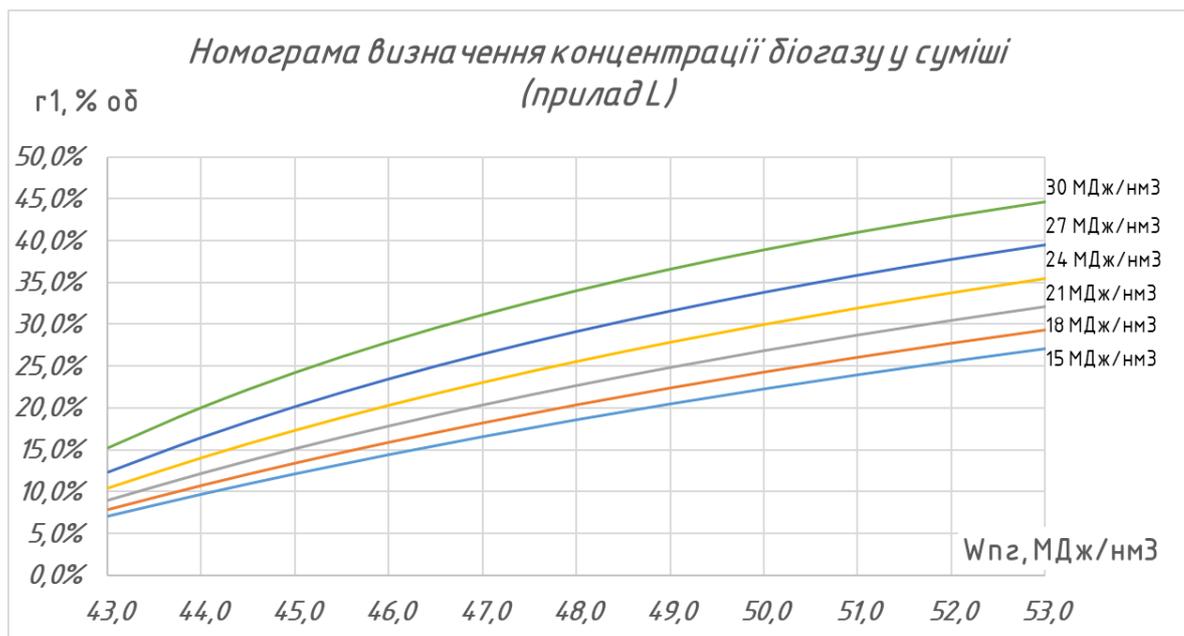


Рисунок 5.2 - Номограма концентрації біогазу у суміші (прилад L)

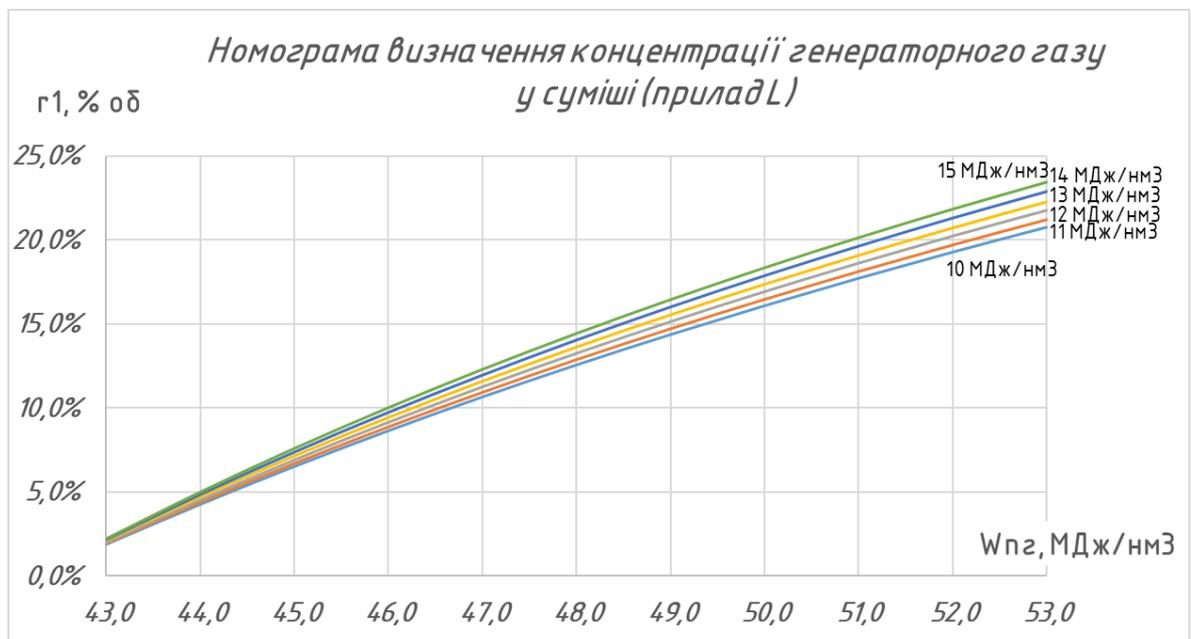


Рисунок 5.3 - Номограма концентрації генераторного газу у суміші (прилад L)

Таким чином, нами були отримані номограми для визначення концентрацій штучних газів на стандартних пальниках груп Н та L. Номограми вказують на робочий діапазон меж концентрацій штучних газів у суміші для всього спектру природних газів. Дані номограм надалі можуть бути використані при реалізації автоматичної системи утворення сумішей з контролем числа Воббе. Недоліком такого представлення номограм є відсутність універсалізації залежностей, коли штучні гази відокремлені один від одного.

Представимо номограми на площині $W_{пг} - W_{шг}$ та об'єднаємо усі штучні гази в загальну групу. При цьому застосуємо весь можливий спектр чисел Воббе штучних газів. Для цього візьмемо діапазон чисел Воббе паливних газів групи Н: 43-53 МДж/нм³; діапазон чисел Воббе штучних газів: 0-45 МДж/нм³. Необхідна величина числа Воббе суміші з біогазом для приладу групи Н складає 45,67 МДж/нм³. Необхідна величина числа Воббе суміші з біогазом для приладу групи L складає 40,62 МДж/нм³.

Для розрахунку необхідної концентрації штучного газу з довільним числом Воббе у суміші з природним газом скористаємося залежністю (2). Згідно з результатами розрахунків отримаємо наступну номограму.

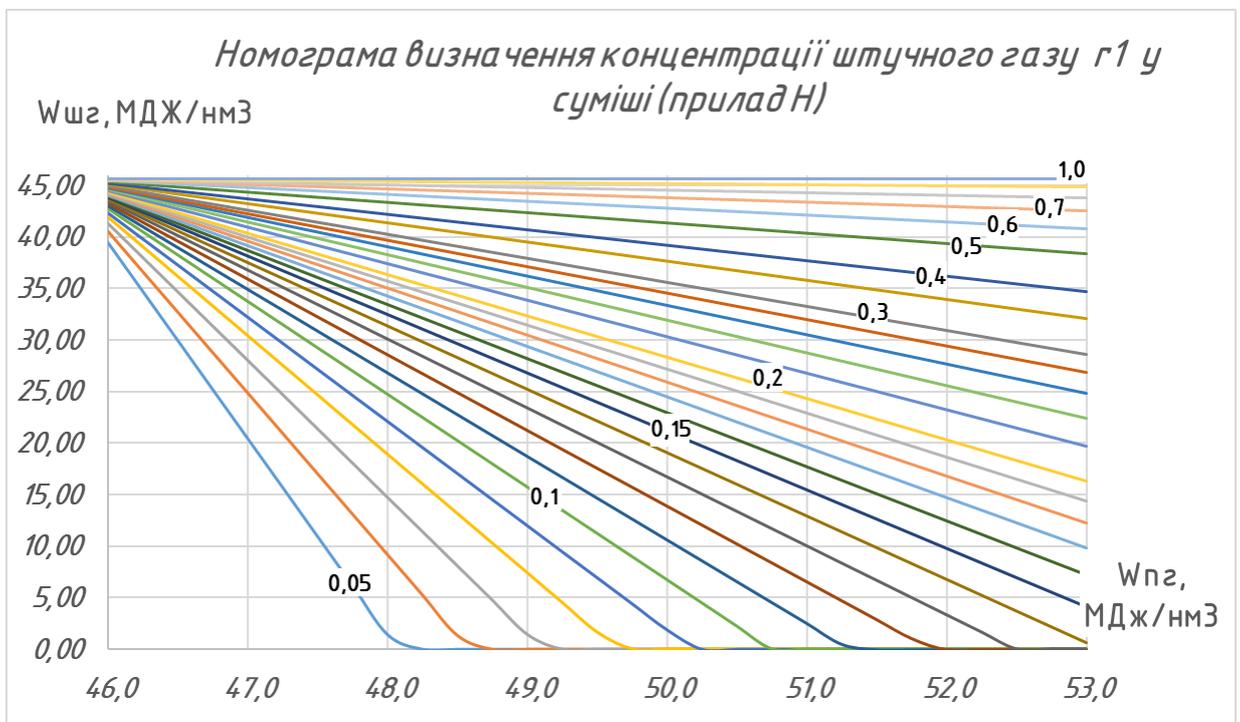


Рисунок 5.4 - Номограма необхідної концентрації штучного газу для суміші (прилад Н)

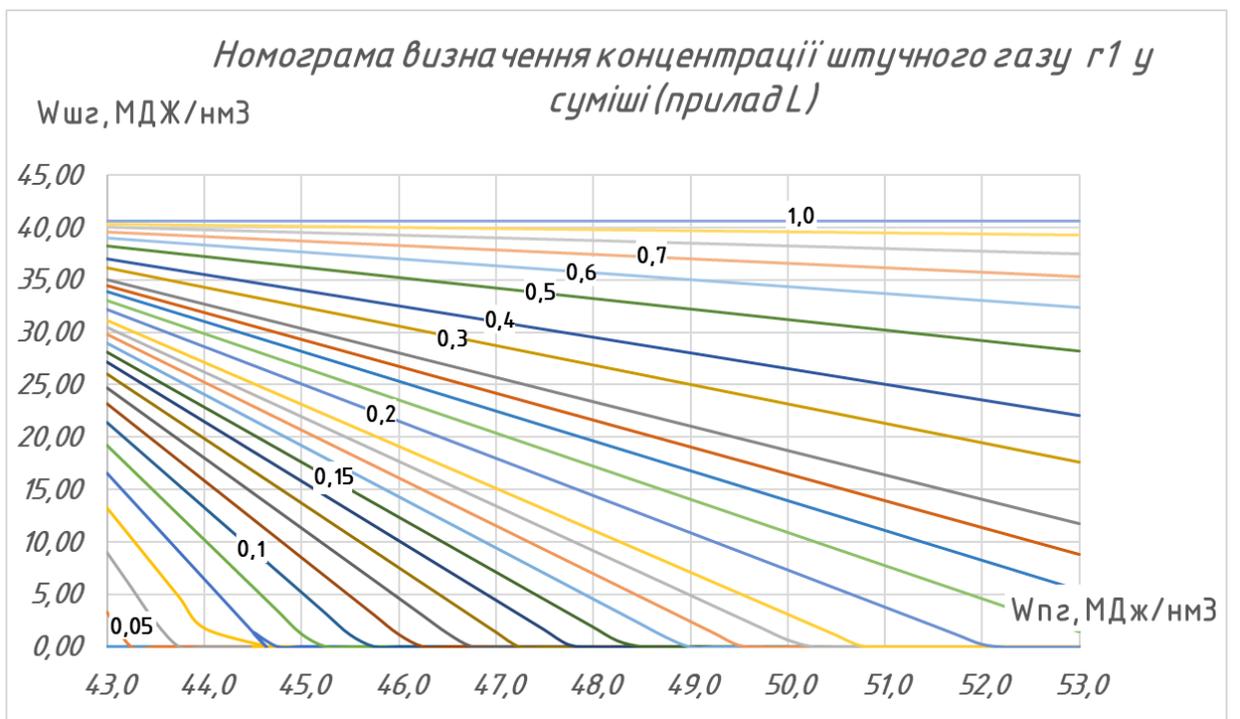


Рисунок 5.5 - Номограма необхідної концентрації штучного газу для суміші (прилад L)

Таким чином, нами були отримані номограми для визначення концентрацій штучних газів на стандартних пальниках груп Н та L. Дані номограм надалі можуть

бути використані при реалізації автоматичної системи утворення сумішей з контролем числа Воббе.

При використанні залежності (5.1) для розрахунку необхідної концентрації була виявлена похибка, що обумовлена знехтуванням зміни густини газів. Тому отримуємо аналітичні вирази для знаходження коефіцієнтів корекції. Рівняння визначення теплоти згорання для двох газів.

$$\begin{cases} r_1 \cdot H_1 + r_2 \cdot H_2 = H_0; \\ r_1 + r_2 = 1. \end{cases} \quad (5.3)$$

де $H_{1,2}$ – об'ємна теплота згорання першого та другого газу;

r_1, r_2 – об'ємні концентрації

H_0 – теплота згорання суміші.

Тоді у базове рівняння системи можна ввести відносну густину газу d_1 і записати рівняння в наступному вигляді:

$$r_1 \cdot H_1 / d_1 + r_2 \cdot H_2 / d_1 = H_0 / d_1. \quad (5.4)$$

Вираз (4) можна представити у наступному вигляді.

$$\frac{r_1 \cdot H_1}{\sqrt{d_1}} + \frac{(1 - r_1) \cdot H_1}{\sqrt{d_1}} = \frac{H_0}{\sqrt{d_1}}. \quad (5.5)$$

Для переходу від величини теплоти згорання до чисел Воббе отримаймо вирази зв'язку між відносною густиною газів. Введемо коефіцієнт відношення густини: $k_d = d_1 / d_2$.

Тоді: $d_2 = d_1 / k_d$; $d_1 = k_d \cdot d_2$.

Відносна густина суміші:

$$d_0 = r_1 \cdot d_1 + r_2 \cdot d_2 = r_1 \cdot d_1 + (1 - r_1) \cdot d_2 =$$

$$r_1 \cdot d_1 + (1 - r_1) \cdot d_1 / k_d =$$

$$d_1 (r_1 + (1 - r_1) / k_d)$$

Тоді:

$$d_1 = \frac{d_0}{r_1 + \frac{(1 - r_1)}{k_d}}. \quad (5.6)$$

В рівняння (6) підставимо отримані вирази для d_1 :

					<i>601-НТ-11393643-МР</i>	Арк.
						107
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\frac{r1 \cdot H1}{\sqrt{d1}} + \frac{(1 - r1) \cdot H2}{\sqrt{kd d2}} = \frac{H0}{\sqrt{\frac{d0}{r1 + (1 - r1) / kd}}} \quad (5.7)$$

Тепер в рівнянні (7) можна перейти до чисел Воббе.

$$r1 \cdot W1 + \frac{(1 - r1)}{\sqrt{kd}} \cdot W2 = \sqrt{r1 + (1 - r1) / kd} \cdot W0 \quad (5.8)$$

Отже, нами було отримано вираз для корегування величини $r1$ з огляду на відмінності густин газових компонентів. Відповідну корекцію можна реалізувати в автоматичній системі утворення сумішей при розрахунку контролером величини $r1$ для підтримки необхідного числа Воббе газової суміші.

5.3 Побудова системи утворення паливних газових сумішей

Побудуємо схему утворення газових сумішей. Запропонуємо два варіанти.

Перший випадок: гази подаються вже під тиском, система керування виконує управління відповідними клапанами що дозволяє керувати тиском, а отже відповідно і газовим потоком. Змішування відбувається в буферній ємності.

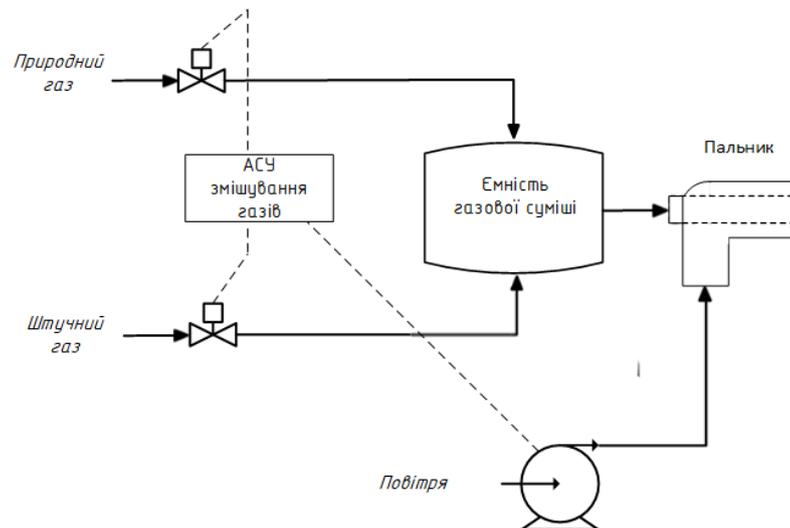


Рисунок 5.1 - Схема утворення газових сумішей з використанням регульованого клапана

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		108

Другий випадок: гази подаються в спеціальну буферну ємність, система керування виконує контроль подачі завдяки використанню газових компресорів.

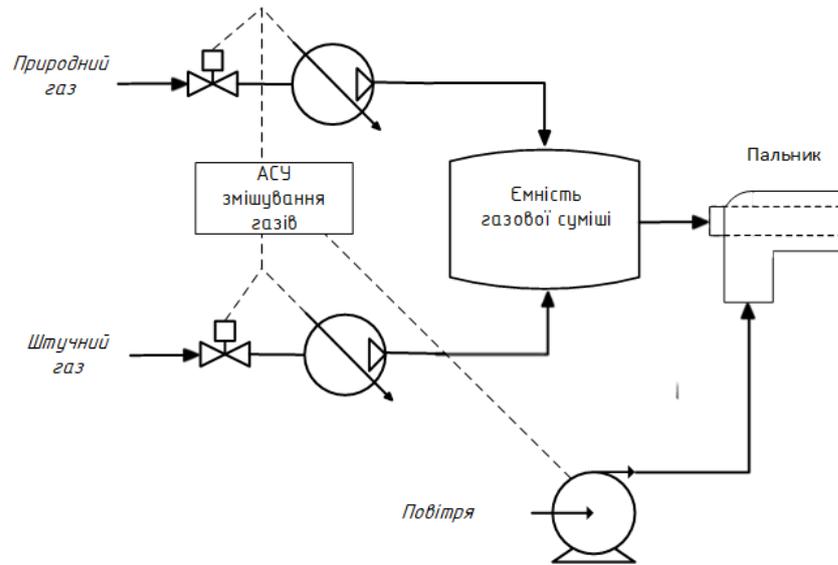


Рисунок 5.2 - Схема утворення газових сумішей з використанням газових компресорів

Особливість другої схеми – можливість утворення газової суміші в випадку нестабільної подачі штучного газу. В цьому випадку буферна ємність повинна мати достатній об'єм для зберігання газової суміші на час недостатньої потужності виробництва штучного газу, що притаманно сучасному рівню розвитку підприємств з виробництва біогазів.

Розглянемо і альтернативну систему спалювання газових сумішей. Відомо, що ефективними пальниками для стійкого спалювання газу з широким діапазоном меж спалахування, є дифузійні та мікродифузійні пальники. Ці пальники обладнані вентиляторами та димососами з частотними регуляторами. Але їх використання обмежується значними коефіцієнтами надлишку повітря котре необхідно створювати для компенсації неякісного премішування, а отже і низькою енергоефективністю. Також не всі топкові простори дозволяють розміщення спеціальних подових дифузійних пальників. Тому в основу конструкції пальника для комбінованого спалювання природного і штучного газів може бути покладений принцип дуттьового кінетичного пальника із примусовою подачею повітря без попереднього змішування. Утворення суміші газів і їх перемішування з повітрям буде здійснюватися у тунелі пальника і в самій топці.

Схема такого пальника показана на рисунку 5.1 [20].

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						109
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

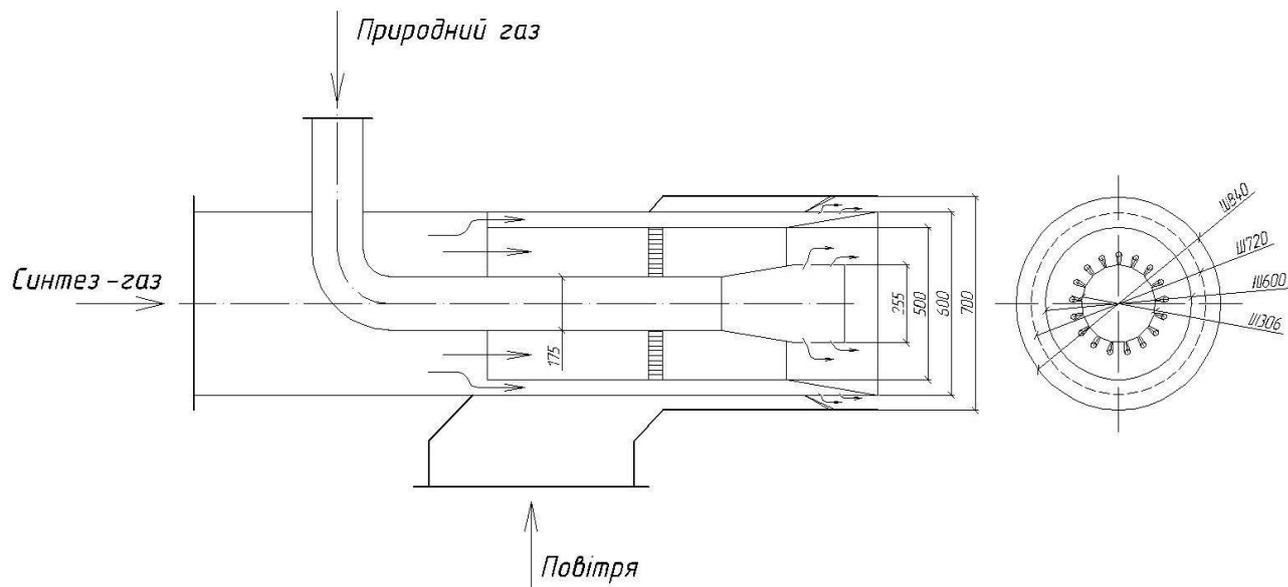


Рисунок 5.3 - Схема дуттьового кінетичного пальника із примусовою подачею повітря без попереднього змішування

Гази подаються через два ряди радіальних отворів у корпусі пальника, а також по кільцевому зазору між трубопроводом для подачі природного газу і корпусом і ефективно перемішується з дуттьовим повітрям шляхом забезпечення необхідної дальnobійності газових струменів. В усті пальника відбувається інтенсивне перемішування природного і штучного газів. Гомогенізація суміші з дуттьовим повітрям завершується на виході із вогнетривкого тунелю пальника - стабілізатора горіння. Тривалий міжремонтний період роботи пальника і тунелю забезпечується шляхом периферійної подачі дуттьового повітря. Випробування моделі пальника засвідчили стійку його роботу у широкому діапазоні регулювання витрат і співвідношення різних горючих газів. А модернізація обладнання для використання саме такого пальника не буде вимагати розробки та впровадження систем попереднього змішування чим значно зменшує необхідні капітальні витрати та термін окупності.

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		110

6 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООБМІНУ ВИПРОМІНЮВАННЯМ ДЛЯ ОЦІНКИ ВЗАЄМОЗАМІНИ ПАЛИВНИХ ГАЗІВ

6.1 Математичні методи оцінки щільності потоку власного випромінювання газового об'єму

Відповідно до [22] власне випромінювання ізотермічних об'ємів діоксиду вуглецю та водяної пари та інших багатоатомних газів було надійно експериментально виміряно починаючи з 30-х років 20 століття. На основі цих даних було складено номограми, які використовуються і в даний час у теплотехнічних розрахунках. До таких належать номограми CO_2 та H_2O [22], у формі залежності коефіцієнта теплового випромінювання газового об'єму від температури газу. Параметром на графіках служить добуток середньої довжини променя l на парціальний тиск випромінюючого газу p . Довжина променя - характерний розмір випромінюючої області. Для водяної пари вплив p дещо сильніший ніж l , тому знайдений відповідно до номограм величина $\epsilon_{\text{H}_2\text{O}}$ необхідно помножити на поправочний коефіцієнт парціального тиску відповідно до окремої номограми [22].

Таким чином ступінь чорноти випромінювання продуктів згоряння $\epsilon_{\text{д}}$ визначається сумуванням ступенів чорнот CO_2 і H_2O з урахуванням коефіцієнту β , тобто:

$$\epsilon_{\text{д}} = \epsilon_{\text{CO}_2} + \beta \times \epsilon_{\text{H}_2\text{O}}, \quad (6.1)$$

де ϵ_{CO_2} - ступінь чорноти випромінювання CO_2 ;

$\epsilon_{\text{H}_2\text{O}}$ - ступінь чорноти випромінювання H_2O ;

β - поправочний коефіцієнт.

За знайденою величиною ϵ розраховується власне випромінювання газового об'єму за співвідношенням:

$$E = \epsilon \sigma T_{\text{г}}^4, \quad (6.2)$$

де $T_{\text{г}}$ - температура газу, К.

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						111
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Номограми побудовані таким чином, що щільність потоку випромінювання E визначатиме випромінювання, що проходить через одиничний майданчик в основі газової сфери, що оточує її. Для того, щоб розрахувати щільність потоку інших об'ємів необхідно привести до еквівалентної газової півсфери. При цьому довжина променя l дорівнює радіусу цієї еквівалентної сфери і може бути з якісним наближенням знайдена із співвідношення:

$$l = 3,6V/F, \quad (6.3)$$

де V – випромінюючий обсяг газу;

F – площа поверхні його оболонки.

Надалі будемо використовувати в якості довжини променя безпосередньо радіус півсфери.

Знайдена за допомогою еквівалентного радіусу та номограм щільність потоку власного випромінювання газового об'єму являє собою середнє значення $E = Q/F$, де Q сумарний потік енергії власного випромінювання газового об'єму.

Згідно [22] коефіцієнт теплового випромінювання суміші газів - ε менше теоретичного значення на деяку величину $\Delta\varepsilon$ і залежить від різноманітних факторів в тому числі інших компонентів суміші. Поправка може бути знайдена по спеціальним номограмам. Згідно [22] для розповсюдженого складу димових газів величина $\Delta\varepsilon$ мала і може не враховуватися.

Згідно [22] розрахунок теплового випромінювання димових газів суміші CO_2 та H_2O можна проводити по спрощеній методиці:

$$\varepsilon = 1 - \exp(-10 \cdot k \cdot p \cdot l). \quad (6.4)$$

$$k = 0,8 \frac{1 + 20p_{\text{H}_2\text{O}}}{\sqrt{10pl}} \left(1 - 0,38 \frac{T_{\text{Г}}}{1000}\right), \quad (6.5)$$

де p – сумарний парціальний тиск CO_2 та H_2O , МПа;

$p_{\text{H}_2\text{O}}$ – парціальний тиск водяної пари, МПа.

Згідно [22] спрощена методика узгоджена з номограмами та правомірна при наступних діапазонах параметрів:

$p_{\text{CO}_2} \cdot l$, Мпа·м ... $8 \cdot 10^{-4} - 0,16$.

$p_{\text{H}_2\text{O}} \cdot l$, Мпа·м ... $4 \cdot 10^{-4} - 0,13$.

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						112
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$p_{CO_2}/p_{H_2O} \dots 0,2 - 2.$

Тг, К ... 750-1950.

Отже, можна зробити висновок що для оцінки теплообмінних процесів при температурах вищих ніж 1677 °С та нижчих ніж 477 °С необхідно використовувати саме базові номограми CO₂ та H₂O.

В [23] для автоматизації розрахунків базові номограми CO₂ та H₂O пропонується замінити наступними залежностями апроксимації:

$$\varepsilon_{CO_2} = \exp\{-[1,4918 + A + B + C]\}, \quad (6.6)$$

$$\varepsilon_{H_2O} = \exp[0,5708 - D - E], \quad (6.7)$$

$$\beta = 1 + \left(-5,0 + 5,3114 \cdot C_{H_2O}^{-0,01191}\right) P_{H_2O}^{0,74 + 0,03705 C_{H_2O}^{-0,1561}}, \quad (6.8)$$

де $A = 0,398 C_{CO_2}^{-0,2609}$ (6.9)

$$B = (0,053 - 0,1239 C_{CO_2}^{0,1718}) \times (t_{\partial}^{cep} / 100);$$

$$C = (0,003504 + 0,0009446 C_{CO_2}^{0,547}) \times (t_{\partial}^{cep} / 100)^2; \quad (6.10)$$

$$D = 1,2016 C_{H_2O}^{-0,2146}; \quad (6.11)$$

$$E = (0,0038 + 0,05133 C_{H_2O}^{-0,2105}) \times (t_{\partial}^{cep} / 100); \quad (6.12)$$

В цих співвідношеннях $C_{CO_2} = P_{CO_2} \cdot l_{ef}$ - добуток парціального тиску

газу CO₂ на ефективну довжину променів, кгс•м/см²;

$C_{H_2O} = P_{H_2O} \cdot l_{ef}$ - добуток парціального тиску газу H₂O на ефективну довжину

променів, кгс•м/см²;

P_{CO_2} , P_{H_2O} - відповідно парціальний тиск CO₂ і H₂O, кг/см²;

l_{ef} – ефективна довжина променів, м.

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		113

6.2 Математичні методи оцінки теплообміну випромінюванням

Теплообмін випромінюванням між газом та чорними стінками можна визначити згідно наступної залежності [22],

$$Q = \sigma F (\varepsilon_{\Gamma} T_{\Gamma}^4 - \varepsilon_{\text{CT}} T_{\text{CT}}^4), \quad (6.13)$$

де T_{CT} – температура стінки, К

ε_{CT} – коефіцієнт випромінювання стінки.

В [22] зазначається, що якщо стінки сірі ($\varepsilon_{\text{CT}} < 1$), то в системі виникають багаторазові відображення і розрахунок ускладнюється. При високих значеннях коефіцієнта випромінювання стінок ($\varepsilon_{\text{CT}} > 0.8$) для наближених розрахунків досить врахувати перші відбиття і використати наступне розрахункове співвідношення:

$$Q = \varepsilon_{\text{CT}}^* \sigma F (\varepsilon_{\Gamma} T_{\Gamma}^4 - \varepsilon_{\text{CT}} T_{\text{CT}}^4), \quad (6.14)$$

де $\varepsilon_{\text{CT}}^*$ - приведений коефіцієнт теплового випромінювання

$$\varepsilon_{\text{CT}}^* = 0,5(1 + \varepsilon_{\text{CT}}).$$

В [22] пропонується і інший наближений метод оцінки теплообміну випромінюванням, що заснований на припущенні, що спектральний коефіцієнт поглинання газу не залежить від частоти і однаковий у всіх полосах спектру. Також вказується, що це припущення виконується на практиці лише приблизно, проте дає можливість побудувати досить універсальний метод розрахунку. Метод використовує коефіцієнти теплового випромінювання газового об'єму при нескінченній довжині променю $\varepsilon_{\Gamma\infty}$.

$$Q = \sigma F \frac{\varepsilon_{\Gamma\infty}(T_{\Gamma})T_{\Gamma}^4 - \varepsilon_{\Gamma\infty}(T_{\text{CT}})T_{\text{CT}}^4}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{CT}}} + \frac{\varepsilon_{\Gamma\infty}(T_{\text{CT}})}{\varepsilon_{\Gamma}(T_{\Gamma})} - 1}. \quad (6.15)$$

Методики проектних розрахунків котлового обладнання вносять корегування в оцінку ступенів чорноти. Розрахунковий вираз (6.5), котрий дозволяє знайти ступінь чорноти триатомних газів продуктів згоряння згідно [24] може бути виражений в альтернативній формі:

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		114

$$k = k_{\Gamma} \cdot r_{\Pi} = \left(\frac{0,78 + 1,6 \cdot r_{\text{H}_2\text{O}}}{\sqrt{p_{\Pi} \cdot l e \phi}} - 0,1 \right) \times \left(1 - 0,37 \frac{T_{\Gamma}''}{1000} \right) \cdot r_{\Pi}, \quad 1/(\text{м} \cdot \text{кгс}/\text{см}^2), \quad (6.16)$$

де r_{Π} – об'ємна частка гідрогену та діоксиду вуглецю димових газів;

$r_{\text{H}_2\text{O}}$ – об'ємна частка гідрогену димових газів;

p_{Π} – загальний парціальний тиск триатомних димових газів, $\text{кгс}/\text{см}^2$,

k_{Γ} – коефіцієнт ослаблення випромінювання газової суміші;

T_{Γ}'' – абсолютна температура газів на виході з топки, К.

Тоді ступень чорноти триатомних газів димового середовища:

$$\varepsilon_{\Gamma} = 1 - e^{-k_{\Gamma} \cdot r_{\Pi} \cdot P \cdot S_{\Gamma}}, \quad (6.17)$$

де, S_{Γ} – ефективна товщина шару випромінювання, м

P – парціальний тиск триатомних газів, $\text{кгс}/\text{см}^2$.

Слід зазначити, що методика проектування котлового обладнання [24] враховує явище утворення сажі у факелі під час процесу горіння для оцінки її впливу на ступень чорноти факелу. При цьому використовується показник відношення мас робочої частини палива C^P/H^P (РЧ). При цьому відношення мас береться на для всього палива, а лише для робочої частини (для вуглеводнів), тобто без баластних домішок і з врахуванням величини робочої частини.

Згідно [24]:

$$C^P / H^P = 0,12 \cdot \sum \frac{m}{n} C_m H_n, \quad (6.18)$$

де 0,12 – відношення атомних мас вуглецю та водню (=11,91757).

Згідно [24] коефіцієнт ослаблення промінів частками сажі при проектування котлового обладнання знаходиться із наступного співвідношення:

$$k_c = 0,03 \cdot (2 - \alpha_{\Gamma}'') \cdot \left(1,6 \cdot \frac{T_{\Gamma}''}{1000} - 0,5 \right) \cdot \frac{C^P}{H^P}, \quad (6.19)$$

де T_{Γ} – температура димових газів на виході з топки, К;

α_{Γ} – коефіцієнт надлишку повітря для ділянки топки.

Далі може бути розрахований загальний коефіцієнт теплового випромінювання ε (світяться газ та сажа):

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						115
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\varepsilon_{ГС} = 1 - e^{-(k_{Г} \cdot r_{П} + k_{С}) \cdot P \cdot S_{Г}}, \quad (6.20)$$

Згідно [24] для оцінки теплообміну у топці котлів вводиться такий розрахунковий параметр, як ефективна ступінь чорноти факела ε_{ϕ} . Цей показник враховує особливості лише часткового впливу коефіцієнта теплового випромінювання часток сажі $\varepsilon_{С}$ у топці котла на теплообмінні процеси з факелом:

$$\varepsilon_{\phi} = m \cdot \varepsilon_{ГС} + (1 - m) \cdot \varepsilon_{Г}, \quad (6.21)$$

де m - коефіцієнт усереднення, що залежить від теплової напруги об'єму топки, для газового палива $m=0,1$.

Отже згідно виразу (6.21) вважається, що для котлового обладнання 90% ефективного ступеня чорноти факела ε_{ϕ} буде визначатися саме ступенем чорноти триатомних газів $\varepsilon_{Г}$ і 10% буде визначатися сумарним впливом триатомних газів і пробісків сажі $\varepsilon_{С}$, що характеризуються показником $C^P/H^P(PЧ)$. При цьому сам вираз (6.21) можна представити у наступному вигляді:

$$\varepsilon_{\phi} = \varepsilon_{Г} + \Delta\varepsilon_{С}, \quad (6.22)$$

де $\Delta\varepsilon_{С}$ – поправка впливу пробісків сажі на коефіцієнт теплового випромінювання газу.

6.3 Дослідження особливостей теплообмінних процесів для альтернативних видів горючих газів

Визначимо, яким чином застосування альтернативних видів горючих газів буде мати вплив на протікання теплообмінних процесів випромінюванням. Оберемо для оцінки впливу розрахунковий вираз (6.14). Ступінь чорноти стінок прийемо на мінімально допустимому для методу рівні, $\varepsilon_{ст} = 0,8$. Тоді, $\varepsilon_{ст}^* = 0,5(1 + 0,8) = 0,9$.

Для розрахунку величини теплообміну випромінюванням між газом та чорними стінками необхідно мати значення температури стінки. Через те, що ця температура буде значно нижча ніж температура факела в топковому просторі, а розрахункова залежність величини теплообміну пов'язана з четвертим ступенем величини абсолютної температури, то для узагальненого попереднього аналізу

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						116
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

величину теплообміну випромінюванням Q на одиницю площі (1 м^2) обчислимо згідно з залежністю:

$$Q \approx \varepsilon_{\text{СТ}} * \sigma F \varepsilon_{\text{Г}} T_{\text{Г}}^4, \text{ при } T_{\text{Г}}^4 \gg T_{\text{СТ}}^4. \quad (6.23)$$

З огляду на те, що визначені температури горіння газів значно перевищують робочі межі розрахункових залежностей (6.4), (6.5) використаємо базові номограми CO_2 та H_2O , а для комп'ютерних розрахунків використаємо залежності апроксимації (6.6) – (6.12). Вихід за температурні межі використання розрахункових виразів також не дає можливості для знаходження ефективного ступеня чорноти факела $\varepsilon_{\text{ф}}$. Тому для здійснення попереднього дослідження знехтуємо поправкою впливу пробісків сажі $\Delta\varepsilon_{\text{с}}$ на коефіцієнт теплового випромінювання газу.

Для газів дослідження визначимо та представимо температуру горіння для адіабатичних умов - $t_{\text{г}}$, число Воббе для нормальних умов – W , ступень чорноти триатомних газів $\varepsilon_{\text{CO}_2}$, $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}$ та загальну ε , величину теплопередачі випромінюванням – Q . Ефективну товщину шару що випромінює оберемо з конструктивних даних парового котла БГ-35, $S=3,458 \text{ м}$.

Згідно з залежністю (6.23) величина теплопередачі випромінюванням залежить від абсолютної температури та коефіцієнта випромінювання. При цьому сам коефіцієнт випромінювання залежить від складу газу та також самої температури. Згідно з номограмами випромінювання триатомних газів збільшення температури на ділянці теплопередачі випромінюванням буде призводити до зменшення величини ступеня чорноти триатомних газів. Отже, маємо складну залежність теплопередачі від двох факторів, коли треба визначати який саме внесок у формуванні величини теплопередачі буде давати коефіцієнт випромінювання, а який температура.

Попередньо розв'язати питання можна через порівняння величин теплопередачі газів дослідження при визначених температурах горіння. Виконаємо розрахунок для природних газів, сумішей та біогазів.

Таблиця 6.1 - Залежність теплопередачі випромінюванням від температури горіння

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						117
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Показник	Одиниця вимірювання	Генера-торний газ 1	Генера-торний газ 2	Генера-торний газ 3	Біогаз 1	Біогаз 2	Біогаз 3	Родовища Блківське	УКПНГ Розпашнівка	ВРГ Копилівської ГДПУ Ду150	УКП Опішня на Дельбао	$r_1 = 0,08$ (Біогаз)	Біометан №2	ВРГ Комишанської УКПГ (ВРГ Поліска)	Біометан №4	$r_1 = 0,24$ (Біогаз)	Біометан №5	Родовища Радченки
		CH ₄ =3 H ₂ =25 CO=25 N ₂ =37 CO ₂ =10	CH ₄ =2 H ₂ =17,5 CO=22,5 N ₂ =43,5 CO ₂ =14,5	CH ₄ =1 H ₂ =10 CO=20 N ₂ =50 CO ₂ =19	CH ₄ =70 H ₂ =3 N ₂ =1 CO ₂ =26	CH ₄ =57,5 H ₂ =1,5 N ₂ =3 CO ₂ =38	CH ₄ =45 N ₂ =5 CO ₂ =50	CH ₄ =91,8 C ₂ H ₆ =4,3 C ₃ H ₈ =1,74 C ₄ H ₁₀ =0,64 C ₄ H ₈ =0,29 N ₂ =1,1 CO ₂ =0,2	CH ₄ =93,26 C ₂ H ₆ =3,36 C ₃ H ₈ =0,77 C ₄ H ₁₀ =0,43 C ₄ H ₈ =0,46 N ₂ =1,59 CO ₂ =0,17	CH ₄ =90,58 C ₂ H ₆ =3,78 C ₃ H ₈ =1,21 C ₄ H ₁₀ =0,87 C ₄ H ₈ =0,48 N ₂ =3,33 CO ₂ =0,17	CH ₄ =91,29 C ₂ H ₆ =3,02 C ₃ H ₈ =0,87 C ₄ H ₁₀ =0,32 C ₄ H ₈ =0,4 N ₂ =0,52 CO ₂ =3,61	CH ₄ =90,4 C ₂ H ₆ =3,1 C ₃ H ₈ =0,72 C ₄ H ₁₀ =0,39 C ₄ H ₈ =0,4 H ₂ =0,12 N ₂ =1,7	CH ₄ =96 N ₂ =0,6 CO ₂ =3,4	CH ₄ =92,75 C ₂ H ₆ =1,84 C ₃ H ₈ =0,21 C ₄ H ₁₀ =0,07 C ₄ H ₈ =0,04 N ₂ =0,21 CO ₂ =4,88	CH ₄ =92 N ₂ =0,8 CO ₂ =7,2	CH ₄ =84,68 C ₂ H ₆ =2,56 C ₃ H ₈ =0,59 C ₄ H ₁₀ =0,33 C ₄ H ₈ =0,32 H ₂ =0,36 N ₂ =1,93	CH ₄ =90 N ₂ =0,9 CO ₂ =9,1	CH ₄ =86,3 C ₂ H ₆ =0,2 C ₃ H ₈ =0,15 C ₄ H ₁₀ =0,05 N ₂ =13,16 CO ₂ =0,17
$\alpha=1.1$		Генера-торні гази			Біогази			Природні гази та суміші Н					Природні гази та суміші І					
W _i	МДж/нм ³	7,82	5,80	4,01	28,49	21,56	15,66	49,17	48,38	47,59	46,05	45,67	44,84	44,36	41,66	40,62	40,15	39,94
t _г	С	1815	1674	1467	1883	1832	1757	1952	1950	1950	1944	1944	1939	1939	1931	1931	1927	1932
rCO ₂		0,160	0,190	0,230	0,115	0,136	0,167	0,090	0,089	0,089	0,092	0,091	0,090	0,092	0,093	0,096	0,095	0,086
rH ₂ O		0,131	0,105	0,069	0,170	0,165	0,157	0,170	0,171	0,170	0,171	0,171	0,174	0,172	0,173	0,170	0,173	0,172
eCO ₂		0,103	0,125	0,154	0,085	0,095	0,111	0,071	0,071	0,071	0,072	0,072	0,072	0,072	0,074	0,075	0,075	0,072
eH ₂ O		0,143	0,138	0,126	0,158	0,161	0,165	0,151	0,152	0,151	0,152	0,152	0,154	0,154	0,155	0,153	0,155	0,154
e		0,246	0,263	0,280	0,243	0,256	0,276	0,222	0,222	0,222	0,224	0,224	0,226	0,226	0,228	0,228	0,230	0,226
Q	кВт/м ²	238,4	192,9	131,3	268,2	257,2	239,1	277,4	277,4	276,7	276,8	276,5	276,6	276,3	275,4	274,7	274,8	272,1
Q*		0,860	0,695	0,473	0,967	0,927	0,862	1,000	1,000	0,998	0,998	0,997	0,997	0,996	0,993	0,990	0,991	0,981
ΔQ^*	%	-14,04%	-30,46%	-52,66%	-3,30%	-7,26%	-13,80%	0,00%	0,00%	-0,23%	-0,21%	-0,30%	-0,28%	-0,37%	-0,71%	-0,96%	-0,94%	-1,91%

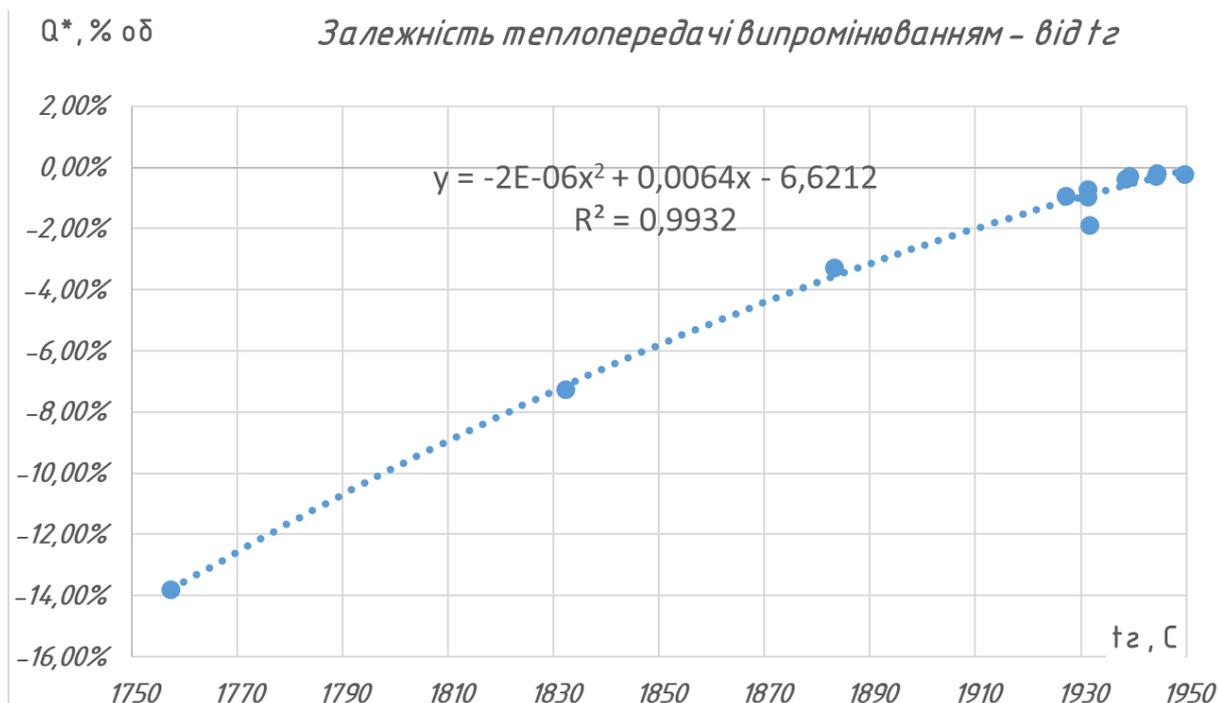


Рисунок 6.1 - Залежність теплопередачі випромінюванням від температури горіння

Отже, загальна тенденція вказує на зростання величини теплопередачі випромінюванням від температури, але при близьких температурах горіння газів величина щільності випромінювання, а отже і теплопередачі буде визначатися складом газу і його коефіцієнтом випромінювання - ϵ . Зниження температури горіння та відповідно теплопередачі буде визначатися наявністю баластних домішок. Зі складу природних газів найгірший випадок – газ родовища Радченки, бо баластна домішка не тільки знижує температуру горіння, але і не являється триатомним газом, що призведе до зниження величини випромінювання: -1,9% відносно базового газу родовища Розпашнівка. В цій групі біометан №5 має нижчу

температуру горіння, але збільшену концентрацію діоксиду вуглецю у димових газах і кращу величину теплопередачі в порівнянні з газом родовища Радченки. Біогази навпаки мають значний початковий рівень діоксиду вуглецю у своєму складі, що відображається на складі димових газів і відповідної концентрації діоксиду вуглецю, але це призводить до суттєвого зменшення температури горіння, що являє головну причину зменшення теплопередачі випромінюванням.

Розглянемо зв'язок між числом Воббе газу та температурою горіння при коефіцієнті надлишку повітря $\alpha=1.15$.

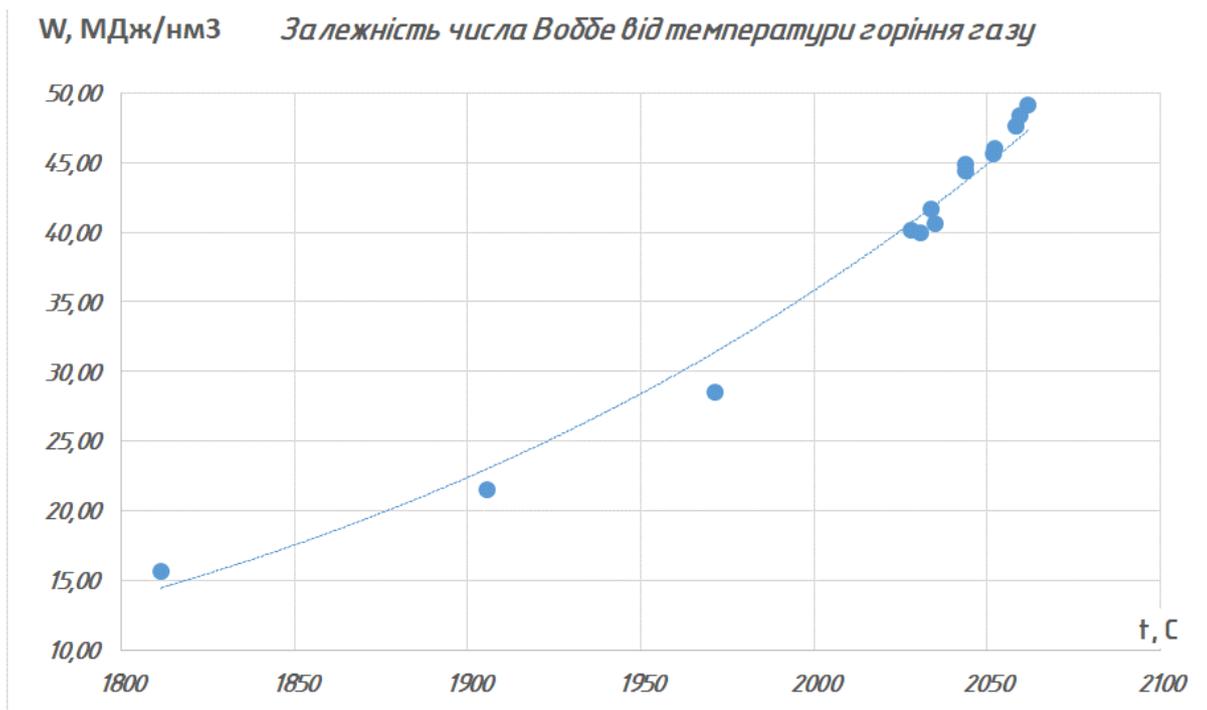


Рисунок 6.2 - Залежність числа Воббе від температури горіння ($\alpha=1.15$)

Якісний аналіз свідчить про кореляційний зв'язок цих величин. З огляду на те, що число Воббе є простим та розповсюдженим параметром характеристики паливного газу та основою найпростішого критерію взаємозаміни, то застосуємо саме його для подальших досліджень.

Розглянемо залежності величини теплопередачі випромінюванням від числа Воббе для трьох можливих ситуацій щодо взаємозаміни газів.

1. Знайдемо величину теплообміну випромінюванням для газів групи Н – природних, біометанів та сумішей зі штучним газом. Оцінено зміну величини теплопередачі відносно базового газу групи.

2. Знайдемо величину теплообміну для газів групи L – природного, біогазів та сумішей зі штучними газами. Оцінимо зміну величини відносно базового газу групи Н. Цей випадок модернізації котлового обладнання з заміною пальника, для оцінки наслідків застосування альтернативних газів на процес теплообміну.

3. Знайдемо величину теплообміну випромінюванням для штучних газів. Це варіант, коли в деякому базовому обладнанні встановлюється нестандартний спеціалізований пальник для штучних газів.

Виконаємо порівняння отриманих результатів з деяким умовним еталоном. Як еталон порівняння приймемо природний газ родовища Розпашнівка, з огляду на те, що газ взаємозамінний з еталонним газом групи Н згідно з числом Воббе. Деякі параметри отриманих результатів для газів дослідження представимо як в абсолютній формі, так і відносних одиницях – відносно показників обраного еталонного природного газу. Коefіцієнт надлишку повітря приймемо на мінімальному практичному рівні роботи котлового обладнання $\alpha = 1,1$. Результати розрахунків представимо у таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 - Розрахунок теплообміну випромінюванням для газів групи Н

Показник	Одиниця вимірювання	Родовища	УКПНГ	ВРГ	УКПГ	Біометан	ВРГ	
		Битківське	Розпашнівка	Копилівської ТДПУ Ду150	Опішня на Дельбао	№2	Комішанської УКПГ (ВРГ Попіака)	
		CH ₄ =91,8 C ₂ H ₆ =4,3 C ₃ H ₈ =1,74 C ₄ H ₁₀ =0,64 C ₅ H ₁₂ =0,29 N ₂ =1,1 CO ₂ =0,2	CH ₄ =93,26 C ₂ H ₆ =3,36 C ₃ H ₈ =0,77 C ₄ H ₁₀ =0,43 C ₅ H ₁₂ =0,42 N ₂ =1,59 CO ₂ =0,18	CH ₄ =90,58 C ₂ H ₆ =3,78 C ₃ H ₈ =1,21 C ₄ H ₁₀ =0,48 C ₅ H ₁₂ =0,46 N ₂ =3,33 CO ₂ =0,17	CH ₄ =91,29 C ₂ H ₆ =3,02 C ₃ H ₈ =0,87 C ₄ H ₁₀ =0,32 C ₅ H ₁₂ =0,36 N ₂ =0,52 CO ₂ =3,61	CH ₄ =90,4 C ₂ H ₆ =3,1 C ₃ H ₈ =0,72 C ₄ H ₁₀ =0,4 C ₅ H ₁₂ =0,39 N ₂ =0,12 N ₂ =1,7	CH ₄ =96 N ₂ =0,6 CO ₂ =3,4	CH ₄ =92,75 C ₂ H ₆ =1,84 C ₃ H ₈ =0,21 C ₄ H ₁₀ =0,07 C ₅ H ₁₂ =0,04 N ₂ =0,21 CO ₂ =4,88
W _i	МДж/нм ³	49,17	48,38	47,59	46,05	45,67	44,84	44,36
W _i *		1,02	1,00	0,98	0,95	0,94	0,93	0,92
t _г	С	1952	1950	1950	1944	1944	1939	1939
ε _{CO2}		0,071	0,071	0,071	0,072	0,072	0,072	0,073
ε _{H2O}		0,139	0,140	0,139	0,140	0,140	0,142	0,141
β		1,086	1,087	1,086	1,087	1,087	1,087	1,087
ε		0,222	0,222	0,222	0,224	0,224	0,226	0,226
ε*		0,997	1,000	0,999	1,008	1,008	1,017	1,018
Q	кВт/м ²	277,4	277,4	276,7	276,8	276,5	276,6	276,3
Q*		1,000	1,000	0,998	0,998	0,997	0,997	0,996
ΔQ*	%	0,00%	0,00%	-0,23%	-0,21%	-0,30%	-0,28%	-0,37%

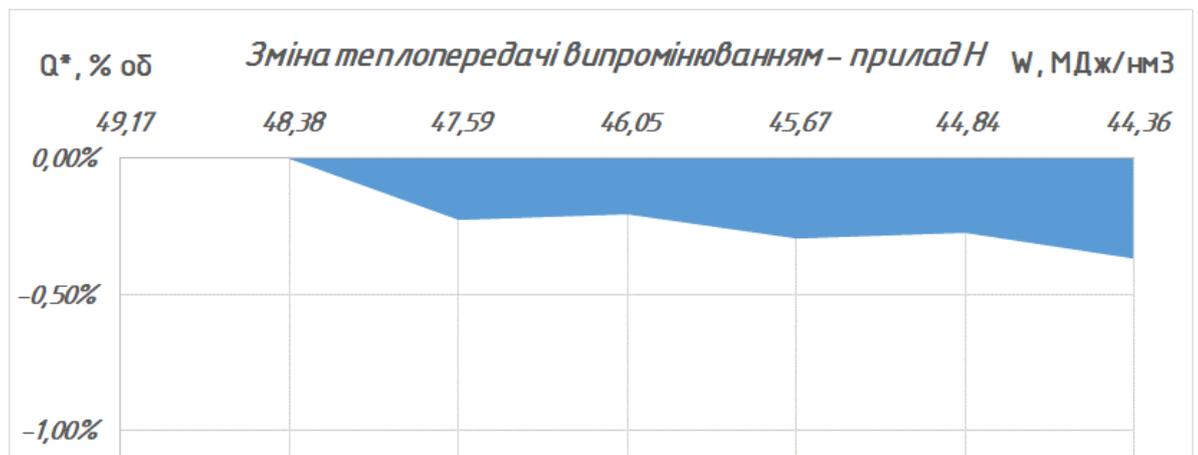


Рисунок 6.3 - Зміни в теплопередачі випромінюванням для газів групи Н

Отже, втрати теплоти в переліку газів дослідження можуть бути представленими залежними від числа Воббе і досягають величини 0,37% (ВРГ Попівка).

Таблиця 6.3 - Розрахунок теплообміну випромінюванням для газів групи L

Показник	Одиниця вимірювання	Біометан №4	г1 = 0,24 (біогаз)	Біометан №5	Родовище Радченки
		CH ₄ =92 N ₂ =0,8 CO ₂ =7,2	CH ₄ =84,68 C ₂ H ₆ =2,56 C ₃ H ₈ =0,59 C ₄ H ₁₀ =0,33 C ₃ H ₁₂ =0,32 H ₂ =0,36 N ₂ =1,93	CH ₄ =90 N ₂ =0,9 CO ₂ =9,1	CH ₄ =86,3 C ₂ H ₆ =0,2 C ₃ H ₈ =0,15 C ₄ H ₁₀ =0,05 N ₂ =13,16 CO ₂ =0,17
W _i	МДж/нм ³	41,66	40,62	40,15	39,94
W _i *		0,86	0,84	0,83	0,83
t _г	С	1931	1931	1927	1932
ε _{CO2}		0,074	0,075	0,075	0,072
ε _{H2O}		0,142	0,141	0,142	0,142
β		1,087	1,086	1,087	1,087
ε		0,228	0,228	0,230	0,226
ε*		1,028	1,025	1,033	1,015
Q	кВт/м ²	275,4	274,7	274,8	272,1
Q*		0,993	0,990	0,991	0,981
ΔQ*	%	-0,71%	-0,96%	-0,94%	-1,91%

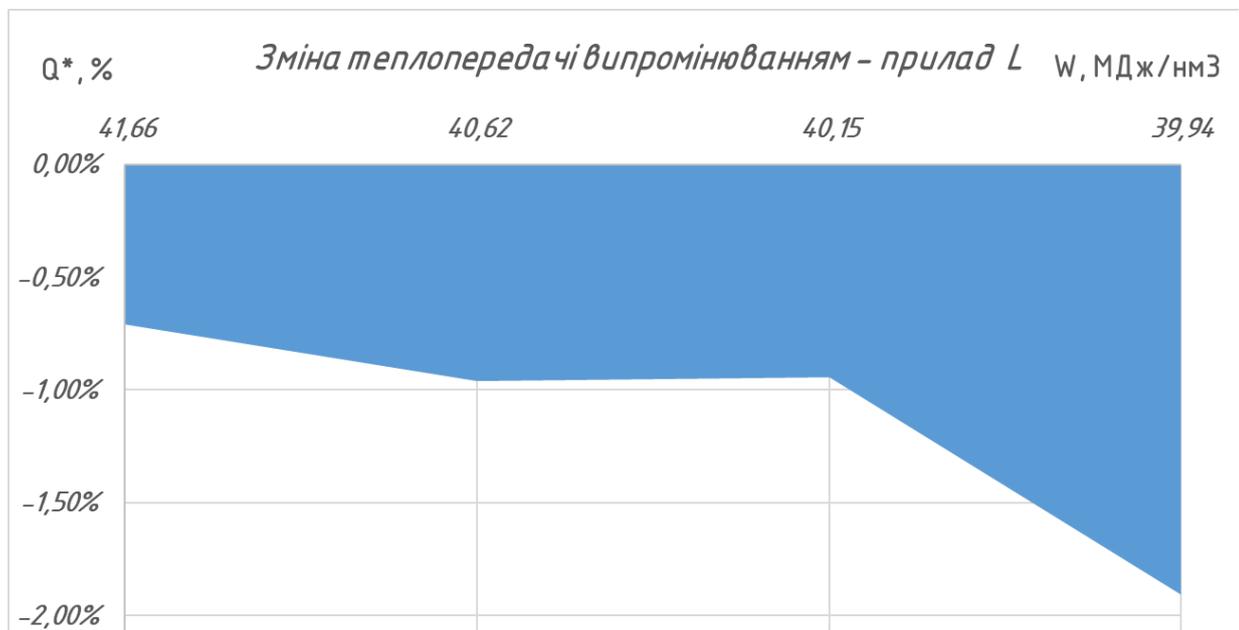


Рисунок 6.4 - Зміни в теплопередачі випромінюванням для газів групи L

Втрати теплоти при заміні паливника групи Н на паливник групи L для застосування сумішей та газів групи L можуть бути представленими залежними від числа Воббе і досягають величини 1,9% - природний газ родовища Радченки. Отже, при заміні паливника котла для спалювання сумішей буде відбуватися втрата теплоти внаслідок погіршення теплопередачі випромінюванням.

Таблиця 6.4 - Розрахунок теплообміну випромінюванням для штучних газів

Показник	Одиниця вимірювання	Біогаз 1	Біогаз 2	Біогаз 3	Генера-торний газ 1	Генера-торний газ 2	Генера-торний газ 3
		CH ₄ =70 H ₂ =3 N ₂ =1 CO ₂ =26	CH ₄ =57,5 H ₂ =1,5 N ₂ =3 CO ₂ =38	CH ₄ =45 N ₂ =5 CO ₂ =50	CH ₄ =3 H ₂ =25 CO=25 N ₂ =37 CO ₂ =10	CH ₄ =2 H ₂ =17,5 CO=22,5 N ₂ =43,5 CO ₂ =14,5	CH ₄ =1 H ₂ =10 CO=20 N ₂ =50 CO ₂ =19
W _i	МДж/нм ³	28,49	21,56	15,66	7,82	5,80	4,01
W _i *		0,59	0,45	0,32	0,16	0,12	0,08
t _r	С	1883	1832	1757	1815	1674	1467
ε _{CO2}		0,085	0,095	0,111	0,103	0,125	0,154
ε _{H2O}		0,146	0,148	0,152	0,133	0,130	0,120
β		1,087	1,086	1,083	1,074	1,065	1,050
ε		0,243	0,256	0,276	0,246	0,263	0,280
ε*		1,093	1,153	1,239	1,105	1,182	1,261
Q	кВт/м ²	268,2	257,2	239,1	238,4	192,9	131,3
Q*		0,967	0,927	0,862	0,860	0,695	0,473
ΔQ*	%	-3,30%	-7,26%	-13,80%	-14,04%	-30,46%	-52,66%

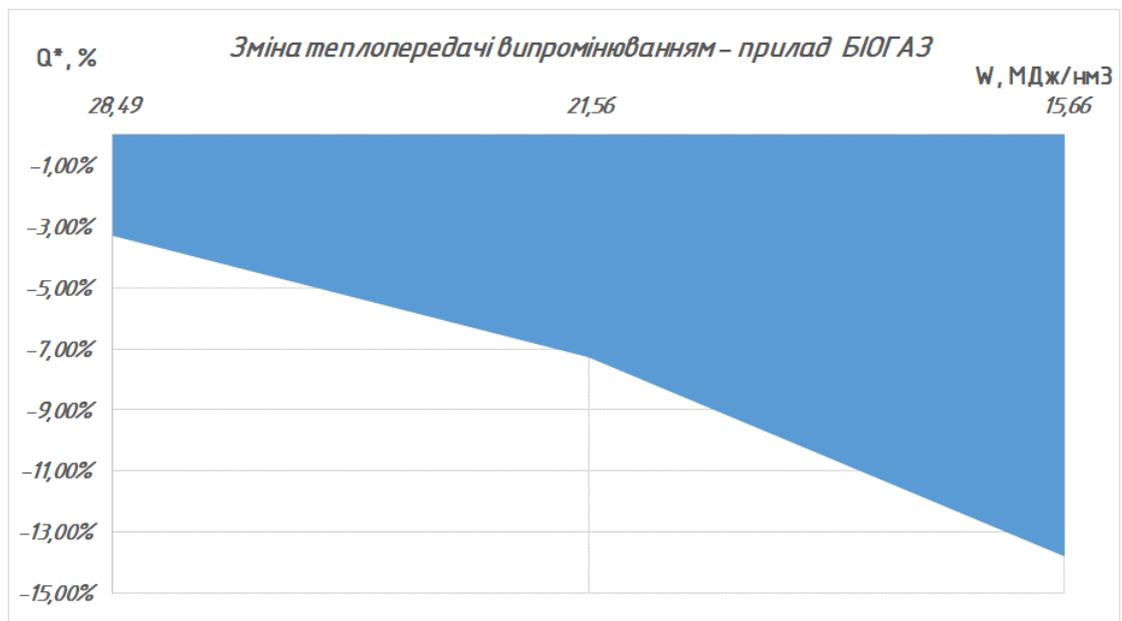


Рисунок 6.5 - Зміни в теплопередачі випромінюванням для біогазів

При створенні спеціального пальника для спалювання біогазів величина зміни теплопередачі випромінюванням буде значно зменшена (3,3 – 13,8%). Величина буде визначатися складом біогазу, може бути представлена залежністю від числа Воббе біогазу. З огляду на значну величину втрат можна зробити висновок про значне погіршення теплопередачі, а отже більш раціональний шлях – використання сумішей зі стандартним пальником групи L, або використання саме біометану.

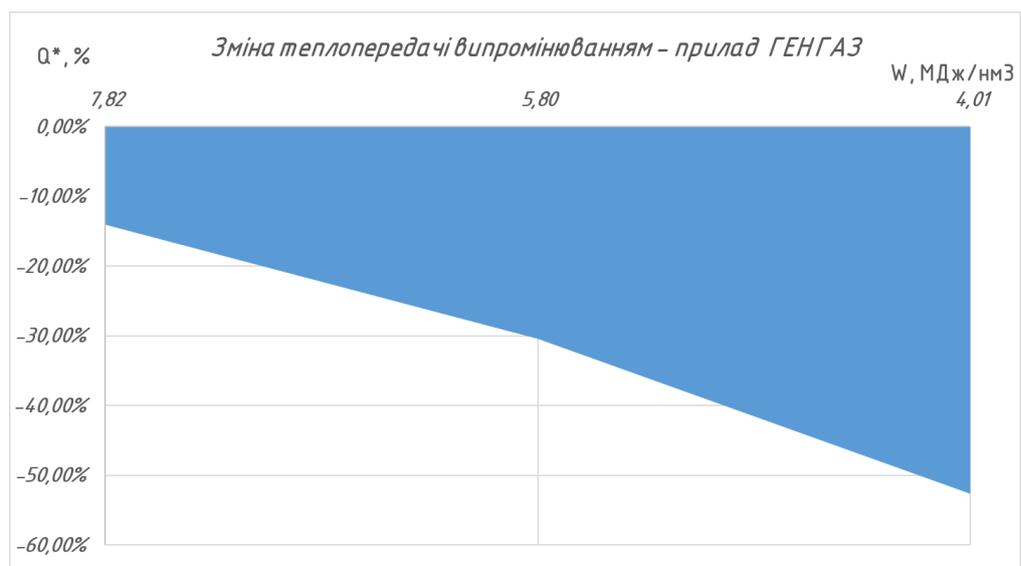


Рисунок 6.6 - Зміни в теплопередачі випромінюванням для генераторних газів

При створенні спеціального пальника для спалювання генераторного газу величина зміни теплопередачі випромінюванням буде значно зменшена на величину, що сягає 50%. Можна зробити висновок, що спалювання безпосередньо генераторного газу буде вимагати і створення відповідного енергетичного обладнання для забезпечення необхідного рівня теплопередачі.

Загальну тенденцію погіршення теплопередачі можна представити графічною залежністю.

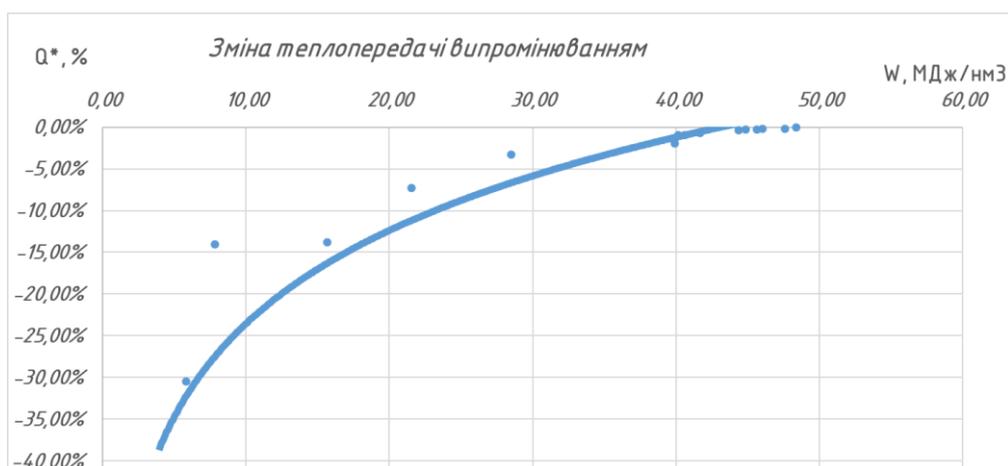


Рисунок 6.7 - Залежність зміни в теплопередачі випромінюванням від величини числа Воббе газу

Зробимо висновок. При використанні в газоспалювальному обладнанні альтернативних газів з меншою температурою горіння та із меншим числом Воббе буде відбуватися погіршення теплопередачі випромінюванням. Для випадку біогазів та генераторних газів розробки спеціалізованих пальників та заміна їх в котловому обладнанні не розв'язує проблему теплопередачі. Для таких газів потрібно застосовувати обладнання зі збільшеними поверхнями нагріву (в порівнянні з обладнанням для використання природних газів).

Слід зазначити, що ці висновки мають попередній характер, більш обґрунтовані висновки потребують використання розрахункових моделей роботи конкретного паливоспалювального обладнання.

6.4 Побудова уточненої розрахункової моделі теплопередачі випромінюванням

Перейдемо від розгляду фізики процесів теплопередачі до моделювання процесів в конкретному обладнанні. Візьмемо паровий котел типу БГ35, що широко використовується в галузі цукроваріння.

Паспортні робочі характеристики котла БГ35.

Номинальна паропроодуктивність – 35 т/год.

Робочий тиск у барабані котла $P_K = 44 \text{ кгс/см}^2$.

Робочий тиск на виході з пароперегрівача $P_{ПП} = 40 \text{ кгс/см}^2$

Температура перегрітої пари $t_{ПП} = 440 \text{ }^\circ\text{C}$

Температура поживної води $t_{ПВ} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$

Температура газів, що відходять $t_{УХ} = 140 \text{ }^\circ\text{C}$

Температура гарячого повітря $t_{ГП} = 190 \text{ }^\circ\text{C}$

Конструктивні розміри та характеристики камери згорання.

Загальна площа стін топкової камери $F_{ст} = 158,1 \text{ м}^2$.

Активний об'єм топкової камери $V_T = 151,88 \text{ м}^3$.

Ефективна товщина випромінювального шару: $(3,6V_T / F_{ст}) = 3,458 \text{ м}$.

Загальне середнє значення коефіцієнта теплової ефективності для камери згорання : 0,546.

Відносне положення максимуму температур факела у топці $X_T = 0,473$.

Параметр температурного поля згідно з висотою топки $M = 0,4454$.

Згідно з нормативним методом проектування [24] розрахунок теплообміну проводиться згідно з наступною залежністю:

$$\theta_T'' = \frac{T_T}{T_a} = \frac{B_0^{0,6}}{M \cdot \varepsilon_T^{0,6} + B_0^{0,6}}, \quad (6.24)$$

де T_T – абсолютна температура газів на виході з топки, К;

T_a – абсолютна температура газів, яка була б при адіабатичному згоранні палива, К;

ε_T – ступінь чорноти топки;

M – параметр температурного поля згідно з висотою топки;

B_0 – критерій Больцмана.

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						125
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Залежність використовується із застосуванням поступових наближень в розрахунку, тобто необхідно за деяким алгоритмом підбирати пошукову величину T_t для забезпечення рівності лівої та правої частини. Тому для реалізації застосуємо систему ітераційних обчислень Microsoft Excel.

Ступінь чорноти топки ε_t визначається за формулою:

$$\varepsilon_t = \frac{\varepsilon_\phi}{\varepsilon_\phi + (1 - \varepsilon_\phi) \cdot \psi_{cp}}, \quad (6.25)$$

де, ψ_{cp} – загальне середнє значення коефіцієнта теплової ефективності для камери згорання.

Параметр температурного поля M згідно з висотою топки [24]:

$$M = A - B \cdot X_t, \quad (6.26)$$

де, A і B дослідні коефіцієнти, значення яких набувають: $A = 0,54$; $B = 0,2$ (при спалюванні природного газу);

X_t – відносне положення максимуму температур факела у топці.

Згідно [24] критерій Больцмана визначається за формулою:

$$V_o = \frac{\varphi \cdot V_p \cdot (V_c)_{cp}}{4,9 \cdot 10^{-8} \cdot \psi_{cp} \cdot F_{ст}^T \cdot T_a^3}, \quad (6.27)$$

де $F_{ст}^T$ – загальна площа стін топки, m^2 ;

V_p – витрати палива, $m^3/год$;

φ – коефіцієнт збереження тепла;

$(V_c)_{cp}$ – середня сумарна тепломісткість продуктів згорання в діапазоні температур $T_t - T_a$, $ккал/(m^3 \cdot ^\circ C)$

Складаємо тепловий баланс для стану парового котла, що встановився:

$$100 = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6. \quad (6.28)$$

Величину втрат тепла q_2 знайдемо згідно з виразом:

$$q_2 = \frac{Q_2}{Q_p^p} \cdot 100 = \frac{(J_{вих} - \alpha \cdot J_{холпов}^0)}{Q_p^p}, \quad (6.29)$$

Q_p^p – калорійність палива, $ккал/нм^3$;

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						126
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$J_{\text{ВИХ}}$ - величина номінальної ентальпії відхідних газів, в розрахунковій моделі при температурі 140 °С;

$J_{\text{ХОЛПОВ}}^0$ - ентальпія вхідного повітря при температурі 30 °С.

Величина втрат з хімічним недопалом згідно з нормативним розрахунком [24] приймається на рівні – 0,5%. Величина втрат механічного недопалу для парового котла = 0. Втрату тепла через зовнішнє охолодження котла - q_5 при продуктивності 35 т знаходимо згідно [24]: $q_5=f(D)=f(35)=1.1\%$.

ККД парового котла бруто знаходиться за методом зворотного балансу:

$$\eta_{\text{ПК}} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6). \quad (6.30)$$

При розрахунку конвективних поверхонь нагрівання частку втрати тепла q_5 , що припадає на окремі газоходи, враховують запровадженням коефіцієнта збереження тепла φ :

$$\varphi = 1 - \frac{q_5}{q_5 + \eta_{\text{ПК}}}. \quad (6.31)$$

Витрата палива, що подається в топку, м³/год, розраховуємо за такою формулою:

$$B = \frac{Q_{\text{ПК}}}{Q_{\text{P}}^{\text{P}} \cdot \eta_{\text{ПК}}} \cdot 100 = \frac{D_{\text{K}}(i_{\text{ПП}} - i_{\text{ПВ}}) \cdot 1000}{Q_{\text{P}}^{\text{P}} \cdot \eta_{\text{ПК}}} \cdot 100, \quad (6.32)$$

де $Q_{\text{ПК}}$ – кількість теплоти, що корисно віддана в паровому котлі;
 $i_{\text{ПП}}$ - ентальпія перегрітої пари, при $P=40$ кгс/см² и $t_{\text{пп}}=440$ °С, $i_{\text{пп}}=789,8$ ккал/м³;

$i_{\text{ПВ}}$ - ентальпія поживної води, при тиску в барабані $P_6 = 1,08 \cdot 44 = 47,52$ кгс/см², температурі води 150°С, $i_{\text{ПВ}} = 151,1$ ккал/м³.

Визначаємо корисне тепловиділення в топці Q_{T} згідно з залежністю:

$$Q_{\text{T}} = Q_{\text{P}}^{\text{P}} \cdot \frac{100 - q_3 - q_4 - q_6}{100 - q_4} + Q_{\text{ПОВ}}, \quad (6.33)$$

де $Q_{\text{ПОВ}}$ - теплота що вноситься у топку з гарячим повітрям $Q_{\text{ГПОВ}}$ при температурі 190 °С (номінальний режим роботи) та холодним повітрям присосів - $Q_{\text{ХПОВ}}$ (прийmemo α присосу топки = 0,05).

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						127
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отже, можна зробити висновок про близькість отриманих результатів щодо величини зміни тепловіддачі випромінюванням в порівнянні із результатами попереднього розрахунку. Розбіжність результатів представимо графічною залежністю.

Таким чином перший метод оцінки може застосовуватися при орієнтовній оцінці зміни теплопередачі випромінюванням, крім абсолютних значень самої величини теплопередачі. Бо ця величина розраховується виключно на температуру факела.

Побудуємо залежність зміни теплоти теплопередачі випромінюванням від зміни числа Воббе.

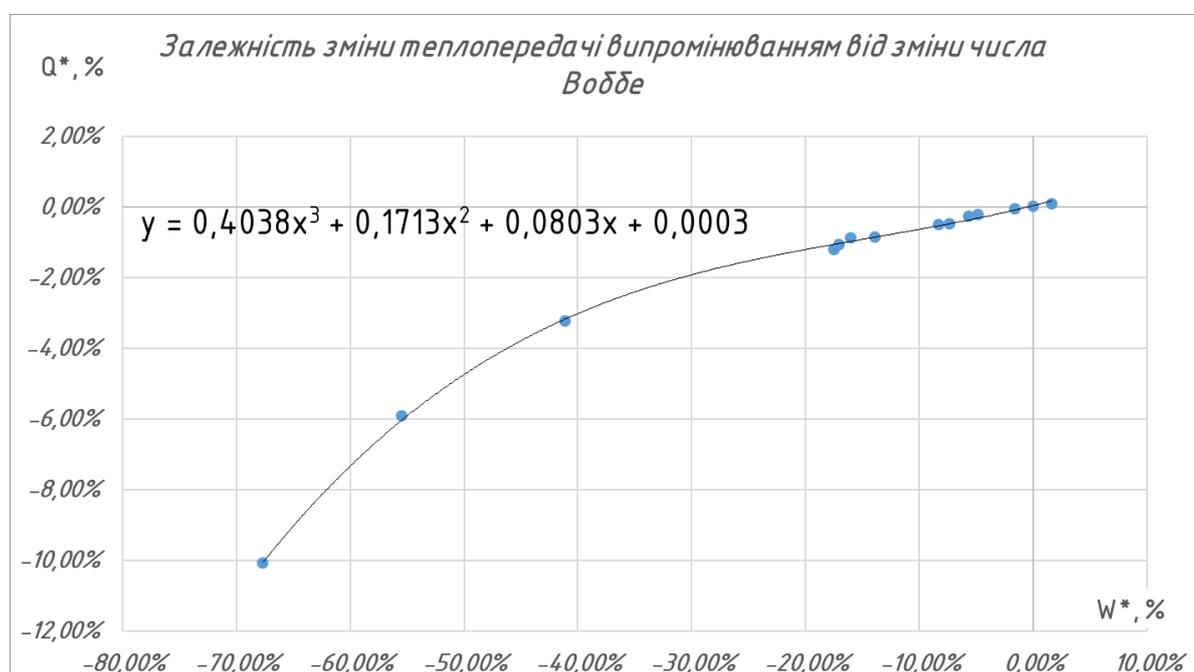


Рисунок 6.9 - Залежність зміни теплоти теплопередачі випромінюванням від зміни числа Воббе газу замітника

Отже зробимо висновок, що в рамках використання газів однієї групи (наприклад групи Н) зміна передачі теплоти випромінюванням буде знаходитися в межах 0,5-0,6 %. Зменшення числа Воббе газу замітника на величину 5% приведе до втрат теплоти лише на рівні 0,26% (при умові підтримки сталості теплової потужності устаткування). При застосуванні інших паливників для переходу на альтернативний газ або застосуванні суміші з меншим числом Воббе буде відбуватися подальше зменшення величини теплопередачі випромінюванням, а

отже будуть збільшуватися втрати теплоти. Величина цих втрат може бути оцінена через оцінку зміни числа Воббе. Більш суттєві величини втрат будуть відбуватися при модернізації пальника з переходом на менш калорійні гази та суміші іншої групи.

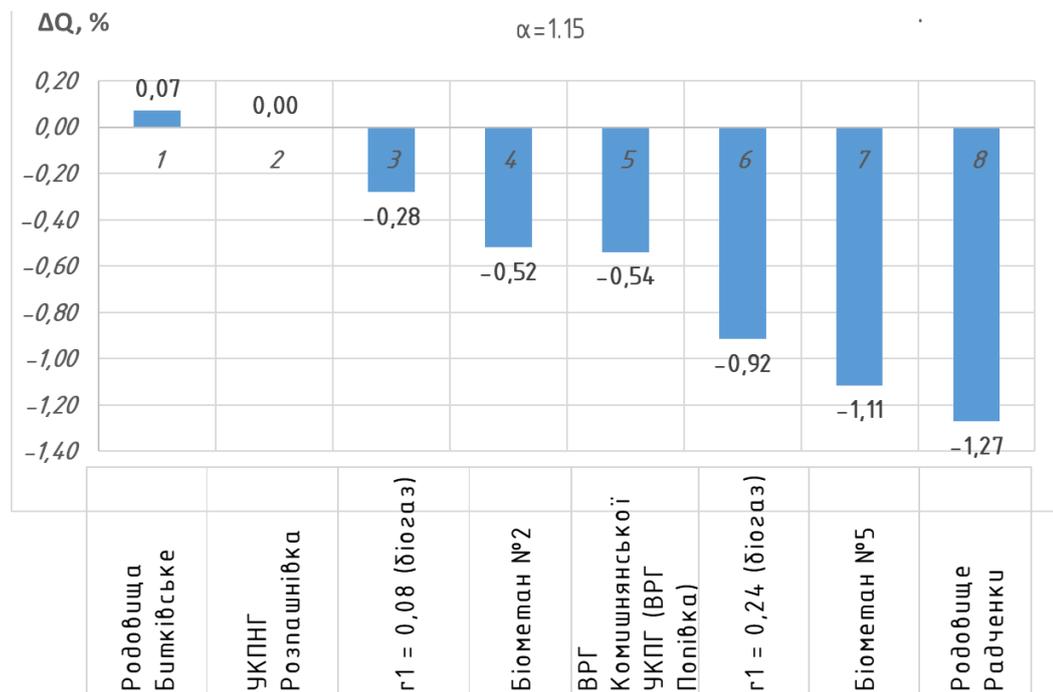


Рисунок 6.10 – Зміна теплопередачі випромінюванням – топка БГ-35

Так спалювання газу родовища Радченки (групи L) на котлі БГ-35 призведе до втрати 1,3% теплоти. Застосування спеціалізованих пальників спалювання біогазів в устаткуванні для спалювання природних газів ще збільшить теплові втрати. Наприклад, застосування біогазу середнього складу на спеціалізованому пальнику призведе до втрат на рівні майже 6% теплоти, що треба враховувати при економічному обґрунтуванні такого переходу. Так, орієнтовні економічні втрати при переході роботи котла БГ-35 з природного газу на біогаз з величиною споживання біогазу на рівні 3945 нм³/год при вартості біогазу 9 грн/нм³ (вартість пропорційна умісту метану) складуть: 0,06·9грн·3945 нм³ = 2130 грн/год, відповідно - 51 127 грн/добу.

7 ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОГО ЕФЕКТУ ПРИ ЗАМІНІ ДИФУЗІЙНОГО ПАЛЬНИКА КОТЛА БГ-35

7.1 Аналіз досвіду використання альтернативного палива на ТЕЦ

Глобинського цукрового заводу

Глобинський цукровий завод входить до складу агропромислового холдингу "Астарта-Київ" [25]. Станом на лютий 2017 року завод входив до числа восьми найбільших цукрових заводів на території України. У 2017 році завод переробив понад 380 тис. тонн буряків, у тому числі виробив 57 тис. тонн цукру. У 2014 році завод провів модернізацію обладнання ТЕЦ з можливістю використання на одному з котлів біогазу від підприємства холдингу ТОВ «Глобинський біоенергетичний комплекс». Так, у 2014 році Глобинський біоенергетичний комплекс ввів в експлуатацію один з найбільших в Україні біоенергетичних комплексів з виробничою потужністю понад 60 млн м³ біогазу на рік. Сировиною для вироблення біогазу є побічні продукти цукрового виробництва (сирого жому) та органічні відходи сільськогосподарського виробництва. Біогаз є альтернативним заміником природного газу для соєпереробного та цукрового заводів агропромхолдингу. Завод оснащений інноваційним обладнанням провідних світових виробників [26].

Глобинський біоенергетичний комплекс реалізує вироблений біогаз на підприємствах холдингу: Глобинському цукровому заводі та Глобинському переробному заводі. Але спалювання біогазу вимагало проведення модернізації газоспалювального обладнання, бо пальники природного газу не можна було застосовувати для спалювання цього виду альтернативного палива.

Так, в котельні ТЕЦ Глобинського цукрового заводу встановлено три парових котли типу БГМ-35М номінальною паропроодуктивністю 40т/год пари та теплопродуктивністю 50МВт кожний, один з котлів є резервним. Для переходу на використання біогазу був розроблений проект модернізації. Проектом передбачалась заміна на кожному котлові газових пальників (4шт.) теплопродуктивністю по 12,5МВт кожний на пальники типу МДГГ-2000П-СГ-2П (2шт.) теплопродуктивністю по 25МВт кожний. Заміна пальників не передбачала

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						131
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

змін в чинних системах регулювання, захисту, блокування і сигналізації котла. Після модернізації загальне компонування обладнання котельні залишилася без змін. Максимальна витрата газу на один котел становить 3350 м³/год. Споживання природного газу після модернізації не перевищувало споживання до реконструкції, тому внесення змін в чинну схему вводу, обліку та розподілення газу іншим споживачам котельні не передбачалось.

Пальники МДГГ - це пальники прямотруменевого типу, в яких використана мікродифузійна технологія спалювання газоподібного палива. Згідно з даними розробника важливою особливістю пальників типу МДГГ є можливість автоматизованого режиму змішування і горіння на всьому діапазоні навантажень. Але треба відмітити, що основна мета створення пальника МДГГ - спалювання газів самого широко спектру та рівнів подачі. При цьому пальник не вимогливий до забезпечення якості процесу горіння і не вимагає забезпечення взаємозаміни газів. Але така універсальність відбувається ціною значного погіршення якості горіння, негативного впливу полум'я на поверхні нагрівання котла. При цьому пальник може бути встановлений тільки на котлах зі значними довжинами топок, що притаманно певному ряду котлів радянського виробництва. Як показує досвід використання, полум'я потрапляє і на конвертині поверхні нагрівання. Пальник МДГГ має проблеми при використанні в сучасному енергоефективному котловому обладнанні. Принцип його роботи кардинально відрізняється від сучасних енергоефективних розробок згідно з стандартом EN 437. Також для роботи пальника вимагається підвищена величина коефіцієнта надлишку повітря, що лежить в межах 1,2-1,4.

7.2 Аналіз напрямків модернізація котлового обладнання

З огляду результати проведених досліджень енергетично оптимальним режимом роботи котлів БГ-35 буде режим використання систем спалювання сумішей на стандартному пальнику групи L. Як було визначено максимальна можлива концентрація біогазу середнього складу, що відповідає складу біогазу Глобинського біоенергетичного комплексу, буде становити - 0,24. Як було визначено з моделювання роботи котла БГ-35 (Таблиця 6.5) номінальна подача

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						132
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

газової суміші на котел буде знаходитися на рівні 2448 нм³/год. Оптимальним режимом роботи буде забезпечення системою автоматики рівномірного розподілу біогазу між двома робочими котлами. При цьому максимальна можлива величина використання біогазу підприємством складе $0,24 \cdot 2448 \text{ нм}^3/\text{год} \cdot 2 = 1175 \text{ нм}^3/\text{год}$. Але такий підхід буде вимагати проведення модернізації котлового обладнання з заміною пальників, впровадження системи утворення сумішей та модернізацію системи автоматичного управління процесом. Як вказують результати розрахунків система буде мати обмеження щодо максимальної величини використання біогазу, а також виникне потреба додаткових заходів щодо контролю над процесом горіння. Збільшення необхідної величини споживання біогазу буде вимагати вже розробки спеціального пальника під необхідну величину такого споживання.

7.3 Розрахунок економічного ефекту при заміні пальника

Оцінимо економічний ефект від впровадження системи спалювання сумішей. Розрахуємо величину втрат теплоти при спалюванні 1175 нм³ біогазу за годину в складі природного газу на пальнику дифузійного типу при коефіцієнту надлишку повітря на рівні 1,3 (на пальнику). Оцінимо економію палива при переході на дугтьовий пальник з необхідним коефіцієнтом надлишку повітря на рівні 1,15 (на пальнику).

Так, для номінального режиму роботи котла необхідно 2186 нм³/год газу (В ном) родовища Розпашнівка з нижньою теплотою згорання Нпг на рівні 37,52 МДж/нм³. Розглянемо суміш, що утворюється з огляду на величину номінальної подачі біогазу на рівні 1175 нм³/год з нижньою теплотою згорання Нбіогаз = 20,793 МДж/нм³ та при умові максимальної можливої подачі газового палива в котел Вмакс на рівні 3300 нм³/год.

Розрахуємо необхідну величину концентрації біогазу в суміші з рівняння:

$$V_{\text{макс}} \cdot (r_1 \cdot N_{\text{біогаз}} + (1-r_1) \cdot N_{\text{пг}}) = V_{\text{ном}} \cdot N_{\text{пг}} \quad (7.1)$$

$$r_1 = \frac{N_{\text{пг}} \left(\frac{V_{\text{н}}}{V_{\text{макс}}} - 1 \right)}{N_{\text{біогаз}} - N_{\text{пг}}} \quad (7.2)$$

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						133
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$r_1 = \frac{37,52 \left(\frac{2186}{3300} - 1 \right)}{20,793 - 37,52} = 0,757.$$

Отримаємо склад газової суміші при концентрації біометану усередненого складу = 0,757.

Склад суміші: $\text{CH}_4 = 66,19$; $\text{C}_2\text{H}_6 = 0,82$; $\text{C}_3\text{H}_8 = 0,19$; $\text{C}_4\text{H}_{10} = 0,11$; $\text{C}_5\text{H}_{12} = 0,11$; $\text{H}_2 = 1,14$; $\text{N}_2 = 2,66$; $\text{CO}_2 = 28,82$.

Проведемо моделювання роботи топки. Результати представимо у таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 - Втрати теплоті дифузійного пальника відносно пальника дуттьового типу групи L

Топка котла БГ35, - 35т/год P=40кгс/см2 t=440С		$r_1 = 0,757$ (біогаз)	$r_1 = 0,24$ (біогаз)
	Од вимір	$\text{CH}_4=66,19$ $\text{C}_2\text{H}_6=0,82$ $\text{C}_3\text{H}_8=0,19$ $\text{C}_4\text{H}_{10}=0,11$ $\text{C}_5\text{H}_{12}=0,11$ $\text{H}_2=1,14$ $\text{N}_2=2,66$	$\text{CH}_4=84,68$ $\text{C}_2\text{H}_6=2,56$ $\text{C}_3\text{H}_8=0,59$ $\text{C}_4\text{H}_{10}=0,33$ $\text{C}_5\text{H}_{12}=0,32$ $\text{H}_2=0,36$ $\text{N}_2=1,93$
α		1,35	1,2
Q _T	кВт/м3	69,68	80,16
Q*	%	-13,08%	0,00%
V	нм3/год	3300	2448

Таким чином використання дифузійного пальника з витратою біогазу на рівні 1175 нм³/год, з концентрацією в суміші на рівні 0,757 та подачею суміші на рівні 3300 нм³/год буде приводити до погіршення теплопередачі відносно випадку використання двох пальників групи L, що працюють на біогазовій суміші з $r_1=0,24$ на рівні 13,1%. Така значна величина зміни теплопередачі обумовлена з однієї сторони складом палива з негативним впливом баластних домішок на температуру горіння, з іншої сторони - впливом надмірної кількості повітря, як на спроможність випромінювання димових газів, так і на температуру горіння, що також додатково призводить до падіння величини теплопередачі випромінюванням.

Розрахуємо орієнтовну величину економії палива при відмові від дифузійного пальника на протязі сезону цукроваріння, що складає для Глобинського цукрового заводу орієнтовно 100 діб на рік. Вартість кубометра

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						134
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

природного газу приймемо на рівні 15,8 грн/нм³. Вартість біогазу усередненого складу – 9 грн/ нм³.

Тоді вартість суміші складає:

$$0,24 \cdot 9 \text{ грн/ нм}^3 + 0,76 \cdot 15,8 \text{ грн/ нм}^3 = 14,17 \text{ грн/нм}^3.$$

Годинна економія палива: $0,131 \cdot 14,17 \text{ грн/нм}^3 \cdot 2448 \text{ нм}^3/\text{год} = 4543,5 \text{ грн/год}$,

Сезонна економія: $4543,5 \text{ грн/год} \cdot 24 \cdot 100 = 10\,904\,418 \text{ грн/рік}$.

Термін окупності знаходиться як відношення капітальних втрат на реалізацію проекту до величини річної (сезонної) економії. Капітальні затрати залежать своєю чергою від вартості реалізації проекту, що складається з розробки проекту модернізації, проектів обладнання з подачі або змішування газів, а також його реалізації з впровадженням нової системи АСУТП. Найбільш привабливий варіант для інвестиційного проекту – можливість окупності капітальних втрат упродовж одного сезону роботи цукрового заводу з величиною капітальних затрат на реалізацію проекту на рівні 10,9 млн грн.

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						135
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВОК

Актуальність магістерської роботи була обґрунтована оглядом наукового та інженерного напрямку пошуку розв'язків проблеми взаємозамінності паливних газів. Аналіз літературних джерел вказав на актуальність пошуку розв'язання науково-технічної проблеми. Були обрані варіації газів, що використовуються в комунально-побутовій і промисловій теплоенергетиці: природні гази різних родовищ України, варіації природних газів Полтавського регіону, біогазу, біометану та генераторного газу.

Під час виконання роботи було вивчено особливості стандарту Європейських вимог ДСТУ ГОСТ EN 437:2014 при його застосуванні в питанні використання природних газів України. Обрані групи газів були досліджені на можливість їх взаємозаміни у сферах комунально-побутової й промислової теплоенергетики. Для цього були застосовані методи оцінки фізико-хімічних показників, порівняння чисел Воббе, а також розширених критеріїв взаємозаміни на основі індексів взаємозаміни. Був вивчений та реалізований відповідний аналітичний апарат визначення взаємозаміни. При реалізації цього апарату була використана система граничних газів стандарту EN 437. Апарат дозволив розв'язати питання підбору необхідного газоспалювального обладнання згідно зі стандартом EN 437 для обраних груп газів дослідження. Також була проведена оцінка наслідків застосування невідповідного обладнання. На основі аналітичного апарату взаємозаміни були обґрунтовані склади сумішей невзаємозамінних газів для можливості їх використання на стандартних пальниках. Запропоновано технічне рішення у вигляді схем змішування або у застосуванні спеціалізованого пальника.

Була проведена оцінка зміни теплопередачі в газоспалювальному обладнанні при застосуванні альтернативних газів. Була побудована розрахункова модель топки котла БГ-35 та проведено дослідження щодо використання альтернативних газів. Був оцінений економічний ефект при відмові від дифузійного пальника з переходом на запропоновану в роботі систему спалювання біогазу у суміші.

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						136
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Hadhami, BDIoui., H., Touati., Maher, BEN, CHIEKH., A., López, Agüera., Oumaima, BEN, AMOR., Ghaleb, Ennine., Thomas, Nietsch. (2023). Feasibility Study on Hydrogen Blending into Tunisian Natural Gas Distributing System. Available from: 10.20944/preprints202312.0662.v1
<https://www.preprints.org/manuscript/202312.0662/v1>

2. Колієнко А.Г. Взаємозамінність горючих газів при використанні водню / А.Г. Колієнко // Подолання екологічних ризиків та загроз для довкілля в умовах надзвичайних ситуацій – 2022 : кол. моногр. / Нац. ун–т ім. Юрія Кондратюка, НУ «Львівська політехніка». – Дніпро : Середняк Т. К., 2022. – С. 585–600

3. ГОСТ 5542-87 «Газы горючие природные для промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия».

4. 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>.

5. 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.

6. Колієнко А.Г. Про деякі проблеми спалювання альтернативних горючих газів // Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Збірник наукових праць XVI міжнародної науково-практичної конференції «Академічна й університетська наука: результати та перспективи». С. 283-285 <https://reposit.nupp.edu.ua/bitstream/PolNTU/14292/1/13.pdf>

7. Alexander Shkarovskiy, Anatolii Koliienko, Vitalii Turchenko. Interchangeability and standardization of the parameters of combustible gases when using hydrogen // March 2022 Architecture and Engineering 7(1):33-45 DOI:10.23968/2500-0055-2022-7-1-33-45

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						137
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

8. David Serrato, Juan Zapata-Mina, Álvaro Restrepo, Jorge Torres. Assessment of liquefied natural gas (LNG) regasified through gas interchangeability in energy consumption sectors // Energy Reports 7 (2021) 2526–2533.

9. Yan Zhao, Vince McDonell, Scott Samuelsen. Residential Fuel Transition and Fuel Interchangeability in Current Self-Aspirating Combustion Applications: Historical Development and Future Expectations // Progress in Power-to-Gas Energy Systems // Energies 2022, 15, 3547

10. Stanislav Honus, Shogo Kumagai, Toshiaki Yoshioka. Replacing conventional fuels in USA, Europe, and UK with plastic pyrolysis gases – Part II: Multi-index interchangeability methods // Energy Conversion and Management 126 (2016) 1128–1145

11. Zhou Yu, Lin Mandi. Study on the interchangeability between low calorific value coalbed methane blended with hydrogen, dimethyl ether and natural gas // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, June 2021 // doi:10.1088/1755-1315/766/1/012041

12. Flórez-Orrego DA. Métodos para el estudio de la intercambiabilidad de una mezcla de Gas Natural y Gas Natural-Syngas en quemadores de premezcla de regimen laminar: Un artículo de revisión; 2009. 34 p. DOI: 10.13140/RG.2.2.32284.03202.

13. Elmer R. Weaver. Formulas and Graphs for Representing the Interchangeability of Fuel Gases // Journal of Research of the National Bureau of Standards, Vol. 46, No.3, March 1951.

14. Природні гази: класифікація, властивості та фізико-хімічні параметри. Лекційний матеріал геологічного факультету Львівський національного університету ім. Івана Франка URL: https://geology.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2022/03/Lektsiia_11-13.pdf (дата звернення: 20.09.2024)

15. Коваленко В.Л., Кузнецова Е.В., Кузнецов В.В. Особливості впровадження біогазових технологій в умовах промислових підприємств металургійної галузі // Теорія і практика металургії, №5, 2019 <https://doi.org/10.34185/tpm.5.2019.06>

16. Георгій Гелетуша, Петро Кучерук, Юрій Матвєєв. Перспективи виробництва біометану в Україні // Аналітична записка UABIO № 29, 2022.

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						138
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

17. ЗАКОН УКРАЇНИ «Про внесення змін до деяких законів України щодо розвитку виробництва біометану» // Відомості Верховної Ради (ВВР), 2021, № 52, ст.431

18. Перший український біометан почав надходити в газотранспортну систему України. URL: <https://www.agronom.com.ua/pershyj-ukrayinskyj-biometan-pochav-nadhodyty-v-gazotransportnu-systemu-ukrayiny/> (дата звернення: 30.10.2024)

19. Pengfei Duan, Chaokui Qin, Zhiguang Chen. Experimental Study of the Influence of Natural Gas Constituents on CO Emission from Chinese Gas Cooker // October 2019, Energies 12(20):3997 DOI:10.3390/en12203997

20. Колієнко А.Г. Конспект лекцій з курсу «Паливо і теорія горіння» для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика» / А.Г. Колієнко. – Полтава : Нац. ун-т ім. Юрія Кондратюка, 2022. – 118 с.
<https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/11700>

21. Чернецька І.В. Моделювання роботи рекуператора в теплотехнічній системі біогазового комплексу / І.В. Чернецька, В.О. Панченко // Тези 76-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету (Полтава, 14 травня – 23 травня 2024 р.). – Полтава : Нац. ун-т ім. Юрія Кондратюка, 2024. – Т. 2. – С. 242–244.

22. Клименко А.В., Зоріна В.М. Теплоенергетика та теплотехніка // К. 2001, 561 С.

23. Словіковський П.А. Математичне моделювання теплової роботи металевого трубчастого рекуператора (перевірочний метод) // П.А. Словіковський, Н. В. Сліпченко // Математичне моделювання. – 2008. –№1 (18). – С. 43–47.

24. Кузнєцова. Н.В. Тепловий розрахунок котельних агрегатів. (Нормативний метод) // Київ, 1973, 296с.

25. Глобинський цукровий завод. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Глобинський_цукровий_завод (дата звернення: 20.09.2024)

26. Глобинський біоенергетичний комплекс. URL: <https://bio-energy.astartaholding.com/> (дата звернення: 20.09.2024).

					601-НТ-11393643-МР	Арк.
						139
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А

Максимальні значення нормальної швидкості поширення полум'я в газоповітряних сумішах при $t = 20^{\circ}\text{C}$ и $p = 101325 \text{ Па}$

Газ	Уміст газу у газоповітряній суміші, % об.		Максимальна нормальна швидкість розповсюдження полум'я, м/с	
	Стехиометрична суміш	Суміш з максимальною швидкістю поширення полум'я	Для стехіометричної суміші	Для суміші з максимальною швидкістю поширення полум'я
Водень	29,5	42,0	1,6	2,67
Оксид Вуглецю	29,5	43,0	0,3	0,42
Метан	9,5	10,5	0,28	0,37
Етан	5,68	6,3	0,32	0,40
Пропан	4,04	4,3	0,31	0,38
<i>n</i> -бутан	3,14	3,3	0,30	0,37
Етилен	6,56	7,0	0,50	0,63
Пропілен	4,47	4,8	0,37	0,44
Бутилен	3,38	3,7	0,38	0,43
Ацетилен	7,75	10,0	1,0	1,35

Ступені дисоціації двоокисі вуглецю та водяної пари

Ступінь дисоціації двоокису вуглецю α , %

t, °C	Парціальний тиск двоокису вуглецю, атм														
	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45
1500	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
1600	1,8	1,7	1,6	1,55	1,5	1,45	1,4	1,35	1,3	1,3	1,2	1,1	1,0	0,95	0,9
1700	3,3	3,1	3,0	2,9	2,8	2,6	2,5	2,4	2,3	2,2	2,0	1,9	1,8	1,75	1,7
1800	5,5	5,2	5,0	4,8	4,6	4,4	4,2	4,0	3,8	3,7	3,5	3,3	3,1	3,0	2,9
1900	8,9	8,5	8,1	7,8	7,6	7,2	6,8	6,5	6,3	6,1	5,6	5,3	5,1	4,9	4,7
2000	14,6	13,9	13,4	12,9	12,5	11,8	11,2	10,8	10,4	10,0	9,4	8,8	8,4	8,0	7,7
2100	21,3	20,3	19,6	18,9	18,3	17,3	16,6	15,9	15,3	14,9	13,9	13,1	12,5	12,0	11,5
2200	31,5	30,3	29,2	28,3	27,5	26,1	25,0	24,1	23,3	22,6	21,2	20,1	19,2	18,5	17,9
2300	40,7	39,2	37,9	36,9	35,9	34,3	32,9	31,8	30,9	30,0	28,2	26,9	25,7	24,8	24,0
2400	51,8	50,2	48,8	47,6	46,5	44,6	43,1	41,8	40,6	39,6	37,5	35,8	34,5	33,3	32,3
2500	62,2	60,6	59,3	58,0	56,9	55,0	53,4	52,0	50,7	49,7	47,3	45,4	43,9	42,6	41,4
2600	71,6	70,2	68,9	67,8	66,7	64,9	63,4	62,0	60,8	59,7	57,4	55,5	53,8	52,4	51,2
2700	79,8	78,6	77,6	76,6	75,7	74,1	72,8	71,6	70,5	69,4	67,3	65,5	63,9	62,6	61,3
2800	86,1	85,2	84,4	83,7	83,0	81,7	80,6	79,6	78,7	77,9	76,1	74,5	73,2	71,9	70,8
2900	90,6	90,0	89,4	88,8	88,3	87,4	86,5	85,8	85,1	84,5	83,0	81,8	80,7	79,7	78,8
3000	93,9	93,5	93,1	92,7	92,3	91,7	91,1	90,6	90,1	89,6	88,5	87,6	86,8	86,0	85,4

Ступінь дисоціації водяної пари β , %

t, °C	Парціальний тиск двоокису вуглецю, атм														
	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45
1600	0,75	0,70	0,65	0,63	0,60	0,58	0,56	0,54	0,52	0,50	0,48	0,46	0,44	0,42	0,40
1700	1,27	1,20	1,16	1,12	1,08	1,02	0,95	0,90	0,85	0,80	0,76	0,73	0,70	0,67	0,64
1800	2,10	2,00	1,90	1,85	1,80	1,70	1,60	1,53	1,46	1,40	1,30	1,25	1,20	1,15	1,10
1900	3,60	3,40	3,25	3,10	3,00	2,85	2,70	2,60	2,50	2,40	2,20	2,10	2,00	1,90	1,80
2000	5,05	4,80	4,60	4,45	4,30	4,00	3,80	3,55	3,50	3,40	3,15	2,95	2,80	2,65	2,57
2100	7,50	7,10	6,80	6,55	6,35	6,00	5,70	5,45	5,25	5,10	4,80	4,55	4,30	4,10	3,90
2200	10,8	10,3	9,90	9,60	9,30	8,80	8,35	7,95	7,65	7,40	6,90	6,50	6,25	5,90	5,65
2300	15,0	14,3	13,7	13,3	12,9	12,2	11,6	11,1	10,7	10,4	9,6	9,1	8,7	8,4	8,0
2400	20,0	16,1	18,4	17,7	17,2	16,3	15,6	15,0	14,4	13,9	13,0	12,2	11,7	11,2	10,8
2500	25,6	24,5	23,5	22,7	22,1	20,9	20,0	19,3	18,6	18,0	16,8	15,9	15,2	14,6	14,1
2600	33,5	32,1	31,0	30,1	29,2	27,8	26,7	25,7	24,8	24,1	22,6	21,5	20,5	19,7	19,1
2700	40,7	36,2	37,9	36,9	35,9	34,2	33,0	31,8	30,8	29,9	28,2	26,8	25,7	24,8	24,0
2800	50,3	48,7	47,3	46,1	45,0	43,2	41,6	40,4	39,3	38,3	36,2	34,6	33,3	32,2	31,1
2900	58,6	56,9	55,5	54,3	53,2	51,3	49,7	48,3	47,1	46,0	43,7	41,9	40,5	39,2	38,1
3000	66,7	65,1	63,8	62,6	61,6	59,6	58,0	56,6	55,4	54,3	51,9	50,0	48,4	47,0	45,8

*Міністерство освіти і науки України
Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка"
Навчально-науковий інститут нафти і газу
Кафедра теплогазопостачання, вентиляції та теплоенергетики*



*Графічна частина
до магістерської кваліфікаційної роботи
на тему: "Використання альтернативних видів горючих газів
на об'єктах комунально-побутової і промислової
теплоенергетики"*

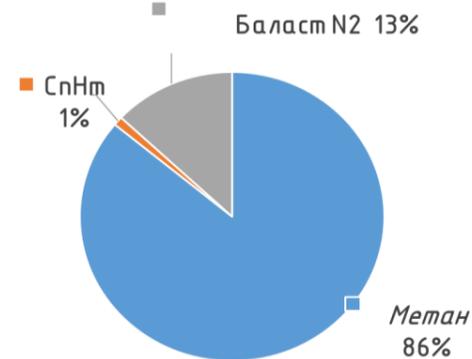
*Виконав: студент 2 курсу, гр. 601-НТ
спеціальності 144 Теплоенергетика
Панченко В.О.*

*Керівник: Колієнко А.Г.
Рецензент: Хміль С.В.
Зав. кафедрою: Голік Ю.С.*

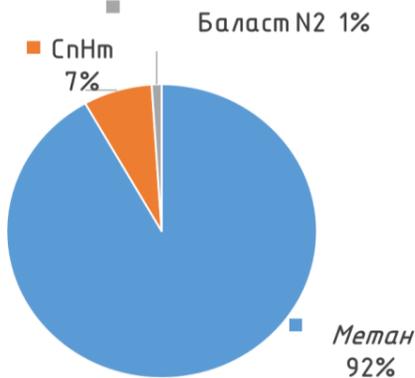
Полтава - 2025

Погоджено:			
Інв.НІ ар.	Підпис і дата	Зам.Інв.НІ	

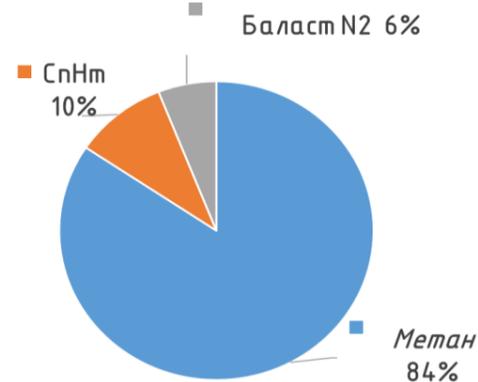
Природний газ р Радченки



Природний газ р Битківське



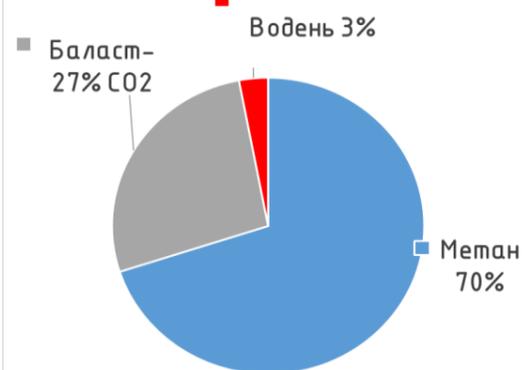
Природний газ р Яблунівське



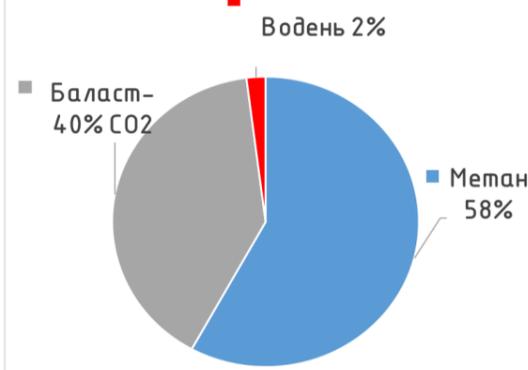
Класифікація газів дослідження згідно з групами EN 437

Родовища Битківське	Родовище Рудківське	Біометан	Родовище Радченки	Біогаз 1	Біогаз 2 (усереднений)	Біогаз 3	Генераторний газ 1	Генераторний газ 2 (усереднений)	Генераторний газ 3
CH ₄ =91,8 C ₂ H ₆ =4,3 C ₃ H ₈ =1,74 C ₄ H ₁₀ =0,64 C ₅ H ₁₂ =0,29 N ₂ =1,1 CO ₂ =0,2	CH ₄ =95,45 C ₂ H ₆ =0,6 C ₃ H ₈ =0,48 C ₄ H ₁₀ =0,3 C ₅ H ₁₂ =0,17 N ₂ =2,9 CO ₂ =0,1	CH ₄ =98 N ₂ =0,5 CO ₂ =1,5	CH ₄ =86,3 C ₂ H ₆ =0,2 C ₃ H ₈ =0,15 C ₄ H ₁₀ =0,05 N ₂ =13,16 CO ₂ =0,17	CH ₄ =70 H ₂ =3 N ₂ =1 CO ₂ =26	CH ₄ =57,5 H ₂ =1,5 N ₂ =3 CO ₂ =38	CH ₄ =45 N ₂ =5 CO ₂ =50	CH ₄ =3 H ₂ =25 CO=25 N ₂ =37 CO ₂ =10	CH ₄ =2 H ₂ =17,5 CO=22,5 N ₂ =43,5 CO ₂ =14,5	CH ₄ =1 H ₂ =10 CO=20 N ₂ =50 CO ₂ =19
Second	Second	Second	Second	F3/2	First	F1/2	F1/2	F1/2	F1/2
H or E	H or E	H or E	L		A				

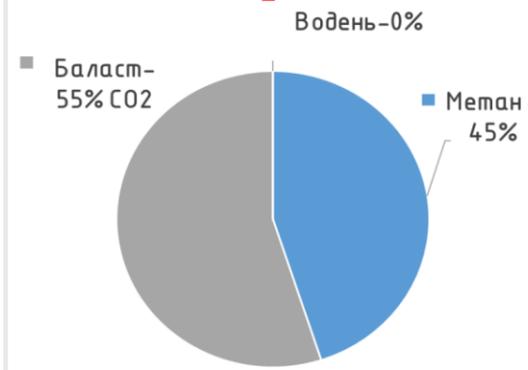
Біогаз 1



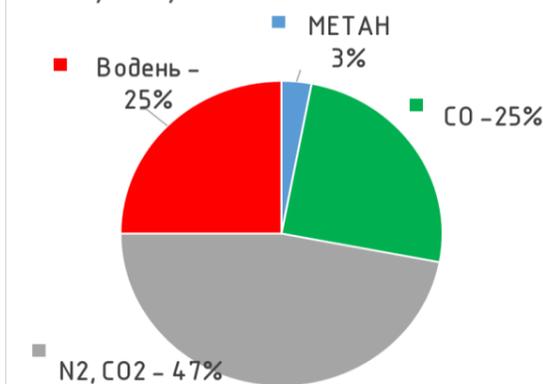
Біогаз 2



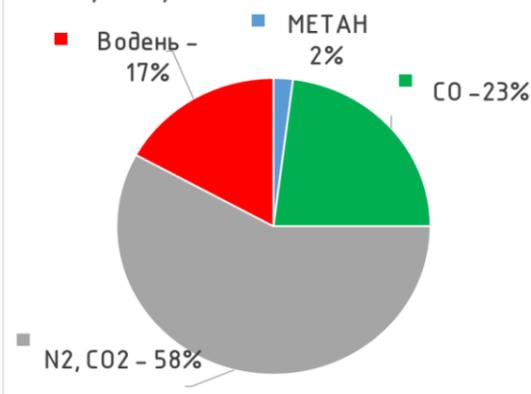
Біогаз 3



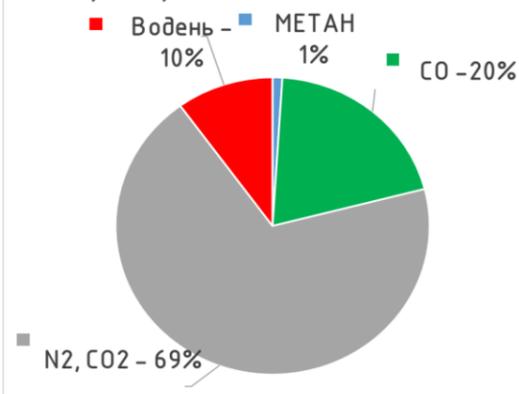
Генераторний газ 1



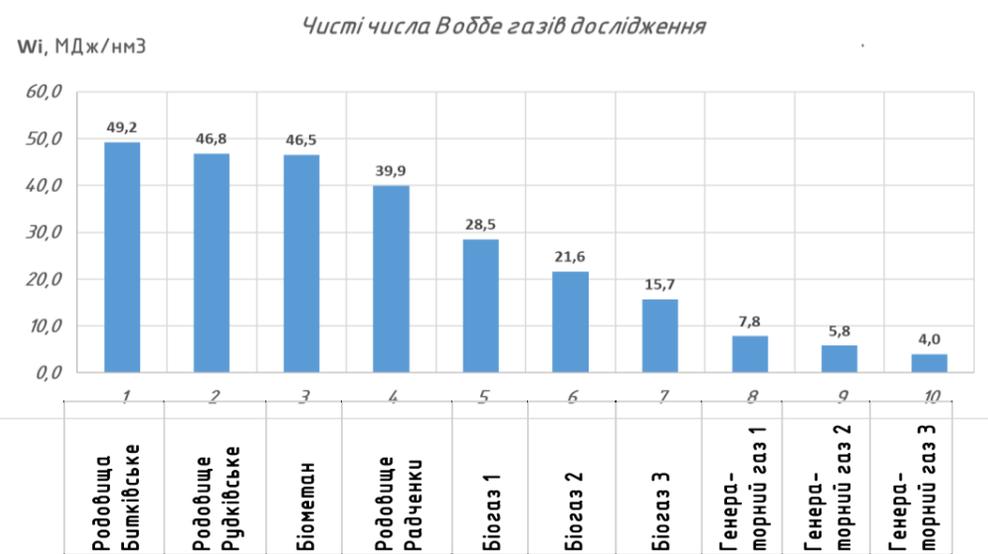
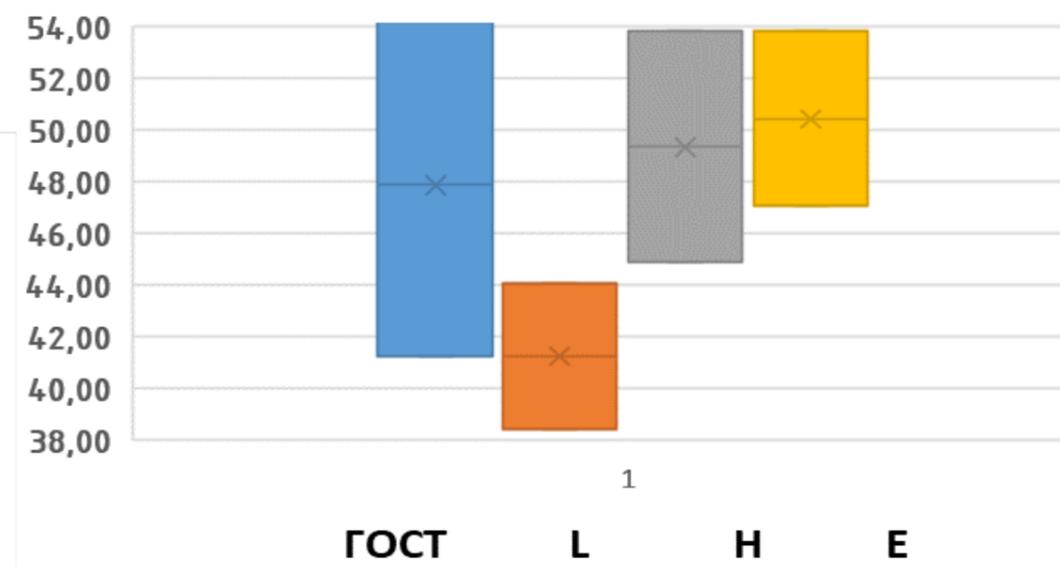
Генераторний газ 2



Генераторний газ 3



Ws, МДж/м3 (20С) Ділянки грубих чисел Водбе для природних газів

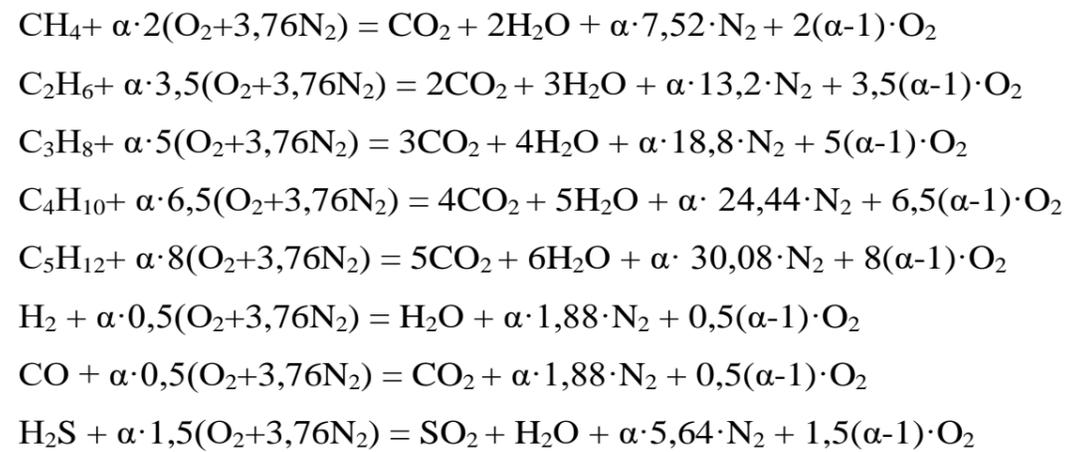


					2025	601-НТ-11393643-МР				
					Використання альтернативних видів горючих газів на об'єктах комунально-побутової і промислової теплоенергетики					
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				Стадія	Арк	Аркушів
Розробив		Панченко В.О		22.01				P	1	12
Перевірів		Колієнко А.Г		22.01						
Н. контроль					Властивості горючих газів, котрі можуть використовуватись в паливоспалювальному обладнанні					
Зав кафедр					Голік Ю. С				Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка"	
					22.01					

Погодження

Інв.№ ар. Підпис і дата Зам.Інв.№

Система рівнянь реакцій горіння складників газових сумішей для умов використання сухого повітря



Кількість вихідних речовин продуктів згорання $N_{пз}$ на одиницю речовини паливного газу

$$\begin{aligned} N_{пз} &= \text{CH}_4 (3 + \alpha \cdot 7,52 + 2(\alpha - 1)) + \text{C}_2\text{H}_6 (5 + \alpha \cdot 13,2 + 3,5(\alpha - 1)) + \\ &\quad \text{C}_3\text{H}_8 (7 + \alpha \cdot 18,8 + 5(\alpha - 1)) + \text{C}_4\text{H}_{10} (9 + \alpha \cdot 24,44 + 6,5(\alpha - 1)) + \\ &\quad \text{C}_5\text{H}_{12} (11 + \alpha \cdot 30,08 + 8(\alpha - 1)) + \text{H}_2 (1 + \alpha \cdot 1,88 + 0,5(\alpha - 1)) + \\ &\quad \text{CO} (1 + \alpha \cdot 1,88 + 0,5(\alpha - 1)) + \text{H}_2\text{S} (2 + \alpha \cdot 5,64 + 1,5(\alpha - 1)) = \\ &\quad \text{CH}_4 (9,52 \alpha + 1) + \text{C}_2\text{H}_6 (16,7 \alpha + 1,5) + \text{C}_3\text{H}_8 (23,8 \alpha + 2) + \\ &\quad \text{C}_4\text{H}_{10} (30,94 \alpha + 2,5) + \text{C}_5\text{H}_{12} (38,08 \alpha + 3) + \\ &\quad \text{H}_2 (2,38 \alpha + 0,5) + \text{CO} (2,38 \alpha + 0,5) + \text{H}_2\text{S} (7,14 \alpha + 0,5) \\ N_{\text{CO}_2} &= \text{CH}_4 + 2 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 3 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 4 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10} + 5 \cdot \text{C}_5\text{H}_{12} + \text{CO} + \text{CO}_2. \\ N_{\text{H}_2\text{O}} &= 2 \cdot \text{CH}_4 + 3 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 4 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 5 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10} + 6 \cdot \text{C}_5\text{H}_{12} + \text{H}_2 + \text{H}_2\text{S} + \text{H}_2\text{O}. \\ N_{\text{SO}_2} &= \text{H}_2\text{S} \\ N_{\text{N}_2} &= \alpha \cdot (3,7,52 \cdot \text{CH}_4 + 13,2 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 18,8 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 24,44 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10} \\ &\quad + 30,08 \cdot \text{C}_5\text{H}_{12} + 1,88 \cdot \text{H}_2 + 1,88 \cdot \text{CO} + 5,64 \cdot \text{H}_2\text{S}) \\ N_{\text{O}_2} &= (\alpha - 1) \cdot (2 \cdot \text{CH}_4 + 3,5 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 5 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 6,5 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10} + \\ &\quad 8 \cdot \text{C}_5\text{H}_{12} + 0,5 \cdot \text{H}_2 + 0,5 \cdot \text{CO} + 1,5 \cdot \text{H}_2\text{S}) \end{aligned}$$

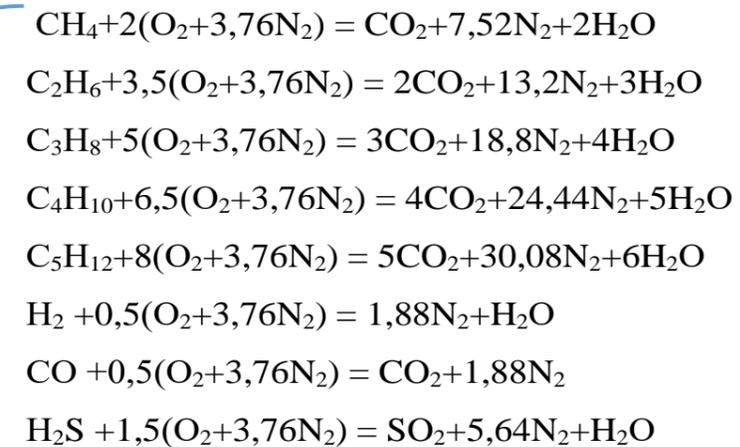
Необхідна кількість сухого повітря $N_{сп}$ на одиницю речовини паливного газу

$$N_{сп стех} = (2 \cdot \text{CH}_4 + 3,5 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 5 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 6,5 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10} + 8 \cdot \text{C}_5\text{H}_{12} + 0,5 \cdot \text{H}_2 + 0,5 \cdot \text{CO} + 1,5 \cdot \text{H}_2\text{S}) + 3,76 \cdot (2 \cdot \text{CH}_4 + 3,5 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 5 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 6,5 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10} + 8 \cdot \text{C}_5\text{H}_{12} + 0,5 \cdot \text{H}_2 + 0,5 \cdot \text{CO} + 1,5 \cdot \text{H}_2\text{S})$$

Об'єм неідеальних газів

$$V = N \cdot M / \rho$$

Система рівнянь стехіометричних реакцій горіння складників газових сумішей



Кількість вихідних речовин продуктів згорання $N_{пз}$ на одиницю речовини паливного газу (стехіометрична реакція)

$$\begin{aligned} N_{пз стех} &= \text{CH}_4 \cdot 10,52 + \text{C}_2\text{H}_6 \cdot 18,2 + \text{C}_3\text{H}_8 \cdot 25,8 + \text{C}_4\text{H}_{10} \cdot 33,44 + \\ &\quad \text{C}_5\text{H}_{12} \cdot 41,08 + \text{H}_2 \cdot 2,88 + \text{CO} \cdot 2,88 + \text{H}_2\text{S} \cdot 7,64. \\ N_{\text{CO}_2} &= \text{CH}_4 + 2 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 3 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 4 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10} + 5 \cdot \text{C}_5\text{H}_{12} + \text{CO} + \text{CO}_2. \\ N_{\text{H}_2\text{O}} &= 2 \cdot \text{CH}_4 + 3 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 4 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 5 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10} + 6 \cdot \text{C}_5\text{H}_{12} + \text{H}_2 + \text{H}_2\text{S} + \text{H}_2\text{O}. \\ N_{\text{SO}_2} &= \text{H}_2\text{S} \\ N_{\text{N}_2} &= 7,52 \cdot \text{CH}_4 + 13,2 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 18,8 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 24,44 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10} \\ &\quad + 30,08 \cdot \text{C}_5\text{H}_{12} + 1,88 \cdot \text{H}_2 + 1,88 \cdot \text{CO} + 5,64 \cdot \text{H}_2\text{S} \end{aligned}$$

Необхідна кількість сухого повітря $N_{сп стех}$ на одиницю речовини паливного газу (стехіометрична реакція горіння)

$$N_{сп стех} = 9,52 \cdot \text{CH}_4 + 16,66 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 23,8 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 30,94 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10} + 38,08 \cdot \text{C}_5\text{H}_{12} + 2,38 \cdot \text{H}_2 + 2,38 \cdot \text{CO} + 7,14 \cdot \text{H}_2\text{S}$$

					2025	601-НТ-11393643-МР			
					"Використання альтернативних видів горючих газів на об'єктах комунально-побутової і промислової теплоенергетики"				
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розробив		Панченко В.О		22.01	Стадія	Арк	Аркушів		
Перевірів		Колієнко А.Г		22.01	Р	2	12		
					Розрахункова модель хімічних реакцій горіння та визначення складу димових газів				
					Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка"				
Н. контроль									
Зав кафедр		Голік Ю. С		22.01					

Концентрації меж спалахування газових компонентів

Хімічна формула	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	H ₂	CO	H ₂ S
LEL, нижня межа, %	5	3	2,1	1,8	1,4	4	12,5	4,3
UEL, верхня межа, %	15	12,5	9,5	8,4	7,8	75	74	45

$$H_i = \sum H_{i, r_{gci}} \cdot r_{gci} \quad EL = 1 / \sum (r_{gci} / EL_{gci}) \cdot \eta_{пал} \quad \alpha EL = \frac{1 - EL}{EL \cdot V_T}$$

$$H_s = \sum H_s \cdot r_{gci} \cdot r_{gci} \quad UL = 1 / \sum (r_{gci} / UL_{gci}) \cdot \eta_{пал} \quad \alpha UL = \frac{1 - UL}{UL \cdot V_T}$$

$$\eta_{пал} = CH_4 + C_2H_6 + C_3H_8 + C_4H_{10} + C_5H_{12} + H_2 + CO + H_2S$$

Масові частини речовини в загальній масі одиниці палива

$$\sum Ar(C) = Ar(C) \cdot (CH_4 + 2C_2H_6 + 3C_3H_8 + 4C_4H_{10} + 5C_5H_{12} + CO + CO_2),$$

$$\sum Ar(H) = Ar(H) \cdot (4CH_4 + 6C_2H_6 + 8C_3H_8 + 10C_4H_{10} + 12C_5H_{12} + 2H_2 + 2H_2S),$$

$$\sum Ar(S) = Ar(S) \cdot H_2S,$$

$$\sum Ar(O) = Ar(O) \cdot (CO + 2CO_2 + 2O_2),$$

$$\sum Ar(N) = Ar(N) \cdot 2N_2,$$

$$C^P = \sum Ar(C) / (\sum Ar(C) + \sum Ar(H) + \sum Ar(S) + \sum Ar(O) + \sum Ar(N))$$

$$H^P = \sum Ar(H) / (\sum Ar(C) + \sum Ar(H) + \sum Ar(S) + \sum Ar(O) + \sum Ar(N))$$

$$S^P = \sum Ar(S) / (\sum Ar(C) + \sum Ar(H) + \sum Ar(S) + \sum Ar(O) + \sum Ar(N))$$

$$O^P = \sum Ar(O) / (\sum Ar(C) + \sum Ar(H) + \sum Ar(S) + \sum Ar(O) + \sum Ar(N))$$

$$N^P = \sum Ar(N) / (\sum Ar(C) + \sum Ar(H) + \sum Ar(S) + \sum Ar(O) + \sum Ar(N))$$

Сумарний уміст горючих газів в суміші з повітрям

$$C_{max} = \frac{r_1 + r_2 + \dots + r_n}{\frac{r_1}{C_1^{max}} + \frac{r_2}{C_2^{max}} + \dots + \frac{r_n}{C_n^{max}}} = \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{\sum_{i=1}^n \frac{r_i}{C_i^{max}}}$$

Максимальна нормальна швидкість поширення полум'я

$$u_H^{max} = C_{max} \frac{\frac{r_1^2}{C_1^{max}} u_{H1} + \frac{r_2^2}{C_2^{max}} u_{H2} + \dots + \frac{r_n^2}{C_n^{max}} u_{Hn}}{r_1^2 + r_2^2 + \dots + r_n^2} = C_{max} \frac{\sum_{i=1}^n \frac{r_i^2}{C_i^{max}} u_{Hi}}{\sum_{i=1}^n r_i^2}$$

$$u_H^0 = u_H^{max} (1 - 0,01 \cdot N_2 - 0,012 \cdot CO_2) \quad u_H^{T_2} = u_H^{293} \left(\frac{T_2}{293} \right)^2$$

Швидкість відриву полум'я

$$w_{відр} = 3,6 \cdot 10^{-3} dT^2 \frac{1 + V_B^T}{1 + \alpha_1 V_B^T}$$

Швидкість відриву полум'я

$$w_{пр} = 7,75 \cdot 10^{-3} \cdot u_H \cdot d / a$$

Теоретична температура горіння при адіабатичних умовах

$$t_a = \frac{Q_H^P + Q_{фіз} - Q_{енд}}{V_{CO_2} C_{CO_2}^P + V_{H_2O} C_{H_2O}^P + V_{N_2} C_{N_2}^P + V_{SO_2} C_{SO_2}^P + V_{CO} C_{CO}^P + V_{O_2} C_{O_2}^P + V_{H_2} C_{H_2}^P}$$

Аналітичний метод уточненого розрахунку теплоємності газів

$$\Delta Q = m \int_{T_0}^{T_i} c(T) dT$$

$$\Delta Q = m \cdot \left[\frac{c_0 + c_1}{2} (T_1 - T_0) [\text{при } n \geq 1] + \frac{c_{n-1} + c_n}{2} (T_n - T_{n-1}) [\text{при } n \geq 2] \right]$$

$$+ \frac{c_1 + c_{n-1}}{2} \cdot \Delta T [\text{при } n \geq 3] + \sum_{i=2}^{n-2} c_i \cdot \Delta T [\text{при } n \geq 4]$$

Розрахункова модель для визначення температури горіння з врахуванням явища дисоціації CO₂ та H₂O

$$t_a = \frac{Q_H^P + Q_{фіз} - (Q_{CO} + Q_{H_2})}{V_{CO_2}^\beta \cdot C_{CO_2}^P + V_{H_2O}^\alpha \cdot C_{H_2O}^P + V_{O_2}^{\alpha, \beta} \cdot C_{O_2}^P + V_{CO}^\beta \cdot C_{CO}^P + V_{N_2} \cdot C_{N_2}^P + V_{SO_2} \cdot C_{SO_2}^P};$$

$$Q_{CO} = 12,64 \cdot \beta \cdot N_{CO_2} \cdot M_{CO_2} / \rho_{CO_2};$$

$$Q_{H_2} = 10,79 \cdot \alpha \cdot N_{H_2O} \cdot M_{H_2O} / \rho_{H_2O};$$

$$V_{CO_2}^\beta = N_{CO_2} \cdot (1 - \beta) \cdot M_{CO_2} / \rho_{CO_2};$$

$$V_{H_2O}^\alpha = (1 - \alpha) \cdot N_{H_2O} \cdot M_{H_2O} / \rho_{H_2O};$$

$$V_{O_2}^{\alpha, \beta} = \frac{\alpha}{2} \cdot N_{CO_2} \cdot M_{CO_2} / \rho_{CO_2} + \frac{\beta}{2} \cdot N_{H_2O} \cdot M_{H_2O} / \rho_{H_2O} + V_{O_2}$$

$$V_{CO}^\beta = \beta \cdot N_{CO_2} \cdot M_{CO_2} / \rho_{CO_2};$$

$$\alpha = f(P_{H_2O}; t_a);$$

$$\beta = f(P_{CO_2}; t_a).$$

$$CO_2 = CO + 0,5O_2 - 12,64 \text{ МДж/нм}^3;$$

$$H_2O = H_2 + 0,5O_2 - 10,79 \text{ МДж/нм}^3.$$

					2025	601-НТ-11393643-МР			
					"Використання альтернативних видів горючих газів на об'єктах комунально-побутової і промислової теплоенергетики"				
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розробив		Панченко В.О		22.01	Стадія	Арк	Аркушів		
Перевірів		Колієнко А.Г		22.01	Р	3	12		
					Аналітичні залежності для визначення фізико-хімічних показників горючих газів та процесу горіння				
Н. контроль					Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка"				
Зав кафедр		Голік Ю. С		22.01					

Погоджено:

Зам. Інв. Ні

Підпис і дата

Інв. Ні ар.

Простий критерій Вобде

$$W = \frac{H}{\sqrt{d}}$$

$$W_{i1} = W_{i2} = \text{const} \pm 5\%$$

$$W_{s1} = W_{s2} = \text{const} \pm 5\%$$

Критерій розширеного числа Вобде

$$W'_1 = W_1 \cdot \sqrt{P1}$$

$$W'_1 = W_1 \cdot \sqrt{P1} \cdot D_1^2$$

$$W'_1 = W'_2 = \text{const} \pm 5\%$$

$$W'_2 = W_2 \cdot \sqrt{P2}$$

$$W'_2 = W_2 \cdot \sqrt{P2} \cdot D_2^2$$

Критерії Даттона

Індекс неповного згорання JCF(D)

$$J_{ICF(D)} = \frac{W_i - 50,73 + 0,03E_{PN} - \frac{\Omega_{H2}}{100}}{1,56}$$

Індекс сажоутворення JSI(D)

$$JSI(D) = 0,896 \cdot \arctan(0,0255 \cdot E_{PN} - 0,0091 \cdot \Omega_{H2} + 0,617)$$

Індeksu відриву полум'я JLI(D)

$$J_{LI(D)} = 3,25 - 2,41 \arctan \left\{ \begin{array}{l} (0,122 + 0,0009 \Omega_{H2}) \cdot \\ \left[(W_i - 36,8 - 0,0019 E_{PN}) + \right. \\ \left. (0,755 - 0,118 E_{PN}^{0,33}) \Omega_{H2} \right] \end{array} \right\}$$

Умови утворення еквівалентної суміші

$$\begin{cases} \frac{x_1}{x_2} = \frac{r_1 + 0,5r_2 - 0,5r_4}{0,5r_2 + r_3 + 1,5r_4} \\ \frac{\sum(x_i \cdot H_{hi})}{\sqrt{\sum(x_i \cdot s_i)}} = \frac{\sum(r_i \cdot H_{hi})}{\sqrt{\sum(r_i \cdot s_i)}} \\ x_1 + x_2 + x_3 = 100 \end{cases}$$

$$C_n H_{(2n+2)} = \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{2}(n-2) \right] \cdot CH_4 + \frac{1}{2}(n-1) \cdot C_3H_8$$

Метод Дельбурга

Число жовтих кінчиків Ij(De) - 2 гр

$$I_j(De) = \frac{\sum(j \cdot v_i)}{\sqrt{d}} \cdot (1 - 0,418 \frac{O_2}{H_s})$$

Число сажі Ic(De) - 1 гр

Метод АГА

Індекс неповне згорання палива C(A)

$$C(A) = \frac{H_s \cdot B_s \cdot da}{H_a \cdot B_a \cdot ds} + \left(\frac{H_a \cdot B_a}{5000 \cdot E_a \cdot Fekva} - \frac{H_s \cdot B_s}{5000 \cdot E_s \cdot Fekvs} \right)$$

Індекс відрив полум'я IL(A)

$$IL(A) = \frac{K_a}{\frac{f_a \cdot a_s}{f_s \cdot a_a} \cdot \left(K_s - \log \left(\frac{f_a}{f_s} \right) \right)}$$

Індекс сажоутворення IY(A)

$$IY(A) = \frac{f_s \cdot a_s \cdot Y_a}{f_a \cdot a_a \cdot Y_s}$$

Індекс проскоку полум'я IF(A)

$$IF(A) = \frac{K_s \cdot f_s}{K_a \cdot f_a} \cdot \sqrt{\frac{H_s}{1000}}$$

$$IF(A)^* = \frac{K_s \cdot f_s}{K_a \cdot f_a}$$

Метод Вібера

Індекс співвідношення теплової потужності JH (heat rate ratio)

$$JH(W) = \frac{W_s}{W_a}$$

Індекс первинного повітря JA(W) (primary air ratio)

$$JA(W) = \frac{V_s \cdot \sqrt{da}}{V_a \cdot \sqrt{ds}}$$

Індекс відриву полум'я JL(W) (lifting index)

$$JL(W) = JA(W) \cdot \frac{S_s}{S_a} \cdot \frac{100 - \Omega_{O2s}}{100 - \Omega_{O2a}}$$

Індекс зворотного полум'я JF(W) (flashback index)

$$JF(W) = \frac{S_s}{S_a} - 1,4JA(W) + 0,4$$

Індекс жовтого кінчика полум'я JY (yellow tipping index)

$$JY(W) = JA(W) - 1 + \frac{N_{cs} - N_{ca}}{110}$$

Індекс неповного згорання JI(W) (incomplete combustion index)

$$JI(W) = JA(W) - 0,366 \frac{R_s}{R_a} - 0,634$$

					2025	601-НТ-11393643-МР			
					Використання альтернативних видів горючих газів на об'єктах комунально-побутової і промислової теплоенергетики				
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розробив		Панченко В.О		22.01	Стадія	Арк	Аркушів		
Перевірив		Колієнко А.Г		22.01	Р	4	12		
					Аналітичні залежності для визначення критеріїв взаємозамінності				
Н. контроль					Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка"				
Зав кафедр		Голік Ю. С		22.01					

Погодження				
Інв.№	ар.	Підпис	І дата	Зам.Інв.№

Назва критерія	Позначення, посилання на формулу	Призначення	Методика оцінки відповідності двох газів за критерієм
Показники взаємозаміни згідно з тепловою потужністю - енергетичний критерій			
Простий критерій Воббе; Методика Вівера, USA	Wi (2.1), (2.2), (2.3) JH(W) (2.33)	Теплова потужність установки	Числа Воббе не повинні відрізнятися для двох газів на величину більшу $\pm 5\%$. Тип числа Воббе - вище (валове) або нижче (чисте) обирається з огляду на технічну особливість устаткування. Індекс теплової потужності для газу, для якого виготовлено пальник і для газу замітника JH(W): $0,95 < JH(W) < 1,05$
Розширений критерій Воббе	W/ (2.8 - 2.12)	Теплова потужність установки	Розширенні числа Воббе не повинні відрізнятися для двох газів на величину понад $\pm 5\%$ з урахуванням зміни діаметра газового отвору і тиску газу
Кноу (CC)	J(K) (2.5)	Теплова потужність установки	Величина Кноу не повинна відрізнятися для двох газів на величину понад $\pm 5\%$
Метод Вівера, USA	JA(W) (2.34)	Забезпечення необхідної величини витрат дуттьового повітря (коефіцієнту надлишку повітря);	Індекс первинного повітря порівнюючи газ замітник з газом приладу повинен бути в межах $0,95 < JA(W) < 1,05$. JA(W) < 1 - надлишок первинного повітря JA(W) > 1 - нестача повітря

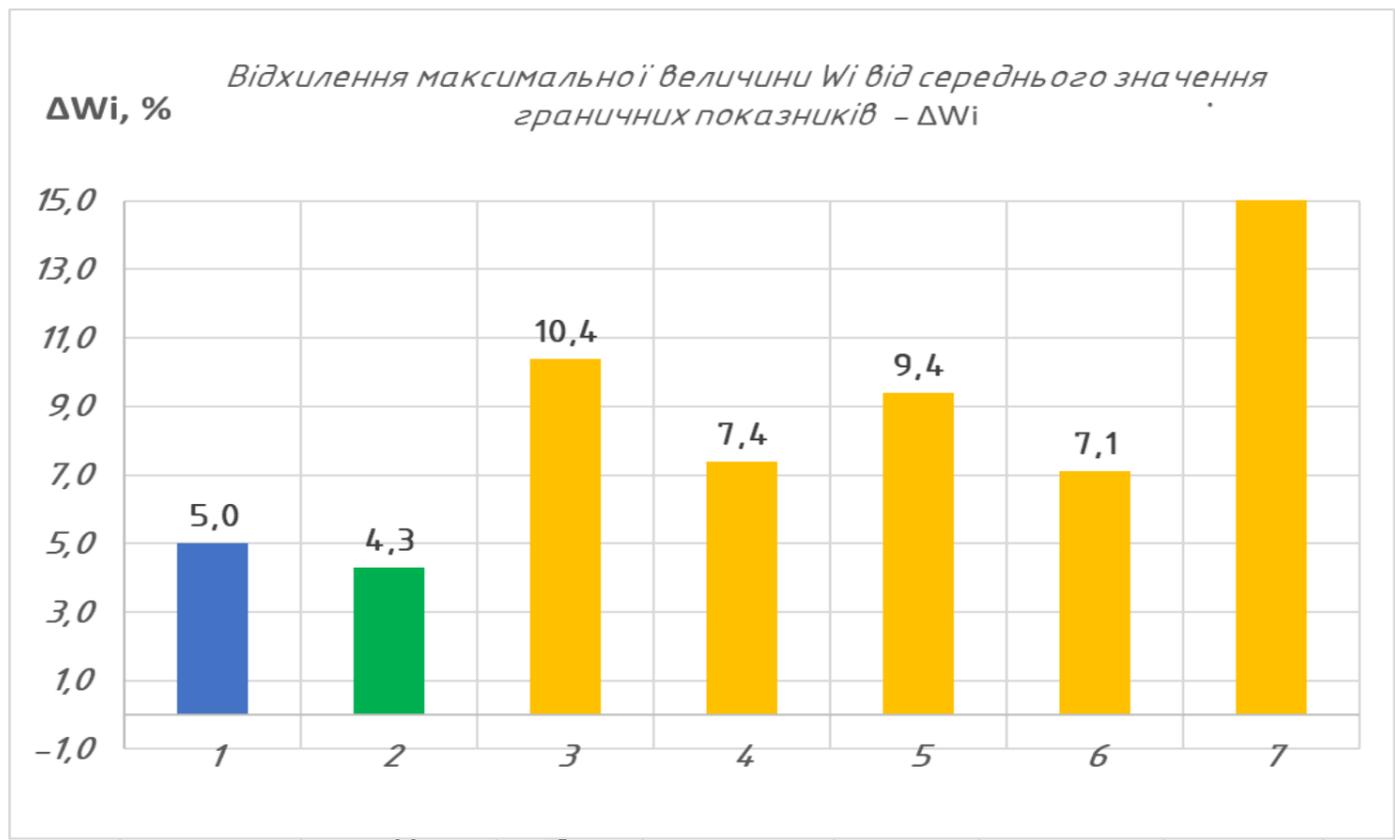
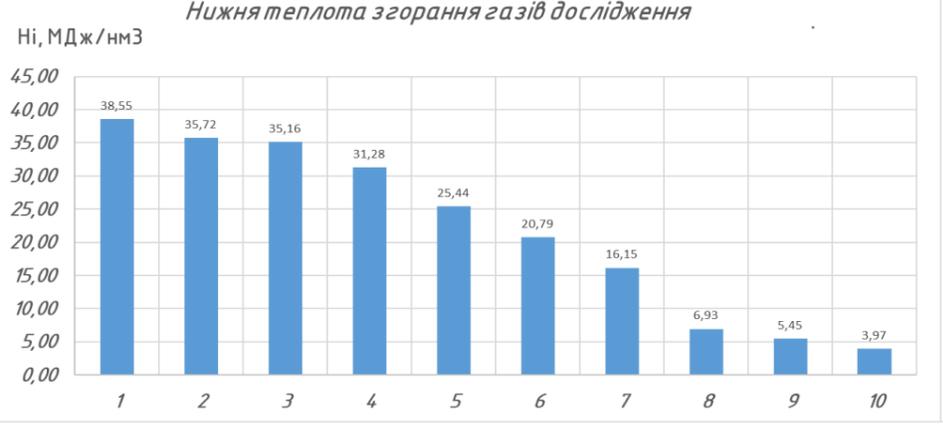
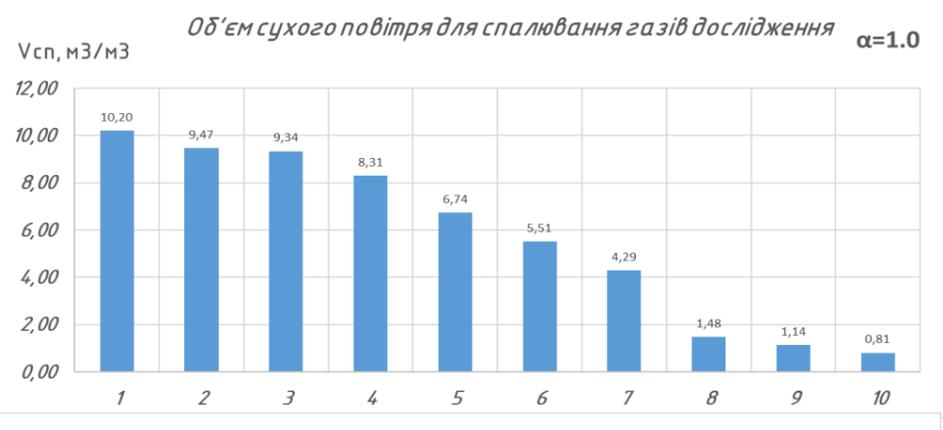
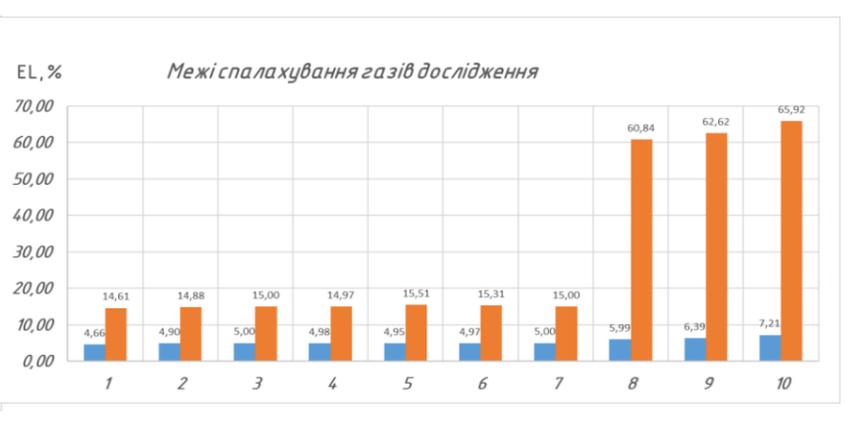
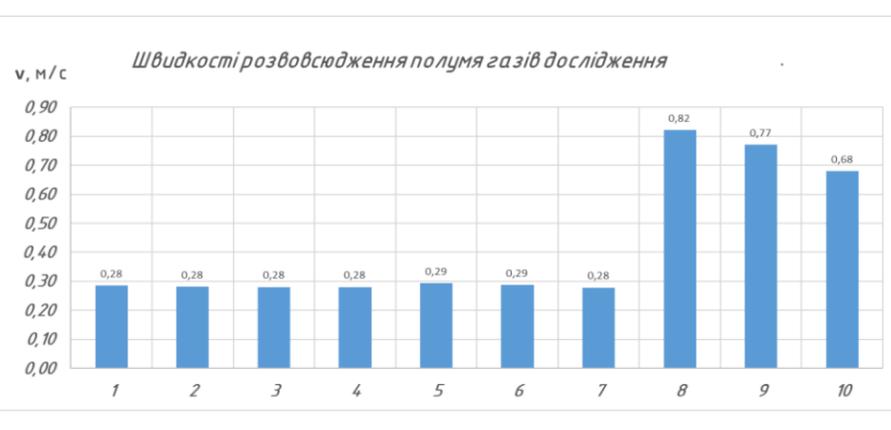
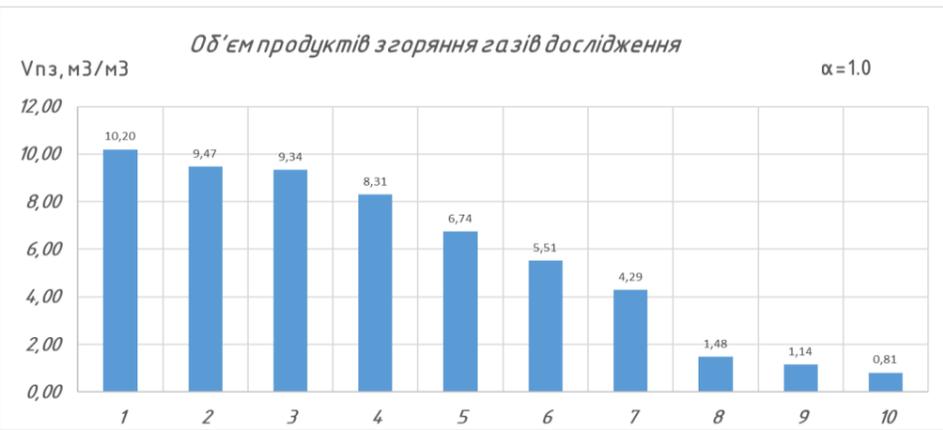
Показники взаємозаміни згідно з явищем відриву полум'я			
Метод Даттона (D), GB (порівняння з метаном)	JLI(D) (2.16)	Відрив полум'я	Величина індексу відриву полум'я повинна бути нижче граничної величини. JL(D) < 1,16. Зростання JL(D) - тенденція відриву
Метод AGA, USA (природні гази)	IL(A) (2.23)	Відрив полум'я	Індекс відриву полум'я порівнюючи газ замітник з газом приладу повинен бути: IL(A) \leq 1. IL(A) > 1 тенденція до відриву полум'я
Метод Вівера (W), USA	JL(W) (2.35)	Відрив полум'я	Індекс відриву полум'я порівнюючи газ замітник з газом приладу повинен бути в межах $0,95 < JL(W) < 1,05$. JL(W) < 1 - тенденція відриву полум'я
Показники взаємозаміни згідно з явищем проскоку полум'я			
Метод AGA, USA (природні гази)	IF(A) (2.29) (2.30)	Проскок полум'я	Індекс проскоку полум'я порівнюючи газ замітник з газом приладу повинен бути IF(A) \leq 1,18 IF*(A) > 1 - тенденція проскоку
Метод Вівера (W), USA	JF(W) (2.37)	Проскок полум'я	Індекс зворотного (проскоку) полум'я порівнюючи газ замітник з газом приладу повинен бути JF(W) \leq 0. JF(W) > 0 - тенденція проскоку

Показники взаємозаміни згідно з явищем неповноти згорання			
Метод Даттона (D), GB (порівняння з метаном)	JCF(D) (2.15)	Неповнота згорання	Величина індексу неповного згорання повинна бути нижче граничної величини. Правила газової безпеки Великобританії: JCF(D) < 0,48; JCF(D) < 1,48 (екстремальний випадок)
Метод AGA, USA (природні гази)	C(A) (2.20) (для природних газів)	Неповнота згорання	Індекс неповного згорання порівнюючи газ замітник з газом приладу повинен бути в межах $0,85 \leq C(A) \leq 1,15$ C(A) > 1,15 - тенденція хімічного недопалу
Метод Вівера (W), USA	L(W) (2.40)	Неповнота згорання	Індекс неповного згорання порівнюючи газ замітник з газом приладу повинен бути: L(W) \leq 0. L(W) > 0 - тенденція хімічного недопалу
Метод Даттона (D), GB (порівняння з метаном)	JSI(D) (2.17)	Жовті проблиски полум'я (сажоутворення)	Величина індексу сажоутворення повинна бути нижче граничної величини: JSI(D) < 0,6
Метод AGA, USA (природні гази)	IY(A) (2.31)	Жовті проблиски полум'я	Індекс сажоутворення порівнюючи газ замітник з газом приладу повинен бути IY \geq 1. IY(A) < 1 - тенденція сажоутворення
Метод Вівера (W), USA	JY(W) (2.38)	Жовті проблиски полум'я	Індекс жовтого кінчика полум'я порівнюючи газ замітник з газом приладу повинен бути JY(W) \leq 0 JY(W) > 0 - тенденція сажоутворення
Метод Дельбурга (Delb), Fr (природні гази)	Ij(De) (2.52)	Жовті проблиски полум'я	«Число жовтих кінчиків» повинно бути Ij(De) < 170 (для газів другої сім'ї методу)
Метод Дельбурга (Delb), Fr (штучні гази)	Ic(De) (2.53)	Утворення сажі	«Число сажі» повинно бути Ic(De) < 170 (для газів першої сім'ї методу)

					2025	601-НТ-11393643-МР				
					<i>"Використання альтернативних видів горючих газів на об'єктах комунально-побутової і промислової теплоенергетики"</i>					
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				Стадія	Арк.	Аркуші
Розробив		Панченко В.О		22.01				Р	5	12
Перевірів		Колієнко А.Г		22.01						
					<i>Класифікація критеріїв взаємозамінності за їх призначенням</i>			<i>Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка"</i>		
Н. контроль										
Зав кафедр		Голік Ю. С		22.01						

Погоджено:

Інв.№І ар. Підпис і дата Зам.Інв.№І



Допуск відхилення	Родовища Полтавського регіону	Гази родовищ України	Біометан (ГТС)	Гази групи H	Гази групи L	Штучні гази
-------------------	-------------------------------	----------------------	----------------	--------------	--------------	-------------

Погодження:	
Інв.№ ар.	Підпис і дата Зам.Інв.№і

Родовища Битківське	Родовища Рудківське	Біометан	Родовища Радченки	Біогаз 1	Біогаз 2	Біогаз 3	Генера-торний газ 1	Генера-торний газ 2	Генера-торний газ 3
---------------------	---------------------	----------	-------------------	----------	----------	----------	---------------------	---------------------	---------------------

					2025	601-НТ-11393643-МР				
					Використання альтернативних видів горючих газів на об'єктах комунально-побутової і промислової теплоенергетики					
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				Стадія	Арк	Аркушів
Розробив		Панченко В.О		22.01				P	6	12
Перевірів		Колієнко А.Г		22.01						
					Фізико-хімічні показники газів дослідження та процесів горіння, первинна оцінка взаємозаміни					
					Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка"					
Н. контроль										
Зав кафедри	Голік Ю. С				22.01					

Індекси взаємозаміни з порівняння природних газів дослідження родовищ України з граничними газами групи Н

Індекс, умова приналежності групи Н	% об	Родовища		Біометан	
		Битківське	Рудківське	Біометан	Родовище Радченки
CH ₄ =91,8 C ₂ H ₆ =4,3 C ₃ H ₈ =1,74 C ₄ H ₁₀ =0,64 C ₅ H ₁₂ =0,29 N ₂ =1,1 CO ₂ =0,2	Явище	CH ₄ =95,45 C ₂ H ₆ =0,6 C ₃ H ₈ =0,48 C ₄ H ₁₀ =0,3 C ₅ H ₁₂ =0,17 N ₂ =2,9 CO ₂ =0,1	CH ₄ =98 N ₂ =0,5 CO ₂ =1,5	CH ₄ =86,3 C ₂ H ₆ =0,2 C ₃ H ₈ =0,15 C ₄ H ₁₀ =0,05 C ₅ H ₁₂ =0,16 N ₂ =13,16 CO ₂ =0,17	
LICF(D) <1,26	Неповнота згорання	0,69	-0,89	-1,07	-5,31
C(A) ≤1		0,91	0,84	0,83	0,63
LI(W) ≤0		-0,08	-0,14	-0,14	-0,27
JSI(D) <0,68		0,60	0,57	0,54	0,69
IY(A) ≥=1	Сажеутворення	1,20	1,35	1,38	1,74
IY(W) ≤0		-0,20	-0,32	-0,35	-0,47
Ij(De) <180,5		152,1	134,9	129,7	112,2
LI(D) <1,26	Відрив полум'я	0,68	0,87	0,89	1,89
IL(A) <=1		0,89	0,93	0,93	1,09
IL(W) ≥=1 (0,95...1)		1,19	1,11	1,11	0,89
IF*(A) <=1	Проскок полум'я	0,76	0,78	0,79	0,86
JF(W) ≤0		-0,48	-0,43	-0,42	-0,25

Індекси взаємозаміни з порівняння природних газів дослідження родовищ України з граничними газами групи L

Індекс, умова приналежності групи L	% об	Родовища		Біометан	
		Битківське	Рудківське	Біометан	Родовище Радченки
CH ₄ =91,8 C ₂ H ₆ =4,3 C ₃ H ₈ =1,74 C ₄ H ₁₀ =0,64 C ₅ H ₁₂ =0,29 N ₂ =1,1 CO ₂ =0,2	Явище	CH ₄ =95,45 C ₂ H ₆ =0,6 C ₃ H ₈ =0,48 C ₄ H ₁₀ =0,3 C ₅ H ₁₂ =0,17 N ₂ =2,9 CO ₂ =0,1	CH ₄ =98 N ₂ =0,5 CO ₂ =1,5	CH ₄ =86,3 C ₂ H ₆ =0,2 C ₃ H ₈ =0,15 C ₄ H ₁₀ =0,05 C ₅ H ₁₂ =0,16 N ₂ =13,16 CO ₂ =0,17	
LICF(D) <LICF(D)гр	Неповнота згорання	0,69	-0,89	-1,08	-5,32
C(A) ≤1		1,31	1,20	1,19	0,89
LI(W) ≤0		0,14	0,07	0,07	-0,09
JSI(D) <JSI(D)гр		0,60	0,57	0,53	0,68
IY(A) ≥=1	Сажеутворення	0,84	0,95	0,97	1,22
IY(W) ≤0		0,12	-0,01	-0,04	-0,19
Ij(De) <Ij(De)гр		152,1	134,9	129,7	112,2
LI(D) <LI(D)гр	Відрив полум'я	0,68	0,87	0,89	1,89
IL(A) <=1		0,75	0,79	0,79	0,93
IL(W) ≥=1 (0,95...1)		1,49	1,39	1,39	1,12
IF*(A) <=1	Проскок полум'я	0,88	0,90	0,91	0,99
JF(W) ≤0		-0,24	-0,19	-0,17	-0,01

Індекси взаємозаміни з порівняння біометанів з граничними газами групи Н

Індекс, умова приналежності групи Н	частка об штучного газу	Біометан						
		№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7
CH ₄ =98 N ₂ =0,5 CO ₂ =1,5	Явище	CH ₄ =96 N ₂ =0,6 CO ₂ =3,4	CH ₄ =94 N ₂ =0,7 CO ₂ =5,3	CH ₄ =92 N ₂ =0,8 CO ₂ =7,2	CH ₄ =90 N ₂ =0,9 CO ₂ =9,1	CH ₄ =88 N ₂ =1,0 CO ₂ =11	CH ₄ =86 N ₂ =1,1 CO ₂ =12,9	
LICF(D) <LICF(D)гр	Неповнота згорання	-1,08	-2,18	-3,23	-4,24	-5,21	-6,14	-7,04
C(A) ≤1		0,83	0,78	0,73	0,68	0,64	0,60	0,56
LI(W) ≤0		-0,14	-0,17	-0,19	-0,21	-0,24	-0,26	-0,27
JSI(D) <JSI(D)гр		0,53	0,56	0,59	0,63	0,66	0,69	0,72
IY(A) ≥=1	Сажеутворення	1,38	1,45	1,53	1,61	1,70	1,79	1,89
IY(W) ≤0		-0,35	-0,38	-0,41	-0,44	-0,47	-0,50	-0,53
Ij(De) <Ij(De)гр		129,7	125,0	120,5	116,1	111,9	107,8	103,9
LI(D) <LI(D)гр	Відрив полум'я	0,89	1,07	1,29	1,54	1,84	2,18	2,56
IL(A) <=1		0,93	0,97	1,01	1,06	1,10	1,14	1,19
IL(W) ≥=1 (0,95...1)		1,00	0,95	0,91	0,86	0,82	0,78	0,74
IF*(A) <=1	Проскок полум'я	0,79	0,80	0,81	0,83	0,84	0,86	0,88
JF(W) ≤0		-0,42	-0,37	-0,33	-0,29	-0,25	-0,21	-0,17
Число Воббе (чисте)	МДж/нм3	46,53	44,84	43,22	41,66	40,15	38,70	37,29
Критерій Воббе	%	-3,44%	-6,94%	-10,31%	-13,55%	-16,68%	-19,69%	-22,61%

Індекси взаємозаміни з порівняння біометанів з граничними газами групи L

Індекс, умова приналежності групи L	частка об штучного газу	Біометан						
		№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7
CH ₄ =98 N ₂ =0,5 CO ₂ =1,5	Явище	CH ₄ =96 N ₂ =0,6 CO ₂ =3,4	CH ₄ =94 N ₂ =0,7 CO ₂ =5,3	CH ₄ =92 N ₂ =0,8 CO ₂ =7,2	CH ₄ =90 N ₂ =0,9 CO ₂ =9,1	CH ₄ =88 N ₂ =1,0 CO ₂ =11	CH ₄ =86 N ₂ =1,1 CO ₂ =12,9	
LICF(D) <LICF(D)гр	Неповнота згорання	-1,08	-2,18	-3,23	-4,24	-5,21	-6,14	-7,04
C(A) ≤1		1,19	1,11	1,03	0,96	0,90	0,84	0,78
LI(W) ≤0		0,07	0,04	0,01	-0,02	-0,05	-0,08	-0,10
JSI(D) <JSI(D)гр		0,53	0,56	0,59	0,63	0,66	0,69	0,72
IY(A) ≥=1	Сажеутворення	0,97	1,02	1,07	1,13	1,19	1,26	1,33
IY(W) ≤0		-0,04	-0,08	-0,12	-0,15	-0,19	-0,22	-0,26
Ij(De) <Ij(De)гр		129,7	125,0	120,5	116,1	111,9	107,8	103,9
LI(D) <LI(D)гр	Відрив полум'я	0,89	1,07	1,29	1,54	1,84	2,18	2,56
IL(A) <=1		0,79	0,82	0,86	0,90	0,93	0,97	1,01
IL(W) ≥=1 (0,95...1)		1,31	1,25	1,19	1,13	1,08	1,02	0,97
IF*(A) <=1	Проскок полум'я	0,91	0,93	0,94	0,96	0,98	1,00	1,02
JF(W) ≤0		-0,17	-0,12	-0,08	-0,04	0,00	0,04	0,08
Число Воббе (чисте)	МДж/нм3	46,53	44,84	43,22	41,66	40,15	38,70	37,29
Критерій Воббе	%	17,98%	13,71%	9,59%	5,63%	1,81%	-1,88%	-5,44%

Порівняння газу родовища Радченки з граничними газами групи Н

Назва, число Воббе та склад газу представника групи	Назва граничного газу, властивості	Склад граничного газу	Критерій	Величина індекса		Аналіз	
				визначена величина	контрольний параметр		
Група Н. Діапазон числа Воббе (Wi, 15 °C), МДж/м3				41,12 ... 49,61			
Показники взаємозаміни згідно теплопродуктивності та якості горіння							
Родовище Радченки	G20; REF GAS Н.Е	CH ₄ =100	Теплова потужність установки	Індекс Вівера JH(W)	0,829	0,95...1,05	Газ не сумісний, потреба зміни тиску або діаметру отвору пальника
			Забезпечення повітрям	Індекс Вівера JA(W)	0,829	0,95...1,05	
Показники взаємозаміни згідно явища неповноти згорання							
Wi (15 °C), МДж/м3 = 37,86	G20	CH ₄ =100	Неповнота згорання	Індекс Даттона JCF(D)	-5,310	<2,84(EN)	Підтвердження показника, сумісність з приладами групи
				Індекс неповного згорання C(A)	0,635	≤ 1	
CH ₄ =86,3 C ₂ H ₆ =0,2 C ₃ H ₈ =0,15 C ₄ H ₁₀ =0,05 N ₂ =13,16 CO ₂ =0,17	G21; sooting lim, incomplete combustion	CH ₄ =87; C ₃ H ₈ =13		Індекс Вівера JI(W)	-0,275	≤0	
				Індекс Даттона JSI(D)	0,689	<0,68(EN)	
	G21; sooting lim, incomplete combustion	CH ₄ =87; C ₃ H ₈ =13	Жовті проблиски полум'я (сажеутворення)	Індекс сажеутворення IY(A)	1,743	≥ 1	
				Індекс Вівера IY(W)	-0,470	≤ 0	
				Індекс Дельбурга Ij(De)	112	<180,5(EN)	
Показники взаємозаміни згідно явища відриву полум'я							
G20	CH ₄ =100		Відрив полум'я	Індекс Даттона JLI(D)	1,886	<1,26(EN)	Показник НЕ підтверджено, газ не сумісний з приладами групи
				Індекс Вівера JL(W)	0,603	≥ 1	
G23; flame lift	CH ₄ =92,5; N ₂ =7,5			Індекс відриву IL(A)	1,340	≤ 1	
				Індекс Вівера IL(W)	0,603	≥ 1	
Показники взаємозаміни згідно явища проскоку полум'я							
G222; light back	CH ₄ =77; N ₂ =23		Проскок полум'я	Індекс проскоку IF*(A)	0,857	≤ 1	Підтвердження показника, сумісність з приладами групи
				Індекс Вівера JF(W)	-0,254	≤ 0	

					2025	601-НТ-11393643-МР		
					"Використання альтернативних видів горючих газів на об'єктах комунально-побутової і промислової теплоенергетики"			
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Панченко В.О.			22.01	Стадія	Арк	Аркушів	
Перевірів	Колієнко А.Г.			22.01	Р	7	12	
Н. контроль					Класифікації газів на основі порівняння з граничними газами стандарту EN 437. Аналіз роботи невідповідного обладнання			
Зав кафедр	Голік Ю. С.			22.01	Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка"			

Погоджено:

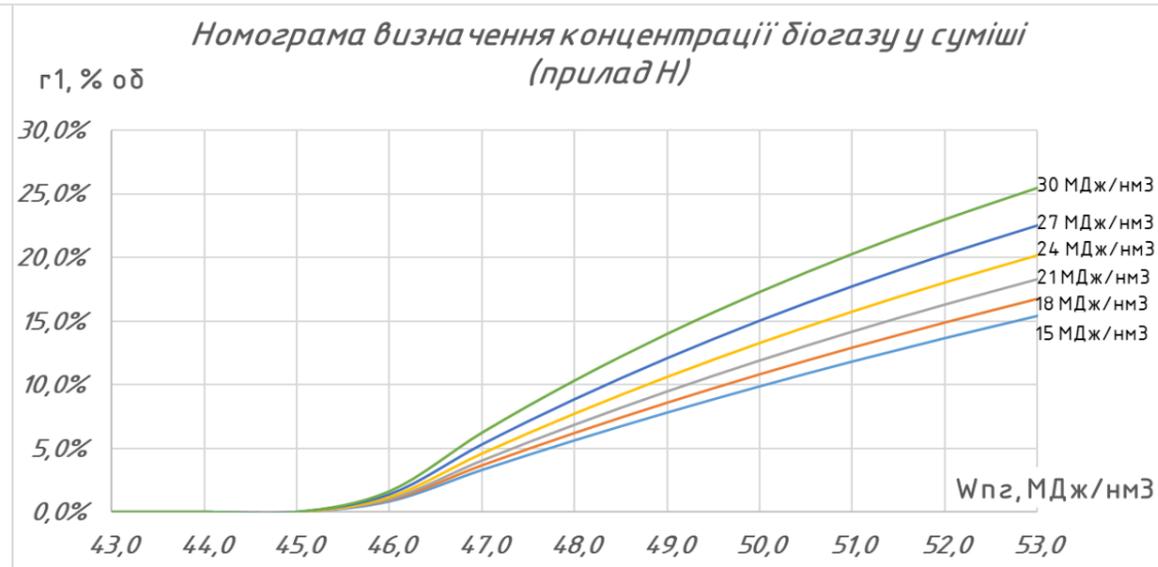
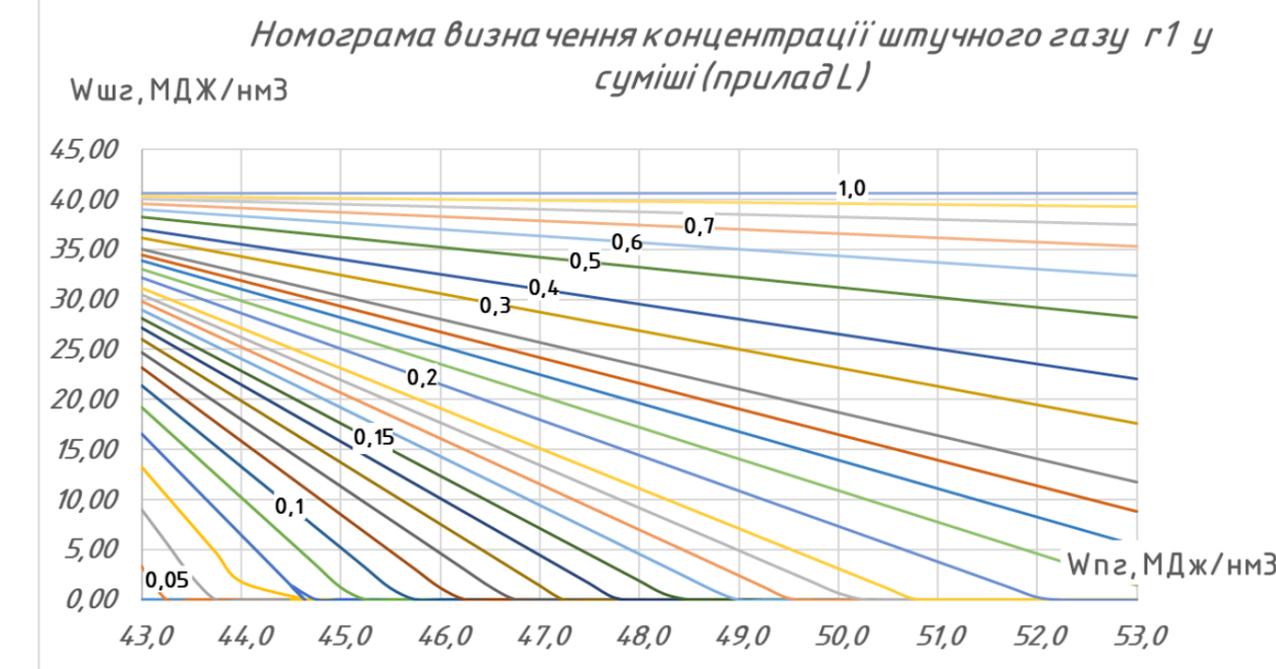
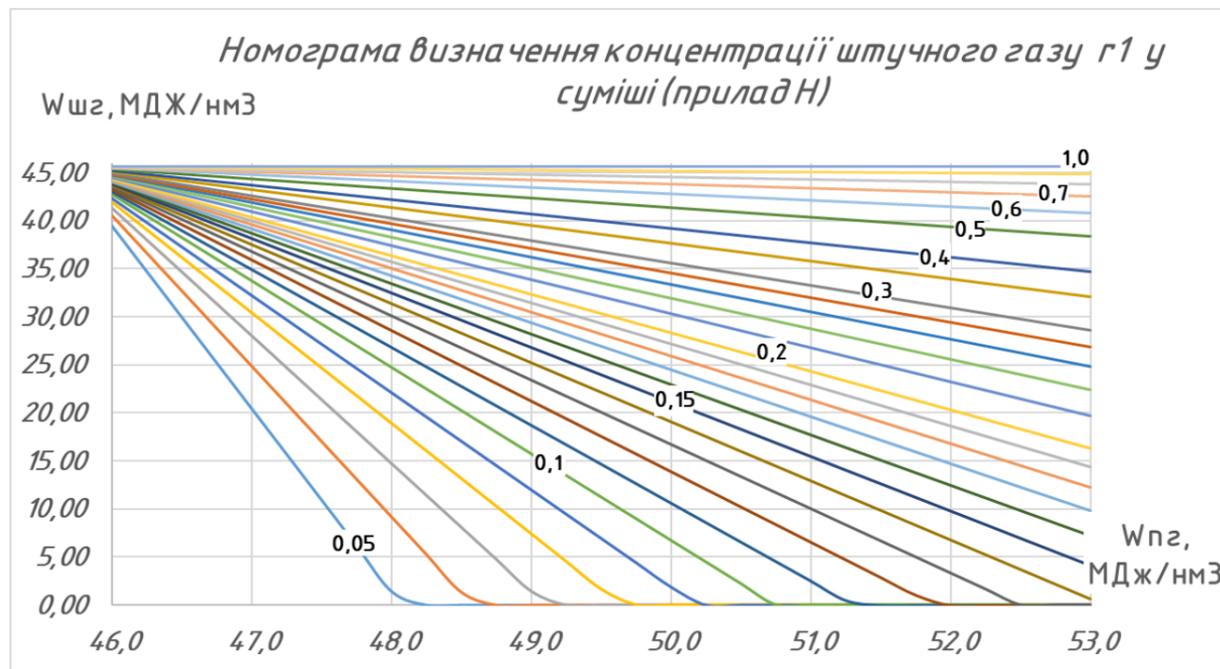
Інв.№1 ар. Підпис і дата Зам.Інв.№1

Індекси взаємозаміни при спалюванні біогазової суміші на пальнику групи Н

Індекс, умова приналежності групи Н	частка об'ємного газу	r1											
		r1 = 0	r1 = 0,02	r1 = 0,04	r1 = 0,06	r1 = 0,08	r1 = 0,1	r1 = 0,12	r1 = 0,14	r1 = 0,16	r1 = 0,18	r1 = 0,2	
Явище	CH4=93,26	CH4=92,55	CH4=91,83	CH4=91,12	CH4=90,4	CH4=89,69	CH4=88,97	CH4=88,26	CH4=87,54	CH4=86,83	CH4=86,11	CH4=85,40	
	C2H6=3,37	C2H6=3,3	C2H6=3,23	C2H6=3,16	C2H6=3,1	C2H6=3,03	C2H6=2,96	C2H6=2,89	C2H6=2,83	C2H6=2,76	C2H6=2,69	C2H6=2,62	
	C3H8=0,78	C3H8=0,76	C3H8=0,75	C3H8=0,73	C3H8=0,72	C3H8=0,7	C3H8=0,68	C3H8=0,67	C3H8=0,65	C3H8=0,64	C3H8=0,62	C3H8=0,61	
	CaH10=0,43	CaH10=0,42	CaH10=0,41	CaH10=0,41	CaH10=0,4	CaH10=0,39	CaH10=0,38	CaH10=0,37	CaH10=0,37	CaH10=0,36	CaH10=0,35	CaH10=0,35	
	C6H12=0,42	C6H12=0,41	C6H12=0,4	C6H12=0,4	C6H12=0,39	C6H12=0,38	C6H12=0,37	C6H12=0,37	C6H12=0,36	C6H12=0,35	C6H12=0,35	C6H12=0,34	
	H2=0	H2=0,03	H2=0,06	H2=0,09	H2=0,12	H2=0,15	H2=0,18	H2=0,21	H2=0,24	H2=0,27	H2=0,3	H2=0,34	H2=0,38
	N2=1,59	N2=1,62	N2=1,65	N2=1,68	N2=1,7	N2=1,73	N2=1,76	N2=1,79	N2=1,82	N2=1,85	N2=1,88	N2=1,91	N2=1,94
	JICF(D) < JICF(D)гр	Неповнота згорання	0,17	-0,28	-0,73	-1,17	-1,60	-2,03	-2,45	-2,86	-3,27	-3,68	-4,08
	C(A) ≤ 1	0,88	0,86	0,84	0,82	0,79	0,77	0,75	0,73	0,72	0,70	0,68	
	J(W) ≤ 0	-0,10	-0,11	-0,12	-0,13	-0,14	-0,15	-0,16	-0,17	-0,18	-0,19	-0,20	
	JSI(D) < JSI(D)гр	0,58	0,59	0,60	0,61	0,62	0,63	0,64	0,65	0,66	0,67	0,69	
	JY(A) ≥ 1	1,27	1,30	1,32	1,35	1,38	1,41	1,44	1,47	1,50	1,53	1,57	
JY(W) ≤ 0	-0,24	-0,26	-0,27	-0,29	-0,30	-0,32	-0,33	-0,34	-0,36	-0,37	-0,38		
Ij(De) < Ij(De)гр	145,8	143,6	141,4	139,3	137,1	135,0	132,9	130,9	128,8	126,8	124,8		
JLi(D) < JLi(D)гр	Відрив полум'я	0,74	0,79	0,85	0,92	0,98	1,05	1,13	1,21	1,30	1,40	1,50	
IL(A) ≤ 1	0,91	0,92	0,94	0,95	0,97	0,99	1,00	1,02	1,04	1,05	1,07		
JL(W) ≥ 1 (0,95...1)	1,15	1,02	1,00	0,98	0,96	0,95	0,93	0,91	0,89	0,88	0,86		
IF*(A) ≤ 1	Проскок полум'я	0,76	0,76	0,77	0,77	0,78	0,79	0,80	0,80	0,81	0,82		
JF(W) ≤ 0	-0,47	-0,45	-0,43	-0,41	-0,39	-0,38	-0,36	-0,34	-0,32	-0,31	-0,29		
Число Воббе (чисте)	МДж/нм3	48,38	47,69	47,01	46,33	45,67	45,01	44,36	43,72	43,09	42,46	41,84	
Критерій Воббе	%	0,40%	-1,03%	-2,45%	-3,85%	-5,23%	-6,59%	-7,94%	-9,27%	-10,58%	-11,88%	-13,17%	

Індекси взаємозаміни при спалюванні біогазової суміші на пальнику групи L

Індекс, умова приналежності групи L	частка об'ємного газу	r1											
		r1 = 0	r1 = 0,04	r1 = 0,08	r1 = 0,12	r1 = 0,16	r1 = 0,2	r1 = 0,24	r1 = 0,28	r1 = 0,32	r1 = 0,36	r1 = 0,4	
Явище	CH4=93,26	CH4=91,83	CH4=90,4	CH4=88,97	CH4=87,54	CH4=86,11	CH4=84,68	CH4=83,25	CH4=81,82	CH4=80,39	CH4=78,96	CH4=77,53	
	C2H6=3,37	C2H6=3,23	C2H6=3,1	C2H6=2,96	C2H6=2,83	C2H6=2,69	C2H6=2,56	C2H6=2,42	C2H6=2,29	C2H6=2,16	C2H6=2,02	C2H6=1,89	
	C3H8=0,78	C3H8=0,75	C3H8=0,72	C3H8=0,68	C3H8=0,65	C3H8=0,62	C3H8=0,59	C3H8=0,56	C3H8=0,53	C3H8=0,5	C3H8=0,47	C3H8=0,44	
	CaH10=0,43	CaH10=0,41	CaH10=0,4	CaH10=0,38	CaH10=0,36	CaH10=0,35	CaH10=0,33	CaH10=0,31	CaH10=0,29	CaH10=0,28	CaH10=0,26	CaH10=0,25	
	C6H12=0,42	C6H12=0,4	C6H12=0,39	C6H12=0,37	C6H12=0,35	C6H12=0,34	C6H12=0,32	C6H12=0,3	C6H12=0,29	C6H12=0,27	C6H12=0,25	C6H12=0,24	
	H2=0	H2=0,06	H2=0,12	H2=0,18	H2=0,24	H2=0,3	H2=0,36	H2=0,42	H2=0,48	H2=0,54	H2=0,6	H2=0,66	H2=0,72
	N2=1,59	N2=1,65	N2=1,7	N2=1,76	N2=1,82	N2=1,87	N2=1,93	N2=1,99	N2=2,04	N2=2,1	N2=2,16	N2=2,22	N2=2,28
	JICF(D) < JICF(D)гр	Неповнота згорання	0,17	-0,73	-1,60	-2,45	-3,27	-4,08	-4,86	-5,63	-6,37	-7,10	-7,82
	C(A) ≤ 1	1,27	1,20	1,14	1,08	1,02	0,96	0,91	0,86	0,81	0,77	0,73	
	J(W) ≤ 0	0,12	0,09	0,06	0,04	0,01	-0,01	-0,03	-0,05	-0,08	-0,10	-0,12	
	JSI(D) < JSI(D)гр	0,58	0,60	0,62	0,64	0,66	0,69	0,71	0,73	0,75	0,76	0,78	
	JY(A) ≥ 1	0,89	0,93	0,97	1,01	1,05	1,10	1,15	1,20	1,26	1,31	1,38	
JY(W) ≤ 0	0,07	0,04	0,00	-0,03	-0,06	-0,09	-0,13	-0,16	-0,19	-0,22	-0,25		
Ij(De) < Ij(De)гр	145,8	141,4	137,1	132,9	128,8	124,8	120,9	117,1	113,4	109,7	106,1		
JLi(D) < JLi(D)гр	Відрив полум'я	0,74	0,85	0,98	1,13	1,30	1,50	1,72	1,97	2,25	2,56	2,88	
IL(A) ≤ 1	0,77	0,80	0,82	0,85	0,88	0,91	0,94	0,97	1,00	1,03	1,06		
JL(W) ≥ 1 (0,95...1)	1,45	1,31	1,27	1,22	1,18	1,13	1,09	1,05	1,01	0,97	0,93		
IF*(A) ≤ 1	Проскок полум'я	0,88	0,89	0,90	0,92	0,93	0,95	0,96	0,98	0,99	1,01	1,03	
JF(W) ≤ 0	-0,23	-0,19	-0,15	-0,11	-0,08	-0,04	-0,01	0,03	0,06	0,09	0,12		
Число Воббе (чисте)	МДж/нм3	48,38	47,01	45,67	44,36	43,09	41,84	40,62	39,43	38,27	37,13	36,01	
Критерій Воббе	%	22,68%	19,20%	15,80%	12,49%	9,26%	6,10%	3,01%	-0,01%	-2,96%	-5,85%	-8,68%	

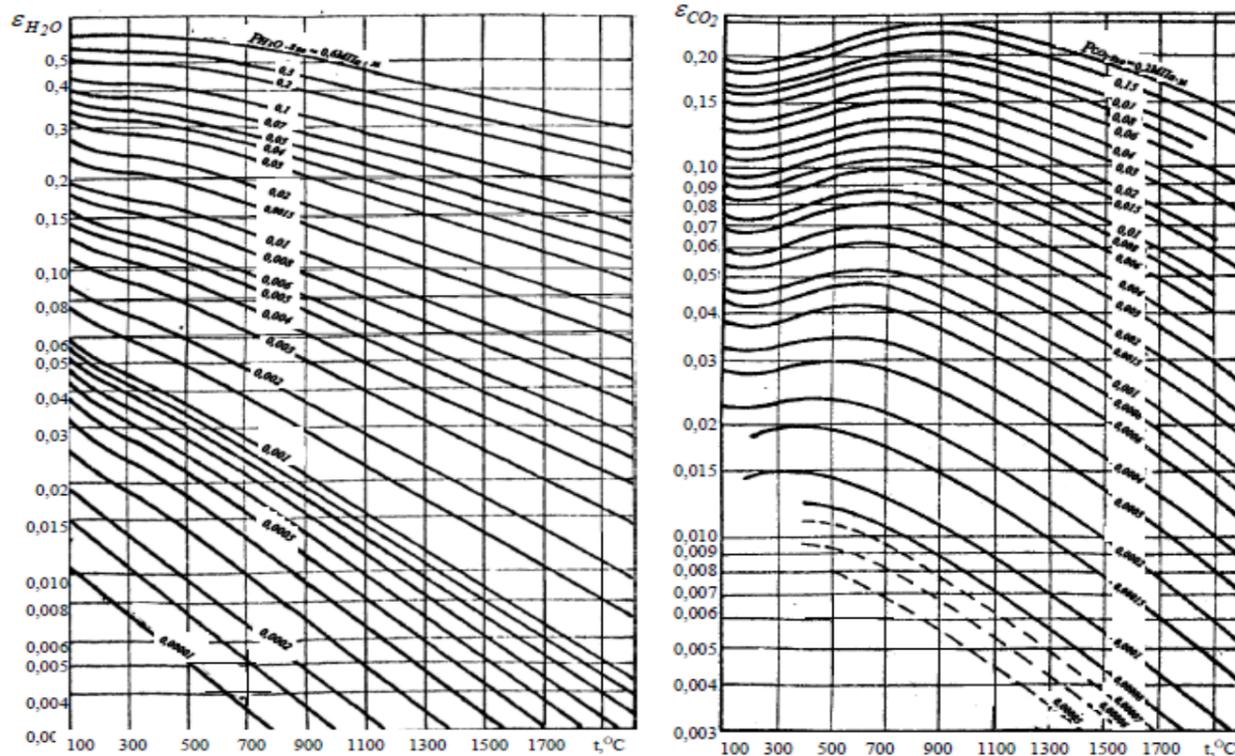


$$r1 \cdot W1 + \frac{(1 - r1)}{\sqrt{kd}} \cdot W2 = \sqrt{r1 + (1 - r1) / kd} \cdot W0$$

					2025	601-НТ-11393643-МР				
					Використання альтернативних видів горючих газів на об'єктах комунально-побутової і промислової теплоенергетики					
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				Стадія	Арк	Аркушів
Розробив		Панченко В.О.		22.01				P	8	12
Перевірів		Колієнко А.Г.		22.01						
					Робота стандартних пальників з газовими сумішами, номограми змішування газів					
					Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка"					
Н. контроль										
Зав кафедр		Голік Ю. С.		22.01						

Погодження: _____
 Інв.№ ар. _____ Підпис і дата Зам. Інв.№: _____

Базові номограми ступеня чорноти CO2 та H2O



Спрощена методика оцінки теплового випромінювання димових газів

$$\varepsilon = 1 - \exp(-10 \cdot k \cdot p \cdot l) \quad k = 0,8 \frac{1 + 20p_{H_2O}}{\sqrt{10pl}} \left(1 - 0,38 \frac{T_{\Gamma}}{1000}\right) \quad E = \varepsilon \sigma T_{\Gamma}^4 \quad l = 3,6V/F$$

Залежності апроксимації базових номограм ступеня чорноти CO2 та H2O

$$A = 0,398 C_{CO_2}^{-0,2609}$$

$$B = (0,053 - 0,1239 C_{CO_2}^{0,1718}) \times (t_{\delta}^{cep} / 100)$$

$$C = (0,003504 + 0,0009446 C_{CO_2}^{0,547}) \times (t_{\delta}^{cep} / 100)^2$$

$$D = 1,2016 C_{H_2O}^{-0,2146}$$

$$E = (0,0038 + 0,05133 C_{H_2O}^{-0,2105}) \times (t_{\delta}^{cep} / 100)$$

$$\varepsilon_{H_2O} = \exp[0,5708 - D - E],$$

$$\varepsilon_{CO_2} = \exp\{-[1,4918 + A + B + C]\},$$

$$\beta = 1 + \left(-5,0 + 5,3114 \cdot C_{H_2O}^{-0,01191}\right) p_{H_2O}^{0,74 + 0,03705 C_{H_2O}^{-0,1561}}$$

$$C_{CO_2} = p_{CO_2} \cdot l \cdot \varepsilon_{CO_2} \quad C_{H_2O} = p_{H_2O} \cdot l \cdot \varepsilon_{H_2O} \quad \varepsilon_{\Gamma} = \varepsilon_{CO_2} + \beta \times \varepsilon_{H_2O}$$

Спрощена методика оцінки теплопередачі випромінюванням

$$Q = \sigma F (\varepsilon_{\Gamma} T_{\Gamma}^4 - \varepsilon_{CT} T_{CT}^4) \quad Q = \varepsilon^*_{CT} \sigma F (\varepsilon_{\Gamma} T_{\Gamma}^4 - \varepsilon_{CT} T_{CT}^4) \quad \varepsilon_{CT}^* = 0,5(1 + \varepsilon_{CT})$$

$$Q \approx \varepsilon^*_{CT} \sigma F \varepsilon_{\Gamma} T_{\Gamma}^4, \text{ при } T_{\Gamma} \gg T_{CT}$$

Уточнена методика оцінки теплопередачі випромінюванням - моделювання роботи топки котла БГ-35

$$k = k_{\Gamma} \cdot r_{\Gamma} = \left(\frac{0,78 + 1,6 \cdot r_{H_2O}}{\sqrt{p_{\Gamma} \cdot l \cdot \varepsilon_{\Gamma}}} - 0,1 \right) \times \left(1 - 0,37 \frac{T_{\Gamma}}{1000} \right) \cdot r_{\Gamma}, \quad 1/(M \cdot \text{кгс}/\text{см}^2),$$

$$k_C = 0,03 \cdot (2 - \alpha_{T''}) \cdot (1,6 \cdot \frac{T_{T''}}{1000} - 0,5) \cdot \frac{C^P}{H^P}$$

$$C^P / H^P = 0,12 \cdot \sum \frac{m}{n} C_m H_n$$

$$\varepsilon_{\Gamma} = 1 - e^{-k_{\Gamma} \cdot r_{\Gamma} \cdot P \cdot S_{\Gamma}}$$

$$\varepsilon_{\Gamma C} = 1 - e^{-(k_{\Gamma} \cdot r_{\Gamma} + k_C) \cdot P \cdot S_{\Gamma}}$$

$$\varepsilon_{\phi} = m \cdot \varepsilon_{\Gamma C} + (1 - m) \cdot \varepsilon_{\Gamma} \quad \varepsilon_{\phi} = \varepsilon_{\Gamma} + \Delta \varepsilon_C$$

$$\theta_{\Gamma}'' = \frac{T_{\Gamma}}{T_a} = \frac{B_0^{0,6}}{M \cdot \varepsilon_{\Gamma}^{0,6} + B_0^{0,6}} \quad B_0 = \frac{\varphi \cdot B_p \cdot (V_c)_{cp}}{4,9 \cdot 10^{-8} \cdot \psi_{cp} \cdot F_{CT}^T \cdot T_a^3} \quad \varepsilon_{\Gamma} = \frac{\varepsilon_{\phi}}{\varepsilon_{\phi} + (1 - \varepsilon_{\phi}) \cdot \psi_{cp}}$$

$$\eta_{\text{ПК}} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6)$$

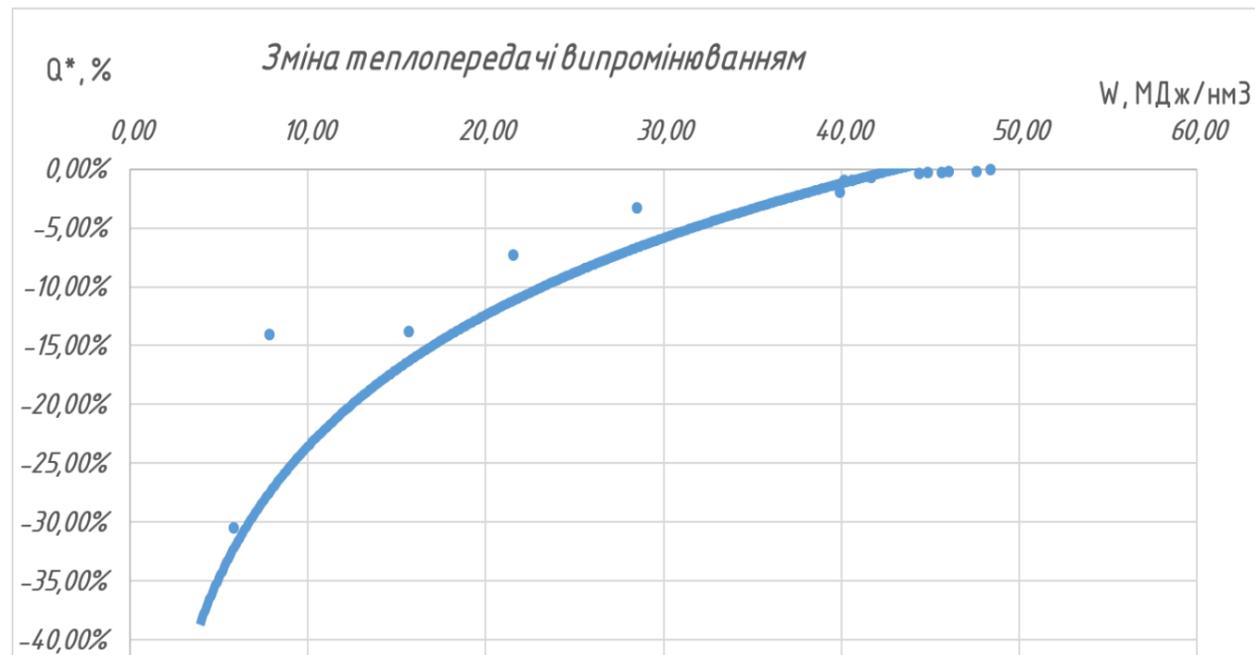
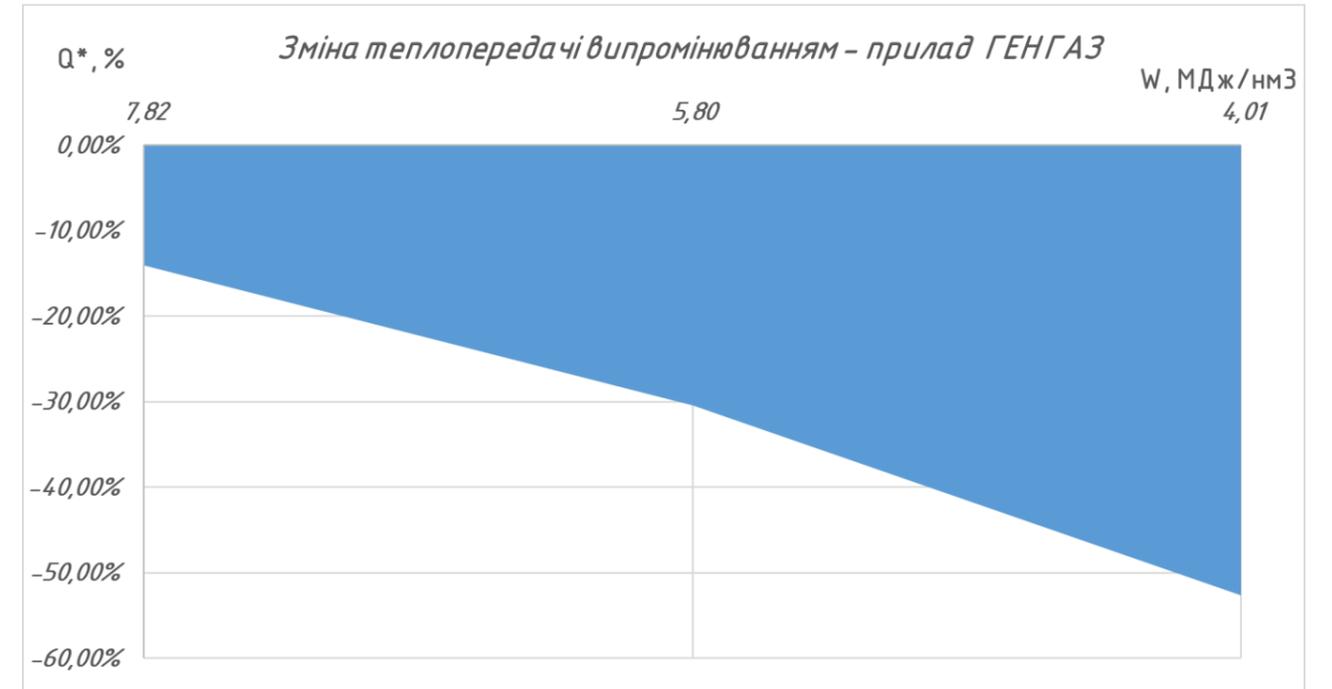
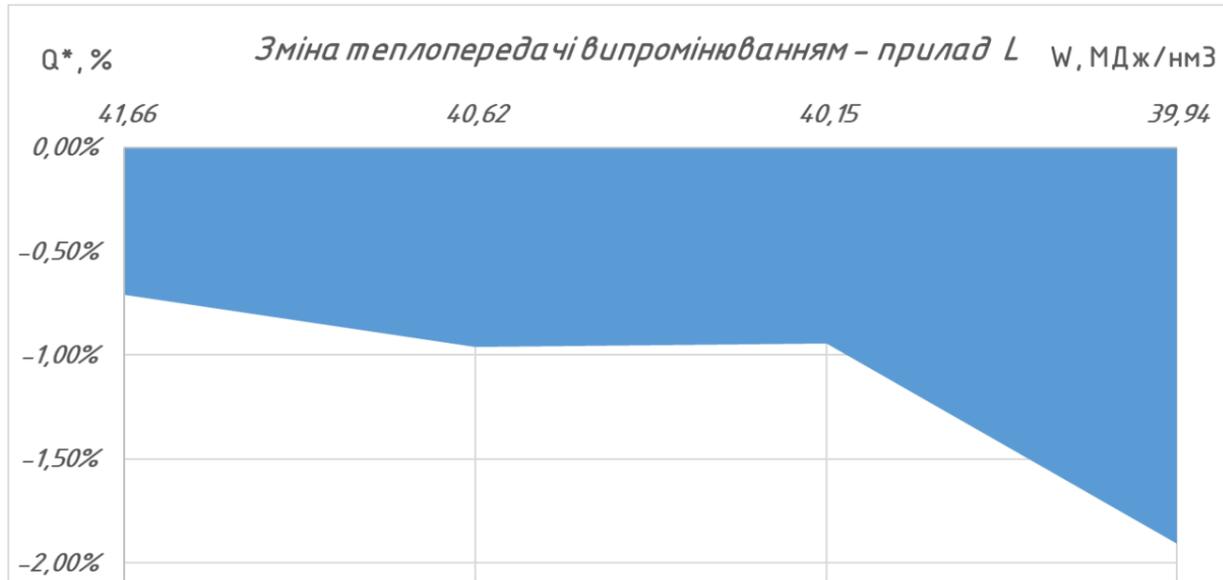
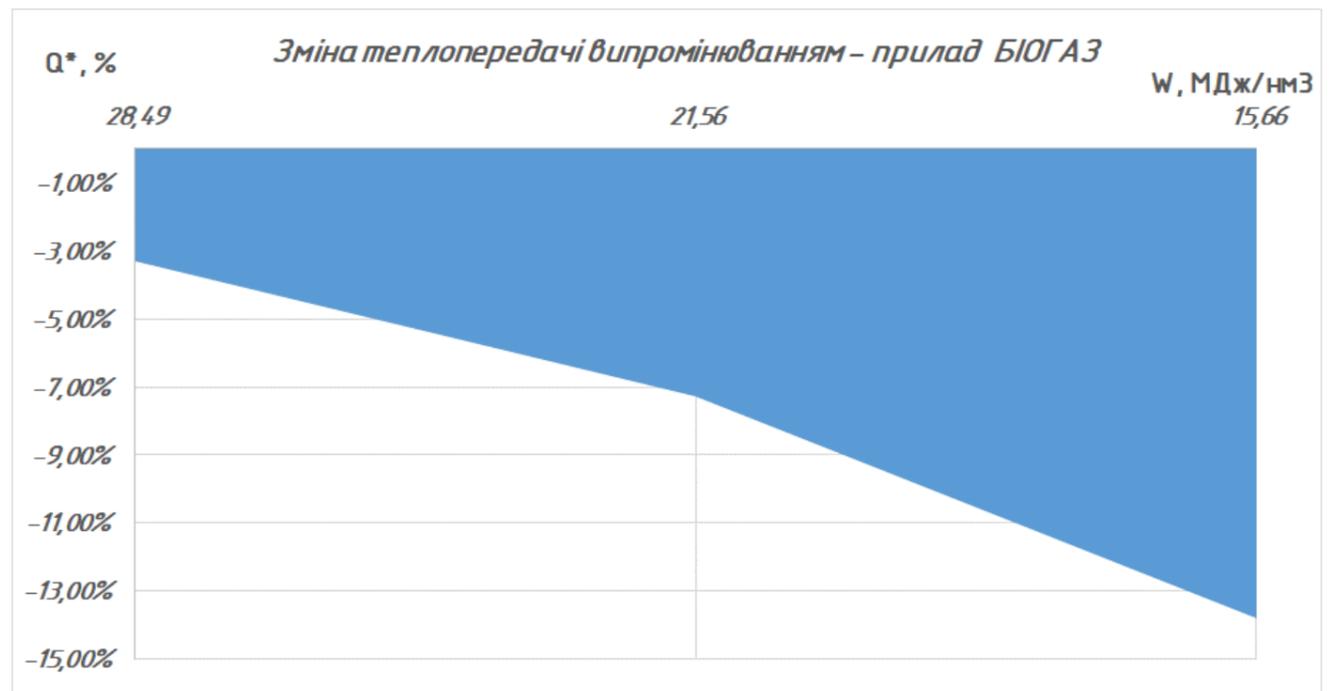
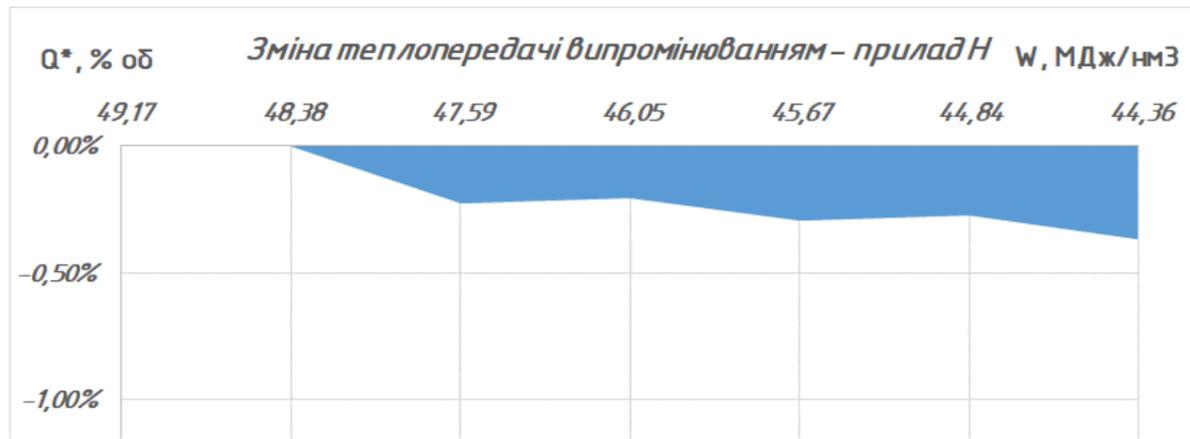
$$\varphi = 1 - \frac{q_5}{q_5 + \eta_{\text{ПК}}} \quad Q_{\Gamma} = Q_p^p \cdot \frac{100 - q_3 - q_4 - q_6}{100 - q_4} + Q_{\text{пов}}$$

					2025	601-НТ-11393643-МР				
					"Використання альтернативних видів горючих газів на об'єктах комунально-побутової і промислової теплоенергетики"					
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				Стадія	Арк.	Аркушів
Розробив		Панченко В.О		22.01				P	10	12
Перевірів		Колієнко А.Г		22.01						
					Аналітичні залежності для оцінки теплообміну випромінюванням					
					Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка"					
Н. контроль										
Зав кафедр	Голік Ю. С				22.01					

Погодження:

Інв.№ ар. Підпис і дата Зам.Інв.№

$$M=A - B \cdot X_T$$

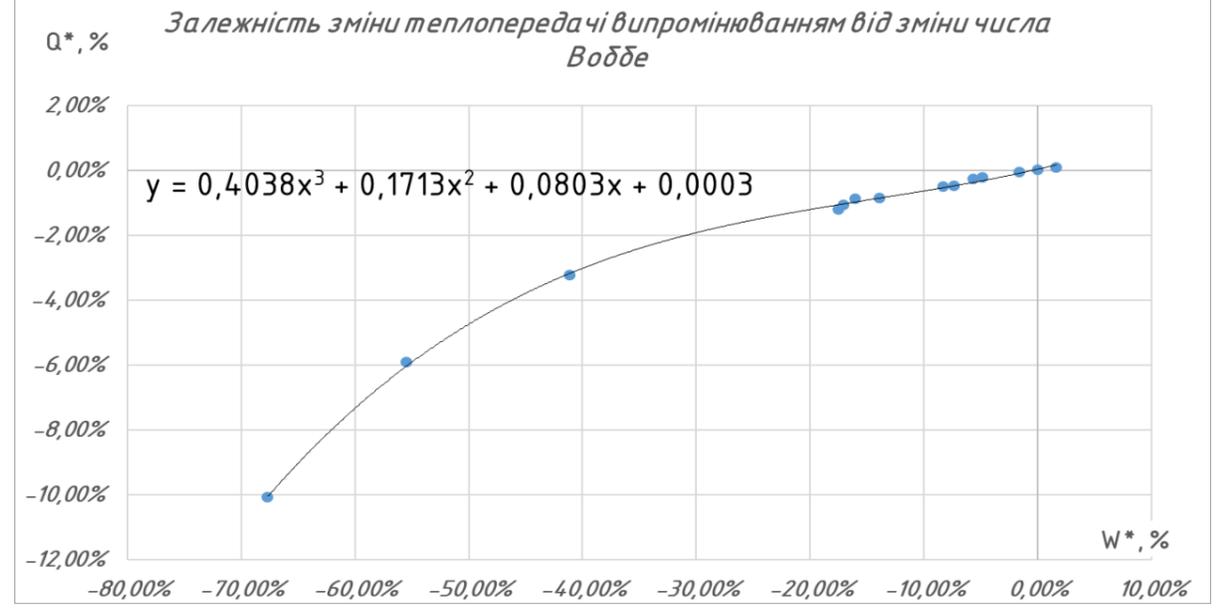


					2025	601-НТ-11393643-МР				
					"Використання альтернативних видів горючих газів на об'єктах комунально-побутової і промислової теплоенергетики"					
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				Стадія	Арк	Аркушів
Розробив		Панченко В.О		22.01				Р	11	12
Перевірів		Колієнко А.Г		22.01						
					Графічні залежності зміни теплопередачі випромінюванням газів дослідження			Національний університет "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка"		
Н. контроль										
Зав кафедр		Голік Ю. С		22.01						

Погодження:					
Інв.Лі ар.	Підпис і дата	Зам.Інв.Лі			



Родовища Битківське	УКПНГ Розпашівка	$r_1 = 0,08$ (біогаз)	Біометан №2	ВРГ Комішнянської УКПГ (ВРГ Попівка)	$r_1 = 0,24$ (біогаз)	Біометан №5	Родовище Радченки
---------------------	------------------	-----------------------	-------------	--------------------------------------	-----------------------	-------------	-------------------



Орієнтовні економічні втрати при переході роботи котла БГ-35 з природного газу на біогаз : $0,06 * 9 \text{ грн} * 3945 \text{ нм}^3 = 2130 \text{ грн/год}, 51\ 127 \text{ грн/добу}$

Втрати теплоті дифузійного пальника відносно пальника дуттьового типу групи L



Біогаз 1	Біогаз 2	Біогаз 3	Генера-торний газ 1	Генера-торний газ 2	Генера-торний газ 3
----------	----------	----------	---------------------	---------------------	---------------------

Топка котла БГ35, - 35т/год P=40кгс/см2 t=440С	Од вимір	$r_1 = 0,757$ (біогаз)	$r_1 = 0,24$ (біогаз)
		$\text{CH}_4=66,19$ $\text{C}_2\text{H}_6=0,82$ $\text{C}_3\text{H}_8=0,19$ $\text{C}_4\text{H}_{10}=0,11$ $\text{C}_5\text{H}_{12}=0,11$ $\text{H}_2=1,14$ $\text{N}_2=2,66$	$\text{CH}_4=84,68$ $\text{C}_2\text{H}_6=2,56$ $\text{C}_3\text{H}_8=0,59$ $\text{C}_4\text{H}_{10}=0,33$ $\text{C}_5\text{H}_{12}=0,32$ $\text{H}_2=0,36$ $\text{N}_2=1,93$
α		1,35	1,2
Q T	кВт/м3	69,68	80,16
Q *	%	-13,08%	0,00%
V	нм3/год	3300	2448

Економічний ефект від заміни дифузійного пальника
 Вартість біогазової суміші: $0,24 * 9 \text{ грн/ нм}^3 + 0,76 * 15,8 \text{ грн/ нм}^3 = 14,17 \text{ грн/нм}^3$.
 Годинна економія палива: $0,131 * 14,17 \text{ грн/нм}^3 * 2448 \text{ нм}^3/\text{год} = 4\ 543,5 \text{ грн/год}$ Сезонна економія: $4\ 543,5 \text{ грн/год} * 24 * 100 = 10\ 904\ 418 \text{ грн/рік}$.

Погодження:				
Інв.№ ар.	Підпис і дата	Зам.Інв.№		

				2025	601-НТ-11393643-МР		
					"Використання альтернативних видів горючих газів на об'єктах комунально-побутової і промислової теплоенергетики"		
Змін.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Стадія	Арк	Аркушів
Розробив		Панченко В.О		22.01	Р	12	12
Перевірів		Колієнко А.Г		22.01			
Н. контроль					Зміна теплопередачі випромінюванням у топці котла БГ-35		
Зав кафедри		Голік Ю. С		22.01			