

**ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

МАЛІСЕВИЧ НАТАЛІЯ МИКОЛАЇВНА

УДК 006.91:681.121

ДИСЕРТАЦІЯ

**ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОТИ ЗГОРЯННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ ІЗ
ЗАСТОСУВАННЯМ ТОРЦЕВИХ ЗВУЖУВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ**

Спеціальність – 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

Галузь знань – 15 Автоматизація та приладобудування

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Н.М. Малісевич

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник:

Середюк Орест Євгенович,

доктор технічних наук, професор

Івано-Франківськ – 2020

АНОТАЦІЯ

Малисевич Н.М. Вимірювання теплоти згоряння природного газу із застосуванням торцевих звужувальних пристроїв. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 152 – Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка. Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Міністерство освіти і науки України, Івано-Франківськ, 2020.

Дисертація присвячена вирішенню актуального науково-прикладного завдання у галузі вимірювання і контролю якісних параметрів природного газу – удосконалення методу і технічних засобів для вимірювання теплоти згоряння природного газу за температурою його спалювання за місцем газоспоживання із застосуванням витратовимірвальних торцевих звужувальних пристроїв.

Об'єктом дослідження є процес вимірювання теплоти згоряння природного газу

Предметом дослідження є засоби вимірвальної техніки для визначення теплоти згоряння природного газу за температурою його спалювання при застосуванні витратовимірвальних торцевих звужувальних пристроїв, їх математичні і метрологічні моделі.

В роботі здійснений аналіз сучасного стану наукового, нормативного і технічного забезпечення при вимірюванні теплоти згоряння природного газу.

Проаналізовано поняття теплоти згоряння природного газу як його якісної характеристики на основі впливових факторів і параметрів, що визначають її кількісну оцінку при обліку природного газу за його енергетичною цінністю. Розглянуто прямі і опосередковані методи для визначення теплоти згоряння природного газу і технічні засоби для реалізації цих методів в лабораторних умовах і при проведенні експрес-контролю якості природного газу у споживачів. Оцінено сучасну вітчизняну і закордонну нормативну базу для визначення теплоти згоряння природного газу.

За результатами аналізу встановлено, що тенденції розвитку засобів вимірювання теплоти згоряння природного газу стосуються не тільки високоточних калориметрів, але і засобів для експрес-контролю теплоти згоряння природного газу безпосередньо за місцем газоспоживання.

Показано, що вимірювання теплоти згоряння природного газу за місцем його споживання є необхідною складовою для підвищення точності обліку природного газу і може бути реалізовано, наприклад, шляхом проведення експрес-контролю теплоти згоряння природного газу безпосередньо у споживачів з використанням мобільних інформаційно-вимірювальних систем вимірювання енергетичних характеристик природного газу. На базі опрацьованих літературних джерел виявлено відсутність на даний час таких засобів для використання у практичній діяльності газопостачальних і контролюючих організацій, що характеризує актуальність дисертаційної роботи.

На підставі проведеного аналізу обґрунтовано актуальність і доцільність вдосконалення методів і засобів для вимірювання теплоти згоряння природного газу за місцем газоспоживання. Сформульовано завдання, які потребують вирішення, і обґрунтовано напрями дисертаційних досліджень.

Проведені теоретичні дослідження процесу вимірювання теплоти згоряння природного газу на засадах використання температури спалювання природного газу як основного вимірюваного інформативного параметра. Досліджено фактори, які впливають на температуру згоряння газу. Такими є компонентний склад, теплофізичні параметри, вологість газу, вологість навколишнього середовища, в якому відбувається згоряння газу, а також технічні характеристики, конструктивні особливості виготовлення і умови функціонування пристрою спалювання газу.

Розглянуті теоретичні засади згоряння горючих газів, які дозволили обґрунтувати патентозахищений за участю здобувачки спосіб експрес-визначення теплоти згоряння газів за їх температурою спалювання з одночасним точним вимірюванням витрати і параметрів газу, який подається

в палиник, та параметрів навколишнього середовища, в якому відбувається згоряння досліджуваного газу.

На базі комп'ютерного моделювання досліджено вплив вологості досліджуваного газу і вплив вологості повітря навколишнього середовища на результат вимірювання теплоти згоряння природного газу.

Аналогічним методом досліджено взаємозв'язок фізичних характеристик і компонентного складу природного газу з його теплою згоряння за умови вимірювання витрати газу торцевими звужувальними перетворювачами. Отримані алгоритмічні залежності між теплою згоряння природного газу і його коефіцієнтом стисливості, який визначається впливом густини газу і вмісту негорючих компонентів. Встановлено суттєвий (на порядок більший) вплив зміни густини природного газу на коефіцієнт стисливості і теплоту згоряння газу порівняно із зміною вмісту в ньому азоту і вуглекислого газу.

Досліджено вплив густини газу і вмісту азоту на показник адіабати і коефіцієнт розширення газу за умов вимірювання витрати з використанням торцевого звужувального пристрою у складі палиника спалюваного газу і, як наслідок, вплив на результати визначення за цих умов теплоти згоряння природного газу. Показано, що найбільш суттєвим впливом при вимірюванні витрати спалюваного газу із застосуванням торцевих звужувальних пристроїв характеризуються умови їх функціонування, які визначаються відношенням перепаду тиску на торцевому соплі до абсолютного тиску на його вході.

За результатами теоретичних і експериментальних досліджень отримана математична модель взаємозв'язку теплоти згоряння природного газу з його температурою спалювання при згорянні сумішей газ-повітря різних якісних складів компонент, а також різного їх об'ємного співвідношення, що дає можливість реалізувати процес вимірювання теплоти згоряння природного газу з використанням термоперетворювачів і торцевих звужувальних перетворювачів витрати.

Отримані алгоритмічні залежності між теплотою згоряння природного газу і його теплофізичними характеристиками (коефіцієнт стисливості, вміст вуглеводневих і неуглеводневих компонентів природного газу, густина) за умови застосування витратовимірювальних торцевих звужувальних перетворювачів у пристрої спалювання газу, що дає можливість досліджувати вплив компонентного складу природного газу на інформативні параметри засобу вимірювання теплоти згоряння природного газу.

Результати моделювання дозволили запропонувати ітераційний метод розрахунку теплоти згоряння природного газу при його експериментальному визначенні без безпосереднього вимірювання густини газу на основі попереднього задання значення густини природного газу і з врахуванням за цих умов коефіцієнтів стисливості і розширення газу на його теплоту згоряння.

Розроблено і метрологічно досліджено алгоритм визначення коефіцієнта стисливості біогазу, що є необхідною умовою при визначенні його теплоти згоряння розробленим методом на основі вимірювання температури спалювання.

На основі виконаних теоретичних досліджень розроблене технічне рішення методу визначення теплоти згоряння природного газу, який реалізований на базі відповідної інформаційно-вимірювальної системи.

Розроблений лабораторний стенд для експериментальних досліджень методу вимірювання теплоти згоряння природного газу за його температурою спалювання. Експериментально досліджено вплив якісного і кількісного складу газових сумішей на температуру полум'я досліджуваного газу за різних значень витрати газу і зміни умов його згоряння.

Дослідження проводилися за умов згоряння природного газу теплотворної здатності $35,3 \text{ МДж/м}^3$ (8431 ккал/м^3) і газоподібного стану пропан-бутанової суміші скрапленого газу калорійністю $46,8 \text{ МДж/м}^3$ (11178 ккал/м^3). При цьому згоряння газу здійснювалося як з формуванням

різних об'ємних співвідношень повітря з досліджуваним газом перед його спалюванням, та і без подавання всередину пальника додаткового повітря.

За результатами експериментальних досліджень встановлено зростання температури спалювання газу із зростанням його калорійності. При цьому експериментально підтверджено збільшення температури спалювання газу із збільшенням об'ємної долі додаткового повітря у суміші, яка згоряє. Водночас встановлено меншу чутливість до зміни витрати досліджуваного газу за більших значень його робочих витрат, завдяки чому встановлено один із факторів оптимізації функціонування газових пальників у складі засобу вимірювання теплоти згоряння природного газу.

Експериментальним шляхом здійснено вимірювання фактичної температури полум'я для умов лабораторного стенду і встановлено відмінність цієї температури полум'я від довідкових даних. Досліджено нерівномірність температури полум'я вздовж його висоти, яка може сягати до 200 °С, що виявлено вимірюванням за допомогою мініатюрного безкорпусного температурного зонда. Виявлено можливість вимірювання температури полум'я термоперетворювачами з захисними кожухами і врахування цього фактору при калібруванні засобу вимірювання теплоти згоряння природного газу. Оцінено кількісне значення методичної похибки при застосуванні різних термоперетворювачів із захисними кожухами, яка не перевищує $\pm 1,6$ %.

За результатами експериментальних досліджень обґрунтовано можливість реалізації пристрою експрес-контролю теплоти згоряння природного газу шляхом використання інформативного параметра – температури згоряння досліджуваних газів. Експериментально підтверджено зростання температури полум'я досліджуваних газів із зростанням їх теплоти згоряння. Встановлено необхідність подальшого дослідження оптимізаційних конструктивних характеристик пальників і робочих умов спалювання досліджуваних газів при експрес-контролі їх теплоти згоряння.

Розглянуто прикладні аспекти застосування вимірювального контролю теплоти згоряння в сучасних лічильниках природного газу, які стосуються застосуванням в них елементів SMART-технологій, які забезпечують отримання результатів обліку природного газу в одиницях енергії і забезпечують можливість діагностування при цьому якості природного газу шляхом контролю за неперевищенням допустимих границь зміни теплоти згоряння природного газу.

Викладено суть патентозахищеної за участю здобувачки поршневої витратовимірювальної еталонної установки для калібрування торцевих звужувальних пристроїв перетворення витрати, яка може бути реалізована за малих об'ємних витрат з використанням робочого середовища природного газу.

Розглянуто результати метрологічних досліджень розробленого методу вимірювання теплоти згоряння природного газу. В цьому аспекті досліджено вплив окремих складових похибки, які стосуються вимірювання температури спалюваного газу, впливу вмісту азоту, а також методичної похибки теоретико-експериментального оцінювання конструктивного коефіцієнта пальника ($\pm 1,54\%$), яка є складовою похибки розробленого методу визначення теплоти згоряння природного газу.

Проведений метрологічний аналіз методу визначення теплоти згоряння природного газу на базі застосування теорії похибок (границя основної допустимої похибки вимірювання $\pm 2,5\%$) і концепції невизначеності (розширена невизначеність при коефіцієнті охоплення 2 і довірчій ймовірності 0,95 становить $\pm 1,61\%$), який обґрунтовує можливість практичного застосування цього методу за місцем газоспоживання.

Ключові слова: природний газ, вуглеводневі гази, теплота згоряння, якість природного газу, експрес-контроль, температура спалювання, торцевий звужувальний пристрій, термоперетворювач, витрата газу, температура газу, густина газу, вологість газу, математичне моделювання, кореляція, моделювання потоків, система контролю, технічне діагностування,

кваліметричне вимірювання, метрологічна модель, похибка, стандартна невизначеність, оцінка точності результату вимірювання.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧКИ

1. Середюк О. Є., Малісевич Н. М., Ткачук В. В., Середюк Д. О. Нові вимірювальні технології у побутових SMART-лічильниках природного газу. *Український метрологічний журнал*. 2020. №1А. С. 134-135. (журнал входить до міжнародної наукометричної бази *Web of Science*).
2. Serediuk O. Ye., Malisevych N. M. Evaluation of Unauthorization at the Express-Control of Heating of Natural Gas. *Measurement Uncertainty: Scientific, Normative, Applied and Methodical Aspects* : Scientific Workshop 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL 2019), Sozopol, Bulgaria, 06-08 September 2019. Sozopol, 2019. P. 694-697. (входить до міжнародної наукометричної бази *Scopus*).
3. Малісевич Н. М., Середюк О. Є. Аналіз патентозахищених технічних рішень у сфері визначення теплоти згорання природного газу. *Методи та прилади контролю якості*. 2018. № 1. С. 58-69.
4. Середюк О., Малісевич Н. Дослідження впливу конструктивних факторів на технічну реалізацію методу експрес-контролю теплоти згорання природного газу. *Перспективні технології та прилади: Збірник наукових праць Луцького НТУ*. 2019. № 15. С. 81-89.
5. Середюк О. Є., Малісевич Н. М. Дослідження впливу температурного фактору за експрес-контролю теплоти згорання природного газу. *Метрологія та прилади*. 2020. №2(82). С. 44-50. (журнал входить до міжнародної наукометричної бази *Index Copernicus*).
6. Середюк О., Малісевич Н. Моделювання впливу теплоти згорання природного газу на вимірювання його витрати торцевими соплами. *Перспективні технології та прилади: Збірник наукових праць Луцького НТУ*. 2020. № 16. С. 63-72.

7. Orest Serediuk, Nataliya Malisevych, Mariusz R. Rząsa. Wpływ wilgotności na błędy metody pomiarowej do wyznaczania wartości ciepła spalania gazu ziemnego. *Zeszytów Naukowych Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej* : L Międzyuczelniana Konferencja Metrologów (MKM 2018), 10-12 września 2018, Szczecin – Kopenhaga: Gdańsk, 2018. №59. S. 175-179.
8. Seredyuk O. E., Malisevych N., Rząsa M. R., Analiza błędów metody pomiarowej do wyznaczania ciepła spalania gazu ziemnego. *Pomiary Automatyka Robotyka*. R. 23, Nr 2/2019. S. 39-43. (входить до міжнародної наукометричної бази *Index Copernicus*).
9. Спосіб експрес-визначення теплоти згорання природного газу / О.Є. Середюк, Т.В. Лютенко , Н.М. Малісевич: пат. 112737 С2 Україна: МПК (2006.01) G01N25/20. № a201512215 ; заявл. 09.12.2015; опубл. 10.10.2016, Бюл. № 19.
10. Калібрувальна поршнева установка для лічильників і витратомірів газу / О.Є. Середюк, В.С. Воцинський, Д.О. Середюк, Н.М. Малісевич: пат. 120308 С2 Україна: МПК G01N 25/20 (2006.01), G01N 25/22 (2006.01), G01N 25/26 (2006.01). № a201712900 ; заявл. 26.12.2017 ; опубл. 11.11.2019, Бюл. № 21.
11. Середюк О. Є., Варша З. Л., Малісевич В. В., Малісевич Н. М. Дослідження впливу теплофізичних параметрів природного газу на його теплоту згорання. *Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС-2017)* : зб. тез доп. IV-ої міжнар. наук. конф., 31 жовтня – 2 листопада 2017р., Вінниця: ПП «ТД«Едельвейс і К», 2017. С. 47.
12. Середюк О. Є., Малісевич Н. М. Нормативне забезпечення визначення якості природного газу. *Нафтогазова енергетика 2017* : тези доп. міжнар. наук.-техн. конф., 15-19 травня 2017р., Івано-Франківськ: Голіней О. М., 2017. С. 295-297.
13. Середюк О. Є., Малісевич Н. М., Лютенко Т. В. Новий спосіб контролю теплоти згорання природного газу. *Вимірювання, контроль та*

діагностика в технічних системах : зб. тез доп. IV-ої міжнар. наук. конф., 31 жовтня – 2 листопада 2017р., Вінниця: ПП «ТД«Едельвейс і К», 2017. С. 93-94.

14. Малісевич Н. М., Середюк О. Є. Лабораторний стенд для апробації нового способу експрес-контролю теплоти згорання природного газу. *Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання* : зб. тез доп. VI-ої всеукр. наук.-практ. конф. студентів і молодих учених, 15-16 листопада 2017р., Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2017. С. 43.
15. Середюк О. Є., Малісевич Н. М., Хомик Г. В. Статистичні дослідження якісних характеристик природного газу в умовах ПАТ «ІВАНО-ФРАНКІВСЬКГАЗ». *Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання* : зб. матер. доп. 8-ої міжнар. наук.-техн. конф. пам'яті проф. Ігоря Кісіля, 14-16 листопада 2017р., Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2017. С. 89-91.
16. Середюк О. Є., Малісевич Н. М. Дослідження методичної похибки експериментального оцінювання конструктивного коефіцієнта пальника при визначенні теплоти згорання природного газу. *Technical Using of Measurement – 2018*: тези доп. IV-ої всеукр. наук.-техн. конф. молодих вчених у царині метрології, 13-18 лютого 2018 р., Славське: Академія метрології України, 2018. С. 49-50.
17. Малісевич Н. М., Середюк О. Є. Моделювання впливу вологості при експериментальному визначенні теплоти згорання природного газу : *Приладобудування: стан і перспективи* : зб. тез доп. XVII міжнар. наук.-техн. конф., 15 – 16 травня 2018 р., Київ: НТУУ «КПІ», ПБФ, 2018. С. 204-205.
18. Середюк О. Є., Малісевич Н. М. Метрологічний аналіз практичного алгоритму визначення коефіцієнта стисливості біогазу. *Technical Using of Measurement – 2019* : тези доп. V всеукр. наук.-техн. конф. молодих вчених

- у царині метрології, 29 січня - 2 лютого 2019 р., Славське: ТзОВ «Галицька видавнича спілка», 2019. С. 53-55.
19. Середюк О. Є., Малісевич Н. М. Метрологічні дослідження методу експрес-визначення теплоти згорання природного газу. *Приладобудування: стан і перспективи* : тези доп. XVIII міжнар. наук.-техн. конф., 15 - 16 травня 2019 р., Київ: НТУУ «КПІ», ПБФ, 2019. С. 204-205.
 20. Малісевич Н. М. Моделювання температурного поля поверхні пластини перетворювача теплоти згорання природного газу. *Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості* : тези доп. IV всеукр. наук.-практ. конф. молодих учених і студентів, 10-11 жовтня 2019р., Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2019. С. 202-204.
 21. Малісевич Н. М. Дослідження впливу вмісту азоту на похибку визначення теплоти згорання природного газу. *Технічне регулювання, метрологія, якість, інформаційні та транспортні технології* : матеріали X всеукр. наук.-практ. конф. молодих учених і студентів, 16-17 травня 2019 р., Одеса: Бондаренко М. О., 2019. С.47-48.
 22. Середюк О. Є., Малісевич Н. М. Практичний спрощений алгоритм визначення коефіцієнта стисливості біогазу. *Системи-2018* : тези доп. міжнар. наук.-техн. конф., 22-23 листопада 2018 р., Львів: ТзОВ «Галицька видавнича спілка», 2018. С. 37-38.
 23. Середюк О. Є., Малісевич Н. М. Експериментальні дослідження методу вимірювання температури спалювання газу при визначенні його теплоти згорання. *Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС-2019)* : зб. тез доп. V міжнар. наук. конф., 29-30 жовтня 2019 р., Вінниця: ВНТУ, 2019. С. 30-31.
 24. Малісевич Н. М. Дослідження динамічних характеристик термоперетворювачів при визначенні теплоти згорання природного газу. *Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання* : зб.

тез доп., VII всеукр. наук.-практ. конф. студ. і молодих вчених, 19-20 листопада 2019 р., Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2019. С. 83-84.

25. Середюк О. Є., Малісевич Н. М. Дослідження методичної похибки вимірювання температури полум'я при згоранні природного газу. *Technical using of measurement–2020* : тези доп. VI всеукр. наук.-техн. конф. молодих вчених у царині інформаційно-вимірювальних технологій та метрології, 4-7 лютого 2020 р., Славське: ТЗОВ «Галицька видавнича спілка», 2020. С. 146-149.
26. Малісевич Н. М., Середюк О. Є. Апробація експрес-контролю теплоти згорання паливних газів за їх температурою при спалюванні. *Прикладні науково-технічні дослідження* : тези доп. IV міжнар. наук.-практ. конф., 1-3 квітня 2020 р., Івано-Франківськ: Академія технічних наук України, 2020. С. 97-98.

ABSTRACT

Malisevych N. M. Measurement of Heat of Combustion of Natural Gas Using Face Orifices. – Qualification Scientific Paper with the Manuscript Copyright.

Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy in Specialty 152 – Metrology and Information-Measuring Technology. Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ministry of Education and Science of Ukraine, Ivano-Frankivsk, 2020.

The thesis is devoted to solving an urgent scientific and applied problem in the field of measuring and monitoring the quality parameters of natural gas that consists in improvement of the methods and tools for measuring the heat of combustion of natural gas with the help of the flow-rate measuring face orifices based on the temperature of gas combustion at the place of its consumption.

The object of the study is the process of measuring the heat of combustion of natural gas.

The subject of the study is made by the tools for measuring the heat of combustion of natural gas based on the temperature of its combustion using the flow-rate measuring face orifices, as well as their mathematical and metrological models.

The paper analyzed current state of the scientific, regulatory and technical means for measuring the heat of combustion of natural gas.

The concept of the heat of combustion of natural gas was studied as its qualitative characteristic on the basis of the influential factors and parameters that determine the quantitative assessment when metering natural gas consumption based on its energy value. The direct and indirect methods for measuring the heat of combustion of natural gas, as well as the technical means for implementing these methods under laboratory conditions and when carrying out express control of the natural gas quality at consumers' places of residence were considered. The modern domestic and foreign regulatory framework for determining the heat of combustion of natural gas was evaluated.

Based on the results of the analysis, it was found out that the trends of development of the means for measuring the heat of combustion of natural gas refer not only to the high-precision calorimeters, but also to the means for express control of the heat of combustion of natural gas at the place of its consumption.

It was shown that the measurement of the heat of combustion of natural gas at the place of its consumption is a necessary component to improve the accuracy of natural gas consumption metering and can be implemented, for example, by conducting express control of the heat of combustion of natural gas using mobile information and measuring systems for determining energy characteristics of natural gas at consumers' places of residence. Based on the processed literature sources, it was found out that there are currently no such means for use in the practical activities of gas supply and control organizations, which characterizes the relevance of the thesis.

The conducted analysis was used to substantiate the relevance and appropriateness of improving the methods and means for measuring the heat of combustion of natural gas at the place of its consumption. The tasks to be solved were formulated and the directions of the thesis studies were grounded.

The theoretical studies of the process of measuring the heat of combustion of natural gas based on the use of the temperature of combustion of natural gas as the main measured informative parameter were carried out. The factors influencing the temperature of gas combustion were examined. They include the compositional analysis, thermophysical parameters, gas humidity, ambient humidity, at which the gas is combusted, as well as the technical characteristics, design manufacturing features and operating conditions of the gas combustion device.

The theoretical foundations of combustion of combustible gases were considered and made it possible to substantiate the method of express determination of the heat of combustion of gases based on their combustion temperature with simultaneous accurate measurement of the flow rate and parameters of the gas supplied into the burner, as well as the parameters of the environment, in which the

studied gas is combusted (the method had been patented with the participation of the applicant).

The computer modeling was utilized to examine the influence of the studied gas humidity and influence of the ambient air humidity on the results of measurement of the heat of combustion of natural gas.

A similar method was used to investigate the relationship between the physical characteristics and composition of natural gas and its heat of combustion when measuring the gas flow rate with the help of the face orifice transducers. The algorithmic dependencies between the heat of combustion of natural gas and its compressibility factor, which is determined by the influence of the gas density and content of non-combustible components, were obtained. A significant (by an order greater) influence of the change in the density of natural gas on the compressibility factor and heat of combustion of gas when compared to the change in the content of nitrogen and carbon dioxide in it was established.

The influence of the gas density and nitrogen content on the adiabatic exponent and gas expansion factor when measuring the flow rate with the help of the face orifice as a part of the gas burner and subsequent influence of the heat of combustion of natural gas under these conditions on the determination results were studied. It was shown that the conditions of functioning of the face orifices, which are determined by the ratio of the pressure drop at the face nozzle to the absolute pressure at its inlet, exert the most significant influence when measuring the flow rate of the burn gas using the face orifices.

The mathematical model for the relationship between the heat of combustion of natural gas and its combustion temperature during the combustion of gas-air mixtures with various qualitative compositions and different volumetric ratios was obtained on the basis of the results of the theoretical and experimental studies. It makes it possible to implement the process of measuring the heat of combustion of natural gas using thermal transducers and face orifice flow transducers.

The algorithmic relationships between the heat of combustion of natural gas and its thermophysical characteristics (compressibility factor, density, content of

hydrocarbon and non-hydrocarbon components of natural gas) provided that the flow-rate measuring face orifice transducers are used as a part of the gas combustion device were obtained. It allowed studying the influence of the composition of natural gas on the informative parameters of the tool for measuring the heat of combustion of natural gas.

The modeling results made it possible to propose an iterative method for calculating the heat of combustion of natural gas when carrying out its experimental determination without the necessity of direct measurement of the gas density on the basis of the presetting of the density value of natural gas and taking into account the influence of the gas compressibility and expansion factors on its heat of combustion under these conditions.

An algorithm for determining the compressibility factor of biogas, which is considered to be a pre-requisite when measuring its heat of combustion by means of the developed method based on the measurement of the combustion temperature, was worked out and studied metrologically.

A technical solution for the method for determining the heat of combustion of natural gas, which is implemented on the basis of an appropriate information and measuring system, was developed based on the performed theoretical studies.

A laboratory bench was worked out for experimental studies of the method for measuring the heat of combustion of natural gas according to its combustion temperature. The influence of the qualitative and quantitative composition of the gas mixtures on the flame temperature of the studied gas at different values of the gas flow rate and changes in the conditions of its combustion was studied experimentally.

The studies were carried out under the conditions of combustion of natural gas with the calorific value of 35.3 MJ/m^3 (8431 kcal/m^3) and gaseous propane-butane mixture of liquefied gas with the calorific value of 46.8 MJ/m^3 (11178 kcal/m^3). In such a case, gas combustion was conducted both with formation of various volumetric ratios of the air with the studied gas before its combustion, and without any supply of additional air into the burner.

The following was established according to the results of the experimental studies: the temperature of gas combustion increases with an increase in its calorific value. At the same time, the fact that the temperature of gas combustion increases with an increase in the volumetric fraction of additional air in the burning mixture was confirmed experimentally. Moreover, it was determined that the sensitivity to a change in the flow rate of the studied gas is lower at greater values of its operating costs (one of the factors for optimizing the operation of gas burners as a part of the tool for measuring the heat of combustion of natural gas was established by virtue of this fact).

The actual flame temperature was measured experimentally for the conditions of the laboratory bench and the difference between this flame temperature and reference data was established. The non-uniformity of the flame temperature along its height, which can reach up to 200°C was studied (this information was obtained based on the measurement with the help of a miniature open-frame temperature probe). The possibility of measuring the flame temperature by thermal transducers with protective casings and taking this factor into account when calibrating the tool for measuring the heat of combustion of natural gas was detected. The quantitative value of the error of method, which does not exceed $\pm 1.6\%$, for using various thermal transducers with protective casings was evaluated.

The possibility of implementation of the device for express control of the heat of combustion of natural gas with the help of the informative parameter such as the temperature of combustion of the studied gases was substantiated on the basis of the results of the experimental studies. It was proven experimentally that the flame temperature of the studied gases increases with an increase in their heat of combustion. The necessity of further study of the optimizing design characteristics of the burners and working conditions of combustion of the studied gases when conducting express control of their heat of combustion was established.

The applied aspects of the use of measuring control of the heat of combustion in modern gas meters were considered. They relate to the utilization of the SMART-technology elements, which provide the results of natural gas consumption metering

in energy units and possibility of predicting the quality of natural gas by monitoring the permissible limits of change in the heat of combustion of natural gas and ensuring that they are not exceeded.

The essence of the reciprocating flow-rate measuring standard machine for calibration of the face orifice flow transducers, which can be implemented at low volumetric flow rates using the natural gas working medium, was described (the machine had been patented with the participation of the applicant).

The results of the metrological studies of the developed method for measuring the heat of combustion of natural gas were considered. The influence of individual components of the error, which relate to the measurement of the temperature of the burn gas, as well as the influence of the nitrogen content and error of method of the theoretical and experimental assessment of the design factor of the burner ($\pm 1.54\%$), which is the error component of the developed method for determining the heat of combustion of natural gas, was studied in this respect.

The metrological analysis of the method for determining the heat of combustion of natural gas based on the application of the theory of errors (the limit of the permissible basic measurement error is $\pm 2.5\%$) and concept of uncertainty (expanded uncertainty is $\pm 1.61\%$ when the coverage factor is 2 and confidence factor is 0.95), which substantiates the possibility of practical application of this method at the place of gas consumption, was carried out.

Key words: natural gas, hydrocarbon gases, heat of combustion, quality of natural gas, express control, combustion temperature, face orifice, thermal transducer, gas flow rate, gas temperature, gas density, gas humidity, mathematical modeling, correlation, flow modeling, control system, technical diagnostics, qualimetric measurement, metrological model, error, standard uncertainty, assessment of the measurement result accuracy.

**LIST OF PUBLICATIONS ON THE SUBJECT OF THE
DISSERTATION**

1. Serediuk O. E., Malisevych N. M., Tkachuk V. V., Serediuk D. O. New measuring technologies in household smart natural gas meters. *Ukrainian metrological journal*. 2020. №1A. P. 134-135. (*Web of Science*).
2. Serediuk O. Ye., Malisevych N. M. Evaluation of Unauthorization at the Express-Control of Heating of Natural Gas. *Measurement Uncertainty: Scientific, Normative, Applied and Methodical Aspects* : Scientific Workshop 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL) 2019, Sozopol, Bulgaria September 06-08 September 2019, Sozopol, 2019. P. 694-697. (*Scopus*).
3. Malisevych N. M., Serediuk O. E. Analysis of patent-protected technical solutions in the field of determining the heat of combustion of natural gas. *Methods and devices of quality control*. 2018. № 1. P. 58-69.
4. Serediuk O., Malisevych N. Research of influence of structural factors on the technical implementation of the express control method of natural gas combustion. *Prospective technologies and devices*: 2019. № 15. P. 81-89.
5. Serediuk O. E., Malisevych N. M. Research of the Influence of Temperature Factor on Express Control of Natural Gas Combustion Heat. *Metrology and instruments*. 2020. №2(82). P. 44-50. (*Index Copernicus*).
6. Serediuk O., Malisevych N. Simulation of the influence of natural gas combustion heat on the measurement of its consumption by end nozzles. *Prospective technologies and devices*. 2020. № 16. P. 63-72.
7. Orest Serediuk, Nataliya Malisevych, Mariusz R. Rząsa. Wpływ wilgotności na błędy metody pomiarowej do wyznaczenia wartości ciepła spalania gazu ziemnego : *Zeszytów Naukowych Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*. L Międzyuczelniana Konferencja Metrologów (MKM 2018), 10 - 12 września 2018, Szczecin – Kopenhaga: Gdańsk, 2018. P. 175-179.

8. Seredyuk O. E., Malisevych N., Rząsa M. R., Analiza błędów metody pomiarowej do wyznaczenia ciepła spalania gazu ziemnego. *Pomiary Automatyka Robotyka*. R. 23, Nr 2/2019, 39-43. (*Index Copernicus*).
9. The method of rapid determination of the heat of combustion of natural gas / O.E. Serediuk, T.V. Lyutenko, N.M. Malisevych: pat. 112737 C2 Ukraine, IPC (2006.01) G01N25 / 20. № a201512215; declared 09.12.2015; publ. 10/10/2016, Bull. № 19.
10. Calibration piston installation for meters and gas flow meters / O. E. Serediuk, V. S. Voshchinsky, D. O. Serediuk, N. M. Malisevych: pat. 120308 C2 Ukraine: MIIK G01N 25/20 (2006.01), G01N 25/22 (2006.01), G01N 25/26 (2006.01). № a201712900; declared 26/12/2017; publ. 11/11/2019, bul. № 21. 5p.
11. Serediuk O. E., Warsha Z. L., Malisevych V. V., Malisevych N. M. Investigation of the influence of thermophysical parameters of natural gas on its heat of combustion. *Measurement, control and diagnostics in technical systems: a collection of abstracts of the IV International Science conference, Vinnytsia, October 31 - November 2, 2017 Vinnytsia : PE "Edelweiss and K", 2017. P. 47.*
12. Serediuk O. E., Malisevych N. M. Regulatory support for determining the quality of natural gas. *Oil and gas energy 2017: : a collection of abstracts of the International. scientific and technical conf., Iv.-Frankivsk, May 15-19. Ivano-Frankivsk: Goliney OM, 2017. P. 295-297.*
13. Serediuk O. E., Malisevych N. M., Liutenko T. V. A new way to control the heat of combustion of natural gas: *Measurement, control and diagnostics in technical systems. collection of abstracts IV International Science conference, Vinnytsia, October 31 - November 2, 2017 Vinnytsia : PE "Edelweiss and K", 2017. P. 93-94.*
14. Malisevych N. M., Serediuk O. E. Laboratory stand for approbation of a new method of express control of heat of combustion of natural gas. *Methods and means of non-destructive testing of industrial equipment: Collection of abstracts of the 6th scientific-practical. conf. students and young scientists, November 15-16, 2017. Ivano-Frankivsk: IFNTUNG, 2017. P. 43.*

15. Serediuk O. E., Malisevych N. M., Homyk G. V. Statistical researches of qualitative characteristics of natural gas in the conditions of PJSC "IVANO-FRANKIVSKGAS". *Modern devices, materials and technologies for non-destructive testing and technical diagnostics of machine-building and oil and gas equipment*: Collection of abstracts of the 8th scientific and technical conf. in memory of prof. Igor Kisil, November 14-16, 2017. Ivano-Frankivsk: IFNTUNG, 2017. P. 89-91.
16. Serediuk O. E., Malisevych N. M. Investigation of the methodological error of the experimental estimation of the structural coefficient of the burner in determining the heat of combustion of natural gas. *Technical Using of Measurement – 2018* : abstracts of reports All-Ukrainian scientific and technical conference of young scientists in the field of metrology, February 13-18, 2018, Slavske: Academy of Metrology of Ukraine, 2018. P. 49-50.
17. Malisevych N. M., Serediuk O. E. Modeling the effect of humidity in the experimental determination of the heat of combustion of natural gas: *Instrument making: status and prospects*: Collection of abstracts of the XVII International. scientific and technical conf., Kyiv, May 15-16, 2018, Kyiv: NTUU "KPI", PBF, 2018. P. 204-205.
18. Serediuk O. E., Malisevych N. M. Metrological analysis of a practical algorithm for determining the compressibility coefficient of biogas. *Technical Using of Measurement – 2019* : Collection of abstracts of the V All-Ukrainian. scientific and technical conf. of young scientists in the field of metrology, Slavske, January 29 - February 2, 2019. Lviv: LLC "Galician Publishing Union", 2019. P. 53-55.
19. Serediuk O. E., Malisevych N. M. Metrological studies of the method of rapid determination of the heat of combustion of natural gas. *Instrument making: state and prospects*: Collection of abstracts of the 18 International. scientific and technical conference, Kyiv, May 15-16, 2019. Kyiv: NTUU "KPI", PBF, 2018. P. 204-205.
20. Malisevych N. M. Simulation of the temperature field of the surface of the plate of the heat converter of natural gas combustion. *Information technologies in*

- education, technology and industry* : Collection of abstracts of the 4th All-Ukrainian scientific-practical conference of young scientists and students. October 10-11, 2019. Ivano-Frankivsk: IFNTUNG, 2019. P. 202-204.
21. Malisevych N. M. Investigation of the influence of nitrogen content on the error of determining the heat of combustion of natural gas. *Technical regulation, metrology, quality, information and transport technologies* : materials 10 All-Ukrainian scientific-practical. conf. young scientists and students, May 16-17, 2019, Odessa: Bondarenko MO, 2019. P.47-48.
22. Serediuk O. E., Malisevych N. M. Practical clearance of the algorithm of determination of the coefficient of biogas performance. *Systems-2018*: Collection of abstracts of the International. scientific and technical conf., November 22-23, 2018, Lviv: Galician Publishing Union LLC, 2018. P. 37-38.
23. Serediuk O. E., Malisevych N. M. Experimental studies of the method of measuring the combustion temperature of gas in determining its heat of combustion: *Measurement, control and diagnostics in technical systems*, collection of abstracts V-a International. Science. Conf., October 29-30, Vinnytsia: VNTU, 2019. S. 30-31.
24. Malisevych N. M. Investigation of dynamic characteristics of thermocouples in determining the heat of combustion of natural gas. *Methods and means of non-destructive testing of industrial equipment* : collection of abstracts add., VII All-Ukrainian. scientific-practical conf. stud. and young scientists, November 19-20, 2019, Ivano-Frankivsk: IFNTUNG, 2019. P. 83-84.
25. Serediuk O. E., Malisevych N. M. Investigation of the methodological error of measuring the flame temperature during the combustion of natural gas. *Technical using of measurement – 2020*: Collection of abstracts of the VI All-Ukrainian scientific and technical conf. young scientists in the field of information and measurement technologies and metrology, Slavske, February 4-7, 2020., Lviv: Halytska Vydavnycha Spilka LLC, 2020. P. 146-149.
26. Malisevych N. M., Serediuk O. E. Approbation of express control of heat of combustion of fuel gases on their temperature at combustion. *Applied scientific*

and technical research. Volume 1: Collection of abstracts of the IV International scientific-practical Conf., April 1-3, 2020, Ivano-Frankivsk: Academy of Technical Sciences of Ukraine, 2020. P. 97-98.

ЗМІСТ

ВСТУП	27
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ НАУКОВОГО, НОРМАТИВНОГО І ТЕХНІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРИ ВИМІРЮВАННІ ТЕПЛОТИ ЗГОРЯННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ.....	38
1.1 Теплота згоряння як якісна характеристика природного газу.....	39
1.2 Аналіз методів визначення теплоти згоряння природного газу.....	46
1.3 Аналіз технічних засобів для визначення теплоти згоряння природного газу.....	55
1.4 Аналіз нормативної бази для визначення теплоти згоряння природного газу.....	73
1.5 Вибір та обґрунтування напрямку дослідження.....	76
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОТИ ЗГОРЯННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ.....	79
2.1 Аналіз теоретичних засад вимірювання теплоти згоряння природного газу за його температурою спалювання.....	80
2.2 Моделювання впливу вологи на визначення теплоти згоряння природного газу.....	94
2.3 Дослідження впливу теплофізичних параметрів природного газу на його теплоту згоряння.....	101
2.4 Моделювання впливу теплоти згоряння природного газу на вимірювання його витрати торцевими соплами.....	103

	2.5	Моделювання алгоритму визначення коефіцієнта стисливості біогазу при визначенні його теплоти згоряння за умови вимірювання витрат торцевими соплами.....	113
	2.6	Висновки до другого розділу.....	119
РОЗДІЛ 3		РОЗРОБЛЕННЯ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОТИ ЗГОРЯННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ.....	121
	3.1	Розроблення принципової схеми інформаційно-виміральної системи для вимірювання теплоти згоряння природного газу.....	121
	3.2	Розроблення лабораторного стенду для експериментальних досліджень методу вимірювання теплоти згоряння природного газу.....	124
	3.3	Дослідження впливу температурного фактору при експрес-контролі теплоти згоряння природного газу.....	125
	3.4	Прикладні аспекти застосування вимірального контролю теплоти згоряння в сучасних засобах обліку природного газу.....	140
	3.5	Розроблення еталонної установки для калібрування торцевих звужувальних пристроїв.....	143
	3.6	Висновки до третього розділу	148
РОЗДІЛ 4		МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОТИ ЗГОРЯННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ.....	150
	4.1	Дослідження впливу вмісту азоту і вуглекислого газу на похибку визначення теплоти згоряння природного газу.....	150
	4.2	Дослідження методичної похибки експериментального оцінювання конструктивного коефіцієнта пальника при визначенні теплоти згоряння природного газу.....	152

4.3 Метрологічний аналіз експрес-контролю теплоти згорання природного газу.....	155
4.4 Оцінювання невизначеності при експрес-контролі теплоти згорання природного газу.....	157
4.5 Висновки до четвертого розділу.....	163
ВИСНОВКИ.....	164
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	166
Додаток А Вимірювання температури полум'я при спалюванні досліджуваного газу.....	181
Додаток Б Вимірювання температури полум'я при спалюванні досліджуваної суміші.....	184
Додаток В Акт про використання у навчальному процесі Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу наукових результатів дисертаційної роботи Малісевич Н.М. «Вимірювання теплоти згорання природного газу із застосуванням торцевих звужувальних пристроїв», яка представлена на здобуття наукового ступеня доктор філософії.....	187

ВСТУП

Актуальність теми. З врахуванням світової тенденції підвищення цін на енергоносії, в тому числі на природний газ, актуальним є питання забезпечення необхідної точності вимірювань з врахуванням нових сучасних концепцій до реалізації його обліку. Одним із напрямків реалізації нової концепції є здійснення обліку природного газу інформаційно-вимірювальними системами, які забезпечують вимірювання не тільки використаного об'єму газу, але і врахування при цьому його теплоти згоряння. Це дозволяє здійснювати облік газу в одиницях енергії і безпосереднім чином впливати на його вартість.

З врахуванням таких тенденцій в Україні з 2011 р. набрав чинності національний стандарт [1], який регламентує методи та порядок визначення енергії під час комерційних розрахунків за спожитий газ. Він фактично є фундаментом для переходу щодо розрахунків за спожитий природний газ за вмістом енергії. Проте на даний час реальне впровадження цього стандарту є достатньо проблематичним через відсутність простих за конструкцією і оперативних за можливістю застосування технічних засобів для визначення теплоти згоряння природного газу безпосередньо у його споживачів [2], адже калорійність природного газу також є впливовим фактором на ефективність роботи газоспоживного обладнання.

Природний газ є важливим невідновлювальним носієм енергії. Як природний продукт, його склад і, отже, його фізичні параметри змінюються залежно від його родовища та умов змішування потоків перед подачею до споживачів. Для виробництва газу, транспортування, торгівлі та його споживання велике економічне та технічне значення має визначення властивостей природного газу. Майбутній ринок газу буде характеризуватися лібералізацією та роз'єднанням по всьому світу. Кількість торговельних партнерів і, таким чином, кількість інтерфейсів між ними зростатиме. З іншого боку, зміна параметрів природного газу збільшиться через міжнародну

торгівлю газом, наприклад, імпорт LNG. Обидві тенденції є додатковими факторами необхідності швидкої, точної та економічної технології вимірювання і контролю якості газу.

Якість газу в газотранспортній та газорозподільній мережі країн Європи значно відрізняється. Динаміка змін якості газу зростає з різних причин. Однією з причин є перехід ринку з L-газу на H-газ. Ці тенденції вимагають швидкого і надійного визначення теплотворної здатності природного газу.

Європейський досвід показав, що протягом останніх років 30% домогосподарств і 20% великих споживачів постраждали від значних коливань якості газу, зокрема Індексу Воббе, коливання якого можуть бути до $1,5 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ [3]. Від зміни якості природного газу страждають його споживачі. Вплив на різні промислові термопроцеси (якість, ефективність, забруднюючі речовини, безпека, термін служби, тощо) можуть бути суттєво різними [4].

Динаміка нестабільності якості природного газу ускладнює розрахунок спожитої енергії і, таким чином, потребує обов'язкового визначення якісних характеристик природного газу.

Класичне вимірювання якості природного газу використовує технологічну газову хроматографію. Використання газової хроматографії перевірена часом і задовольняє необхідну точність. Проте ця технологія потребує великих затрат на обслуговування. Крім того, час аналізу становить 3-5 хв для реалізації керуючих процесів, таких як система підготовки природного газу. Вимірювальні прилади, які визначають індекс Воббе, пропонують можливість, у поєднанні з вимірюванням густини, вимірювати теплотворну здатність протягом декількох секунд. Однак, подібно технологічним газовим хроматографам, ці системи є дуже дорогими в обслуговуванні.

Тенденція обліку природного газу за його енергетичною цінністю також широко впроваджується в міжнародному досвіді, що підтверджується запровадженням міжнародних стандартів, які регламентують якісні

характеристики природного газу [5, 6], а також сучасними закордонними публікаціями по дослідженню у цій сфері [3, 4, 7, 8].

В Україні з метою впровадження обліку газу з врахуванням його калорійності, як доповнення до вузлів обліку природного газу, переважно застосовують лабораторні хроматографи, які реалізують розрахунковий метод визначення теплоти згоряння природного газу за даними лабораторного аналізу компонентного складу газу. Проте такий метод практично неможливо реалізувати безпосередньо у споживачів, в тому числі і у населення, через значну вартість такого обладнання і практичну відсутність мобільних дешевих хроматографів. Тому актуальною є розробка нових методів та засобів визначення теплоти згоряння природного газу, які могли би бути реалізовані і безпосередньо у споживачів газу.

Також відомим є практично всім споживачам факт, який стосується того, що при спалюванні однакового об'єму газів різної калорійності неоднаковою буде ефективність функціонування газового обладнання [2], а значить доцільно є коригування за таких умов вартості спожитого газу.

Водночас в умовах сьогодення розрахунок за спожитий газ практично здійснюється на підставі використаного його об'єму. При цьому плата за блакитне паливо з врахуванням його теплоти згоряння практично не реалізовується. Реально здійснюється тільки періодичний контроль (один раз в 7-10 днів) якості природного газу спеціалізованими хімічними лабораторіями щодо його відповідності до стандарту, тобто теплоти згоряння не менше $31,8 \text{ МДж/м}^3$ (7600 ккал/м^3) [9], що не завжди відповідає дійсності [10].

Додамо також, що недоліком практично всіх засобів вимірювальної техніки, які застосовуються сьогодні для обліку природного газу безпосередньо у газоспоживних підприємствах і населення є вимірювання ними тільки витрати або об'єму газу як комерційного параметра [11, 12]. Поряд з цим сучасна стратегія розвитку метрологічного забезпечення обліку

природного газу передбачає необхідність впровадження в Україні розрахунків за спожитий природний газ, виходячи із його енерговмісту [13].

Запровадження Кодексу газорозподільних систем [14], який набув чинності з 30.09.2015 р., передбачає врахування якості природного газу при здійсненні обліку і оплати за природний газ. Однак на сьогодні такий аспект реалізується тільки операторами газорозподільної системи. Безпосередньо перевірити якість газу, який подається окремим споживачам практично є неможливо. Кодекс регламентує, що оператор газорозподільної системи повинен опубліковувати на власному сайті фактичні дані щодо розміру середньозваженої вищої теплоти згоряння природного газу за кожним маршрутом газопостачання. Оскільки вартість відповідних засобів вимірювання теплоти згоряння природного газу є значною, то реально споживачі не мають можливості проконтролювати відповідність фактичної якості газу до задекларованої оператором якості. Це підкреслює актуальність розроблення маловартісних і мобільних засобів вимірювання теплоти згоряння природного газу.

Значну увагу дослідженню наукових питань вимірювання вимірювання теплоти згоряння природного газу приділено у працях вітчизняних науковців І.С. Петришина, М.О. Карпаша, В.П. Мотала, О.Є. Середюка, П.М. Райтера, С.А. Чеховського, І.Я. Дарвай, О.М. Карпаша, А.В. Яворського, І.В. Рибіцького, Й.Й. Білинського (Україна), Р. Nitschke-Kowsky, A. Martino, W. Weßling, J. Leicher (Німеччина), Д. Клек, Г. Рослоник, Т. Шустер (Польща) та інших. Тим не менше, напрямок дослідження нових методів вимірювання теплоти згоряння природного газу і розроблення на їх базі відповідних технічних засобів на сьогоднішній день містить ряд невивчених питань, які перш за все стосуються удосконалення мобільних засобів, які би могли знайти застосування безпосередньо газоспоживачів.

Тому удосконалення методу і технічних засобів для вимірювання теплоти згоряння природного газу за температурою його спалювання із застосуванням витратовимірювальних торцевих звужувальних пристроїв є

актуальним науково-прикладним завданням, що характеризує актуальність дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дослідження, результати яких знайшли відображення в дисертаційній роботі, виконувались здобувачкою відповідно до плану навчання в аспірантурі на кафедрі метрології та інформаційно-виміральної техніки (МІВТ) Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ) згідно з тематикою виконання держбюджетної науково-дослідної роботи кафедри МІВТ ІФНТУНГ «Наукові основи удосконалення метрологічного та інформаційного забезпечення виміральної техніки в нафтогазовій галузі» (2018-2020 рр.) №0119U002949. Здобувачка була виконавцем окремих підрозділів, пов'язаних з удосконаленням виміральної техніки для контролю якісних параметрів природного газу.

Мета і завдання досліджень. Метою роботи є вирішення актуального науково-прикладного завдання у галузі вимірювання і контролю якісних параметрів природного газу – удосконалення методу і технічних засобів для вимірювання теплоти згоряння природного газу за температурою його спалювання із застосуванням витратовимірвальних торцевих звужувальних пристроїв.

Для досягнення зазначеної мети необхідно розв'язати такі задачі:

1) Провести аналіз сучасних методів і засобів вимірювання теплоти згоряння природного газу та обґрунтувати напрямки реалізації при проведенні вимірювання і експрес-контролю теплоти згоряння природного газу;

2) Дослідити наявність та характер взаємозв'язків між теплою згоряння природного газу і його температурою спалювання з врахуванням теплофізичних властивостей газу;

3) Розробити теоретичні засади функціонування засобу вимірювання теплоти згоряння природного газу із застосуванням торцевих звужувальних пристроїв;

4) Розробити, виготовити та здійснити дослідне перевіряння на базі лабораторного стенда експериментального зразка пристрою для вимірювання теплоти згоряння природного газу і провести апробацію можливостей його практичного застосування;

5) Здійснити метрологічний аналіз методу вимірювання теплоти згоряння природного газу із застосуванням торцевих звужувальних пристроїв.

Об'єктом дослідження є процес вимірювання теплоти згоряння природного газу

Предметом дослідження є засоби вимірювальної техніки для визначення теплоти згоряння природного газу за температурою його спалювання при застосуванні витратовимірювальних торцевих звужувальних пристроїв, їх математичні і метрологічні моделі.

Методи досліджень. Математичне і фізичне моделювання термодинамічних процесів при згорянні природного газу, а також моделювання теплофізичних параметрів стану газу у пальниках з торцевими звужувальними перетворювачами здійснювалося з використанням теорій газодинаміки, теплообміну, критеріїв гідродинамічної подібності потоків, методів імітаційного моделювання на персональних комп'ютерах.

Експериментальні дослідження та узагальнення результатів здійснювалося із застосуванням методів планування експерименту, теорії вимірювань, математичної статистики і теорії імовірності, статистичного і регресійного аналізу, методів числового опрацювання результатів експериментів із використанням персональних комп'ютерів.

При метрологічному аналізі розробленого засобу експрес-контролю теплоти згоряння природного газу використовувалися методи оцінювання з використанням теорії похибок і концепції невизначеності у вимірюваннях, методу структурного аналізу складових похибок та невизначеностей та імовірнісні методи розрахунку стандартної невизначеності.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше отримана математична модель взаємозв'язку теплоти згоряння природного газу із його температурою спалювання при згоранні сумішей газ-повітря різного об'ємного співвідношення, що дає можливість реалізувати процес вимірювання теплоти згоряння природного газу з використанням термоперетворювачів і торцевих звужувальних перетворювачів витрати.

2. Вперше отримані алгоритмічні залежності між теплою згоряння природного газу і його теплофізичними характеристиками (коефіцієнт стисливості, вміст неуглеводневих компонентів природного газу, густина) за умови застосування торцевих звужувальних пристроїв, що дає можливість досліджувати вплив компонентного складу природного газу на інформативні параметри пристрою вимірювання теплоти згоряння природного газу.

3. Набули подальшого розвитку дослідження впливу вологості досліджуваного газу і вологості навколишнього середовища на визначення теплоти згоряння природного газу при його спалюванні, що дає можливість здійснювати вимірювання теплоти згоряння вологих газів з врахуванням умов функціонування засобу вимірювання теплоти згоряння природного газу.

4. Набув удосконалення метод термометричного контролю при вимірюванні теплоти згоряння природного газу шляхом застосування витратовимірювальних перетворювачів торцевого типу, що забезпечує практичну реалізацію експрес-вимірювання теплоти згоряння природного газу.

5. Набули подальшого розвитку метрологічні дослідження засобів вимірювання теплоти згоряння природного газу з метою коректного оцінювання їх метрологічних характеристик на основі теорії похибок і з використанням концепції невизначеності вимірювань.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Розроблено та виготовлено макет експериментальної установки для визначення теплоти згоряння природного газу, яка пройшла апробацію в умовах науково-дослідної лабораторії ІФНТУНГ, що підтвердило

правильність прийнятих теоретичних підходів та практичних рішень при реалізації експрес-методу визначення теплоти згоряння природного газу.

2. Запропоновані нові технічні рішення при створенні засобів для вимірювання теплоти згоряння природного газу, які захищені двома патентами України на винахід.

3. Отримані в дисертаційній роботі наукові результати використовуються в навчальному процесі кафедри метрології та інформаційно-вимірювальної техніки Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу при викладанні дисципліни «Опосередковані вимірювання в нафтогазовій промисловості» при підготовці магістрів за спеціальністю 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка.

Особистий внесок здобувачки.

Особистий внесок здобувачки є основним на всіх етапах досліджень і полягає у тому, що всі положення, які становлять суть роботи, були сформульовані та вирішені нею самостійно і у безпосередньому виконанні розрахункової і експериментальної частин роботи.

Основні теоретичні положення, висновки та результати дослідження, що виносяться на захист одержані авторкою самостійно. У працях, написаних у співавторстві авторці належать: обґрунтування концептуального підходу до врахування калорійності природного газу при його обліку побутовими лічильниками [105]; моделювання складових похибок при визначенні теплоти згоряння на базі теорії невизначеності [83]; пошук літературних джерел, формулювання переваг і недоліків технічних рішень при визначенні теплоти згоряння природного газу [54]; експериментальні дослідження впливу конструктивних факторів, які впливають на визначення температури спалювання природного газу прямим і опосередкованим методами [102]; експериментальні дослідження і апроксимація впливу на температуру спалювання газу об'ємного співвідношеннях газ-повітря [122]; комп'ютерне моделювання взаємозв'язків між вимірюванням витрати торцевими соплами і

теплотою згоряння природного газу [84]; моделювання впливу вологи природного газу і навколишнього середовища на теплоту згоряння природного газу [79]; моделювання складових похибок при визначенні теплоти згоряння на базі теорії похибок [111]; обґрунтування і розроблення технічного рішення для вимірювання теплоти згоряння природного газу [78]; розроблення технічного рішення при застосуванні поршневого розділювача тороподібного форми у калібрувальній установці [109]; моделювання впливу компонентного складу природного газу на його теплоту згоряння [82]; бібліографічний пошук і аналіз вітчизняних нормативних документів при визначенні якості природного газу [62]; розроблення алгоритму практичної реалізації способу контролю теплоти згоряння природного газу [89]; розроблення принципів технічних рішень при виготовленні лабораторного стенду [94]; статистичний аналіз і узагальнення якісних характеристик природного газу різних джерел видобування [18]; моделювання складових похибки при методичному оцінюванні конструктивного коефіцієнта пальника [114]; узагальнення і графічна інтерпретація впливу вологості при експериментальному визначенні теплоти згоряння природного газу [81]; дослідження складових похибки алгоритму визначення коефіцієнта стисливості біогазу [90]; розроблення алгоритму визначення похибки методу експрес-визначення теплоти згоряння природного газу на базі теорії похибок [112]; експериментальні дослідження і апроксимація зміни температури поверхні пластини при її нагріванні спалюваним газом [100] (одноособова); моделювання вмісту азоту на похибку визначення теплоти згоряння природного газу за різних значень вмісту вуглекислого газу [113] (одноособова); дослідження складових для визначення коефіцієнта стисливості біогазу [116]; експериментальні дослідження і апроксимація результатів вимірювання температури спалювання газу з використанням різних технічних реалізацій [110]; експериментальні дослідження і апроксимація динамічних характеристик корпусних і безкорпусних термопар [101] (одноособова); експериментальні дослідження методу вимірювання температури різними термопарами, розробка алгоритму

визначення методичної похибки [86]; експериментальні дослідження, узагальнення і апроксимація результатів апробації на базі лабораторного стенду методу експрес-контролю теплоти згорання паливних газів [120].

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на 10 міжнародних і 6 всеукраїнських науково-технічних конференціях: VI, VII науково-практична конференція студентів і молодих учених «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання», м. Івано-Франківськ, 2017 р., 2019 р.; IV, V, VI Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених у царині метрології «Technical using of Measurement», 2018 р., 2019 р., 2020 р.; VI Міжнародна науково-технічна конференція «Нафтогазова енергетика 2017», м. Івано-Франківськ, 2017 р.; IV, V Міжнар. наук. конф. «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах», м. Вінниця, 2017 р., 2019 р.; VIII міжнародна наук.-техн. конф. Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання, м. Івано-Франківськ, 2017 р.; XVII, XVIII Міжнар. наук.-техн. конф. Приладобудування: стан і перспективи, м. Київ, 2018 р., 2019 р.; L Międzyuczelniana Konferencja Metrologów MKM 2018, Szczecin – Kopenhaga 2018; X Всеукраїнська наук.-практ. конф. молодих учених і студентів «Технічне регулювання, метрологія, якість, інформаційні та транспортні технології», м. Одеса, 2019 р.; 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, CAOL*2019, Uncertainty of measurement: scientific, applied, regulatory and methodical aspects, Sozopol, Bulgaria, 2019; 4-я Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених і студентів «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості» - ІТОТП-2019, м. Івано-Франківськ, 2019 р.; IV міжнародна науково-практична конференція «Прикладні науково-технічні дослідження», Івано-Франківськ, 2020 р.; 7-ма міжнародна науково-технічна конференція «Метрологія, інформаційно-вимірювальні технології та системи» (МІВТС-2020), м. Харків, 2020 р.

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано 26 наукових публікацій, у тому числі 5 статей у вітчизняних виданнях, що входять до переліку МОН України (серед яких 1 стаття у фаховому виданні України, включеного до наукометричної бази Web of Science і 1 стаття у виданні з наукометричною індексацією Index Copernicus), 3 статті у закордонних періодичних виданнях (серед яких 1 з наукометричною індексацією Scopus і 1 – Index Copernicus), 2 патенти України на винаходи, 16 публікацій (із них 3 одноособові) за матеріалами праць міжнародних і всеукраїнських науково-технічних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів основної частини, висновків, переліку використаних джерел та додатків. Матеріали викладені на 160 сторінках основного тексту; робота містить 9 таблиць, 51 рисунок, список використаних джерел з 123 найменувань та 3 додатки на 7 сторінках.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ НАУКОВОГО, НОРМАТИВНОГО І ТЕХНІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРИ ВИМІРЮВАННІ ТЕПЛОТИ ЗГОРЯННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

Відповідно до європейських норм, що відкривають ринок газу для конкуренції [15], точне вимірювання кількості енергії в природному газі є гострою потребою для забезпечення кращого контролю за його витратами внаслідок збільшення кількості споживачів. Тому необхідно розглянути наукову, нормативну і технічну практику забезпечення визначення теплоти згоряння природного газу, і як ці складові розвивалися під впливом нових технологій (компактні хроматографи, вдосконалене моделювання газової мережі, тощо) та нових стандартів та правил. Тому вимірювання теплоти згоряння природного газу є важливою проблемою, оскільки воно лежить в основі розрахунків і оплати за споживання газу. З цієї причини Міжнародна організація правової метрології (IOLM) готує майбутню рекомендацію щодо «Вимірювальних систем для газоподібних палив», яка охоплює вимірювання об'єму, маси та енергії для газоподібних видів палива. Ця проектна рекомендація визначає три класи з точки зору точності, наприклад, на рівні швидкості потоку, з відповідними рівнями MPE – Максимально допустимі помилки. Рівень MPE для вимірювання теплотворної здатності газу (GCV) становить: $\pm 0,5\%$ у класі А (найбільші витрати) та $\pm 1\%$ у класах В і С (менші витрати) [15]. Оскільки розрахунки базуються на енергії, що постачається, питання вимірювання енергії з точністю, що вимагається рекомендаціями IOLM, а також питання даних про теплотворну здатність газу стають першочерговими пріоритетами. Можливості використання більш точних контрольних методів та засобів також передбачають вдосконалення стандартів з експлуатації газового обладнання для задоволення споживачів. Один із способів полягає в порівнянні прямих і непрямих методів вимірювання, а інший – формуванні даних про вміст енергії кожного газового компонента, присутнього в природних газах різного походження.

1.1 Теплота згоряння як якісна характеристика природного газу

Природний (горючий) газ – це газоподібна суміш, що складається з метану і більш важких вуглеводнів, азоту, діоксиду вуглецю, водяної пари, сірковмісних сполук, інертних газів. Природний газ широко використовується як високоекономічне паливо на електростанціях, у чорній та кольоровій металургії, цементній та скляній промисловості, у процесі виробництва будматеріалів та для комунально-побутових потреб, а також як сировина для отримання багатьох органічних сполук. У порівнянні з іншими джерелами енергії, має низку переваг: при горінні, виділяє тільки вуглекислий газ і водяну пару; при згорянні не виділяє кіптяви і диму; швидко розпалюється і процес його горіння легко контролювати; майже не містить твердих домішок і інших шкідливих компонентів; відносно дешевий, завдяки легшому способу видобутку і транспортування.

В [16] описано такі поняття та визначення газів.

Ідеальний газовий стан – умовний стан газу або суміші газів, якій характеризується відсутністю взаємодії молекул газу, а самі молекули не мають власного об'єму.

Реальний газ – газ, який дійсно існує в природі, тобто стан цього газу характеризується взаємодією молекул, а самі молекули мають власний об'єм.

За складом газу можуть бути чистими і сумішами.

Чистими газами є газу, в яких міститься не більше 0,05% (молярних) домішок газів інших найменувань.

Газова суміш – суміш чистих газів, які не вступають один з одним в хімічну реакцію.

Природний газ – це газова суміш, компонентами якої в основному є насичені вуглеводні (C_kH_{2k+2}), азот, діоксид вуглецю і сірководень.

Компонентний склад суміші газів, в тому числі і природного газу, визначається в об'ємних або молярних частках [16].

Для природного газу характерним є компонентний склад (табл. 1.1), виражений в таких об'ємних частках [16].

Таблиця 1.1 – Компонентний склад природного газу

0,6 < метан < 1,0	0,00 < азот < 0,16
0,00 < етан < 0,12	0,00 < діоксид вуглецю < 0,16
0,00 < пропан < 0,06	0,00 < сірководень < 0,01
0,00 < бутани < 0,04	0,00 < гелій < 0,002
0,00 < пентани < 0,04	Інших компонентів в сумі < 0,002

Також згідно [12] акцентується, що точне визначення вмісту споживчого природного горючого газу, з огляду на ряд причин є дуже складним завданням. Однак більшості спеціалістів, що контролюють передавання та розподілення газу, добре відомі загальні положення та зазвичай в принципі відомо, чи відповідає якийсь окремий природний газ сфері застосування за цим визначенням.

Споживчий природний газ містить переважно (молярна частка більша ніж 0,70) метан та зазвичай має вищу теплоту згоряння в діапазоні від 30 МДж·м⁻³ до 45 МДж·м⁻³ (табл. 1.2). Азот та діоксид вуглецю є основними не вуглеводневими складовими (молярна частка кожного приблизно 0,20). Етан (молярна частка кожного приблизно 0,10), пропан, бутани, пентани та вищі алкани зазвичай наявні в малих кількостях. Молярні частки гелію, бензолу та толуолу становлять менше ніж 0,001. Природні гази із синтетичними домішками можуть містити водень та моноксид вуглецю в молярних частках приблизно до 0,10 та 0,03 відповідно, також у них може бути невелика кількість етилену. Інші компоненти, які можна знайти в вологих та кислих газах (наприклад пари води, сульфід водню або кисень) зазвичай містяться у слідових кількостях, а аерозолів, рідин або твердих частинок не має бути. Таке визначення споживчого природного газу не вилучає природних газів з іншим складом, що їх транспортують газопроводи.

Таблиця 1.2 – Допустимі межі молярних часток компонентів

Компонент	Молярна частка	Компонент	Молярна частка
Основні компоненти		Малі та слідові компоненти	
Метан	$\geq 0,70$	Етилен	$\leq 0,001$
Азот	$\leq 0,20$	Бензол	$\leq 0,0005$
Діоксид вуглецю	$\leq 0,20$	Толуол	$\leq 0,0002$
Етан	$\leq 0,10$	Аргон	$\leq 0,0002$
Пропан	$\leq 0,035$	Сульфід водню	$\leq 0,0002$
Бутани	$\leq 0,015$	Кисень	$\leq 0,0002$
Пентани	$\leq 0,005$	Незазначені компоненти разом	$\leq 0,0001$
Гексани	$\leq 0,001$		
Гептани	$\leq 0,0005$		
Октани та вище	$\leq 0,0005$		
Водень	$\leq 0,10$		
Міноксид вуглецю	$\leq 0,03$		
Гелій	$\leq 0,005$		
Вода	$\leq 0,00015$		

До основних якісних характеристик природного газу належать вища та нижча теплота згоряння, густина, число Воббе, коефіцієнт стисливості, вологість.

Згідно [17] вища теплота згоряння – це кількість теплоти, що може виділитися при повному згорянні в повітрі певної кількості газу таким чином, що тиск p_1 , при якому відбувається реакція, залишається постійним, а всі продукти згоряння приймають ту ж температуру t_1 , що і температура реагентів. При цьому всі продукти знаходяться в газоподібному стані, за винятком води, яка конденсується в рідину при t_1 .

У тих випадках, коли теплоту згоряння визначають на основі компонентного складу газу, вираженого в одиницях молярної частки, її позначають, як $\bar{H}_s(t_1, p_1)$. Якщо склад виражений в одиницях масової частки, теплоту згоряння позначають як $\hat{H}_s(t_1, p_1)$.

У тих випадках, коли теплоту згоряння визначають на основі компонентного складу газу, вираженого в одиницях об'ємної частки, її позначають як $\tilde{H}_s[(t_1, p_1), V(t_2, p_2)]$, де t_2 і p_2 – (вимірні) стандартні умови для об'єму газу (рис. 1.1). Теплота згоряння є результатом відношення тепла, що виділилося, до вимірюваного при цьому об'єму газу

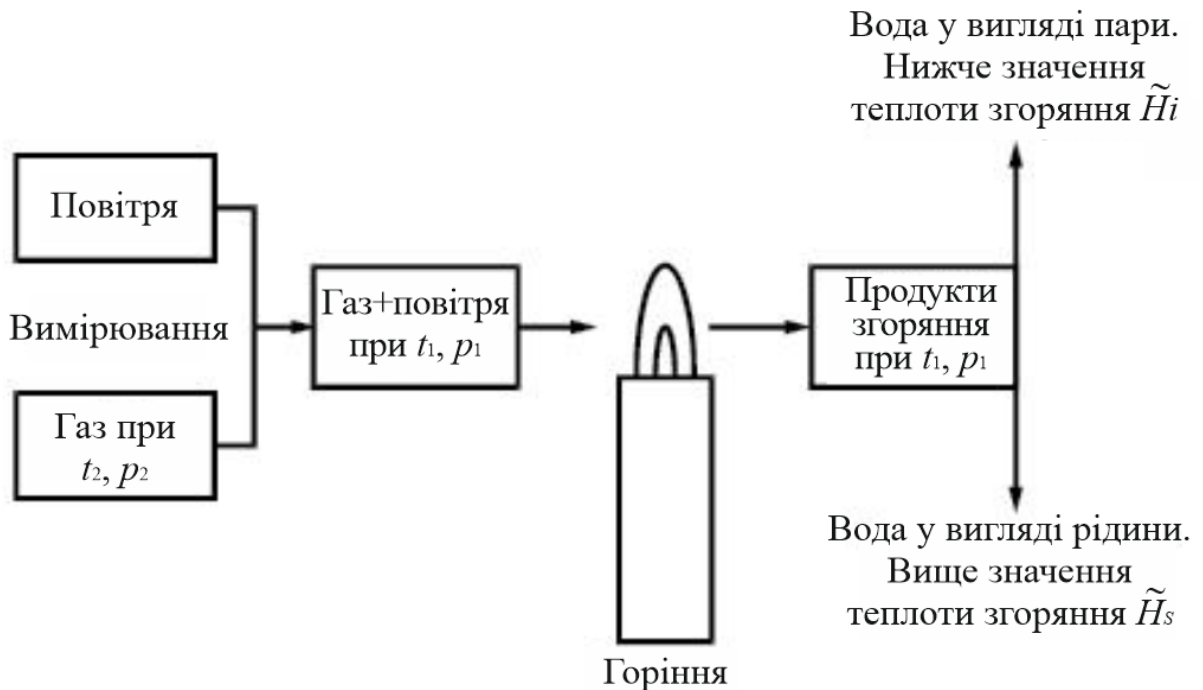


Рисунок 1.1 – Об'ємна теплота згоряння

Нижча теплота згоряння – це кількість теплоти, яка може виділитися при повному згорянні в повітрі певної кількості газу таким чином, що тиск p_1 , при якому протікає реакція, залишається постійним, а всі продукти згоряння приймають ту ж температуру t_1 , що і температура реагентів. При цьому всі продукти знаходяться в газоподібному стані.

Значення нижчої теплоти згоряння розраховане на основі одиниць молярної частки, масової частки і об'ємної частки компонентів позначають, відповідно, як $\bar{H}_1(t_1, p_1)$, $\hat{H}_1(t_1, p_1)$ та $\tilde{H}_1[(t_1, p_1), V(t_2, p_2)]$ відповідно.

Густина природного газу за робочих умов – маса газової проби, поділена на її об'єм при певних значеннях тиску і температури.

Для практичних цілей використовується відносна густина газу – густина газу, поділена на густину сухого повітря стандартного складу при однакових заданих значеннях тиску і температури. Термін «ідеальна відносна густина» застосовують в тих випадках, коли як газ, так і повітря вважаються середовищами, які підкоряються закону ідеального газу. Термін «реальна відносна густина» застосовують в тих випадках, коли як газ, так і повітря вважаються реальними середовищами. Відносна густина метану – 0,554, етану – 1,05, пропану – 1,55.

Число Воббе – значення вищої об'ємної теплоти згоряння при певних стандартних умовах, поділене на квадратний корінь відносної густини при тих же стандартних умовах вимірювань

На сьогоднішній день розвиваються наукові аспекти оцінювання якості природного газу. Прикладом може бути застосування теорії кваліметричних вимірювань при визначенні рівня якості природного газу як джерела енергії [29].

Також відомими є наукові дослідження, що стосуються вивчення впливу на теплотворну здатність природного газу його фізико-хімічних властивостей [30], вологості [31, 32]. Однак в цих дослідженнях акцент зроблений на вивчення методів і засобів вимірювання вказаних одиничних показників якості природного газу і частково їх впливу на його теплоту згоряння.

Відомо, що якісні характеристики природного газу є неодинаковими в межах України, що пояснюється різними джерелами його видобутку і постачання. З метою обґрунтування необхідності оперативного контролю за рівнем якості природного газу нами проведені статистичні дослідження зміни

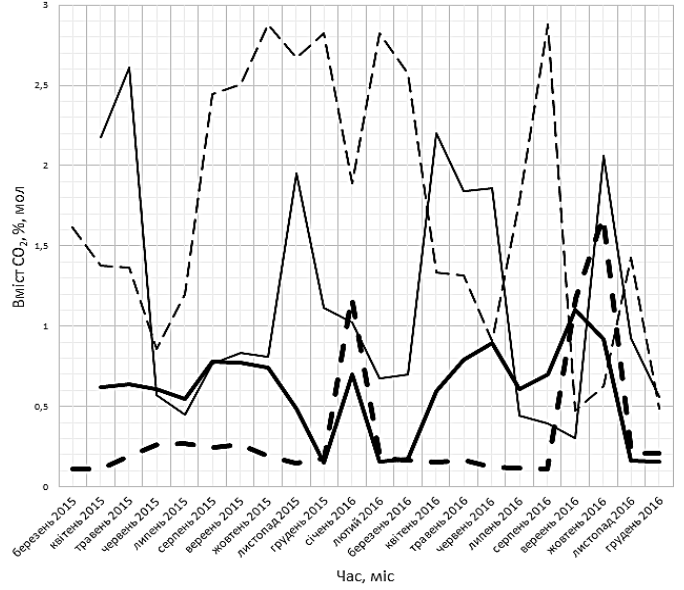
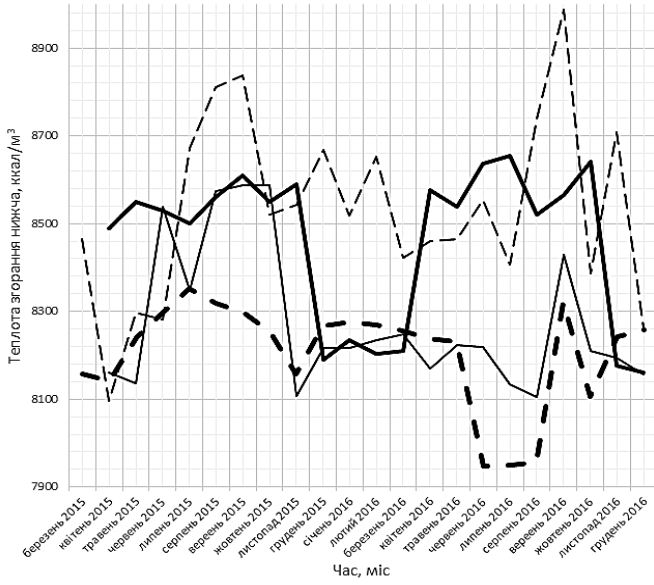
калорійності природного газу в залежності від джерела і місця газопостачання в Івано-Франківській області впродовж двох років [18].

Для дослідження взято чотири лінії газопостачання, на яких періодично здійснюється визначення фізико-хімічних показників природного газу за допомогою лабораторного хроматографа Кристал-2000М виміральної хіміко-аналітичної лабораторії ПАТ «Івано-Франківськгаз». Ілюстрація графічної залежності якісних характеристик природного газу протягом двох років зображено на рис.1.2.

З аналізу видно, що газ з досліджуваних всіх джерел відповідає нормованим даним (не менше 7600 ккал/м^3), оскільки калорійність всіх джерел знаходиться в межах від 7947 ккал/м^3 до 8987 ккал/м^3 . Але водночас є розходження по калорійності до 7% між різними джерелами. Також спостерігається, що природний газ з ГРС Битків Надвірнянського НГВУ має найвищу калорійність, а з газ ГРС Саджава Богородчанського ПСГ – найнижчу. Зміна калорійності природного газу з ГРС Битків характеризується особливостями місцевого Битків-Бабченського нафтогазоконденсатного родовища. Проте не спостерігається великих розбіжностей калорійності природного газу з ПГРС Тисмениця Богородчанського ЛВУМГ.

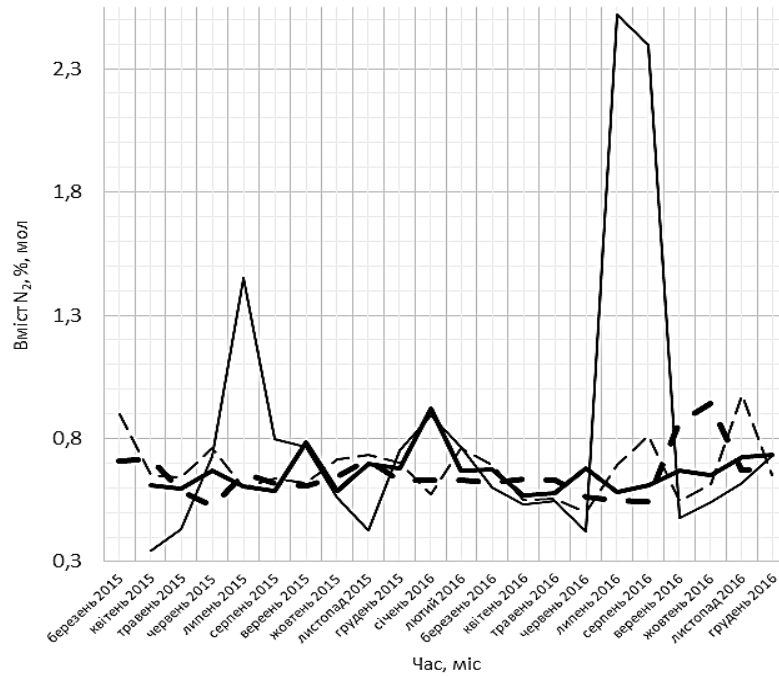
Вміст діоксиду вуглецю змінюється в межах від 0,11 %, мол до 2,89 %, мол (рис.1.2 б) і немає яскраво виражених закономірностей зміни вмісту CO_2 від місяця чи пори року. Вміст азоту в природному газі змінюється в межах від 0,35 %, мол до 2,52 %, мол (рис.1.2 в), при цьому вміст N_2 у всіх джерелах газопостачання є майже однаковий, крім яскраво виражених піків в літні місяці на ГРС Болехів Долинського ЛВУМГ.

Отримані результати підтверджують необхідність постійного контролю за теплою згорання природного газу, що без належного контролю може бути одним із суттєвих джерел його втрат. Також наведені дослідження можуть бути конкретним прикладом для задання діапазонів зміни калорійності і компонентного складу газу при розробленні нових способів діагностування і контролю якісних показників природного газу.



а)

б)



в)

— Богородчанське, Тисмениця - - - Долинське, Болехів . . . Битків - . - - Саджава

а) теплота згорання; б) діоксид вуглецю (CO₂); в) азот (N₂)

Рисунок 1.2 – Графічні ілюстрації зміни фізико-хімічних показників природного газу впродовж 2015-2016рр.

1.2 Аналіз методів визначення теплоти згоряння природного газу

Теплоту згоряння природного газу визначають як енергетичну характеристику. В свою чергу, згідно з [1], енергію природного газу можна вимірювати безпосередньо або розраховувати за кількістю і теплотою згоряння газу (рис. 1.3- 1.4).

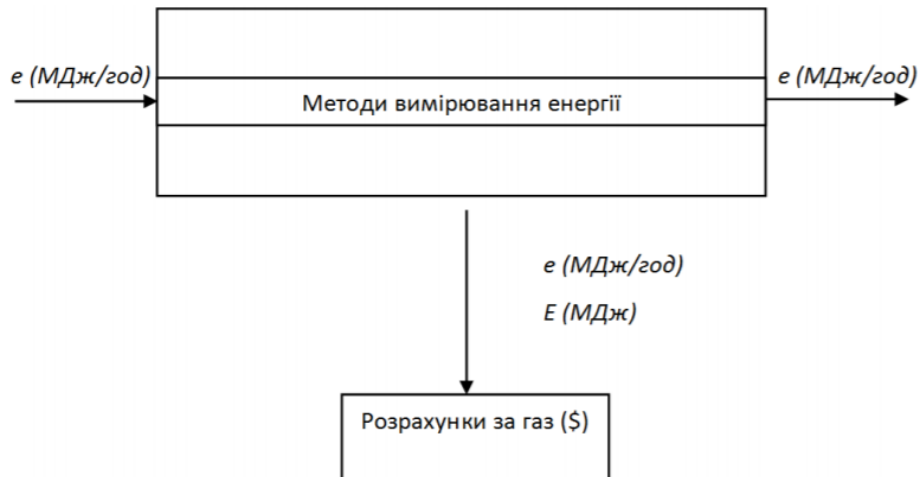


Рисунок 1.3 – Схема вимірювання енергії

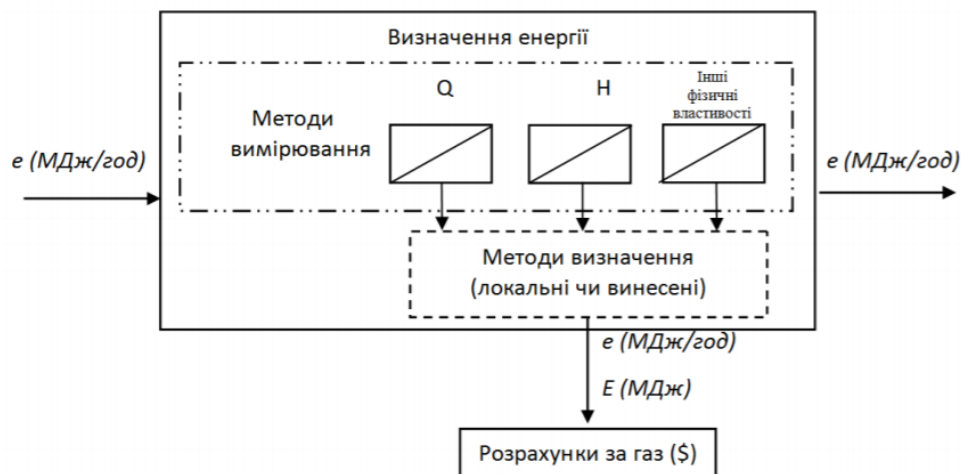


Рисунок 1.4 – Схема визначення енергії

При прямих вимірюваннях енергії (рис. 1.5) індивідуальні фізичні параметри не вимірюються. Швидкість потоку енергії і її кількість визначаються і відображаються безпосередньо на місці установки. В даний час

міжнародні стандарти, що встановлюють методи прямого визначення енергії природного газу, відсутні.

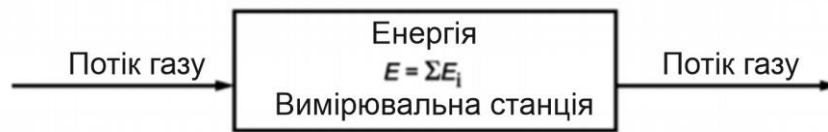


Рисунок 1.5 – Схема прямого визначення енергії

Тому важливо визначати теплоту згоряння природного газу як вихідного параметра для проведення розрахунку вартості газу для споживачів.

Теплота згоряння природного газу визначається згідно з [1] із застосуванням таких методів: прямого вимірювання (калориметри згоряння), непрямого вимірювання (газова хроматографія) та опосередкованого вимірювання (на основі кореляційних залежностей).

Наразі найбільшого поширення набув метод непрямого вимірювання із застосуванням хроматографа. Згідно з ним проводять аналіз компонентного складу відібраного природного газу і розраховують теплоту згоряння газу H (МДж/м³) за формулою:

$$H = \sum_{i=1}^n H_i \cdot x_i \quad (1.1)$$

де H_i – теплота згоряння i -го компонента газу; x_i – частка i -го компонента в природному газі.

Згідно з [19] теплота згоряння палива H – це кількість теплоти, що виділяється при повному згорянні 1 моль, 1 кг або 1 м³ палива. Для газоподібного палива застосовується поняття об'ємної теплоти згоряння. При цьому розрізняють теплоту згоряння 1 м³ газу при нормальних умовах (температура газу 0 °С і тиск 0,1 МПа) і при стандартних умовах (температура газу 20 °С і тиск 760 мм рт. ст.). Перерахунок значень теплоти згоряння газу при різних умовах проводиться за формулою:

$$H_{ст.} = \frac{293}{273} \cdot H_{норм.} \quad (1.2)$$

де $H_{ст.}$ і $H_{норм.}$ – значення теплоти згоряння газу відповідно при стандартних і нормальних умовах.

Тому, надзвичайно важливим, для визначення теплоти згоряння природного газу є методичне та технічне забезпечення для визначення енергетичних характеристик природного газу.

Висока точність вимірювання, постійне вимірювання та швидка реакція – вимоги до вимірювання теплоти згоряння, але акцент буде змінюватися залежно від мети вимірювання. Серед найбільш надійних калориметрів природного газу, що забезпечують високу точність вимірювання, є калориметри газового хроматографа.

Загалом, міжнародні стандарти визначають, що природний газ характеризується такими показниками:

- має певне мінімальне значення нагріву BTU (кількість енергії, необхідної для підвищення температури одного фунта води з 58,5 °F до 59,5 °F). У Сполучених Штатах вона повинна становити близько 1000±50 BTU на кубічний фут газу при 1 атмосфері та 60 градусах Фаренгейта;

- знаходиться при або вище зазначеної температури роси вуглеводнів;

- не містить твердих частинок для запобігання ерозії, корозії та інших пошкоджень трубопроводу;

- має достатньо мало водяної пари для запобігання утворенню гідратів метану всередині газу. Максимальна концентрація повинна бути менше приблизно 150 проміле;

- містить не більше ~ 4 проміле сірководню;

- містить не більше 2% -3% вуглекислого газу;

- загальна кількість інертів (CO_2 , N_2 , O_2) буде менше 4%.

Тому найбільш поширеним методом визначення теплоти згоряння природного газу є розрахунковий метод [20, 21], що використовує дані про компонентний склад природного газу, отриманий за допомогою хроматографічного аналізу.

Визначення теплоти згоряння природного газу за допомогою газової хроматографії

Принцип дії газових хроматографів [22] полягає в пропусканні досліджуваної суміші через колонку з адсорбуючим матеріалом, сорбції (поглинання) окремих компонентів шляхом послідовного проходження їх по колонці за допомогою газу-носія та визначення окремих компонентів (складових) газової суміші, яка досліджується за допомогою детекторів за часом їх появи на виході колонки.

Компоненти досліджуваного природного газу на виході детекторів ідентифікуються на діаграмах електронних потенціометрів у вигляді піків, розділених ділянками нульової лінії. Це дає можливість детектору окремо фіксувати компоненти, розділені зонами чистого газу-носія. Результат аналізу суміші газів з'являється у вигляді хроматограми, яка являє собою графік, що відображає залежність об'єму та кількості газових компонентів у газі-носії від часу або від об'єму газу-носія.

Потім теплота згоряння розраховується виходячи з теплоти згоряння і кількостей кожного компонента. Точність вимірювання за допомогою хроматографа визначається характеристикою розділення газу та точністю кількісного визначення [23].

Газова хроматографія зазвичай використовується для розрахунку величини теплоти згоряння. Однак, коли газовий хроматограф проводить аналіз, ми отримуємо не тільки значення теплоти згоряння, але й іншу інформацію, таку як склад газу. Газові хроматографи (ГХ) широко використовуються в установах для переробки вуглеводнів, коли потрібні високоякісні характеристики продукції або коли для торгівлі природним газом необхідні відповідні стандарти передачі.

Газова хроматографія – це метод, при якому зразок газу розділяється на його складові частини для вимірювання. Газовий хроматограф складається з підсистем, які впорскують зразок, відокремлюють зразок, виявляють компоненти, інтегрують піки та показують результати [25]. У типовому

застосуванні природного газу газ розділяють на одинадцять різних компонентів. Гексани та більш важкі компоненти, такі як гептан, октан та нонан, поєднуються разом, утворюючи єдиний пік, відомий як C₆+.

Недоліками методу газової хроматографії є дорожнеча і складність приладів, що є неможливим для використання у кінцевого споживача, а також певні обмеження використання, зумовлені вимогами до речовин, що досліджуються. З огляду на складність досліджуваних об'єктів у багатьох випадках виникає необхідність проводити заздалегідь спеціальну підготовку зразків для аналізу з використанням методів газової хроматографії. Процес підготовки потребує додаткового часу. Запорукою високоякісного і своєчасного контролю теплоти згоряння природного газу з метою приведення якості газу у відповідність споживчим вимогам необхідним є запровадження новітніх технологій, використання сучасної високоефективної вимірювальної техніки і засобів вимірювання, поєднання новітніх і традиційних методів досліджень.

Визначення теплоти згоряння природного газу за допомогою калориметрів

Калориметри реалізують прямий метод вимірювання теплоти згоряння природного газу. Використовувані в даний час еталонні показники калорійності компонентів природного газу в [21] узгоджуються з невизначеністю в кращому випадку $\pm 0,12\%$ (метан). Калориметр газу може проводити вимірювання теплоти згоряння газу з найменшою можливою невизначеністю. Тому є еталонні калориметри і калориметри, які серійно виготовляються для застосування в промисловості.

Калориметр, як правило, являє собою посудину, в якій відбувається вимірювання температури. Тепло, що виділяється або поглинається в цій посудині, викликає зміну температури калориметра, внаслідок чого виникає теплообмін із зовнішнім середовищем. Теплообмін відбувається між

поверхнею калориметричної посудини (внутрішньою оболонкою) і поверхнею порожнини (зовнішньою оболонкою), в якій поміщений цю посудину [22].

Теплота згоряння, визначена в калориметр вимірюється в процесі заміщення, при якому теплота, отримана від зразка порівнюється з теплою, отриманою від згоряння подібного кількості стандартизованого матеріалу з відомою калорійністю. Ці вимірювання отримуються шляхом представленого зразка в кисневому середовищі під тиском в металевих посудинах високого тиску, так званих «бомбах».

Енергія отримана при цьому згорянні поглинається в калориметр. При цьому фіксується зміна температур в поглинаючому середовищі. Потім теплота згоряння зразка розраховується шляхом множення величини зміни температури в калориметр на раніше певний енергетичний еквівалент або теплоємність, визначену при попередніх випробуваннях із стандартизованим матеріалом.

Недоліками калориметричного методу визначення теплоти згоряння природного газу є обставина, що при визначенні теплоти хімічної реакції найбільші труднощі часто пов'язані не з урахуванням побічних процесів, а з визначенням повноти протікання реакції і з необхідністю враховувати кілька реакцій.

Точність калориметра знижується через пароутворення або розбризкування калориметричної рідини. Для усунення цього недоліку зразок розміщують у додаткову посудину, яка занурюється у рідину. Але у цьому випадку період теплообміну збільшується і ускладнюється врахування поправок до додаткових теплових витрат.

Калориметр також потребує попереднього градування.

Визначення теплоти згоряння природного газу за допомогою термоанемометричного методу

Одним з методів визначення калорійності природного газу є термоанемометричний метод. Оскільки температура термоперетворювача

залежить не тільки від швидкості потоку газу, але і від його якісних характеристик.

Принцип термоанемометричного методу визначення калорійності природного газу базується на зміні електричного опору провідника в залежності від температури [26]. Потік газу охолоджує нагрітий провідник і тим самим змінює його електричний опір. Вимірювання енергії природного газу за допомогою термоанемометричного методу можливо двома способами: в першому способі температура провідника за допомогою змінного опору підтримується на постійному рівні, і вимірюється кількість спожитої електричної енергії, що витрачається на втрату тепла. При другому способі спостереження ведеться при постійній силі струму і падаючої температурі провідника, причому залежність між опором провідника і швидкістю газового потоку встановлюється шляхом градування.

Теоретичні та експериментальні дослідження термоанемометричного методу при контролі енергетичної цінності природного газу викладені в [27, 28, 53]. Недоліком термоанемометрів, що звужує область їх застосування при контролі якості природного газу, є чутливість не тільки до швидкості потоку природного газу, але і до його температури та тиску.

Вимірювання теплоти згоряння природного газу кореляційним методом

Як альтернатива до наведених методів для визначення теплоти згоряння природного газу виступають кореляційні методи, як окремий підхід до непрямого визначення теплоти згоряння природного газу. До категорії «кореляційних» відносяться прилади, які вимірюють певну фізико-хімічну властивість природного газу і використовують відомі взаємозв'язки між теплою згоряння і виміряною властивістю, встановлені як за експериментальними спостереженнями, так і на основі теоретичного аналізування, що дає можливість зробити висновок щодо теплоти згоряння природного газу [76].

В основі кореляційних методів вимірювання, як правило лежить вимірювання різних фізико-хімічних параметрів газової проби, а саме: загальна концентрація вуглеводнів, концентрація діоксиду вуглецю, теплопровідність, теплоємність, діелектрична проникність, швидкість поширення ультразвуку в газовій пробі, динамічна в'язкість [33]. Підбір і поєднання даних параметрів (як правило від 2 до 4 інформативних параметрів) в найкращу кореляційну залежність, яка отримується на різних тестових газових сумішах, що моделюють природний газ з різною теплотою згоряння, дозволяє отримати емпіричну залежність за допомогою якої «кореляційні» прилади дозволяють проводити вимірювання на реальному потоці природного газу [34-40].

Вітчизняні наковці на даний час найбільші здобутки мають у вивченні кореляційних зв'язків між теплотою згоряння та швидкістю ультразвуку в газовому середовищі [41, 42], що дозволило реалізувати дослідний зразок приладу [43].

Вимірювання теплоти згоряння природного газу оптичним методом

Оптичний метод визначення теплоти згоряння природного газу може бути реалізованим на базі методу інфрачервоних спектроскопії [44, 45]. Його суть полягає в вимірюванні інтенсивності поглинання природним газом інфрачервоних коливань, що проходять через нього. Метод може бути реалізований за допомогою вимірювальної схеми, яка складається із трьох кільцеподібних кювет.

Відомим також є оптичний метод контролю якості природного газу [46] які реалізує оптоелектронний метод вимірювання кольору. При визначенні параметрів газу використовуються давач кольору, який містить більше трьох фотоприймачів. Це дає можливість шляхом відомих перетворень сигналів відтворити криву складення кольору. Завдяки цьому отримується інфрачервоний сигнал про якість природного газу.

Вимірювання теплоти згорання природного газу терموкаталітичним та термокондуктометричним методами

Для визначення теплоти згорання природного газу також можна застосовувати терموкаталітичний метод (термокаталітичний давач) [47], принцип роботи якого базується на безполуменовому спалюванні метану на каталізаторах, для яких характерна висока вибірковість і чутливість до вимірюваного компоненту.

Вимірювальна схема складається з чотирьох елементів з'єднаних за допомогою мостової схеми. Резистори знаходяться в зоні зіткнення з вимірюваним компонентом. Обидва резистора нагріті (близько 400 °C). Один з резисторів покритий спеціальним каталітичним шаром. При попаданні горючої суміші на поверхню резистора з каталітичним напиленням на ній починається реакція окислення з виділенням тепла. Опір цього резистора починає зростати, баланс моста змінюється. Сигнал розбалансу фіксується. Сенсори закриті спеціальної “губкою” з вогнетривкого металу для того, щоб нагрітий пеллістор не спричинив займання горючих парів в вимірювальній зоні. Пеллістор аналогічний вольфрамній нитці лампочки розжарювання. Метод має лінійну характеристику.

До недоліків термокаталітичного методу слід віднести можливість перегріву і виходу з ладу чутливих елементів при тривалій дії високих концентрацій метану, вплив на результати вимірювання зміни опору газодифузійних фільтрів і каталітичної активності елементів в результаті тривалої експлуатації, нестабільність “нуля” аналізаторів при зміні температури навколишнього середовища, газового складу та напруги живлення, відносно велику (в порівнянні з оптичним і ультразвуковим методами) інерційність засобів контролю, заснованих на термокаталітичному методі.

Іншим методом аналізу складу газу, який ґрунтується на вимірюванні теплопровідності, є термокондуктометричний [47]. Так само як і в термокаталітичному методі, тут є два елементи, нагріті до певної температури.

Один з елементів, будучи опорним елементом, ізольований від вимірюваного середовища і значення його постійно. Інший нагрітий елемент змінює свою температуру при попаданні на нього газу з теплопровідністю відмінною від газу, в якому знаходиться опорний елемент. Різниця сигналу прямо пропорційна концентрації вимірюваного газу. Спосіб реалізації термокондуктометричного методу здійснюють за допомогою мостового принципу, аналогічно термокаталітичному. Методу не потрібний кисень. Діапазон вимірювання до 100% об'єму. Теплопровідність вимірюваного газу повинна значно відрізнятися від теплопровідності зразка (той газ, в якому знаходиться опорний елемент, зазвичай повітря). Крім теплопровідності вимірюваного газу на вимірювання впливає конвекція, перенесення маси і звичайно ж зміна вологості.

Слід зазначити, що існуючим термокондуктометричним газоаналізаторам притаманний ряд недоліків, які полягають в істотному впливі на результати вимірювання неконтрольованих компонентів газової суміші, що змінюють її теплопровідність, в тому числі вуглекислого газу, водню, парів води. Перевагами вищенаведених давачів є простота конструкції, висока швидкодія.

1.3 Аналіз технічних засобів для визначення теплоти згорання природного газу

Багато технічних засобів, які зазвичай використовуються для визначення якості газу (енергетичного вмісту), розроблені для використання як стаціонарних та і онлайн (або потокових) аналізаторів, встановлених на станціях обліку природного газу поблизу трубопроводу або місцях газоспоживання. Якщо використання онлайн інструментів неможливо, наприклад, у віддалених місцях чи районах, де обмежений доступ до комунальних послуг та інших інфраструктур, можуть використовуватися циліндри для збору зразків проби з місця розташування технологічного

процесу або трубопроводу. Потім зразок транспортується в лабораторію для аналізу. Правильні методи обробки зразків мають вирішальне значення для забезпечення репрезентативності зразка та його транспортування до лабораторії вчасно.

Розробка надійних і точних польових переносних приладів для визначення значення теплоти згоряння природного, в яких аналіз газу легко можна реалізувати в полі без передачі зразка в лабораторію, значно підвищує надійність проби. Це полегшує операторам технологічних процесів та трубопровідним компаніям швидко реакцію на зміни якості технологічного процесу чи газу [48].

Аналізатор природного газу модель 292В (рис. 1.6) – це легкий, міцний хроматограф, який використовується для аналізу проби з газопроводу на місці для визначення складу газу та значення нагріву. Модель 292В призначена для роботи як автономний блок, здатний визначати аналіз газу безпосередньо в польових умовах, і підходить для встановлення на мобільній платформі, наприклад, вантажівці, фургоні або автомобілі [48].



Рисунок 1.6 – Зовнішній вигляд аналізатора природного газу модель 292В

Особливості аналізатора включає внутрішню систему відбору проб та компоненти розподілу газу, які дозволяють безпосередньо підключитися до зонда газопроводу. З іншого боку, ця портативна система аналізатора забезпечує всі функції вимірювання, наявні в стаціонарному аналізаторі одного потоку. Результати аналізу відображаються на кольоровому світлодіодному дисплеї і зберігаються в пам'яті, поки їх не буде отримано через бортовий USB-порт або надруковано безпосередньо, коли принтер підключений до порту USB-принтера. Такі хроматографи оснащені внутрішньою пам'яттю, що дозволяє зберігати результати, а також дані калібрування та попередньо створені звіти. Газовий хроматограф має додатковий інвертор постійного струму для змінного струму, щоб він міг працювати з постійним струмом від автомобіля/вантажівки або джерелом постійного струму, що дасть можливість працювати у віддаленому місці.

Калориметр природного газу CVM400 GasCVD (рис. 1.7) вимірює теплопровідність газової суміші, наприклад природного газу, при різних температурах і обчислює теплотворну здатність газу, виходячи з його теплопровідності [49]. Спираючись на досвід в галузі аналізу газу та вимірювання теплотворної здатності газу, накопиченого протягом більше 20 років з моменту виходу першого смарт-газового хроматографа, корпорація Azbil [49] тепер пропонує компактні, легкі та високоточні калориметри природного газу, які відповідають міжнародним законодавчим метрологічним стандартам.

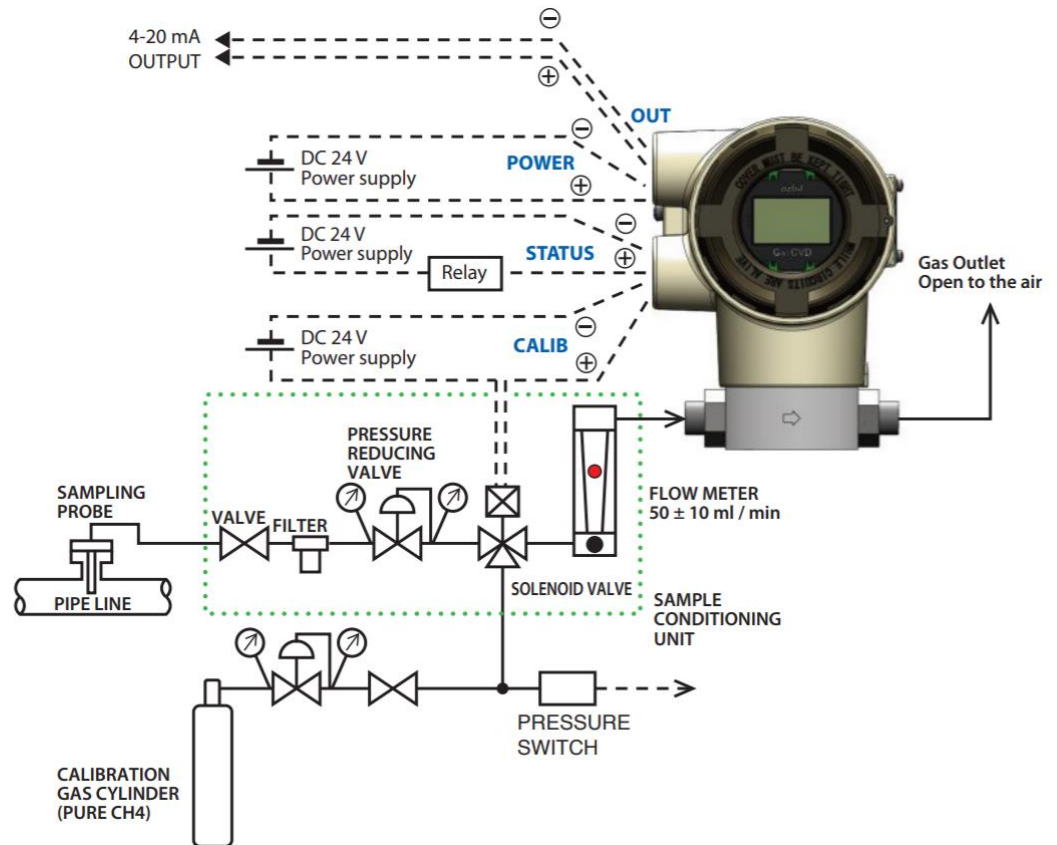
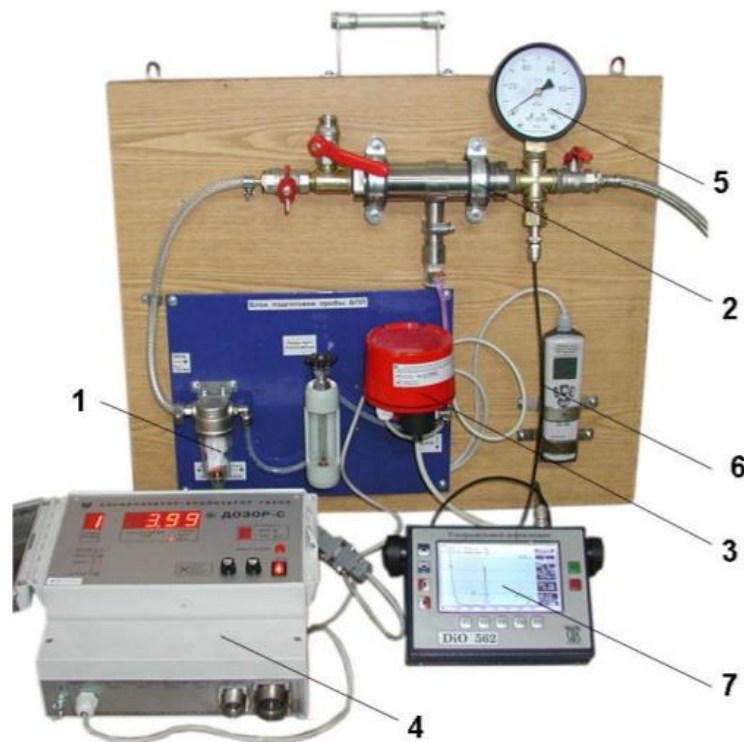


Рисунок 1.7 – Зовнішній вигляд калориметра природного газу CVM400
GasCVD

CVM400 вимірює теплопровідність природного газу при різних температурах, змінюючи температуру датчика теплопровідності в кілька етапів. Калориметр використовує метод підтримуючої регресії векторів (SVR). Калорійність обчислюється із вимірених значень теплопровідності процесу, використовуючи заздалегідь формулу характеристик на основі теплопровідності, вимірної при різних температурах природного газу.

Експериментальна установка для визначення теплоти згоряння газу розроблена в умовах Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу [88], реалізує кореляційний метод і складалася з таких основних вузлів (рис. 1.8) [50]: блоку підготовки газу 1, до складу якого входить вологовідділювач і ротаметрична трубка, що призначений для очищення проби від пилу та вологи; сенсора визначення швидкості поширення звуку в газі 2; блоку вимірювання концентрації CO_2 в природному газі, який

складається з серійного давача діоксиду вуглецю 3 типу ИП-СО₂ та аналізатора газу 4 „ДОЗОР-С”. Особливістю установки є спеціально спроектований та виготовлений блок визначення швидкості поширення звуку в газі. Блок є герметичною конструкцією із нержавіючої сталі циліндричної форми, в яку подається природний газ. В блоці встановлений ультразвуковий первинний перетворювач швидкості ультразвуку власного виготовлення з частотою до 1 МГц, який працює в суміщеному режимі як випромінювач-приймач [51]. На розрахованій з умови отримання максимального значення енергії відбитого сигналу та чітко зафіксованій відстані 57,7 мм встановлено відбивач, який виготовлений з нержавіючої сталі діаметром 22 мм та шорсткістю поверхні Rz=20.



1 - блок підготовлених газу; 2 - блок визначення швидкості звуку в газі;
3 - давач концентрації СО₂ в природному газі; 4 - аналізатор газу; 5 -
манометр; 6 - термогігрометр; 7 - ультра звуковий дефектоскоп.

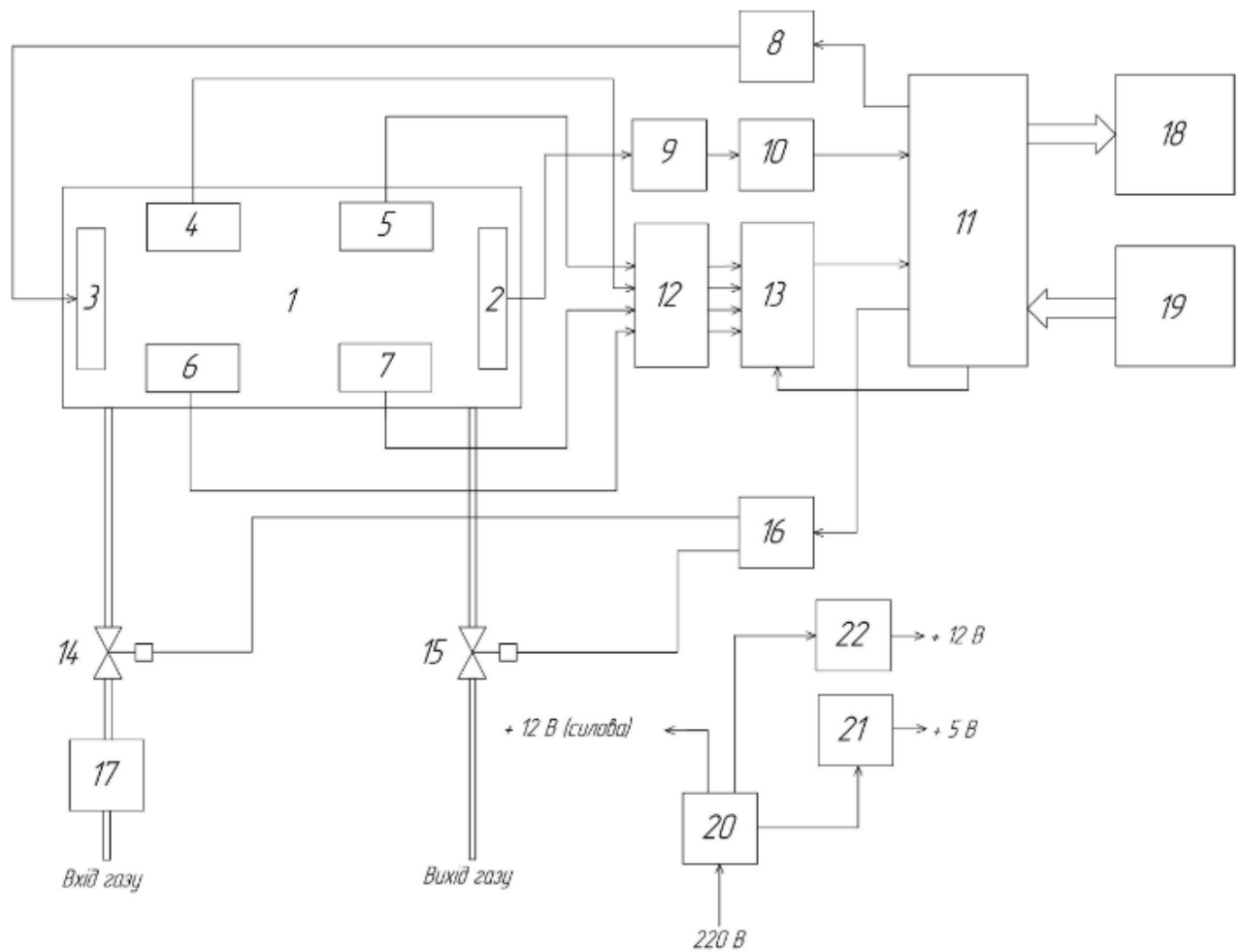
Рисунок 1.8 – Експериментальна установка для визначення теплоти згоряння природного газу

Технологія визначення теплоти згоряння природного газу на експериментальній установці (рис. 1.8) наступна. Проба газу надходить у вимірювальну камеру 2, в якій визначається швидкість поширення звуку. Для вимірювання вмісту діоксиду вуглецю в природному газі пробу газу необхідно додатково очистити від механічних домішок та осушити за допомогою блоку підготовки проби. Вміст діоксиду вуглецю за допомогою давача 3 визначається в блоці визначення вмісту діоксиду вуглецю 4. Крім цього, в процесі визначення теплоти згоряння також вимірюється тиск, температура та вологість проби газу.

В [43] описано прилад, що реалізує оперативне визначення (експрес-контроль) нижчої теплоти згоряння природного газу, придатного до застосування в газових мережах низького тиску (рис. 1.9).

Основним елементом приладу є вимірювальна камера 1, де здійснюється процес вимірювання інформативних параметрів, які необхідні для визначення теплоти згоряння природного газу. У вимірювальній камері 1 знаходяться два ультразвукові перетворювачі 2 і 3. Перетворювач 3 є випромінювачем, а перетворювач 2 – приймачем ультразвукового сигналу. Також у вимірювальній камері знаходяться давач тиску 4, давач температури 5, давач вологості 6 та давач визначення вмісту вуглекислого газу (CO_2) 7, який працює за принципом недиспергованої інфрачервоної спектроскопії (NDIR). При такому способі визначення концентрації CO_2 виходять з того, що CO_2 абсорбує інфрачервоне випромінювання, тобто відсоток ІЧ-випромінювання в певному, вузькообмеженому діапазоні довжин хвиль, що являє собою величину, яку можна застосовувати для визначення концентрації CO_2 .

В [52] описано розроблено портативний калориметр для визначення теплоти згоряння природного газу, в тому числі й за умов побутового сектору, схему якого представлено на рис. 1.10. Основними складовими елементами розробленого портативного переносного калориметра є: калориметрична колонка згоряння із газовим пальником, в якій здійснюється спалювання



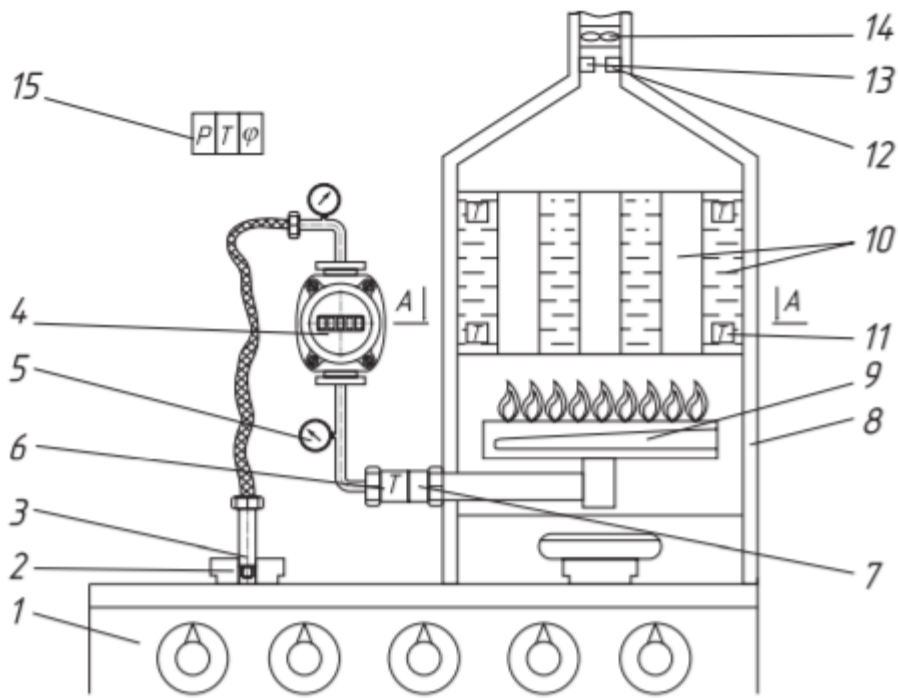
1 - вимірювальна камера; 2, 3 - ультразвукові перетворювачі; 4 - давач тиску; 3 - давач температури; 6 - давач вологості; 7 - давач визначення вмісту вуглекислого газу; 8 - ультразвуковий генератор; 9 - вхідний підсилювач; 10 - модуль узгодження рівнів акустичного блоку; 11 - програмно-цифровий модуль; 12 - блок нормалізуючих підсилювачів; 13 - аналого-цифровий перетворювач; 14, 13 - електромагнітні газові клапани; 16 - блок керування електромагнітними газовими клапанами; 17 - газовий редуктор; 18 - інформаційний дисплей; 19 - клавіатура; 20 - блок живлення; 21, 22 - перетворювачі напруги

Рисунок 1.9 – Структурна схема приладу для експрес-контролю теплоти згоряння природного газу

природного газу, термоізолюваний теплообмінник із теплоносієм з попередньо визначеними фізико-хімічними характеристиками; пристрій для визначення об'єму спожитого природного газу, який надходить у газовий пальник.

Оскільки проведення вимірювань теплоти згоряння газу – це процедура, яка здійснюється у попередньо визначений період, тобто калориметр не передбачає стаціонарного встановлення у споживача, відповідно, для виконання вимірювань необхідно провести підготовчі роботи. Для реалізації визначення теплоти згоряння природного газу у споживачів [52] розглядається спосіб, який передбачає застосування спеціального пробовідбірника для використання у комплекті калориметра.

Значна кількість способів характеризуються патентозахищеними технічними рішеннями [54] у сфері визначення теплоти згоряння природного газу. Одним із відомих є спосіб визначення теплоти згоряння горючих газів [55], який полягає у вимірюванні температури полум'я пальника при згорянні суміші постійного об'ємного співвідношення досліджуваного газу з повітрям. Схема технічного рішення для реалізації цього способу (рис. 1.11) містить пальники 1 і 2, вхідний газовий 12 та повітряний 15 патрубки, повітряну лінію 16, газову лінію 10, капілярні трубки 14, 17, 8 і 9 для обмеження витрати газу та повітря, серво-клапан 13 з контролером 15 для регулювання витрати горючого газу, термопари 3 і 4 для вимірювання температури полум'я на пальниках, звужувальний пристрій 6 для забезпечення постійної різниці співвідношення повітря-газ в двох пальниках, електромагнітний клапан 13, контролер 18, реєструючий пристрій 19, турбінний витратомір 7.



1 - газова плита, 2 - конфорка, 3 - штуцер, який монтується на заміну сопла конфорки, 4 - лічильник газу з цифровим відліковим пристроєм, 5 - давач надлишкового тиску в трубопроводі газу після лічильника, 6 - давач температури газу, 7 - інфрачервоні давачі вмісту метану та CO_2 в газі, 8 - калориметрична колонка згорання, 9 - газовий пальник, 10 - кожухотрубний теплообмінник, 11 - давачі температури рідини, 12 - давач вмісту залишкового кисню в димових газах, 13 - давач температури димових газів, 14 - регулятор кількості димових газів; 15 - давачі тиску, температури та вологості навколишнього середовища

Рисунок 1.10 – Схема розробленого калориметра для визначення теплоти згорання природного газу в побутовому секторі

При реалізації цього способу спочатку за допомогою двох пальників спалюють досліджуваний газ разом з газом-носієм, що підтримує горіння, вимірюючи температуру полум'я і витрату досліджуваного газу за допомогою турбінного витратоміра. Потім досліджуваний газ змішують в одній лінії з газом-носієм і подають в обидва пальники, регулюючи витрату таким чином, щоб досягнути максимальної температури полум'я в пальниках. На основі

отриманих даних щодо об'ємного співвідношення витрат газів, за яких досягається максимальна температура полум'я, розраховують теплоту згоряння досліджуваного газу.

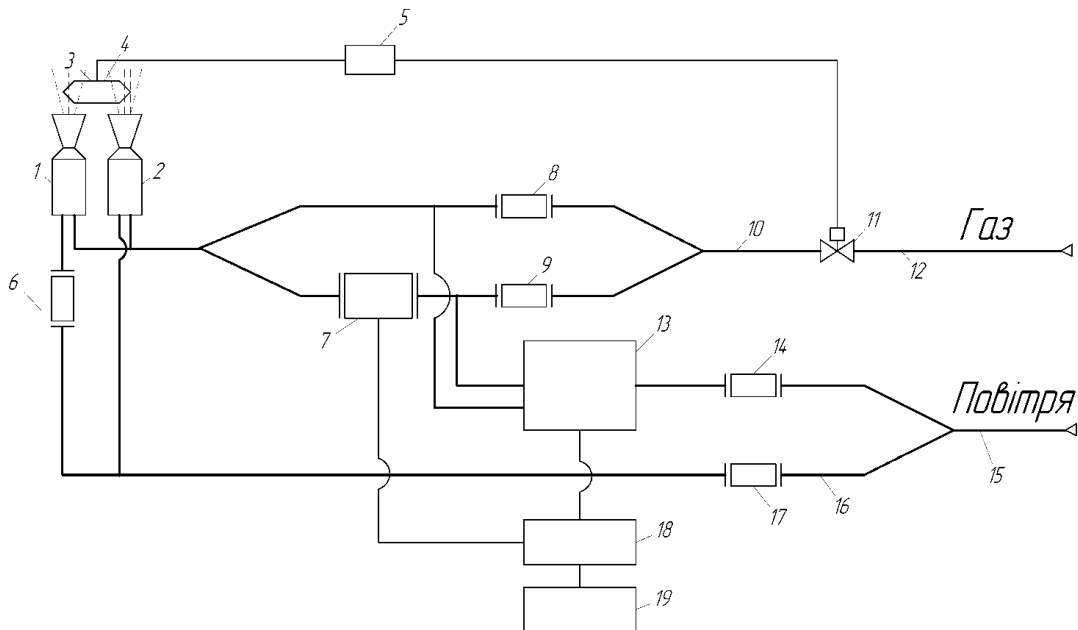


Рисунок 1.11 – Схема пристрою для визначення теплоти згоряння горючих газів

Проте цей спосіб вимагає двоетапності практичної реалізації і, як наслідок, тривалості проведення досліджень. Крім того, цей спосіб характеризується складністю технічної реалізації внаслідок необхідності застосування двох спеціальних ідентичних пальників, турбінного витратоміра, системи керування вентилями і електромагнітним клапаном для регулювання співвідношення витрат досліджуваного газу і газу-носія, що обумовлює недостатню точність і повторюваність результатів вимірювання, оскільки визначення моменту максимальної температури полум'я є оптимізаційною характеристикою, яка потребує поетапного регулювання в сторону збільшення і зменшення об'ємного співвідношення газів для зміни температури полум'я пальників.

Відомий також запатентований мікрокалориметр для вимірювання теплоти згоряння природного газу [56]. Він включає в себе блок 4 (рис. 1.12), що керує потоком, в який вводять досліджувані гази для проведення аналізу.

Мікрокалориметр містить камеру згоряння 6, в якій зразки газу пропускають через давач 8, в якому здійснюється окислення зразків газу та генерація аналітичного сигналу. Засіб обробки сигналу підключено до вихідного сигналу 7 давача 8 для приймання інформативного сигналу та обчислення теплоти згоряння зразкового газу. Після окислення газу утворену суміш випускають в атмосферу через патрубок 9 в камері згоряння 6.

Під час роботи в блок 4 вводять калібрувальний газ 3 відомої теплоти згоряння або пробний газ 1 з невідомою теплотою згоряння, де його змішують з газом-носієм 2, як правило, повітрям, перед контактом з давачем 8, який нагрівається до температури експлуатації. Блок 4 вводить точний заздалегідь визначений об'єм пробного газу або калібрувального газу в потік газу-носія. Отримана суміш 5 потрапляє в камеру згоряння 6, де каталітично окислюється нагрітим давачем 8. Реакція окислення виробляє тепло, що викликає зміну температури давача 8. Зміна температури прямо пропорційна виділеній теплоті і використовується для визначення теплоти згоряння зразка газу.

Калібрування давача 8 здійснюється при певній температурі та тиску навколишнього середовища, тому точність калориметра є досить високою через зменшення ефекту коливань умов навколишнього середовища. Мікрокалориметр може включати давачі температури та тиску, що дозволяє при зміні умов навколишнього середовища вводити корекційний коефіцієнт.

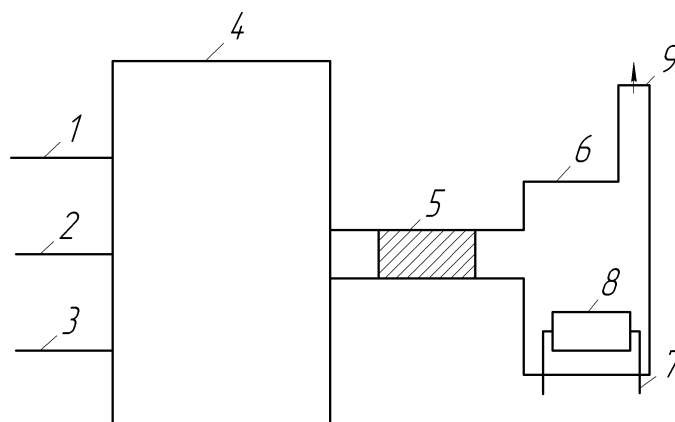


Рисунок 1.12 – Блок-схема мікрокалориметра для вимірювання теплоти згоряння природного газу

Застосування описаного пристрою для визначення теплоти згоряння природного газу вимагає використання калібрувального газу та газу-носія, що ускладнює його використання як мобільного засобу при експрес-визначенні теплоти згоряння газу, а точність функціонування як високоточного в патенті не конкретизується.

Калориметричний спосіб прецизійного вимірювання теплоти згоряння природного газу [57] реалізується прямим методом шляхом спалювання газоподібного палива в калориметричній посудині. При цьому теплова енергія, що виділилась під час горіння використовується для повного плавлення введеної в посудину калориметричної речовини. Процес плавлення проводять в заданому температурному інтервалі, симетричному щодо температури плавлення калориметричної речовини, підтримуючи при цьому температуру оболонки калориметра рівною температурі плавлення калориметричної речовини. Теплота згоряння газоподібного палива дорівнює тепловій енергії, необхідній для нагрівання калориметричної речовини в заданому температурному інтервалі і встановленої в процесі електричного градування калориметра.

Технічне рішення для реалізації способу (рис. 1.13 а,б) містить калориметричну посуду 1, наповнену калориметричною речовиною відомої кількості 2. У калориметричній посудині розміщена камера згоряння 3 з електродами 4 для запалювання газу, яка забезпечена системою трубопроводів для подачі газу 5, первинного кисню 6, вторинного кисню 7, аргону 8. Для подачі газів в камеру згоряння передбачені електронні регулятори витрати газу 9-12, посудини 13 для насичення кисню водою і посудини 14 для запобігання попадання води в регулятори витрати кисню. У термостатичній оболонці 15 (водяний термостат) розміщені чотири спіралі 16. Калориметр містить два платинових термометри опору 17 і 18 і два електричних нагрівачі 19 і 20. Нагрівач 20 розміщений в калориметричній посудині 1, а нагрівач 19 у водяному термостаті 15. Крім того термостат 15 обладнаний мішалкою 21. Між калориметричною посудиною 1 і термостатичною оболонкою 15

розташований масивний блок 22 з металу з високою теплопровідністю. Калориметрична посудина 1 закрита кришкою 23, що має пази для трубопроводів 5-8 і кінці електричних провідників до блоку управління і вимірювання 24. Між металевим блоком 22 і зовнішньою стінкою калориметричної посудини 1 розміщена батарея диференційних термопар 25. Трубки 26 призначені для виведення продуктів згоряння в камеру для збору конденсату 27. Трубка 28 служить для виходу газоподібних продуктів згоряння з калориметра.

Теплоту згоряння природного газу визначають таким чином. Калориметричну посудину 1 заповнюють рідкою евтектикою 2 так, що вона повністю покриває камеру згоряння 3. Потім калориметричну посудину 1 охолоджують в холодильнику до повної кристалізації евтектики 2. Після цього калориметричну посудину 2 виймають з холодильника і витримують при кімнатній температурі близько однієї години, поки калориметрична посудина 1 не прийме температуру навколишнього середовища, але не більше 24°C.

Температура водяного термостата 15 встановлюється рівною температурі плавлення евтектики (25,2°C) і підтримується постійною з похибкою $\pm 0,002^\circ\text{C}$. Поміщають калориметричну посудину з твердою евтектикою в термостат.

За допомогою термометра опору 18, що знаходиться в хорошому тепловому контакті з калориметричною речовиною 2, реєструють температуру калориметричної посудини 1. За допомогою електричного нагрівача 20 доводять температуру калориметричної посудини 1 до 25°C і починають вимірювання різниці температур між калориметричною посудиною 1 і термостатом 15 за допомогою батареї диференційних термопар 25.

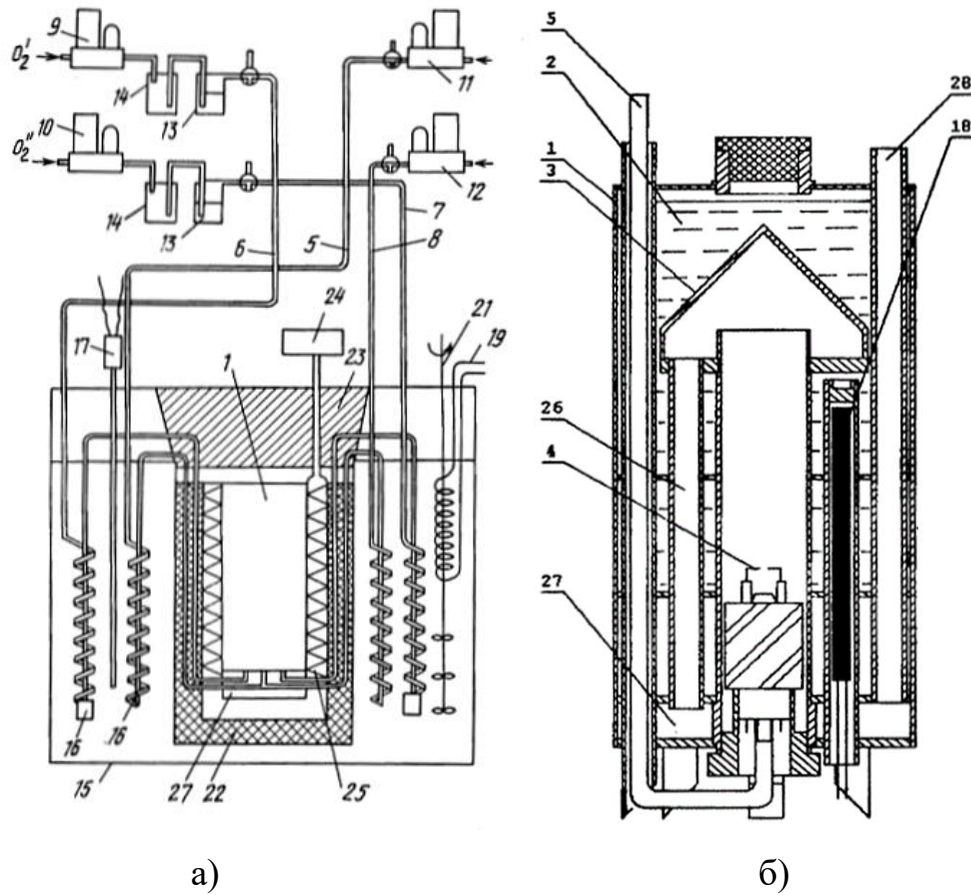


Рисунок 1.13 – Функціональна схема (а) та конструкція калориметричної посудини (б) для технічної реалізації способу прецизійного вимірювання теплоти згоряння природного газу

Як тільки встановиться постійний хід температури калориметричної посудини, що свідчить про досягнення стаціонарного стану, і температура калориметричної посудини 1 (T_1) буде на $0,1^\circ\text{C}$ нижче температури плавлення евтектики 2, фіксують величину різниці температур, виміряну батареєю термопар 25, і подають за допомогою електричного нагрівача 20 постійну електричну потужність близько 30 Вт, яку вимірюють з похибкою, що не перевищує $0,01\%$. Подачу електричної потужності продовжують до тих пір, поки різниця температури, що реєструється батареєю термопар, не досягне того ж вихідного значення, але протилежного знаку, тобто температура рідкої евтектики стане вище температури плавлення евтектики на $0,1^\circ\text{C}$. Визначають величину електричної енергії Q , витраченої на плавлення всієї

калориметричної речовини 2 і нагрів калориметричної посудини від початкового значення (T_1), що знаходиться на $0,1^\circ\text{C}$ нижче температури плавлення калориметричної речовини 2, до її кінцевого значення (T_2), що перевищує температуру плавлення на $0,1^\circ\text{C}$.

Значення питомої теплоти згоряння H досліджуваного природного газу з врахуванням визначеної теплової енергії Q та відомої маси евтектики m розраховують за формулою:

$$H = \frac{Q}{m}. \quad (1.3)$$

Технічна реалізація даного способу вимагає використання холодильної установки, забезпечення сталих нормованих лабораторних умов, а проведення експериментальної частини вимірювань займає тривалий відрізок часу. Тому такий спосіб є достатньо складним конструктивно і не підходить для реалізації в мобільних пристроях експрес-визначення теплоти згоряння природного газу.

Пристрій [58] дозволяє визначати теплоту згоряння природного газу непрямим методом шляхом визначення теплопровідності його компонентів. Згідно з схемою (рис. 1.14 а) пристрій містить балони 1, 5, 8, 11 з різними компонентами природного газу, регулятори тиску кожного каналу 3, 7, 10, 13, контролери швидкості потоку для кожного каналу 3А, 3В, 3С, 3D, вимірювальний трубопровід 4 системою визначення теплоти згоряння природного газу. Чутливим елементом системи визначення теплоти згоряння природного газу (рис. 1.14 б) є електронний чип, що дозволяє визначати теплопровідність робочого середовища. До його складу входять нагрівальний елемент 16, елементи для визначення температури 15 і 17, теплоізолятор 14, ізоляційна плівка 19, вимірювальна порожнина 18.

Виконання вимірювань починають з пропускання через вимірювальний трубопровід 4 досліджуваного природного газу. За допомогою чутливого елемента системи визначення теплоти згоряння природного газу визначають теплопровідність досліджуваного газу шляхом вимірювання температури та електричної потужності нагрівального елемента. Після цього вимірювальний

трубопровід 4 продувають, видаляючи з нього і чутливого елемента досліджуваний газ. Далі у вимірювальному трубопроводі 4 почергово формують різні компонентні склади природного газу шляхом змішування досліджуваного газу з газами з балонів 1 за допомогою регуляторів тиску 2 і контролерів витрати 3. Для кожного складу газу визначають його теплопровідність. В результаті проведення певної кількості дослідів отримують ряд значень теплопровідності для різних компонентних складів. Використовуючи теорію багатовимірної аналізу та елементи нечіткої логіки при обробці отриманих експериментальних значень визначають теплоту згоряння досліджуваного природного газу розрахунковим методом.

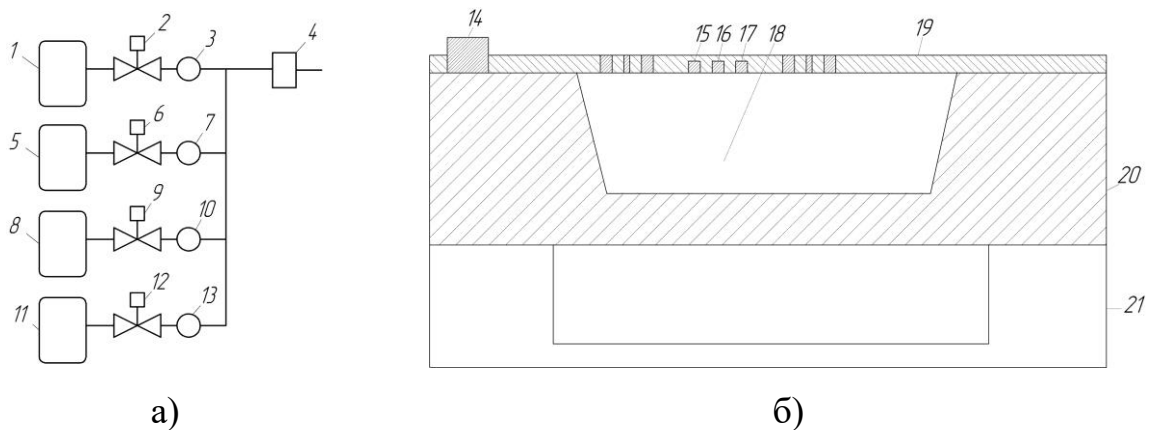


Рисунок 1.14 – Функціональна схема (а) та конструкція чутливого елемента (б) пристрою для визначення теплоти згоряння природного газу

Проте даний спосіб визначення теплоти згоряння природного газу є складним у реалізації, вимагає застосування дорогих датчиків та системи обробки інформації в поєднанні з складним математичним апаратом. Практично це унеможлиблює використання такого методу у споживачів природного газу.

Відомий спосіб визначення теплоти згоряння природного газу природних вуглеводневих горючих газів [59], метою якого є скорочення витрати часу на визначення теплоти згоряння газу. Спосіб полягає в послідовному спалюванні в однакових умовах в полум'ї іонізаційного детектора газового хроматографа в потоці інертного газу-носія однакових

об'ємів калібрувального і досліджуваного газу з реєструванням хроматограм. При спалюванні досліджуваного газу через час t після введення проби в хроматографічну колонку, визначеного умовою $1 \text{ хв.} \leq t \leq t_0$ (t_0 – час початку виходу метану), змінюють напрям руху газу-носія на протилежний, в результаті чого реєструють один загальний пік досліджуваного газу без розділу на компоненти. Теплоту згоряння досліджуваного газу Q визначають за табличним значенням теплоти згоряння калібрувального газу Q_k і вимірних площ піків досліджуваного S_n і калібрувального S_k газу використовуючи формулу:

$$Q = Q_k \frac{S_n}{S_k}. \quad (1.4)$$

Цей спосіб потребує застосування хроматографа, тому не може слугувати як експрес-контроль у споживачів природного газу.

Спосіб [60] оперативного визначення теплоти згоряння газоподібних палив базується на використанні явища іонізації полум'я і передбачає вимірювання за допомогою електричного зонду струму іонізації полум'я мікропальника, який підключений до ліній подачі газу і повітря. Особливість способу полягає в тому, що шляхом зміни витрати подаваного в мікропальник повітря знаходять максимум іонізації полум'я, фіксують відповідні до цього максимуму витрати газу $Q_G(\text{max})$ і повітря $Q_{II}(\text{max})$ і при цьому обчислюють коефіцієнт їх співвідношення:

$$K = \frac{Q_{II}(\text{max})}{Q_G(\text{max})} \quad (1.5)$$

За величиною коефіцієнта K визначають теплоту згоряння газоподібних палив за формулою:

$$P = 3,71 \cdot K + 1,17, \quad (1.6)$$

де P – теплота згоряння палива, МДж/м³.

Конструктивно пристрій для реалізації такого способу містить газовий мікропальник 1 (рис. 1.15), який під'єднаний з однієї сторони до газового балону 2 (на реальному об'єкті – до лінії подачі газу) через лічильник газу 3 і

ротаметр 4. З іншого боку мікропальник 1 з'єднаний з компресором 5 через лічильник повітря 6 і ротаметр 7. Імпульси від первинних давачів лічильників газу 3 і повітря 6 надходять на входи перетворювачів 8 і 9 цих лічильників у дискретні електричні сигнали, частота проходження яких пропорційна витратам газу й повітря відповідно. Арифметико-логічний пристрій 10 на основі цих сигналів здійснює розрахунок коефіцієнта співвідношення газ-повітря, а результат виводиться на інформаційне табло 11.

У полум'ї 12 мікропальника 1 розміщений двоелектродний зонд 13, який призначений для вимірювання ступеня іонізації полум'я. Електричний сигнал зонда через блок 14 первинної обробки керуючого сигналу надходить на вимірювальний прилад 15, призначений для візуального контролю ступеня іонізації полум'я, і на вхід аналого-цифрового перетворювача 16, підключеного до входу обчислювального пристрою 17 (мікроконтролера).

Цей пристрій хоча і може бути застосовний для оперативного визначення теплоти згоряння природного газу у споживачів, однак є технічно складним у конструктивному виконанні.

Відомими є ряд способів і технічних рішень для експрес-визначення теплоти згоряння природного газу [41, 42, 61], який дозволяє проводити вимірювання в режимі реального часу на базі вимірювання швидкості проходження ультразвукових коливань в природному газі. Вони вже розглянуті вище при аналізі кореляційних методів вимірювання теплоти згоряння природного газу.

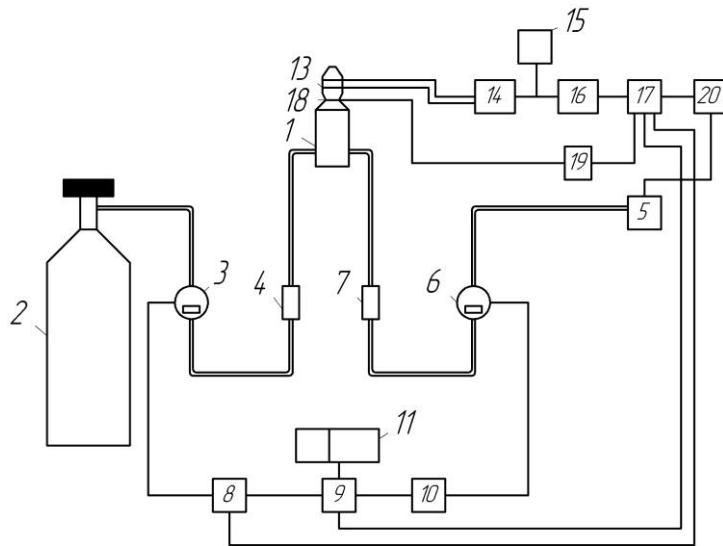


Рисунок 1.15 – Загальний вигляд пристрою, який реалізує спосіб оперативного визначення теплоти згоряння природного газу

1.4 Аналіз нормативної документації для визначення теплоти згоряння природного газу

Враховуючи сучасні тенденції зростання цін на енергоносії, в тому числі і на природний газ актуальнішими стають вимоги до його якості. Вимоги до якісних характеристик природного газу, а також підходи до їх визначення в Україні відрізняються від закордонних, насамперед країн ЄС [62].

Згідно з чинним нормативним документом України [63] якість продукції характеризується сукупністю характеристик продукції, які стосуються її здатності задовольняти встановлені і передбачені потреби. Стосовно природного газу, то його якість визначається компонентним складом, який формує основні споживчі характеристики газу. З 1987 року, в т.ч. в Україні, на сьогодні чинним є міждержавний стандарт [9], який визначає фізико-хімічні характеристики природного газу, найважливішими серед яких є теплота згоряння та число Воббе, що характеризує можливість взаємозаміни природного газу. На відміну від іноземного стандарту [64] і гармонізованого з європейським стандартом [65] у [9] не регламентовані значення відносної густини природного газу, метанового числа, а також вмісту у ньому метану,

азоту та водяної пари. Водночас в [64] вже нормуються значення відносної густини в діапазоні (0,555 – 0,680), об'ємний вміст метану не менше ніж 80 %, азоту і вуглекислого газу разом – не більше 10 %.

Визначення компонентного складу природного газу в Україні та за кордоном відбувається шляхом хроматографічного аналізу. Нормативний документ [66] конкретизує вимоги, яким має відповідати аналітичний метод для повного та розширеного аналізу природного газу. Останній дає змогу кількісно виміряти вміст не тільки окремих компонентів, але і гексанової вуглеводневої фракції та обчислити на цій базі фізичні властивості газу. Незважаючи на те, що вищі вуглеводні впливають на зміну теплоти згоряння та густини, менше ніж на 0,3 % та 0,004 % відповідно, їх потрібно виявляти для оцінювання долі гексанової фракції.

Нормативний документ [23], що складається з п'яти частин, описує методи аналізування природного газу із заданими рівнями невизначеності. Цей підхід зручний для обчислення теплотворної здатності та інших адитивних фізичних властивостей газу із певною невизначеністю. Перша частина надає настанови щодо аналізування природного газу для визначення молярних часток його головних компонентів. У другій частині задані характеристики вимірювальних систем і статистичний підхід до оброблення даних, а також обчислення помилок для визначення невизначеностей у молярних часток компонентів газу. Третя і подальші частини документа містять опис різних методик проведення спеціалізованих аналізів, які можуть бути застосовані тільки з урахуванням вимог першої та другої частин міждержавного стандарту.

За кордоном застосовують нормативний документ [67], який в Україні є гармонізованим з [66] і стосується методу оцінки ефективності аналітичних систем, призначених для аналізу природного газу. Оцінка ефективності конкретизує методики досліджень, які можуть повинні бути застосовані до вибраної аналітичної системи, включаючи метод, обладнання і відбір проби.

Теплота згоряння природного газу в Україні згідно з [9] не повинна бути меншою, ніж $31,8 \text{ МДж/м}^3$ (за температури $20 \text{ }^\circ\text{C}$ та абсолютного тиску 101325 Па). В Європі згідно з стандартом [68] природний газ поділяють на три групи L, E і H за числом Воббе відповідно від $39,1$ до $54,7 \text{ МДж/м}^3$, але за температури $15 \text{ }^\circ\text{C}$ та абсолютного тиску 101325 Па . При цьому газові прилади також поділяються на категорії, що визначаються відповідно до типу газу і тиску, для яких вони призначені. В кожній країні, відповідно до місцевих умов газопостачання (компонентний склад газу і його тиск), повинні використовуватися тільки рекомендовані категорії приладів, які функціонують на газі певних груп. Це в свою чергу забезпечує правильне їх функціонування і запобігає виникненню позаштатних ситуацій при роботі газового обладнання [93].

В Україні нормативними документами регламентовано визначення теплоти згоряння двома способами: розрахунковим [20, 69] і за результатами спалювання газу [70, 71]. Найбільш поширеним є метод [20, 69], що базується на використанні даних про компонентний склад природного газу, отриманих за допомогою хроматографічного аналізу.

Згідно з [70] теплоту згоряння визначають шляхом спалювання в калориметрі виміряного об'єму газу і вимірюванні тепла, яке виділяється при цьому. На основі отриманих даних розраховують вищу теплоту згоряння природного газу.

Прямий метод визначення питомої теплоти згоряння природного газу за [71] полягає у спалюванні в калориметричній бомбі (при постійному об'ємі) в середовищі стиснутого кисню певного об'єму газу і визначенні кількості тепла, яке виділяється при його згорянні.

Не менш важливим якісним показником природного газу є метанове число [72], яке характеризує здатність газу до згоряння без детонації. Велике метанове число означає високу стійкість до детонації, яка, в свою чергу, означає високу ефективність, і більш низькі викиди CO_2 при згорянні. Газ із надто низьким метановим числом може привести до пошкодження двигуна

внутрішнього згоряння або привести до втрат в ефективності його застосування.

Важливим якісним параметром природного газу є його вологість. При високій вологості газу може утворюватися конденсат на внутрішніх поверхнях газового обладнання, що є джерелом таких проблем, як зниження пропускну здатності, корозії металу, утворення кристалогідратів та інших, а також зменшення нижчої теплоти згоряння, що як наслідок, приводить до збільшення його споживання нагрівальними приладами для досягнення однакової ефективності обладнання.

В Україні є чинним стандарт [73], який визначає три методи для визначення кількості водяної пари та точки роси вологи: конденсаційний, електролітичний та абсорбційний. В той же час в Європі застосовують стандарт [74], який описує метод визначення кількості води в природному газі під тиском більшим, ніж 1 МПа. Також метод підходить для аналізу газу, що містить гідроген сульфід з вмістом води 10 мг/м^3 або більше. Серія європейських стандартів [75] описує процес визначення кількості води в природному газі кулонометричним методом, який полягає у титруванні дослідного зразка розчином Карла Фішера, відповідно до абсорбційного методу [73].

Найбільш актуальним, на наш погляд на сьогоднішній день, критерієм якості природного газу є оцінювання його енергетичної цінності [1], про що свідчать останні результати профільних нарад у сфері метрології та обліку природного газу за сприяння і організації НАК «Нафтогаз України».

1.5 Вибір та обґрунтування напрямку дослідження

Проведений аналіз сучасного стану наукового, нормативного і технічного забезпечення при вимірюванні теплоти згоряння природного газу.

Проаналізовано поняття теплоти згоряння природного газу як його якісної характеристики на основі впливових факторів і параметрів, що

визначають її кількісну оцінку при обліку природного газу за його енергетичною цінністю.

Розглянуто прямі і опосередковані методи для визначення теплоти згоряння природного газу і технічні засоби для реалізації цих методів в лабораторних умовах і при проведенні експрес-контролю якості природного газу у споживачів. Оцінено сучасну вітчизняну і закордонну нормативну базу для визначення теплоти згоряння природного газу.

За результатами аналізу встановлено, що тенденції розвитку засобів вимірювання теплоти згоряння природного газу стосуються не тільки високоточних калориметрів, але і засобів для експрес-контролю теплоти згоряння природного газу безпосередньо за місцем газоспоживання.

Встановлено, що вимірювання теплоти згоряння природного газу за місцем його споживання є необхідною складовою для підвищення точності обліку природного газу і може бути реалізовано, наприклад, шляхом проведення експрес-контролю теплоти згоряння природного газу безпосередньо у споживачів з використанням мобільних інформаційно-вимірювальних систем вимірювання енергетичних характеристик природного газу. На базі опрацьованих літературних джерел виявлено відсутність на даний час таких засобів для використання у практичній діяльності газопостачальних і контролюючих організацій, що характеризує актуальність дисертаційної роботи.

Актуальними для впровадження є практично всі проаналізовані способи і пристрої вимірювання теплоти згоряння природного газу, однак сфера їх застосування повинна бути техніко-економічно обґрунтована внаслідок суттєвої різниці між ними в складності технічної реалізації, рівнях метрологічної точності функціонування і умовах застосування згідно поставлених завдань при вимірюванні якісних характеристик природного газу.

З проведеного аналізу слід відмітити необхідність впровадження і дотримання сучасної української нормативної бази в сфері якості природного газу, яка повинна бути гармонізованою з європейськими нормами, з метою

досягнення сучасних вимог щодо забезпечення якісних характеристик природного газу, а також збільшення при цьому точності їх визначення для покращення обліку природного газу.

На підставі аналізу методів і засобів для вимірювання теплоти згоряння природного газу можна сформулювати такі завдання, які необхідно вирішити в дисертаційній роботі:

1) провести аналіз сучасних методів і засобів вимірювання теплоти згоряння природного газу та обґрунтувати напрямки реалізації при проведенні вимірювання і експрес-контролю теплоти згоряння природного газу;

2) дослідити наявність та характер взаємозв'язків між теплотою згоряння природного газу і його температурою спалювання з врахуванням теплофізичних властивостей газу;

3) розробити теоретичні засади функціонування засобу вимірювання теплоти згоряння природного газу із застосуванням торцевим звужувальних пристроїв;

4) розробити, виготовити та здійснити дослідне перевіряння на базі лабораторного стенда експериментального зразка пристрою для вимірювання теплоти згоряння природного газу і провести апробацію можливостей його практичного застосування;

5) здійснити метрологічний аналіз методу вимірювання теплоти згоряння природного газу із застосуванням торцевих звужувальних пристроїв.

РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОТИ ЗГОРЯННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

Розглянуті фізичні процеси, які спостерігаються при спалюванні природного газу. Використовуючи довідкові матеріальні і стехеометричні формули встановлено, що різні складові компоненти природного газу мають різну теплоту згоряння, а також при цьому характеризуються різною температурою згоряння. Відомі практичні дані, якими користувались щодо необхідності певного об'єму повітря для згоряння одиниці об'єму природного газу, є наближеними і впливають головним чином на ефективність спалювання газу. В роботі досліджено, що немає довідкових даних які б одночасно характеризували не тільки теплоту згоряння природного газу але і температуру згоряння окремих його компонентів. Очевидно, що температура спалювання газу буде різною внаслідок різного співвідношення вуглеводневих і не вуглеводневих компонентів в ньому. Також встановлено що температура спалювання залежить від співвідношення окислювача і вуглеводневих компонентів. Зокрема більша кількість повітря, в якому міститься кисень, відносно одиниці об'єму природного газу сприяє до підвищення температури згоряння. Крім того на температуру згоряння впливає наявність водяної пари, яка може бути у складі природного газу, а також яка може приймати участь у складі повітря навколишнього середовища, яке бере участь у процесі горіння. Виходячи із цих основних фізичних процесів нами запропонований алгоритм вимірювання теплоти згоряння природного газу з використанням температури спалювання, як інформативного параметру.

Досліджено вплив теплофізичних параметрів природного газу на визначення теплоти згоряння природного газу, а також досліджено взаємозв'язки вимірювальних і розрахункових параметрів торцевих звужувальних пристроїв із вимірюванням теплоти згоряння природного газу. Здійснено моделювання алгоритму визначення коефіцієнта стисливості

біогазу при визначенні його витрати через противне сопло, що необхідно при вимірюванні теплоти згоряння біогазу.

2.1 Аналіз теоретичних засад вимірювання теплоти згоряння природного газу за його температурою спалювання

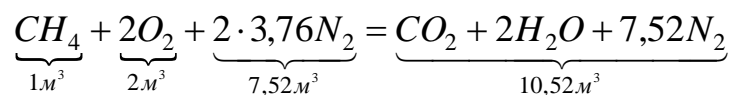
Горіння палива – це процес швидкого окислення його горючих компонентів киснем, що протікає з інтенсивним виділенням тепла [77]. Реакція горіння будь-якого вуглеводню в кисні виражається рівнянням:



Наприклад, реакція горіння метану має вигляд $CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$.

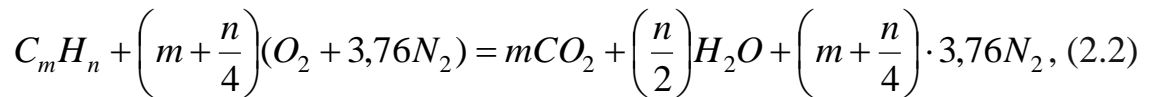
Рівняння (2.1) описує якісну і кількісну сторони реакції до її початку і після завершення. Об'єм 1 кмоля будь-якого газу при нормальних умовах приблизно однаковий ($22,4 \text{ м}^3$), тому рівняння горіння метану можна записати у вигляді $1 \text{ м}^3 CH_4 + 2 \text{ м}^3 O_2 = 1 \text{ м}^3 CO_2 + 2 \text{ м}^3 H_2O$.

Таким чином, для повного згоряння 1 м^3 метану теоретично необхідно витратити 2 м^3 кисню, причому в результаті реакції виходить 1 м^3 вуглекислого газу і 2 м^3 водяної пари. Практично необхідний для горіння газу кисень подається в складі повітря, що складається за обсягом з 21% кисню і 79% азоту (останній в горінні не бере). Отже, на 1 м^3 кисню доводиться $79/21 = 3,76 \text{ м}^3$ азоту. З огляду на це реакція горіння метану в повітрі в ідеальних умовах виражається співвідношенням:



Визначені в подібних реакцій горіння кількісні співвідношення між реагентами називаються стехеометричними. Зокрема, з них випливає, що теоретично для згоряння 1 м^3 метану необхідно $9,52 \text{ м}^3$ повітря.

Реакція горіння будь-якого вуглеводню в повітрі виражається рівнянням:



Характеристики горіння деяких простих газів при теоретично необхідній витраті повітря наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Характеристики горіння простих газів при $\alpha=1$

Газ	Рівняння горіння	Витрата, м ³ /м ³		Об'єм продуктів згорання, м ³ /м ³			
Кисень	$H_2 + 0,5O_2 = H_2O$	0,5	2,38	–	1,0	1,88	2,88
Диоксид вуглецю	$CO + 0,5O_2 = CO_2$	0,5	2,38	1,0	–	1,88	2,88
Метан	$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$	2,0	9,52	1,0	2,0	7,52	10,52
Етан	$C_2H_6 + 3,5O_2 = 2CO_2 + 3H_2O$	3,5	16,66	2,0	3,0	13,16	18,16
Пропан	$C_3H_8 + 5O_2 = 3CO_2 + 4H_2O$	5,0	23,80	3,0	4,0	18,80	25,80
Бутан	$C_4H_{10} + 6,5O_2 = 4CO_2 + 5H_2O$	6,5	30,94	4,0	5,0	24,44	33,44
Пентан	$C_5H_{12} + 8O_2 = 5CO_2 + 6H_2O$	8,0	38,08	5,0	6,0	30,08	41,08
Ацетилен	$C_2H_2 + 2,5O_2 = 2CO_2 + H_2O$	2,5	11,90	2,0	1,0	9,40	12,40
Сірководень	$C_2S + 1,5O_2 = SO_2 + H_2O$	1,5	7,14	1,0 (SO ₂)	1,0	5,64	7,64

Використовуючи її дані, теоретично необхідний об'єм сухого повітря для згорання суміші газів можна визначити за рівнянням:

$$V_T = \left(\frac{1}{21} \left(0,5H_2 + 0,5CO + 2CH_4 + 3,5C_2H_6 + 5C_3H_8 + \right. \right. \\ \left. \left. + 6,5C_4H_{10} + C_5H_{12} + 1,5H_2S - O_2 \right) \right) \quad (2.3)$$

Для газів з теплотою згорання більш 7000-8000 ккал/м³ теоретичний об'єм повітря для спалювання:

$$V_T \approx 1,13Q_H/1000. \quad (2.4)$$

де Q_H – нижча теплота згорання за стандартних умов.

Дійсна об'єм повітря для спалювання газу:

$$V_d = \alpha V_T \quad (2.5)$$

де α – коефіцієнт витрати повітря, що визначає відношення дійсного об'єму повітря до теоретично необхідного.

Залежно від умов сумішоутворення і методу спалювання газу α приймають 1,02–1,20.

Об'єм продуктів повного згоряння газового палива при спалюванні його з надлишком повітря визначається за такими формулами, м³/м³:

– Об'єм диоксида вуглецю:

$$V_{CO_2} = 0,01(CO_2 + CO + CH_4 + 2C_2H_6 + 3C_3H_8 + 4C_4H_{10} + 5C_5H_{12}) \quad (2.6)$$

– об'єм водяної пари з урахуванням вологи газу d , г/м³, і вмісту в повітрі 1% вологи за масою, (0,016 м³ на 1 м³ сухого повітря):

$$V_{H_2O} = 0,01(H_2 + 2CH_4 + 3C_2H_6 + 4C_3H_8 + 5C_4H_{10} + 6C_5H_{12} + 0,124d + 1,6V_T\alpha) \quad (2.7)$$

– об'єм азоту:

$$V_{N_2} = 0,79\alpha V_T + 0,01N_2 \quad (2.8)$$

– об'єм кисню:

$$V_{O_2} = 0,21(\alpha - 1)V_T \quad (2.9)$$

– сумарний об'єм вологих продуктів згоряння становить:

$$V_{в.п.з.} = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{O_2} \quad (2.10)$$

Основна кількість тепла, що виділяється при згорянні палива, витрачається на нагрів продуктів горіння до певної температури. Розрізняють такі температури горіння газів: жаропродуктивність, калориметричну, теоретичну і дійсну.

Жаропродуктивністю $t_{жс}$ називають температуру продуктів повного згоряння пального газу в адіабатичних умовах з коефіцієнтом надлишку повітря $\alpha=1,0$ при початковій температурі газу і повітря $t=0^\circ\text{C}$.

$$t_{жс} = \frac{Q_H}{\sum V c_p} = \frac{Q_H}{V_{CO_2} c_{pCO_2} + V_{H_2O} c_{pH_2O} + V_{N_2} c_{pN_2}} \quad (2.11)$$

де Q_n – нижча теплота згоряння газу, ккал/м³; V_{CO_2} , V_{H_2O} , V_{N_2} – об'єми складових частин продуктів згоряння 1 м³ газу, м³/м³; c_{pCO_2} , c_{pH_2O} , c_{pN_2} – середні теплоємності при постійному тиску складових частин продуктів згоряння в межах від 0 до $t_{ж}$, °С, ккал/(м³·°С).

У формулі (2.11) застосовують середню теплоємність, так як теплоємність – величина непостійна, збільшується з підвищенням температури. Тому при визначенні $t_{ж}$ попередньо задається величиною теплоємності, відповідної очікуваної жаропродуктивності. Потім визначають обсяги компонентів продуктів згоряння, задаються їх середніми теплоємності (табл. 2.2) і підраховують жаропродуктивність. Якщо вона відрізняється від раніше прийнятої, задаються іншою жаропродуктивністю і розрахунок повторюють.

Таблиця 2.2 – Середня об'ємна теплоємність газів при постійному тиску від 0 до t °С, ккал/(м³·°С)

t , °С	CO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂	Повітря	СО
0	0,3821	0,3569	0,3090	0,3119	0,3098	0,3103
200	0,4269	0,3636	0,3104	0,3189	0,3122	0,3122
400	0,4609	0,3739	0,3144	0,3290	0,3174	0,3174
600	0,4875	0,3857	0,3201	0,3384	0,3240	0,3242
800	0,5090	0,3984	0,3265	0,3463	0,3306	0,3311
1000	0,5263	0,4115	0,3324	0,3529	0,3367	0,3374
1200	0,5407	0,4244	0,3378	0,3584	0,3422	0,3430
1400	0,5526	0,4366	0,3427	0,3631	0,3470	0,3479
1600	0,5626	0,4481	0,3470	0,3673	0,3513	0,3522
1800	0,5712	0,4589	0,3508	0,3712	0,3551	0,3559
2000	0,5785	0,4688	0,3541	0,3748	0,3585	0,3592
2200	0,5848	0,4779	0,3521	0,3781	0,3615	0,3621
2400	0,5902	0,4864	0,3598	0,3813	0,3643	0,3647

У табл. 2.3 приведена жаропродуктивність деяких газів при їх горінні в сухому повітрі. При згорянні газів в атмосферному повітрі, що містить близько 1% вологи (по масі), жаропродуктивність знижується на 25-30° С.

Таблиця 2.3 – Температури займання, жаропродуктивність і межі займистості деяких газів в суміші з повітрям при атмосферному тиску і $\alpha=1$

Газ	Мінімальна вимірювана температура займання, °С	Межі займистості, % по об'єму газу в суміші при 20 °С та 760 мм.рт.ст.		Жаропродуктивність
		верхня	нижня	
Водень	510	4,0	75,0	2235
Диоксид вуглецю	610	12,5	75,0	2370
Метан	645	5,0	15,0	2043
Етан	530	3,0	14,0	2097
Пропан	510	2,0	9,5	2110
Бутан	490	1,5	8,5	2118
Ацетилен	305	2,3	8,2	2620
Природний	530	4,5	17,0	2040
Коксовий	640	5,0	31,0	2120
Доменний	680	40,0	70,0	1500
Сланцевий	700	7,0	35,0	1900

Примітка. Жаропродуктивність вказана без урахування змісту вологи в повітрі.

Калориметрична температура горіння газів t_k на відміну від жаропродуктивності враховує коефіцієнт надлишку повітря і фізичне тепло палива і повітря.

$$t_k = \frac{Q_n + q_{физ}}{\sum V c_p} = \frac{Q_n + V_B c_{pB} t_B + c_{pГ} t_{Г}}{V_{CO_2} c_{pCO_2} + V_{H_2O} c_{pH_2O} + V_{N_2} c_{pN_2} + V_{O_2} c_{pO_2}} \quad (2.12)$$

де $q_{физ}$ – фізичне тепло газу і повітря, ккал/м³; $V_в$, $c_{pв}$, $t_в$ – відповідно кількість, м³/м³, середня теплоємність, ккал/(м³·°C), і температура повітря, °C; $c_{pг}$, $t_г$ – середня теплоємність, ккал/(м³·°C), і температура газу, °C; V_{CO_2} , V_{H_2O} , V_{N_2} , V_{O_2} – відповідно кількість CO₂, H₂O, N₂ і O₂, що утворюються при згорянні 1 м³ газу з розрахунковим надлишком повітря, м³/м³; c_{pCO_2} , c_{pH_2O} , c_{pN_2} , c_{pO_2} – середні теплоємності при постійному тиску CO₂, H₂O, N₂ і O₂ в межах від 0 до $t_к$ C, ккал/(м³·°C).

Фізичне тепло газу і повітря слід враховувати, якщо вони перед спалюванням нагріті вище 100°C, так як при менших температурах величина $q_{физ}$ незначна в порівнянні з Q_n .

Теоретична температура горіння t_T враховує втрати тепла при ендотермічних реакціях дисоціації продуктів згорання.

$$t_T = \frac{(Q_n + q_{физ} - q_d)}{(\sum V \cdot c_p)} \quad (2.13)$$

де q_d – втрата тепла на дисоціацію CO₂ і H₂O і синтез NO₂, ккал/м³; V і c_p – об'єми і теплоємності продуктів згорання з урахуванням дисоціації на 1 м³ газу.

Жаропродуктивність, калориметрична і теоретична температури горіння є теоретичними величинами, які не досягаються в реальних умовах спалювання газу, і служать для співставлення гранично можливих температур горіння різних газів.

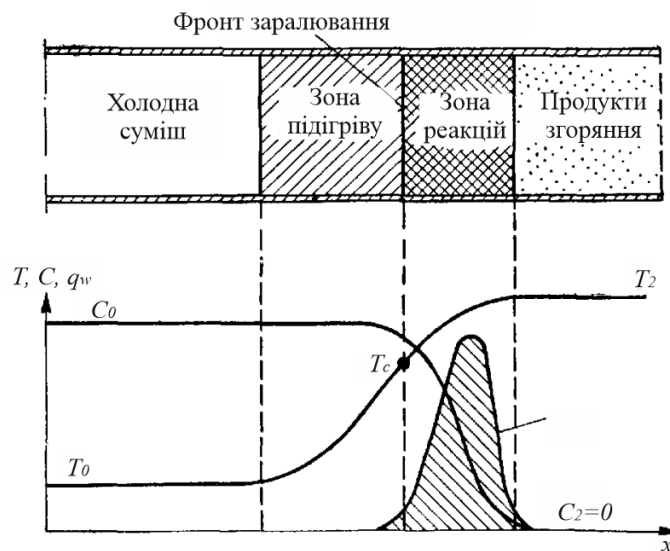
Дійсна температура горіння газового палива $t_д$, що досягається в реальних умовах його спалювання, значно нижче калориметричної і теоретичної температур, так як при її визначенні враховуються тепловтрати в навколишнє середовище, тривалість процесу горіння, метод спалювання газу і інші фактори.

$$t_д = \eta_{нir} t_к \quad (2.14)$$

де η_{nir} – емпіричний пірометричний коефіцієнт; t_k – калориметрична температура. Для більшості топок котлів і печей η_{nir} знаходиться в межах 0,65-0,75 і лише для найбільш досконалих з них $\eta_{nir}=0,8\div 0,85$.

Температура горіння в значній мірі залежить від коефіцієнта надлишку повітря, що помітно знижується зі збільшенням або зменшенням α щодо стехеометричного складу. При $\alpha \geq 1,0$ підвищення температури горіння може бути досягнуто поліпшенням якості змішування газу з повітрям, зменшенням тепловтрат печі і попереднім нагріванням повітря і газу.

При спалюванні газоповітряної суміші зона горіння поширюється за об'ємом суміші з певною швидкістю, так званої швидкістю поширення полум'я. Визначення її величини при різних умовах горіння проводиться експериментально з урахуванням складу суміші, температури, тиску, режиму руху, методів спалювання та ряду інших факторів. Найбільш часто для порівняльної оцінки швидкості поширення полум'я застосовують два методи – статичний і динамічний [77].



T – температура; C – концентрація пального; q_w – тепловиділення

Рисунок 2.1 – Схема поширення полум'я в трубці

При статичному методі швидкість поширення полум'я визначається вимірюванням швидкості переміщення фронту полум'я по газоповітряній суміші, укладеної в трубку з тугоплавкого скла. Якщо лівий кінець трубки

заглушений, то при підпалюванні газоповітряної суміші з відкритого правого кінця можна спостерігати за переміщенням полум'я в трубці. При цьому уздовж осі трубки справа наліво рухаються послідовно: зона підігріву суміші, фронт займання і зона реакцій горіння, залишаючи за собою продукти згоряння. По кривих рис. 2.1 видно, що в зоні підігріву за рахунок теплопровідності від фронту горіння суміш нагрівається від початкової температури T_0 до температури самозаймання T_c , потім запалюється, при цьому за рахунок інтенсивної реакції в зоні горіння температура зростає до максимального значення T_2 . Процес горіння супроводжується різким зниженням концентрації горючого газу в суміші від значення C_0 до нуля. Зменшення концентрації горючого газу в зоні горіння відповідає інтенсивне зростання тепловиділень, показаний кривою q_w .

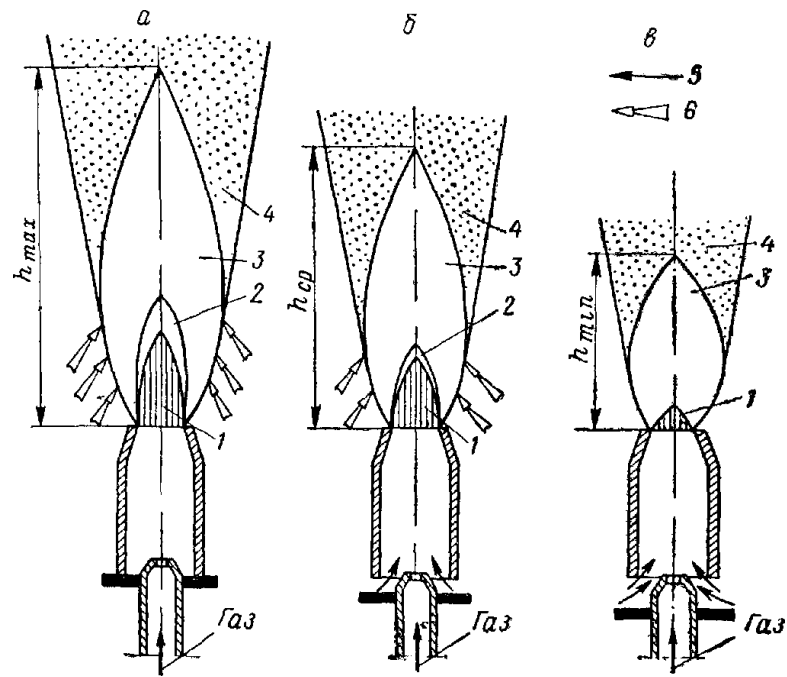
Горіння газу складається з сумішоутворення, підігріву газоповітряної суміші до температури спалаху і стадії хімічної реакції горіння:

$$\tau_{гор} = \tau_{см} + \tau_{нід} + \tau_{хім} = \tau_{фіз} + \tau_{хім} \quad (2.15)$$

де $\tau_{гор}$ – загальна тривалість процесу горіння; $\tau_{см}$ – тривалість сумішоутворення; $\tau_{нід}$ – тривалість підігріву суміші до температури займання; $\tau_{хім}$ – тривалість хімічної реакції горіння; $\tau_{фіз}$ – тривалість фізичної стадії підготовки горіння.

Оскільки підігрів і хімічна реакція горіння суміші протікають дуже швидко, основним фактором, що лімітує тривалість процесу горіння, є час, що витрачається на перемішування газу і повітря. Від швидкості і якості перемішування газу з необхідною кількістю повітря в пальнику певної конструкції залежать швидкість і повнота згоряння газу, довжина і температура полум'я.

Залежно від місця і способу сумішоутворення методи спалювання газу умовно поділяють на дифузний, кінетичний і змішаний [77]. Схематично ці методи представлені на прикладі інжекційного пальника (рис. 2.2).



а - дифузійне; б - змішане; в - кінетичне

1 – внутрішній конус; 2 – зона первинного горіння; 3 – зона основного горіння; 4 – продукти згоряння; 5 – первинний; 6 – вторинний повітря;

Рисунок 2.2 – Схема будови газового полум'я

При дифузійному методі спалювання (рис. 2.2, а) до місця горіння з горілки надходить тільки газ ($\alpha_T=0$), а все необхідне для його горіння повітря надходить із зовнішнього середовища за рахунок молекулярної, а при великій швидкості витікання газу і за рахунок турбулентної дифузії. В цьому випадку до струменя холодного газу 1 від периферії дифундує повітря, а з струменя газу до периферії – газ. В результаті поблизу струменя газу створюється газоповітряна суміш горючої концентрації, горіння якої утворює зону первинного горіння газу 2.

У зоні 3 відбувається горіння основної частини газу, в зоні 4 рухаються продукти згоряння. Взаємна дифузія газу і повітря, ускладнюється виділенням продуктів згоряння, протікає повільно, з утворенням внаслідок термічного розкладання вуглеводнів сажових частинок. Тому характерними особливостями дифузійного методу спалювання є світність і значна довжина полум'я.

До переваг такого методу спалювання можна віднести: високу стійкість полум'я в широкому діапазоні зміни теплових навантажень, неможливість проскоку, відносну рівномірність температури по довжині полум'я. Недоліками цього методу є: низька інтенсивність горіння, неминучість термічного розпаду вуглеводнів, потреба у великих топкових обсягах, що забезпечують розвиток полум'я без дотику з теплообмінними поверхнями, ймовірність хімічного недопалу навіть при значному коефіцієнті витрати повітря.

При кінетичному методі спалювання (рис. 2.2, в) до місця горіння подається заздалегідь підготовлена всередині пальника однорідна суміш газу з кількістю первинного повітря, кілька перевищує теоретично необхідне ($\alpha_2=1,02\div 1,05$). Згорання такої суміші відбувається швидко, в короткому прозорому факелі, без видимого утворення продуктів термічного розпаду вуглеводнів.

Перевагами цього методу спалювання є висока теплопродуктивність, мала ймовірність хімічного недопалу і невелика довжина полум'я, а недоліком – необхідність стабілізації полум'я.

При змішаному методі спалювання (рис. 2.2, б) частина повітря у вигляді первинного підмішується до газу за рахунок інжекції в самій пальнику ($0 < \alpha_2 < 1$), а решта повітря, необхідне для завершення повного згорання газу, як вторинного дифундує в зону горіння із зовнішнього середовища. Факел виходить більш коротким і менш світиться, ніж при дифузійному горінні. Світиться оболонка зони первинного горіння газу 2 при кількості первинного повітря більше 40-50% від теоретично необхідного стає вельми тонкої, чим і пояснюється невелика світність факела в цьому випадку. Інжекційні пальники, що спалюють газ за змішаним методом, часто називають пальниками неповного або часткового попереднього змішування. Окремий випадок змішаного методу має місце при незавершеності перемішування газу з повною кількістю повітря в пальнику. Продовження сумішоутворення в обсязі факела

після виходу суміші з пальника збільшує його довжину в порівнянні з довжиною факела при кінетичному спалюванні.

Газовими пальниками називаються пристрої, призначені для утворення горючих газоповітряних сумішей і стійкого їх спалювання при необхідних теплових потужностях. Відповідно до [115] газові пальники класифікуються за способом подачі повітря на горіння, номінальному тиску газу і повітря, теплоті згорання газу, тепловою потужністю, довжині факела і методу стабілізації факела. За способом подачі повітря розрізняють пальники:

- з подачею до них повітря з навколишнього середовища за рахунок розрідження або конвекції;
- пальники, що забезпечують сумішоутворення за рахунок інжекції повітря газом або газу повітрям;
- з примусовою подачею повітря, в тому числі без попереднього змішування його з газом і з попереднім змішуванням.

По номінальному тиску газу розрізняють пальники низького (до 500 кгс/м²), середнього (понад 500 до 10000 кгс/м²) і високого (понад 10000 кгс/м²) тиску. Відповідно номінальний тиск повітря, що подається в пальник, підрозділяють на низьке (до 100 кгс/м²), середнє (понад 100 до 300 кгс/м²) і висока (понад 300 кгс/м²). Основними показниками пальника є: номінальна теплова потужність, відповідні їй номінальні тиски газу і повітря і межі регулювання пальника по тепловій потужності. Додатково пальник характеризують номінальна довжина факела (щодо калібру вихідного отвору), питома металоємність, тиск (розрідження) в камері згорання і шумові якості.

Подовий пальник низького тиску являє собою заглушений з одного торця трубу з двома рядами отворів, розташованих під 90° один до одного. Труба поміщена в щілину, утворену вогнетривкою цеглою. Виходить з отворів газ переміщується з повітрям, що поступає в щілину за рахунок розрідження в топці. Прийнятий крок між отворами забезпечує достатній приплив повітря до смолоскипів і переміщення полум'я від одного отвору до іншого. Розпалюються стінки щілини надійно стабілізують процес горіння, а для

спрямованого надходження повітря в щілину бічної частини колосникових ґрат перекриті цеглою.

Розроблена серія подових пальників на номінальні витрати природного газу від 5 до 75 м³/год стійко працює при тиску газу від 20 до 200 кгс/м², при розрідженні в топці 1,5-2 кгс/м² і коефіцієнті витрати повітря $\alpha=1,25\div 1,35$. Незважаючи на великий коефіцієнт витрати повітря, подові пальники завдяки простоті конструкції, стійкості й безшумної в роботі часто застосовують в котлах, сушилках і інших теплових агрегатах з невеликими тепловими потужностями і великими топковим обсягами. Подові пальники можуть працювати і з примусовою подачею повітря, і на середньому тиску газу. У цих випадках α зменшується до 1,15.

В інжекційних багатофакельних пальниках низького тиску струмів газу, що випливає з великою швидкістю з сопла, засмоктує в пальник 40-60% повітря, необхідного для повного згорання газу. У змішувачі, що складається з конфузора, горла і дифузора, здійснюються змішування газу з повітрям і вирівнювання поля швидкостей суміші по перетину пальника. При цьому в дифузори не тільки завершується сумішоутворення, але і здійснюється перетворення кінетичної енергії в статичний напір, необхідний для подолання опорів на виході суміші з отворів горілчаного насадка. Надходження первинного повітря регулюється повітряної шайбою. Від згорання суміші відбувається в факелах синьо-фіолетового кольору, що розміщуються один від одного на відстанях, що забезпечують надходження до них вторинного повітря з топки і взаємне підпалювання суміші.

Представлені пальника ГКС виготовляють звареними на номінальні витрати природного газу від 4,7 до 6,1 м³/год. Вони працюють досить стійко при тисках газу від 10 до 180 кгс/м² і знаходять застосування в невеликих чавунних секційних котлах та інших установках з топкою висотою не менше 600 мм.

В інжекційних однофакельних пальниках для газу середнього тиску з $Q_n \geq 8500$ ккал/м³ за рахунок великої енергії, що витікає з сопла газу,

підсмоктується в якості первинного все повітря, необхідне для повного згоряння газу при тиску в топці до 2 кгс/м^2 . Стабілізація процесу горіння забезпечується зазвичай застосуванням вогнетривких тунелів. Для роботи на природному газі ($Q_n=8500 \text{ м}^3/\text{год}$) без підігріву повітря розроблено 20 типорозмірів таких пальників на номінальні витрати від $0,7$ до $180 \text{ м}^3/\text{год}$ при номінальному тиску газу 5000 кгс/м^2 . Завдяки відсутності примусової подачі повітря і забезпечення повноти згоряння при малих надлишках повітря пальника знайшли широке застосування в нагрівальних та термічних печах чорної металургії, а також в інших агрегатах, які працюють на холодній газоповітряній суміші.

Пальники типу ГГВ з примусовою подачею повітря призначені для спалювання природного газу низького і середнього тиску в котлах, печах, сушках і інших теплових установках з невеликим об'ємом топок. Газ, що подається в газорозподільний колектор, виходить з нього через радіально розташовані отвори і переміщується з потоком примусово подається, закрученим напрямними лопатками завихрювача.

Добре перемішана газоповітряна суміш згорає в прозорому факелі порівняно невеликої довжини. Стабілізація горіння забезпечується вогнетривким тунелем. Номінальні витрати газу – $50-500 \text{ м}^3/\text{год}$, номінальні тиски – 130 (низька) і 3000 (середнє) кгс/м^2 , номінальний тиск повітря незалежно від тиску газу – 100 кгс/м^2 . Повне згоряння газу відбувається при α до $1,05$.

Вітростійкі пальники інфрачервоного випромінювання ГПВ-1 і ГПВ-2 – одні з різновидів радіаційних пальників. Газ низького тиску через сопло надходить в змішувач, підсмоктує все повітря, необхідне для його згоряння. З змішувача газоповітряна суміш виходить в розподільну камеру, перекриту керамічними перфорованими плитками. Розмір кожної плитки $65 \times 45 \times 12 \text{ мм}$, діаметр отворів в них 1 мм . Газоповітряна суміш надходить в канали керамічної насадки і, згораючи в них, нагріває поверхню насадки до $800 - 940 \text{ }^\circ\text{C}$. Нагріта до вишнево-червоного кольору, поверхня насадки $40 - 60\%$

тепла, отриманого при згорянні газу, виділяє випромінюванням. Для вітростійкості на передній частині рефлектора є щілиноподібні прорізи, вирівнюють тиск всередині і зовні пальника. Малі діаметри отворів керамічних плиток виключають проскакування полум'я усередину пальника, а висока температура насадки практично виключає хімічний недопал.

З врахуванням вказаних вище теоретичних засад згоряння газу можна сформулювати наступний алгоритм функціонування пристрою визначення теплоти згоряння природного газу.

При функціонуванні пристрою визначають теплоту згоряння H_c природного газу за стандартних умов за формулою [78]:

$$H_c = \frac{(A \cdot T - B \cdot K_i \cdot \varphi \cdot q_c \cdot \tau)}{q_c \cdot \tau}, \quad (2.16)$$

де A – коефіцієнт конструктивного виконання пальника; T – температура полум'я пальника; B – коефіцієнт теплоти випаровування води повітря; K_i – коефіцієнт інжекції інжекторного пристрою пальника; φ – відносна вологість повітря навколишнього середовища; q_c – об'ємна витрата газу через торцевий звужувальний пристрій за стандартних умов; τ – тривалість пропуску об'єму газу через пальник.

Значення коефіцієнта конструктивного виконання пальника A визначають під час попереднього калібрування пристрою експрес-визначення теплоти згоряння щонайменше на трьох сумішах природного газу відомої теплоти згоряння як функцію від робочих параметрів згоряння природного газу.

Оскільки при спалюванні газу згідно алгоритму (3.1) необхідне достатньо точно визначення його витрати, то одним із напрямків практичної реалізації може бути застосування первинних перетворювачів з використанням торцевих звужувальних пристроїв.

При цьому об'єм природного газу, що проходить через торцевий звужувальний пристрій, розраховується за формулою:

$$q_c = 5,9736 \cdot 10^{-2} \alpha \varepsilon d^2 K_\varphi \sqrt{\frac{P \Delta p}{\rho_c T K}}, \quad (2.17)$$

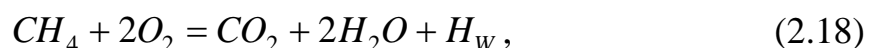
де q_c – об'ємна витрата газу через звужувальний пристрій, м³/с; α – коефіцієнт витрати звужувального пристрою; ε – поправний множник на розширення газу; d – діаметр отвору звужувального пристрою пальника; Δp – перепад тиску на звужувальному пристрої; ρ_c – густина природного газу за стандартних умов; K_φ – коефіцієнт, який враховує вологість природного газу; P , T , K – абсолютний тиск, абсолютна температура і коефіцієнт стисливості природного газу за умов звужувального пристрою відповідно.

Коефіцієнт витрати α звужувального пристрою визначається експериментальним шляхом при його індивідуальному градуюванні за допомогою еталонного обладнання, наприклад, дзвонової еталонної установки [11].

2.2 Моделювання впливу вологи на визначення теплоти згоряння природного газу

З аналізу формули (2.16) очевидним є вплив другої частини формули, тобто вологості навколишнього середовища (повітря), на результати визначення теплоти згоряння природного газу. Тому проаналізуємо вплив цього фактору на вимірювальний процес.

Основним компонентом природного газу є метан, об'ємний вміст якого в середньостатистичному газі є рівним 93% [1], процес згоряння природного газу можна описати наступним відомим алгоритмом:



де H_w – вища теплота згоряння метану, яка за умови спалювання його 1 кг дорівнює 55,6 МДж [5].

З формули (2.18) видно, що крім діоксиду вуглецю CO_2 продуктом згоряння газу є також вода H_2O , яка під час горіння випаровується і поглинає

при цьому частину енергії згоряння газу. Тому в результаті згоряння газу при визначенні ефективності спалюваного природного газу розраховують калорійність газу, яка називається нижчою теплотою згоряння H_N і враховує зменшення його енергії, яка затрачається на випаровування води, що знаходиться в продуктах згоряння газу.

На згоряння природного газу також впливає волога, яка безпосередньо міститься в природному газі і поступає разом з ним у пальник, а також волога, яка знаходиться в навколишньому повітрі і також поступає до пальника через інжекційний пристрій забору зовнішнього повітря. Тому в реальних умовах використання природного газу нижчу фактичну теплоту H_{NF} його згоряння можна розрахувати за формулою:

$$H_{NF} = H_N - H_R - H_\varphi, \quad (2.19)$$

де H_N – нижча теплота згоряння, яка розраховується при хроматографічному аналізі сухого газу, наприклад, за методикою [16]; H_R – енергія, яка витрачається на випаровування вологи, що міститься в природному газі; H_φ – енергія, яка витрачається на випаровування вологи, що міститься в навколишньому повітрі, яке приймає участь у згорянні газу.

Енергію H_R від вологи природного газу при умові його згоряння при стандартних умовах (абсолютний тиск 101325 Па, температура 20 °С) можна розрахувати за формулою:

$$H_R = c_W \cdot m_1 \cdot (T_{TO} - T_S) + r \cdot m_1 + c_P \cdot m_1 \cdot (T_P - T_{TO}), \quad (2.20)$$

де c_W, c_P – питома теплоємність води і водяної пари відповідно; m_1 – маса води в газі; T_{TO}, T_P, T_S – температура пароутворення води, температура полум'я і нормоване значення температури за стандартних умов (20 °С) відповідно; r – питома теплота пароутворення води.

Вологість природного газу найчастіше оцінюють за температурою точки роси [22]. Тому для моделювання впливу вологості природного газу на його згоряння прийнято межі зміни температури точки роси газу в межах від -20 °С до 5 °С. Використовуючи відомі алгоритми і номограми [11] цей діапазон

можна виразити в одиницях абсолютної вологості природного газу ($8 \cdot 10^{-4} \dots 65 \cdot 10^{-4}$) кг/м³.

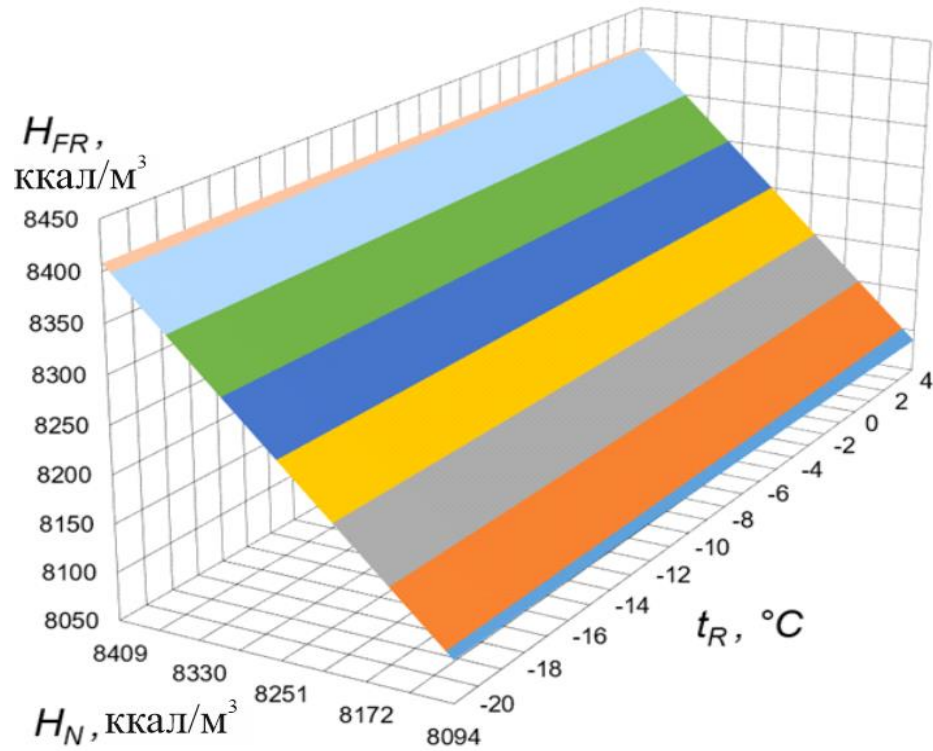
В процесі функціонування пристрою для визначення теплоти згоряння зміна компонентного складу природного газу буде впливати на результати вимірювання. Тому для розрахункового визначення меж діапазону зміни теплоти згоряння газу здійснене математичне моделювання компонентного складу природного газу, яке описане в [80]. За основу при моделюванні умовно вибраний такий склад газу, який містить за об'ємом 93 % метану, 3,3 % етану, 1,8 % пропану, 1,5 % азоту та 0,4 % вуглекислого газу. В процесі моделювання змінювався вміст метану в діапазоні (89 ... 97) %, етану (0 ... 6,6) %, пропану (0 ... 3) %, азоту (0 ... 3) %, вуглекислого газу (0 ... 0,8) %. При зміні вмісту кожного з компонентів вміст решти складових пропорційно збільшувався або зменшувався для досягнення суми 100 % [53].

З аналізу формули (2.18) можна зробити висновок, що для повного згоряння 1 м³ природного газу необхідно 2 м³ кисню. Враховуючи, що в навколишньому середовищі об'ємна доля кисню складає 21 %, то для спалювання 1 м³ природного газу необхідний об'єм повітря буде становити $2/0,21 = 9,52$ м³. Тому формулу для визначення H_ϕ можна записати у вигляді:

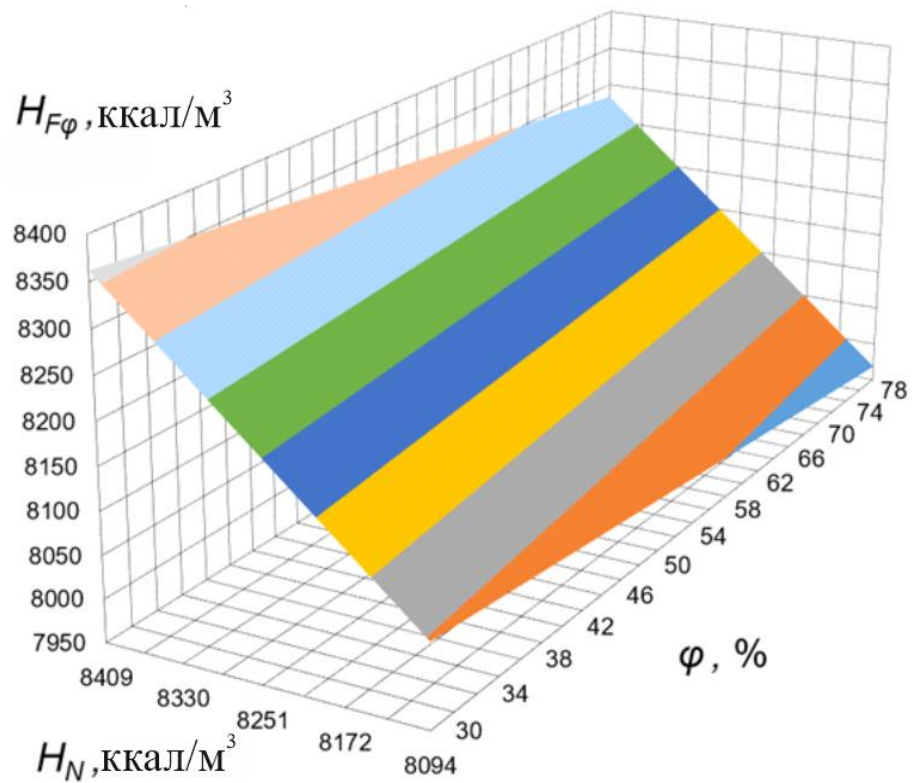
$$H_\phi = 9.52 \cdot c_w \cdot m_2 \cdot (T_{TO} - T_S) + 9.52 \cdot r \cdot m_2 + 9.52 \cdot c_p \cdot m_2 \cdot (T_P - T_{TO}), \quad (2.21)$$

де m_2 – маса води в 1 м³ повітря.

Результати моделювання наведено на рис. 2.2. Вони відображають зміну фактичної нижчої теплоти згоряння природного газу H_{FR} з урахуванням зменшення калорійності газу при випаровуванні супутньої вологи природного газу від температури його точки роси (рис. 2.2 а) та теплоти згоряння $H_{F\phi}$ з урахуванням зменшення калорійності газу при випаровуванні вологи навколишнього повітря (рис. 2.2 б). При цьому на кожному графіку діапазон зміни нижчої теплоти згоряння H_N аналітично розрахований для різного складу газу, що описано вище по тексту.



а)



б)

Рисунок 2.2 – Графічна ілюстрація зміни фактичного значення нижчої теплоти згоряння природного газу різного компонентного складу від зміни температури точки роси газу (а) та вологості навколишнього повітря (б)

З рис. 2.2 можна зробити висновок про неоднаковий вплив вологості газу та вологості навколишнього повітря на теплоту згоряння природного газу. Наприклад, для газу з нижчою теплотою згоряння 8409 ккал/м^3 фактична теплота згоряння H_{FR} буде змінюватися від 8408 ккал/м^3 при температурі точки роси $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ до 8402 ккал/м^3 при температурі точки роси $5 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 2.2 а). Вологість навколишнього середовища має більший вплив на теплоту згоряння природного газу і кількісно виражається діапазоном зміни фактичної теплоти згоряння H_{FR} для того ж газу в межах від 8362 ккал/м^3 до 8283 ккал/м^3 при відносній вологості повітря 30% і 80% відповідно (рис. 2.2 б). Також відмітимо, що якісний вплив вологості газу і вологості повітря практично не змінюється при умові зміни компонентного складу природного газу, однак з точки зору метрологічного аналізу потребує додаткових досліджень.

Оскільки для досліджуваних нами процесів відсутні стандартні програми метрологічного аналізу, то здійснимо моделювання похибки для конкретної нашої задачі по аналогії з методичним підходом, який запропонований в [19] і стосується застосування конкретного прикладного алгоритму розрахунку похибки.

Відносні похибки δ від впливу вологи на визначення теплоти згоряння природного газу розрахуємо за алгоритмами:

$$\delta_R = \frac{H_{FR} - H_N}{H_N} \cdot 100\% , \quad (2.21)$$

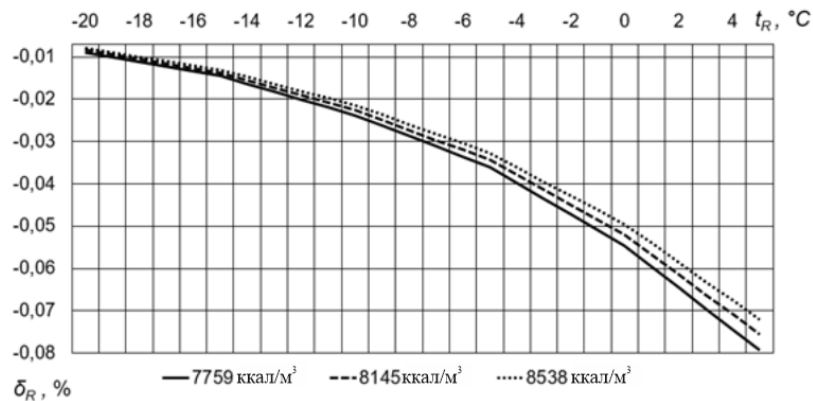
$$\delta_\varphi = \frac{H_{F\varphi} - H_N}{H_N} \cdot 100\% , \quad (2.22)$$

де δ_R – похибка від наявності супутньої вологи у природному газі; δ_φ – похибка від наявності вологи у повітрі, яке приймає участь у згорянні газу.

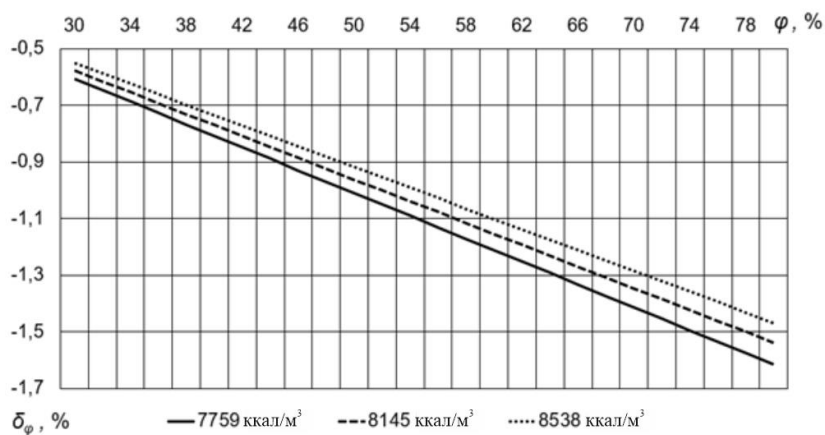
Для реалізації алгоритму (2.21) і (2.22) використані конкретні дані про компонентний склад та нижчу теплоту згоряння реальних проб природних газів [8], які отримані на основі їх хроматографічного аналізу.

Результати математичного моделювання зміни відносної похибки δ_R від температури точки роси природного газу (рис. 2.3 а) та відносної похибки δ_φ

від відносної вологості повітря (рис. 2.3 б) проведені для конкретних проб газів з нижчою теплотою згоряння 7759 ккал/м³, 8145 ккал/м³ та 8538 ккал/м³.



а)



б)

Рисунок 2.3 – Графічна ілюстрація зміни відносної похибки при визначенні нижчої теплоти згоряння природного газу від температури точки роси (а) та від вологості навколишнього повітря (б)

На графіках (рис. 2.3 а,б) спостерігається зростання від'ємної похибки при визначенні теплоти згоряння природного газу за умови зростання його вологості та вологості навколишнього повітря. Очевидною є нелінійна зміна відносної похибки δ_R від температури точки роси газу, яка кількісно характеризується межами зміни відносної похибки від 0.01 % до 0.08 % при зростанні температури точки роси від -20 °C до 5 °C. Однак зміна відносної похибки δ_φ від вологості навколишнього повітря практично є лінійною і свідчить про суттєво більшу кількісну зміну похибки від 0.6 % до 1.6 % при

зростанні відносної вологості повітря від 30 % до 80 %. При цьому для газів із меншою теплотою згоряння вплив зміни вологості є більш вагомим і зростає із збільшенням вологи як природного газу так і повітря. Так при зміні калорійності газу від 7759 ккал/м³ до 8538 ккал/м³ для газу із $t_R = -20$ °С розходження в похибках становить 0,001 %, а при $t_R = 5$ °С воно збільшується до 0,008 %. Кількісне значення діапазону зміни похибки від вологи повітря для вказаного діапазону зміни складу природного газу становить 0,05 % при відносній вологості 30 % і 0,16 % при відносній вологості 80 %.

З метою подання більш повного характеру впливу вологості при визначенні теплоти згоряння природного газу здійснено моделювання зміни похибки δ від одночасного впливу двох складових вологості. Для цього використовувався такий алгоритм визначення похибки [81]:

$$\delta = \frac{H_{R\phi} - H_N}{H_N} \cdot 100\% . \quad (2.23)$$

Значення теплоти згоряння $H_{R\phi}$ розраховувалося матричним методом почерговою зміною температури точки роси газу з дискретністю 1 °С при фіксованих значеннях відносної вологості навколишнього повітря, які змінювалися з дискретністю 2 %.

Моделювання похибки характеризує про близьку до лінійного виду закономірність зростання похибки від вологості повітря і нелінійну закономірність від впливу вологості природного газу. При цьому для досліджуваних діапазонів зміни вологи вплив вологи повітря є набагато суттєвішим (до 1,7 %) порівняно з вологістю природного газу (не перевищує 0,1 %).

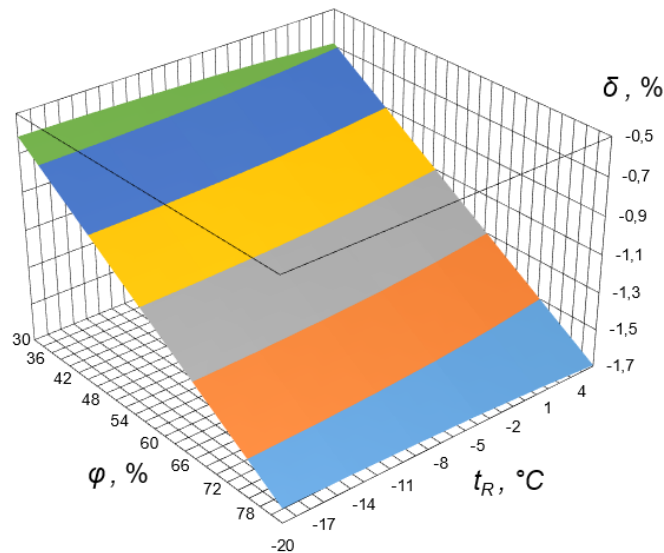


Рисунок 2.4 – Графічна ілюстрація зміни відносної похибки визначення теплоти згоряння природного газу від вмісту вологи в ньому та в навколишньому повітрі для нижчої теплоти згоряння 7759 ккал/м^3

2.3 Дослідження впливу теплофізичних параметрів природного газу на його теплоту згоряння

Метою дослідження є вплив коефіцієнтів теплопровідності і теплоємності природного газу на його теплоту згоряння.

Моделювання [82] здійснювалося для температури газу 20°C за робочого тиску $0,1 \text{ МПа}$. За базові значення при дослідженнях умовно вибраний газ, який за компонентним складом містить за об'ємом 93% метану, $3,3 \%$ етану, $1,8 \%$ пропану, $1,5 \%$ азоту і $0,4 \%$ вуглекислого газу (вузлова точка на рис. 2.5). При моделюванні змінювали вміст метану в діапазоні $(89-97) \%$, етану $(0-6,6) \%$, пропану $(0-3) \%$, азоту $(0-3) \%$ і вуглекислого газу $(0-0,8) \%$. При цьому зміна концентрації кожної із компонент аналітичним методом впливала на вміст інших складових природного газу пропорційним збільшенням або зменшенням до досягнення ними загального об'єму 100% .

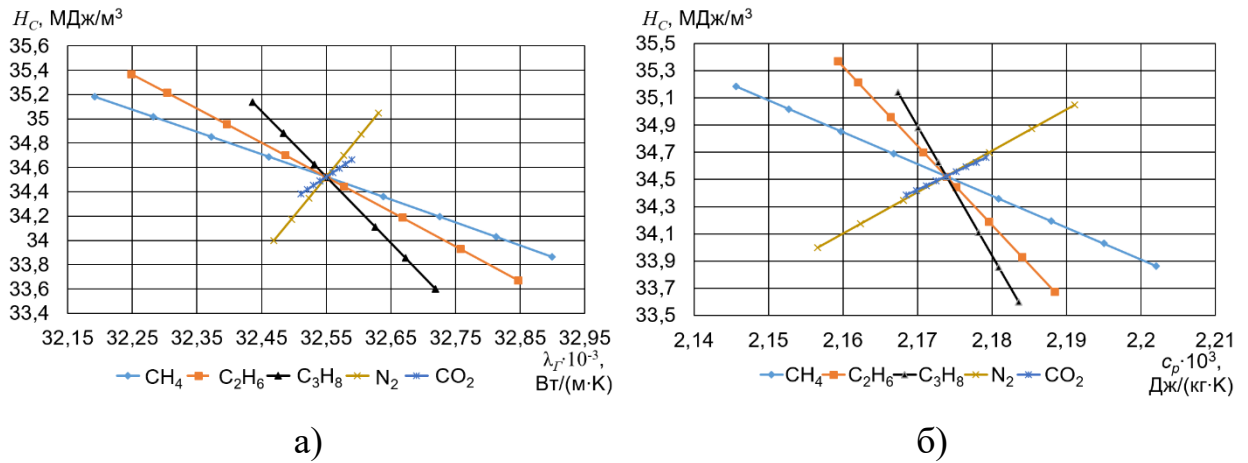


Рисунок 2.5 – Залежність теплоти згоряння природного газу від його теплопровідності а) і теплоємності б) при зміні концентрації в ньому метану, етану, пропану, азоту і вуглекислого газу

Для кожного складу газу за алгоритмом композиційного аналізу з врахуванням табличних даних розраховувався коефіцієнт теплопровідності λ_T . Коефіцієнт теплоємності c_p розраховувався методом адитивності з врахуванням долі кожної компоненти газу. Теплота згоряння природного газу розраховувалася стосовно стандартних умов за методикою нормативного документа [16].

Результати моделювання є очевидними із наведеної графічної ілюстрації і характеризують не тільки якісні, але і кількісні характеристики впливу параметрів природного газу на коефіцієнти λ_T і c_p і відповідно на зміну теплоти згоряння від їхніх значень. Також з графіків можна оцінити чутливість термоанемометра до зміни концентрації кожної з досліджуваних компонент природного газу. Отримані результати відкривають нові напрямки для подальших досліджень функціонування термоанемометричних перетворювачів при контролі енергетичних параметрів природного газу.

2.4 Моделювання впливу теплоти згоряння природного газу на вимірювання його витрати торцевими соплами

Облік природного газу інформаційно-вимірювальними системами в одиницях енергії повинно гармонізуватися з міжнародними підходами [5, 6] і відповідати національному стандарту України [1]. Актуальність вирішення цього питання підкреслюється запровадженням з 1 січня 2020 року нового національного стандарту [95], який регламентує дві системи створення пристроїв перетворення в енергію (ППЕ, термінологія із [95]) облікованого об'єму природного газу. Ці ППЕ формують вхідну інформацію для обчислювача енергії і фактично є складовою частиною інформаційно-вимірювальних систем обліку енергії природного газу.

У першому виді система ППЕ містить засіб визначення теплоти згоряння (ЗВТЗ), який монтований локально та є складовою частиною ППЕ. Ця структура системи містить обчислювач енергії, який може використовувати згенерований сигнал від локально монтованого ЗВТЗ для визначення енергії.

У другому виді система ППЕ не передбачає локального встановлення ЗВТЗ, а передбачає використовувати тільки його вихідний сигнал як від зовнішнього перетворювача системи. При цьому також обчислювач може приймати для визначення енергії фіксоване значення сигналу теплоти згоряння або яке періодично оновлюється.

Таким чином, при вимірюванні енергії природного газу обов'язковим є застосування ЗВТЗ природного газу. Оскільки при вимірюванні теплоти згоряння природного газу згідно запропонованого нами способу застосовуються торцеві звужувальні пристрої для вимірювання витрати природного газу, якість якого контролюється, то потрібно дослідити вплив теплоти згоряння природного газу на вимірювання витрати цього типу перетворювачами [84].

В дослідженнях [86, 87] експериментально підтверджено працездатність запропонованого способу експрес-визначення теплоти згоряння природного

газу і визначення умов, за яких відкриваються можливості його практичної реалізації. Водночас деякою складністю практичної реалізації способу є необхідність наявності інформації про густину природного газу. Тут необхідно зауважити, що це не стосується питання хроматографічного аналізу, оскільки при хроматографічному аналізі визначається компонентний склад газу і за його результатами стає можливим визначення теплоти згоряння. Згідно запропонованого нами способу [78] необхідно вимірювати густину газу для розрахунку його витрати через торцеве сопло звужувального пристрою у пальника, де згорає суміш газу і повітря. Адже, наприклад, зростання густини газу не завжди характеризує зростання його теплоти згоряння, що завжди має місце для суміші вуглеводневих компонент із збільшенням молярної маси. До зростання густини газу також може привести збільшення частки азоту чи вуглекислого газу, які є негорючими компонентами, і за цих умов теплота згоряння буде зменшуватися. Ці фактори безпосередньо також будуть впливати на результати вимірювання витрати газу з використанням спеціальних звужувальних пристроїв (в нашому прикладі торцевих сопел). Тому доцільним є дослідження кореляційних зв'язків між фізичними параметрами природного газу (коефіцієнта стисливості, коефіцієнта розширення, показника адіабати), які впливають на результат вимірювання витрати газу методом змінного перепаду тиску і теплою згоряння досліджуваного газу.

Суть запропонованого способу визначення теплоти згоряння природного газу полягає у використанні інформативного параметра – температури спалювання [78, 89]. При реалізації способу повинно забезпечуватися згоряння суміші заданого об'ємного співвідношення досліджуваного газу із повітрям при застосуванні пальника спеціальної конструкції, у якому використовується торцеве сопло як первинних перетворювач витрати для вимірювання об'ємної витрати спалюваного досліджуваного газу. Реалізація способу передбачає попереднє встановлення градууювальної характеристики засобу вимірювання як функціональної

залежності теплоти згоряння природного газу від температури полум'я пального і витрати досліджуваного газу.

Алгоритм реалізації вимірювального контролю при визначенні теплоти згоряння природного газу на основі розробленої фізичної моделі записується моделлю, яка наведена в розділі 2.1 формулами (2.16) та (2.17).

Із аналізу формули (2.16) очевидним є вплив витрати q_c , яка визначається з використанням алгоритму (2.17). Звідси є очевидним взаємозв'язок між витратою q_c і змінними параметрами ε , ρ_c , K , які визначаються якісними характеристиками природного газу. При цьому, як наслідок, очевидно є наявність їх впливу на теплоту згоряння природного газу.

Вплив коефіцієнта K_φ на результат вимірювання витрати природного газу викладений в нормативному документі [85]. За умови відносної вологості природного газу менше 10%, що нормується умовами газопостачання споживачів приймається рівним одиниці. Також тут додамо, що вплив вологості природного газу і вологості навколишнього середовища при реалізації алгоритму (2.16) досліджено нами в [79].

При моделюванні зміни коефіцієнта стисливості використано алгоритм методу його розрахунку NX19мод. [98] за такого діапазону зміни фізичних характеристик і компонентного складу природного газу. При цьому молярна концентрація азоту становить $(0,0075 \div 0,1)$ у відносних одиницях та вуглекислого газу $(0,0005 \div 0,03)$ у відносних одиницях, густина газу $(0,67 \div 0,73)$ кг/м³ і за таких заданих параметрів потоку газу через ЗП: абсолютний тиск $(0,101825 \div 0,103325)$ МПа, абсолютна температура $(283 \div 293)$ К.

Зважаючи на те, що кожен з цих параметрів може змінюватися у вказаних межах для умов функціонування пристрою експрес-вимірювання теплоти згоряння природного газу, необхідно дослідити вплив зміни кожного параметра на коефіцієнт стисливості. На основі проведених розрахунків побудовані графічні залежності зміни коефіцієнта стисливості від кожного

вхідного параметра, за умови вибору середнього значення всіх інших вхідних параметрів.

Спочатку проведено моделювання зміни коефіцієнта стисливості від вмісту азоту x_{N_2} і вуглекислого газу x_{CO_2} (рис. 2.6) і від густини природного газу (рис. 2.7). Для моделювання використовувалася методика NX19мод. [98]. Встановлено суттєво більший вплив зміни густини газу на зміну коефіцієнта стисливості порівняно із зміною вмісту азоту x_{N_2} і вуглекислого газу x_{CO_2} . Так при зміні густини на 10%, наприклад від 0,7 до 0,77 кг/м³ коефіцієнт стисливості змінюється на $4 \cdot 10^{-6}$, що становить $4 \cdot 10^{-4}$ %. Водночас при зміні вмісту азоту на 10%, наприклад від 0,05 до 0,055 відносних одиниць – коефіцієнт стисливості змінюється на $2 \cdot 10^{-7}$, що становить $2 \cdot 10^{-5}$ %. А при зміні вмісту вуглекислого газу на 10%, наприклад від 0,02 до 0,022 відносних одиниць – коефіцієнт стисливості змінюється на $5 \cdot 10^{-7}$ що становить $2 \cdot 10^{-5}$ %. Тобто очевидними є практично на порядок більший вплив зміни густини газу на коефіцієнт стисливості, ніж зміни вмісту азоту чи вуглекислого газу.

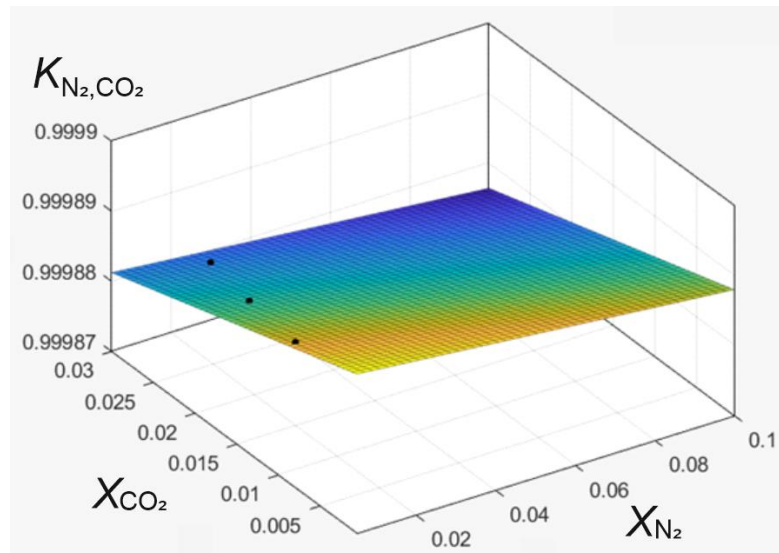


Рисунок 2.6 – Результати моделювання вмісту азоту і вуглекислого газу на коефіцієнт стисливості природного газу

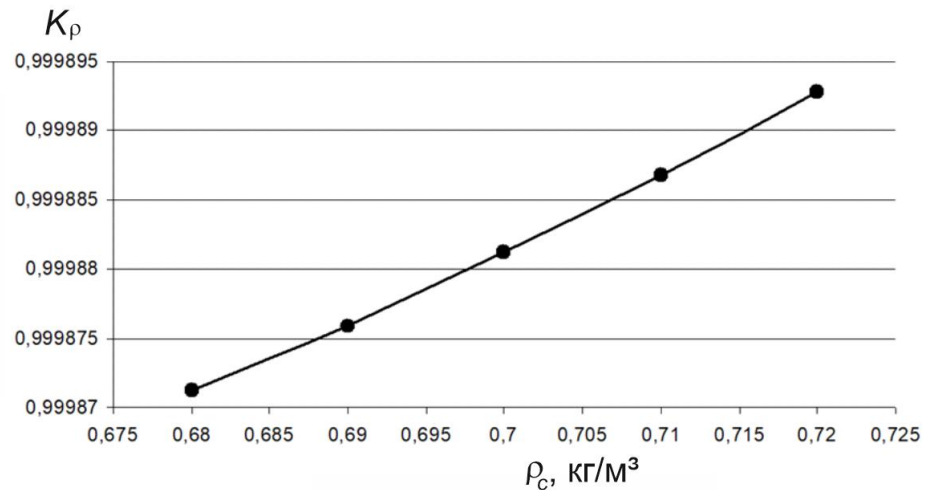


Рисунок 2.7 – Результати моделювання густини природного газу на його коефіцієнт стисливості

За результатами моделювання отримані такі апроксимаційні залежності зміни коефіцієнта стисливості від досліджуваних параметрів:

$$K_{N_2,CO_2} = 0,9999 - 5,143 \cdot 10^{-5} \cdot x_{N_2} - 0,0003921 \cdot x_{CO_2}; \quad (2.24)$$

$$K_\rho = 0,0021 \cdot \rho_c^2 - 0,0024 \cdot \rho_c + 1,0005. \quad (2.25)$$

де K_{N_2,CO_2} – коефіцієнт стисливості при роздільній зміні вмісту азоту і вуглекислого газу; K_ρ – коефіцієнт стисливості при зміні густини газу.

Для аналізованих складів газу здійснювався розрахунок їх нижчої теплоти згоряння з використанням формули [16]:

$$H = 85,453 \cdot (0,52190 \cdot \rho_c + 0,04242 - 0,65197 \cdot x_{N_2} - x_{CO_2}). \quad (2.26)$$

де H – нижча теплоти згоряння за стандартних умов, яка є функцією трьох змінних ρ_c , x_{N_2} і x_{CO_2} .

Це дало можливість здійснити моделювання закономірностей зміни теплоти згоряння H за умов попередньо вибраних діапазонів зміни параметрів x_{N_2} , x_{CO_2} , ρ_c , що відображено на рис. 2.8 та рис. 2.9.

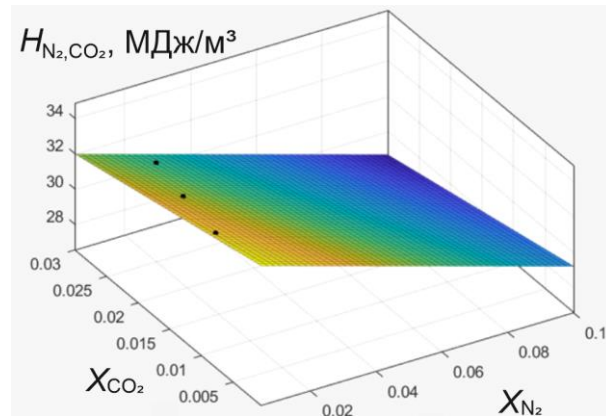


Рисунок 2.8 – Результати моделювання вмісту азоту і вуглекислого газу на теплоту згоряння природного газу

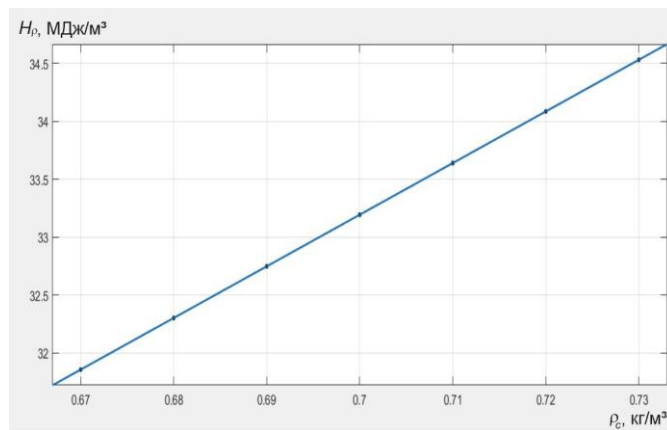


Рисунок 2.9 – Результати моделювання густини газу на його теплоту згоряння

Теплота згоряння H_{N_2, CO_2} моделювалася при змінних x_{N_2} , x_{CO_2} і постійному значенню густини $\rho_c = 0,7$ кг/м³, а теплота згоряння H_p моделювалася при змінній густині ρ_c та постійних значеннях $x_{N_2} = 0,05$, $x_{CO_2} = 0,015$.

Отримані результати моделювання не суперечать відомим фізичним закономірностям, тобто із зростанням вмісту азоту і вуглекислого газу відбувається зменшення його теплоти згоряння, а із збільшенням густини відбувається зростання теплоти згоряння. Вплив цих параметрів на зміну

теплоти згоряння характеризується різною чутливістю, що можна обчислити з графіків або з отриманих апроксимаційних залежностей:

$$H_{N_2,CO_2} = 34,84 - 55,71 \cdot x_{N_2} - 85,45 \cdot x_{CO_2} \quad (2.27)$$

$$H_\rho = 44,6 \cdot \rho_C + 1,976 \quad (2.28)$$

Наступним етапом досліджень було встановлення залежності між теплою згоряння і коефіцієнтами стисливості K_ρ і K_{N_2,CO_2} (рис. 2.10, 2.11).

$$H_{N_2,CO_2} = 3,214 \cdot 10^5 \cdot K_{N_2,CO_2} - 3,213 \cdot 10^5 \quad (2.29)$$

$$H_\rho = -5,802 \cdot 10^8 \cdot K_\rho^2 + 1,16 \cdot 10^9 \cdot K_\rho - 5,802 \cdot 10^8 \quad (2.30)$$

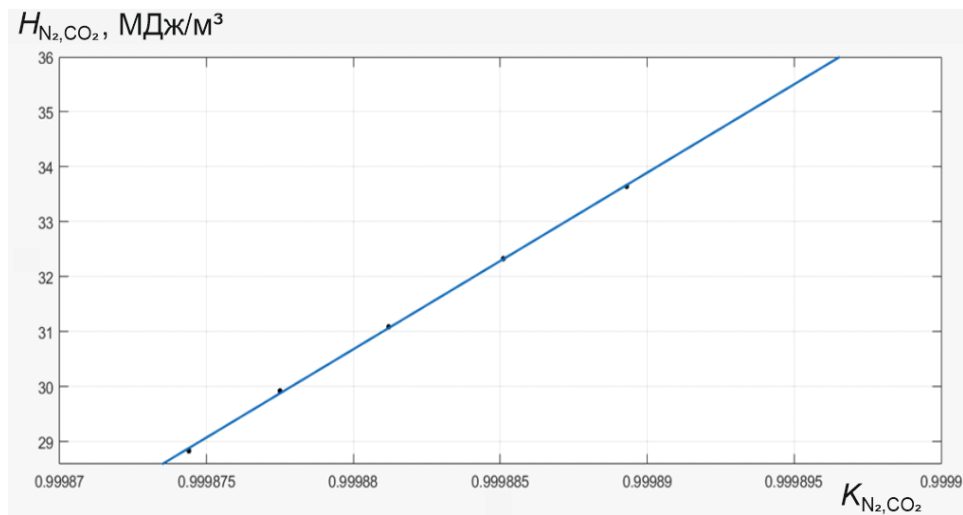


Рисунок 2.10 – Графічна ілюстрація взаємозв'язку коефіцієнта стисливості K_{N_2,CO_2} із теплою згоряння газу

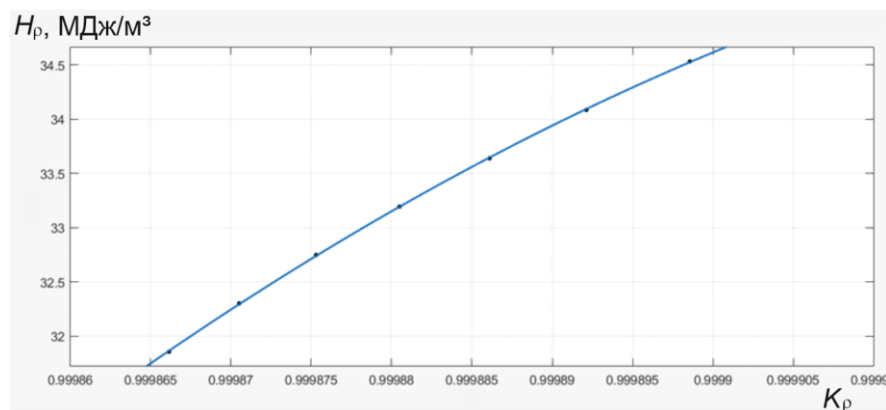


Рисунок 2.11 – Графічна ілюстрація взаємозв'язку коефіцієнта стисливості K_ρ газу із його теплою згоряння

Це моделювання також підтверджує про більший вплив на теплоту згоряння зміни складової коефіцієнта стисливості від густини порівняно із складовою коефіцієнта стисливості від вмісту азоту і вуглекислого газу.

Так як впливовими факторами на зміну коефіцієнта стисливості є три параметри, то для ілюстрації об'єднаного впливу здійснено моделювання зміни коефіцієнта стисливості від двох параметрів (густини та суми негорючих складових) (рис. 2.12), а також аналогічне моделювання теплоти згоряння від цих параметрів (рис. 2.13).

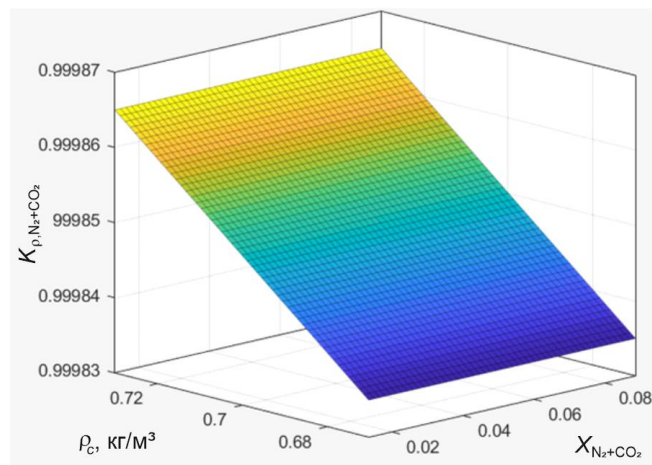


Рисунок 2.12 – Результати моделювання вмісту суми негорючих складових і густини газу на його коефіцієнт стисливості

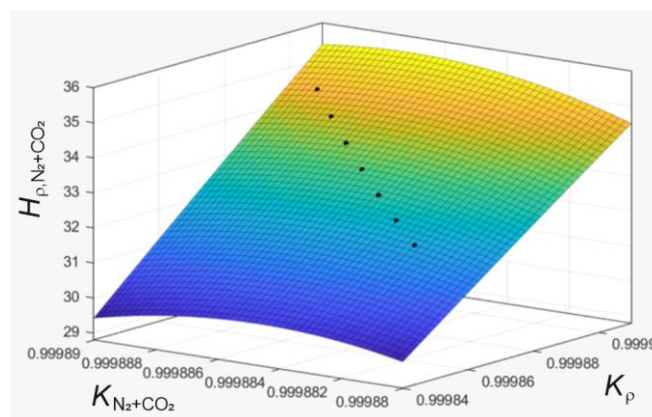


Рисунок 2.13 – Результати моделювання двох складових коефіцієнту стисливості (суми негорючих складових і густини газу) на його теплоту згоряння

Ці рисунки також підтверджують про суттєво більший вплив зміни густини як на коефіцієнт стисливості газу так і на його теплоту згоряння порівняно із впливом зміни негорючих компонентів.

Формульне подання отриманих залежностей має вигляд:

$$K_{\rho, N_2+CO_2} = 0,9995 - 3,08 \cdot 10^{-13} \cdot x_{N_2+CO_2} + 0,0005 \cdot \rho_c \quad (2.31)$$

$$H_{\rho, N_2+CO_2} = \begin{pmatrix} -1,864 \cdot 10^{10} - 1,387 \cdot 10^9 \cdot K_{\rho} + 3,868 \cdot 10^{10} \cdot K_{N_2+CO_2} - \\ -2,684 \cdot 10^7 \cdot K_{\rho}^2 + 1,441 \cdot 10^9 \cdot K_{\rho} \cdot K_{N_2+CO_2} - \\ -2,006 \cdot 10^{10} \cdot K_{N_2+CO_2}^2 \end{pmatrix} \quad (2.32)$$

Враховуючи, що в формулі (2.17) витрата q_c залежить від коефіцієнта розширення робочого середовища (природного газу), то проведено моделювання зміни показника адіабати κ і коефіцієнта розширення ε . При цьому використовувався алгоритм:

$$\kappa = \begin{pmatrix} 1,556 \cdot (1 + 0,074 \cdot x_{N_2}) - 3,9 \cdot 10^{-4} \cdot T \cdot (1 - 0,68 \cdot x_{N_2}) - 0,208 \cdot \rho_c + \\ + \left(\frac{P}{T}\right)^{1,43} \cdot \left[384 \cdot (1 - x_{N_2}) \cdot \left(\frac{P}{T}\right)^{0,8} + 26,4 \cdot x_{N_2} \right] \end{pmatrix} \quad (2.33)$$

$$\varepsilon = \left[\left(1 - \frac{\Delta p}{P}\right)^{\frac{2}{\kappa}} \cdot \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot \frac{1 - \left(1 - \frac{\Delta p}{P}\right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}}}{\frac{\Delta p}{P}} \cdot \frac{1 - m^2}{1 - m^2 \cdot \left(1 - \frac{\Delta p}{P}\right)^{\frac{2}{\kappa}}} \right]^{0,5} \quad (2.34)$$

де m – модуль торцевого звукувального пристрою.

Результати моделювання наведені на рис. 2.14 та рис. 2.15, які показують, що коефіцієнт розширення практично не залежить від показника адіабати і визначається головним чином перепадом тиску на торцевому ЗП, який є розрахованим параметром за результатами вимірювання Δp , P . Тому для умов вимірювання теплоти згоряння природного газу його можна вважати сталим і попередньо розрахованим для певного складу газу з врахуванням фізичних умов функціонування торцевих сопел.

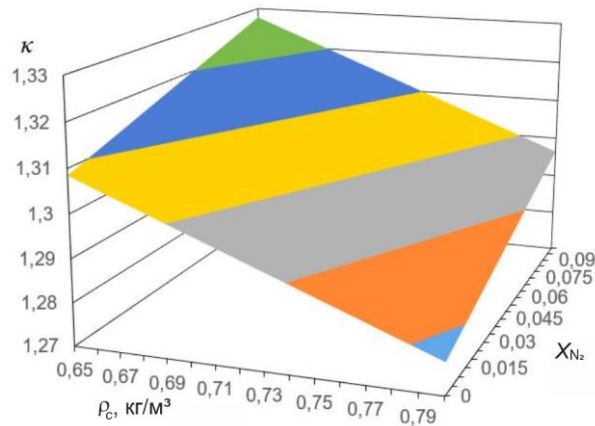


Рисунок 2.14 – Результати моделювання показника адіабати від вмісту азоту та густини газу

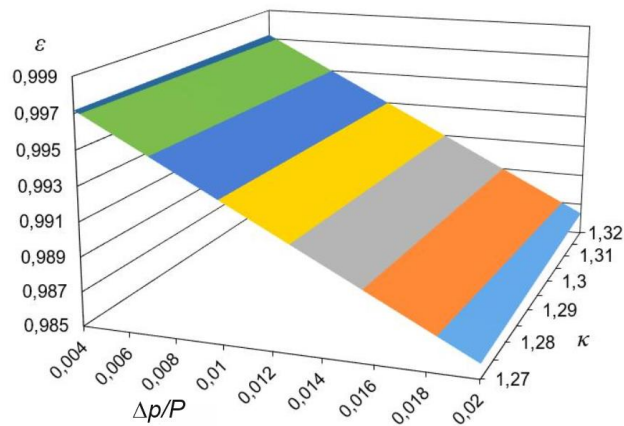


Рисунок 2.15 – Результати моделювання коефіцієнта розширення від показника адіабати та відношення $\Delta p/P$

Отримані результати моделювання дозволяють застосувати ітераційний метод при розрахунку теплоти згоряння природного газу. Його реалізація передбачає застосування даних газопостачальної організації про густину і фізичні характеристики природного газу за попередній інформативний період для даного об'єкту газоспоживання, для проведення обчислень по визначенню теплоти згоряння природного газу при першій ітерації. При наступній ітерації враховується взаємозв'язок отриманого першого розрахункового значенням теплоти згоряння з параметрами газу ε , ρ_c і K , які враховуються для наступного обчислення витрати і теплоти згоряння. Кількість ітерацій визначається ступенем наближення кожного наступного обчислення до попереднього, що

потребує подальших досліджень для практичної реалізації ітераційного методу.

Водночас такий підхід виключає необхідність вимірювання густини природного газу при реалізації способу експрес-вимірювання, що суттєво спрощує його практичну реалізацію. Доцільно тут також зауважити, що ітераційний метод розрахунку потребує практичної апробації з використанням природного газу за різних взірців відомої теплоти згоряння і відомого його компонентного складу для проведення можливої корекції алгоритму ітераційного методу розрахунку.

2.5 Моделювання алгоритму визначення коефіцієнта стисливості біогазу при визначенні його теплоти згоряння за умови вимірювання витрат торцевими соплами

З врахуванням можливості експериментального визначення теплоти згоряння будь-яких спалюваних газів необхідно дослідити особливості визначення теплоти згоряння для біогазу, як альтернативного джерела енергії. Так як функціонування дослідженого в дисертації засобу вимірювання теплоти згоряння газу передбачає вимірювання витрати газу при його спалюванні, то необхідно розробити і метрологічно оцінити алгоритм визначення коефіцієнта стисливості біогазу [90].

На даний час значної актуальності набуває питання обліку біогазу і контролю його якісних показників як одного із альтернативних джерел енергії. Це вимагає розроблення нових методичних підходів для обчислення його фізичних параметрів, зокрема коефіцієнта стисливості (КС), що є необхідною умовою для розрахунку зведеного до стандартних умов об'єму сухої частини біогазу, який є комерційним параметром при оплаті. Незважаючи на те, що біогаз є вологим газом, відносна вологість якого може сягати понад 50%, за його реальних робочих умов (надлишковий тиск 10...20 кПа і температурі 0...40 °С) впливом вологості на зміну КС можна знехтувати [91].

Поряд з цим на сьогодні відсутні практичні алгоритми визначення КС біогазу, оскільки відомі алгоритми, які описуються у відповідних відомих нормативних документах, стосуються природного газу і не можуть бути застосовані для біогазу з причини різних їх компонентних складів. Насамперед суттєво меншої кількості метану у біогазі порівняно із його кількістю у природному газі.

Розроблення алгоритму визначення КС біогазу базується на його чотирьох складових компонентного складу: метан (50...60)%, вуглекислий газ (28...38)%, азот (5...11)% та кисень (0,5...3,5)% при вказаних вище значеннях надлишкового тиску та температури. Це дозволяє застосувати методологію визначення КС через приведені значення тиску і температури біогазу з використанням графічних залежностей [92].

Суть практичного алгоритму визначення коефіцієнта стисливості біогазу передбачає визначення абсолютної критичної (псевдокритичної) температури $T_{кр}$ та абсолютного критичного (псевдокритичного) тиску $p_{кр}$ біогазу за формулами:

$$T_{кр} = 0,01(v_1T_{кр1} + v_2T_{кр2} + v_3T_{кр3} + v_4T_{кр4}), \quad (2.35)$$

$$p_{кр} = 0,01(v_1p_{кр1} + v_2p_{кр2} + v_3p_{кр3} + v_4p_{кр4}), \quad (2.36)$$

де $v_1... v_4$ – об'ємний вміст у відсотках компонентів біогазу CH_4 , CO_2 , N_2 , O_2 відповідно (сума відсотків повинна становити 100%); $T_{кр1}...T_{кр4}$ – абсолютні критичні температури окремих компонентів біогазу CH_4 , CO_2 , N_2 , O_2 відповідно; $p_{кр1}...p_{кр4}$ – абсолютні критичні тиски окремих компонентів біогазу CH_4 , CO_2 , N_2 , O_2 відповідно.

За табличними даними [92] критичні параметри окремих компонентів біогазу становлять:

$$p_{крCH_4}=4,5988 \text{ МПа}; \quad p_{крCO_2}=7,386 \text{ МПа}; \quad p_{крN_2}=3,390 \text{ МПа}; \\ p_{крO_2}=5,043 \text{ МПа}, \quad T_{крCH_4}=190,555 \text{ К}; \quad T_{крCO_2}=304,20 \text{ К}; \quad T_{крN_2}=126,2 \text{ К}; \\ T_{крO_2}=154,58 \text{ К}.$$

Далі визначають приведену температуру T_{np} та приведений тиск p_{np} за формулами:

$$T_{np} = (t + 273,15) / T_{кр}, \quad (2.37)$$

$$p_{np} = (p_n + p_a) / p_{кр}, \quad (2.38)$$

де t – температура біогазу, °С; p_n – надлишковий тиск, Па; p_a – атмосферний тиск, Па.

КС біогазу визначають за допомогою графіка (рис. 2.16) [92] використовуючи значення розрахованих приведених тиску та температури для робочих умов біогазу. Для цього записується рівняння прямої, що проходить через дві точки А і В з координатами $(p_{npA}; z_A)$ та $(p_{npB}; z_B)$ відповідно:

$$\frac{p_{np} - p_{npA}}{p_{npB} - p_{npA}} = \frac{z - z_A}{z_B - z_A}. \quad (2.39)$$

де z – КС біогазу; z_A, z_B – КС біогазу для точок А і В відповідно.

За точку А приймається початок координат графіка, який становить $z_A=1$ і $p_{npA}=0$.

За точку В приймається значення КС (точка z_B), яка розраховується шляхом лінійної інтерполяції КС між двома значеннями приведених температур, які вибираються по графіку для вибраного фіксованого значення, наприклад $p_{np}=1$.

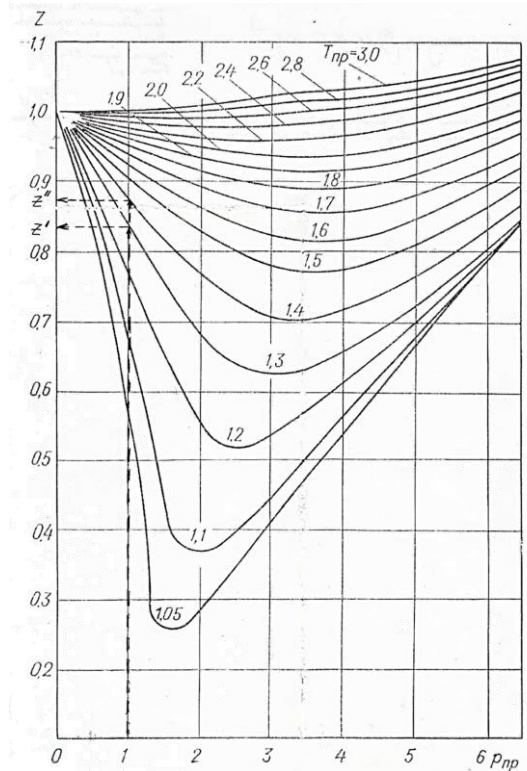


Рисунок 2.16 – Графіки функції $z = f(T_{np}, p_{np})$

На основі рівняння (2.39) значення КС біогазу напишемо такою формулою:

$$z = p_{np} \cdot \frac{z_B - z_A}{p_{npB} - p_{npA}} - p_{npA} \cdot \frac{z_B - z_A}{p_{npB} - p_{npA}} + z_A. \quad (2.40)$$

В свою чергу значення z_B при інтерполяції обчислюється за формулою:

$$z_B = z' + \frac{z'' - z'}{T_{np2} - T_{np1}} \cdot (T_{npB} - T_{np1}), \quad (2.41)$$

де z' , z'' - значення КС при вибраному фіксованому p_{np} та двох значеннях T_{np1} і T_{np2} відповідно (рис. 2.16).

Тут конкретизуємо, що для біогазу при його надлишковому тиску (10-20) кПа і температурі (0-40) °С діапазон приведених значень температури буде знаходитися в діапазоні (1,3-1,4), що відповідає точкам z' та z'' (рис. 2.16).

Абсолютні похибки розрахунку критичної температури та критичного тиску згідно (1) та (2) знайдемо за формулами:

$$\Delta T_{кр} = \left(\frac{\partial T_{кр}}{\partial v_1} \cdot \Delta v_1 \right) + \left(\frac{\partial T_{кр}}{\partial v_2} \cdot \Delta v_2 \right) + \left(\frac{\partial T_{кр}}{\partial v_3} \cdot \Delta v_3 \right) + \left(\frac{\partial T_{кр}}{\partial v_4} \cdot \Delta v_4 \right), \quad (2.42)$$

$$\Delta p_{кр} = \left(\frac{\partial p_{кр}}{\partial v_1} \cdot \Delta v_1 \right) + \left(\frac{\partial p_{кр}}{\partial v_2} \cdot \Delta v_2 \right) + \left(\frac{\partial p_{кр}}{\partial v_3} \cdot \Delta v_3 \right) + \left(\frac{\partial p_{кр}}{\partial v_4} \cdot \Delta v_4 \right), \quad (2.43)$$

де $\Delta v_1, \dots, \Delta v_4$ – абсолютні похибки визначення об'ємного вмісту компонентів біогазу CH_4 , CO_2 , N_2 , O_2 відповідно; $\partial T_{кр}/\partial v_1, \dots, \partial T_{кр}/\partial v_4$ – коефіцієнти впливу для розрахунку похибок параметрів v_1, \dots, v_4 відповідно; $\partial p_{кр}/\partial v_1, \dots, \partial p_{кр}/\partial v_4$ – коефіцієнти впливу для розрахунку похибок параметрів v_1, \dots, v_4 відповідно.

Значення абсолютних похибок параметрів $\Delta v_1, \dots, \Delta v_4$ визначалися з врахуванням відносної похибки їх визначення 0,5% відносно усереднених значень вказаного вище компонентного складу біогазу. Вони становлять $\Delta v_1=0,275$, $\Delta v_2=0,16$, $\Delta v_3=0,05$, $\Delta v_4=0,015$. При цих умовах значення коефіцієнтів впливу становлять $\partial T_{кр}/\partial v_1=1,906$, $\partial T_{кр}/\partial v_2=3,042$, $\partial T_{кр}/\partial v_3=1,262$, $\partial T_{кр}/\partial v_4=1,546$, $\partial p_{кр}/\partial v_1=0,046$, $\partial p_{кр}/\partial v_2=0,074$, $\partial p_{кр}/\partial v_3=0,034$, $\partial p_{кр}/\partial v_4=0,05$. В результаті отримуємо такі значення похибок визначення критичних параметрів $\Delta T_{кр}=0,718$ К, $\Delta p_{кр}=1,741 \cdot 10^{-2}$ МПа.

Визначимо абсолютні похибки приведених значень тиску і температури біогазу згідно (2.35) і (2.36):

$$\Delta T_{np} = \sqrt{\left(\frac{\partial T_{np}}{\partial T} \cdot \Delta T \right)^2 + \left(\frac{\partial T_{np}}{\partial T_{кр}} \cdot \Delta T_{кр} \right)^2}, \quad (2.44)$$

де $\partial T_{np}/\partial T$, $\partial T_{np}/\partial T_{кр}$ – коефіцієнти впливу для розрахунку похибки параметрів T та $T_{кр}$ відповідно; ΔT та $\Delta T_{кр}$ – похибки визначення параметрів T та $T_{кр}$ відповідно.

Враховуючи, що $\Delta T=0,15$ К, $\partial T_{np}/\partial T=4,558 \cdot 10^{-3}$, $\partial T_{np}/\partial T_{кр}=-6,297 \cdot 10^{-3}$, $\Delta T_{кр}=0,718$ К значення $\Delta T_{np}=4,575 \cdot 10^{-3}$ К.

$$\Delta p_{np} = \sqrt{\left(\frac{\partial p_{np}}{\partial p_{аб}} \cdot \Delta p_{аб} \right)^2 + \left(\frac{\partial p_{np}}{\partial p_{кр}} \cdot \Delta p_{кр} \right)^2}, \quad (2.45)$$

де $\partial p_{np}/\partial p_{аб}$, $\partial p_{np}/\partial p_{кр}$ – коефіцієнти впливу для розрахунку похибки параметрів p_H та $p_{кр}$ відповідно; $\Delta p_{аб}$ та $\Delta p_{кр}$ – похибка визначення параметрів $p_{аб}$ та $p_{кр}$ відповідно.

Для значень $\Delta p_{аб}=0,11 \cdot 10^{-3}$ МПа, $\partial p_{np}/\partial p_H=1,858 \cdot 10^{-7}$, $\partial p_{np}/\partial p_{кр}=-3,486 \cdot 10^{-9}$ значення $\Delta p_{np}=6,403 \cdot 10^{-11}$ МПа.

Абсолютну похибку розрахунку z_B визначимо за формулою:

$$\Delta z_B = \Delta z' + \sqrt{\left(\left(\frac{\partial z_B}{\partial z'} \Delta z' \right)^2 + \left(\frac{\partial z_B}{\partial z''} \Delta z'' \right)^2 + \left(\frac{\partial z_B}{\partial T_{np1}} \Delta T_{np1} \right)^2 + \left(\frac{\partial z_B}{\partial T_{np2}} \Delta T_{np2} \right)^2 + \left(\frac{\partial z_B}{\partial T_{npB}} \Delta T_{npB} \right)^2 \right)}, \quad (2.46)$$

де $\partial z_B/\partial z'$, $\partial z_B/\partial z''$, $\partial z_B/\partial T_{np1}$, $\partial z_B/\partial T_{np2}$, $\partial z_B/\partial T_{npB}$ - коефіцієнти впливу для розрахунку похибки параметрів z' , z'' , T_{np1} , T_{np2} , T_{npB} відповідно; $\Delta z'$, $\Delta z''$, ΔT_{np1} , ΔT_{np2} , ΔT_{npB} - похибки вимірювання параметрів z' , z'' , T_{np1} , T_{np2} , T_{npB} відповідно.

Для $\partial z_B/\partial z' = 0,183$, $\partial z_B/\partial z'' = 0,817$, $\partial z_B/\partial T_{np1} = 0,245$, $\partial z_B/\partial T_{np2} = -0,245$, $\partial z_B/\partial T_{npB} = 0,3$, з врахуванням прийнятої похибки зчитування КС по графічному зображенню $\pm 0,002$ (відповідає $\pm 0,5$ мм згідно з прийнятим масштабом) отримаємо $\Delta z' = 0,002$; $\Delta z'' = 0,002$; $\Delta T_{npB} = 0,002$; $\Delta T_{np1} = 0,002$; $\Delta T_{np2} = 0,002$. Тому значення $\Delta z_B = 3,909 \cdot 10^{-3}$.

Числове значення сумарної похибки Δz визначення коефіцієнта стисливості біогазу визначається за формулою:

$$\Delta z = \Delta z_A + \sqrt{\left(\left(\frac{\partial z}{\partial z_B} \Delta z_B \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial z_A} \Delta z_A \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial p_{npB}} \Delta p_{npB} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial p_{npA}} \Delta p_{npA} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial p_{np}} \Delta p_{np} \right)^2 \right)} + \Delta z_{зрМ} \quad (2.47)$$

де $\Delta z_{зрМ}$ – методична похибка графіка, що становить $0,005$; $\partial z/\partial z_B$, $\partial z/\partial z_A$, $\partial z/\partial p_{npB}$, $\partial z/\partial p_{npA}$, $\partial z/\partial p_{np}$ – коефіцієнти впливу для розрахунку похибки

параметрів $z_B, z_A, p_{npB}, p_{npA}, p_{np}$ відповідно; $\Delta z_B, \Delta z_A, \Delta p_{npB}, \Delta p_{npA}, \Delta p_{np}$ – похибки вимірювання параметрів $z_B, z_A, p_{npB}, p_{npA}, p_{np}$ відповідно.

Після підстановки числових значень складових похибки $\partial z/\partial z_B=0,019$; $\partial z/\partial z_A=0,981$; $\partial z/\partial p_{npB}=0,003$; $\partial z/\partial p_{npA}=0,133$; $\partial z/\partial p_{np}=-0,135$; $\Delta z_A=0$; $\Delta z_{zPM}=0,005$ $\Delta p_{npA}=0$; $\Delta p_{npB}=0,002$; $\Delta p_{np}=6,403 \cdot 10^{-11}$ у (2.47) отримуємо значення $\Delta z=0,00507$, що становить 0,507%.

Здійснений кількісний метрологічний аналіз практичного визначення коефіцієнта стисливості біогазу, який характеризується похибкою близькою до 0,5%, обґрунтовує можливість його практичного застосування і досягнення при цьому достатньої для практики точності вимірювань.

2.6 Висновки до другого розділу

Проведені теоретичні дослідження процесу вимірювання теплоти згоряння природного газу на засадах використання температури спалювання природного газу як основного вимірюваного інформативного параметра. Досліджено фактори, які впливають на температуру згоряння газу. Такими є компонентний склад, теплофізичні параметри, вологість газу, вологість навколишнього середовища, в якому відбувається згоряння газу, а також технічні характеристики, конструктивні особливості виготовлення і умови функціонування пристрою спалювання газу.

Розглянуті теоретичні засади згоряння горючих газів, які дозволяють обґрунтувати спосіб експрес-визначення теплоти згоряння газів за їх температурою спалювання з одночасним точним вимірюванням витрати і параметрів газу, який подається в пальник, та параметрів навколишнього середовища, в якому відбувається згоряння досліджуваного газу.

На базі комп'ютерного моделювання досліджено вплив вологості досліджуваного газу і вплив вологості повітря навколишнього середовища на результат вимірювання теплоти згоряння природного газу.

Методом комп'ютерного моделювання досліджено взаємозв'язок фізичних характеристик і компонентного складу природного газу з його теплотою згоряння за умови вимірювання витрати газу торцевими звужувальними перетворювачами. Отримані алгоритмічні залежності між теплотою згоряння природного газу і його коефіцієнтом стисливості, який визначається впливом густини газу і вмісту негорючих компонентів. Встановлено суттєвий (на порядок більший) вплив зміни густини природного газу на коефіцієнт стисливості і теплоту згоряння газу порівняно із зміною вмісту в ньому азоту і вуглекислого газу.

Досліджено вплив густини газу і вмісту азоту на показник адіабати і коефіцієнт розширення газу за умов вимірювання витрати з використанням торцевого звужувального пристрою у складі пальника спалюваного газу і, як наслідок, вплив на результати визначення за цих умов теплоти згоряння природного газу. Показано, що найбільш суттєвим впливом при вимірюванні витрати спалюваного газу із застосуванням торцевих звужувальних пристроїв характеризуються умови їх функціонування, які визначаються відношенням перепаду тиску на торцевому соплі до абсолютного тиску на його вході.

Отримані алгоритмічні залежності між теплотою згоряння природного газу і його теплофізичними характеристиками (коефіцієнт стисливості, вміст вуглеводневих і неуглеводневих компонентів природного газу, густина) за умови застосування витратовимірювальних торцевих звужувальних перетворювачів у пристрої спалювання газу, що дає можливість досліджувати вплив компонентного складу природного газу на інформативні параметри засобу вимірювання теплоти згоряння природного газу.

Розроблено і метрологічно досліджено алгоритм визначення коефіцієнта стисливості біогазу, що є необхідною умовою при визначенні його теплоти згоряння розробленим методом на основі вимірювання температури спалювання.

РОЗДІЛ 3 РОЗРОБЛЕННЯ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОТИ ЗГОРЯННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

3.1 Розроблення принципової схеми інформаційно-виміральної системи для вимірювання теплоти згоряння природного газу

Схему і розробленої інформаційно-виміральної системи для експрес-визначення теплоти згоряння природного газу показано на рис. 3.1 [54[]]. Пристрій містить пальник 1 з торцевим звужувальним пристроєм 2 подачі природного газу і інжекторним забірним пристроєм повітря з навколишнього середовища 3. Вхідний патрубок пальника 1 приєднано до технологічного вузла 4 регулювання надлишкового тиску і вимірювання температури, густини і вологості природного газу, який в свою чергу приєднаний через кран подачі газу 5 до лінії подачі газу 6. Технологічний вузол 4 містить пристрій регулювання надлишкового тиску 7 і перетворювачі тиску 8, температури 9, густини 10 і вологості 11 природного газу, які через відповідні узгоджуючі пристрої під'єднані до ПЕОМ 12. Перетворювачі температури полум'я пальника 13, тиску 14, температури 15 і вологості 16 також через відповідні узгоджуючі пристрої під'єднані до ПЕОМ 12.

Спосіб експрес-визначення теплоти згоряння природного газу здійснюють так [78]. Перед проведенням вимірювань за реальних умов здійснюють попереднє калібрування пальника 1, на якому проводять експрес-визначення теплоти згоряння природного газу пропонованим способом. Для цього під'єднують до джерела природного газу з відомою його теплою згоряння лінію подачі природного газу 6 до пальника 1 через технологічний вузол 4 регулювання надлишкового тиску і вимірювання температури, густини і вологості природного газу. Далі відкривають кран подачі газу 5 до пальника 1 і запалюють пальник 1. Наступною операцією встановлюють з використанням ПЕОМ 12, щонайменше на трьох сумішах 5 природного газу

відомої теплоти згорання, залежність між відомим значенням теплоти згорання природного газу і температурою полум'я з урахуванням вимірних значень надлишкового тиску, температури, густини і вологості природного газу і вимірних значень тиску, температури і вологості повітря навколишнього середовища. При цьому об'єм природного газу, що проходить через торцевий звужувальний пристрій для 10 визначення його об'ємної теплоти згорання, розраховують за формулою (2.16).

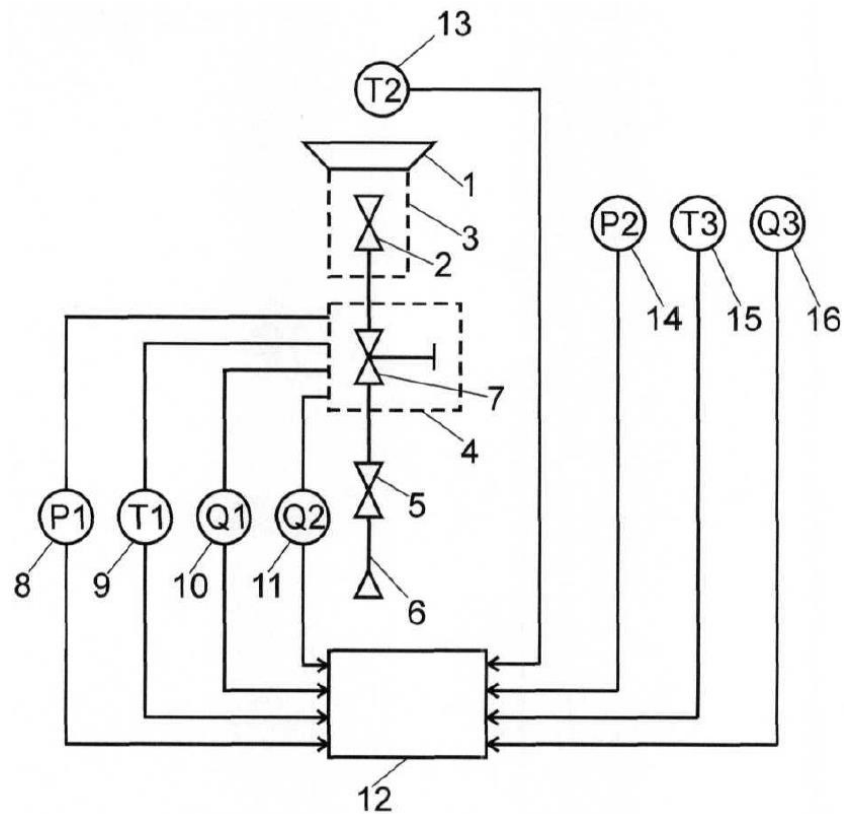


Рисунок 3.1 – Схема інформаційно-вимірювальної системи експрес-визначення теплоти згорання природного газу

На завершальному етапі визначають теплоту згорання N_s природного газу за стандартних умов за формулою (2.17).

Значення коефіцієнта конструктивного виконання пальника A визначають під час попереднього калібрування пристрою експрес-визначення теплоти згорання щонайменше на трьох сумішах природного газу відомої теплоти згорання, як функцію від робочих параметрів згорання природного газу. При проведенні експрес-визначення теплоти згорання, безпосередньо

пропонованим способом, під'єднують джерело досліджуваного природного газу до лінії його подачі 6 до попередньо прокаліброваного пальника 1, скомпонованого з інжекторним забірним пристроєм 3 забору навколишнього повітря і проградуйованим по витраті торцевим звужувальним пристроєм 2, через технологічний вузол 4 регулювання надлишкового тиску і вимірювання температури, густини і вологості природного газу. Далі відкривають кран 5 подачі газу до пальника і запалюють пальник. Після цього вузлом регулювання 7 регулюють до необхідного значення перепад тиску природного газу на звужувальному пристрою 2 пальника 1 і вимірюють температуру полум'я давачем 13. Після цього вимірюють температуру, густину і вологість природного газу давачами 9, 10, 11 і параметри повітря навколишнього середовища (тиск, температура, вологість) давачами 14, 15 і 16 відповідно. Далі за попередньо визначеними для даного пальника значенням коефіцієнта конструктивного виконання A за формулами (2.16) і (2.17) здійснюють розрахунок теплоти згорання досліджуваного природного газу. Пропонований спосіб підвищує точність і достовірність визначення теплоти згорання природного газу з можливістю його реалізації безпосередньо у газоспоживачів, що сприяє суттєвій економії затрат на проведення вимірювань без матеріально затратних операцій відбору проб природного газу і їх транспортування до відповідних лабораторій з контролю якості природного газу. Спосіб дозволяє визначати теплоту згорання одоризованого природного газу, що при застосуванні хроматографічного методу аналізу є недопустимим, і вимірювати теплоту згорання вологого природного газу будь-якого компонентного складу, в т.ч. за наявності неуглеводневих компонентів із забезпеченням необхідної точності вимірювання і допустимої величини похибки.

3.2 Розроблення лабораторного стенду для експериментальних досліджень методу вимірювання теплоти згоряння природного газу

Для проведення експериментальних досліджень щодо впливу конкретних конструктивних факторів, розроблений лабораторний стенд (рис. 3.2) [94, 95].

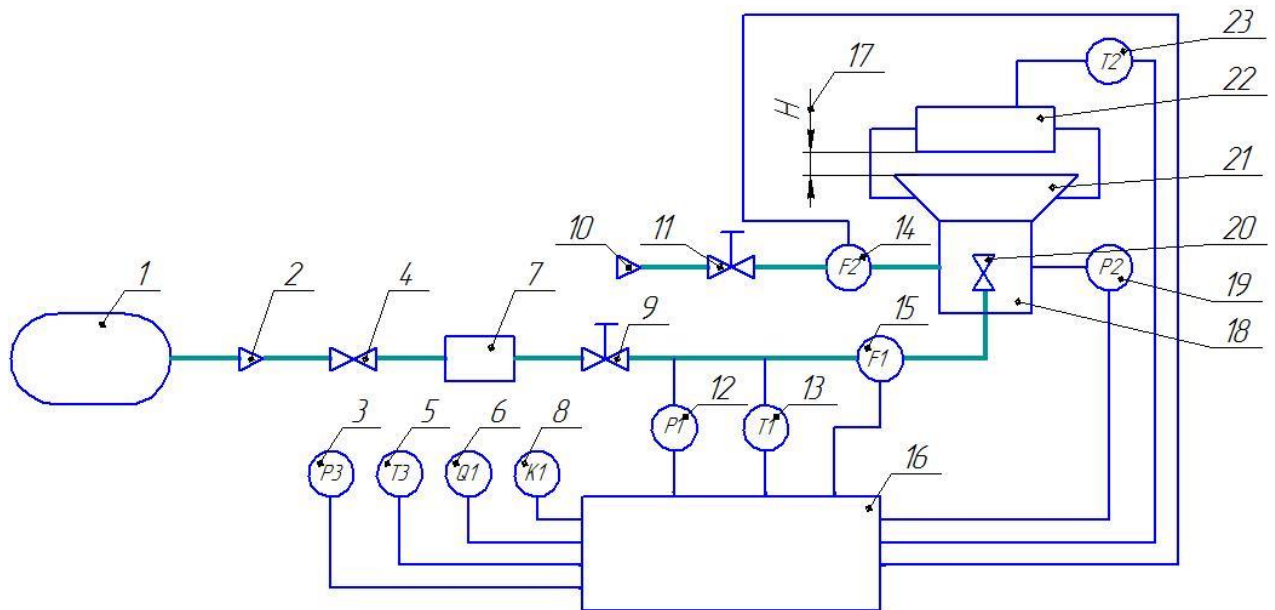


Рисунок 3.2 – Схема лабораторного стенду для контролю теплоти згоряння природного газу

Лабораторний стенд (рис. 3.2) містить балон 1 зі стиснутим природним газом з відомими його фізико-хімічними показниками, лінію 2 і кран 4 подачі газу, осушувач газу 7, вузол 9 регулювання витрати подачі газу, витратомір 15, , пальник 21 із торцевим звужувальним пристроєм 20. Пальник 21 обладнаний інжектором 18 навколишнього повітря, витрата повітря до якого подається лінією 10, вимірюється витратоміром 14 і задається регулятором 11. Теплоту згоряння вимірюють по температурі пластини 22, яка нагрівається полум'ям пальника 21, відстань до якої можна регулювати пристроєм 17. Система збору і обробки вимірювальної інформації 16 також містить давачі тиску 12 та температури 13 досліджуваного газу, давач тиску 19 в інжекторі,

перетворювач 23 температури пластини, а також давачі тиску 3, температури 5 та вологості 6 навколишнього середовища і цифровий хронометр 8.

Загальний вигляд стенду подано рис. 3.3.



Рисунок 3.3 – Загальний вигляд стенду

3.3 Дослідження впливу температурного фактору при експрес-контролі теплоти згоряння природного газу

Вивчення довідкових документів, нормативних і літературних джерел показало на відсутність конкретних нормованих температурних факторів, які би характеризували температуру полум'я при згорянні природного газу, який формує його енергопродуктивність, так як є сумішшю цих компонентів з непостійними об'ємними співвідношеннями. Також виявлено, що температура спалювання газу залежить від умов спалювання (параметри навколишнього середовища), від кількості повітря, яке приймає участь у горінні, а також від конструктивного виконання пальника. Так за даними стандарту [96] температура полум'я метану при згорянні в середовищі кисню за стандартних умов становить 2045 °С, а пропану 2110 °С. При використанні полум'я спалюваного газу у обладнанні для зварювання може розвиватися температура

при згорянні природного газу (2100...2200) °С і відповідно окремих його компонентів: метану (2043...2200) °С, пропану (2110...2500) °С, бутану (2118...2500) °С [97]. Тому також необхідно оцінити фактичну температуру полум'я спалюваного газу за умов реалізації пристрою для експрес-контролю теплоти згорання природного газу [78].

Спосіб визначення теплоти згорання природного газу здійснюється за його температурою спалювання [78]. При реалізації способу повинно забезпечуватися згорання суміші заданого об'ємного співвідношення досліджуваного газу з повітрям із застосуванням пальника спеціальної конструкції. Попередньо необхідно встановити градууювальну характеристику засобу вимірювання як функціональну залежність теплоти згорання природного газу від температури полум'я пальника.

Алгоритм реалізації вимірювального контролю при визначенні теплоти згорання природного газу на основі запропонованої фізичної моделі записується формулою (2.16):

Значення коефіцієнта конструктивного виконання пальника A необхідно визначати експериментальним методом під час попереднього калібрування пристрою експрес-контролю теплоти згорання природного газу щонайменше на трьох його сумішах відомої теплоти згорання як функцію від робочих параметрів згорання газу.

Алгоритм (2.16) реалізації методу експрес-контролю теплоти згорання природного газу є наближенням, так як передбачається експериментальне визначення коефіцієнту A при згорянні газо-повітряної суміші при певному їх співвідношенні. Тобто цей коефіцієнт є функціонально залежним від співвідношення газ-повітря і безпосередньо від витрати газу в пальнику, а також робочих параметрів умов згорання газу. Тому необхідно експериментально дослідити закономірності зміни температури полум'я при змінних параметрах умов згорання газу.

Розроблений лабораторний стенд (рис. 3.4) [122] містить пальник у вигляді конструктивно вдосконаленої атмосферної горілки (рис. 3.5) з технологічною можливістю подачі спалюваного газу і додаткового повітря для регулювання умов спалювання. Для досліджень вибрано пальник з камерою 10 змішування повітря з природним газом, яка утворена розсікачем 6 полум'я і кришкою 8 розсікача діаметром 80 мм. В камері 10 знаходиться торцевий звужувальний пристрій (сопло) 5, до якого подається природний газ від газової мережі гнучким трубопроводом 1 з регулюванням витрати за допомогою дросельного вентиля 2. Витрата газу у пальнику контролюється ротаметром 4 моделі РС-3А і обчислюється за допомогою побутового лічильника газу 3 моделі Premagas ВК, типорозміру G1,6 і хронометра 18. Тиск газу в лінії перед соплом 5 вимірюється давачем надлишкового тиску 18 типу ROSEMOUNT моделі 2024 (верхній діапазон вимірювання 10 кПа) з вторинним цифровим приладом. Температура газу вимірюється цифровим термометром 23 моделі DS18B20. Лабораторний стенд передбачає можливість під'єднання балона 20 зі стиснутим природним або скрапленим газом з відомими фізико-хімічними показниками. У вихідній лінії балона 20 розміщені перекиривний кран 19 і дросельний вентиль 17 подачі газу в технологічну лінію до камери 10. Витрата додаткового повітря для спалювання газу у лінії 14 формується повітродувкою 15 і дросельним вентилям 13. Додаткове повітря для кращого змішування із спалюваним газом подається за допомогою декількох (в конструкції використаної горілки чотирьох) паралельних вхідних патрубків 11. Витрата повітря в лінії 14 обчислюється за допомогою побутового лічильника газу 12 моделі Premagas ВК, типорозміру G1,6 і хронометра 26. В складі лабораторного стенда передбачена можливість застосування пробовідбірників газу 16 і 21 для лабораторного визначення за допомогою хроматографа фізико-хімічних параметрів газу, який використовується при проведенні експериментів. Для вимірювання температури полум'я 7 спалюваного газу використовуються термометри 9.

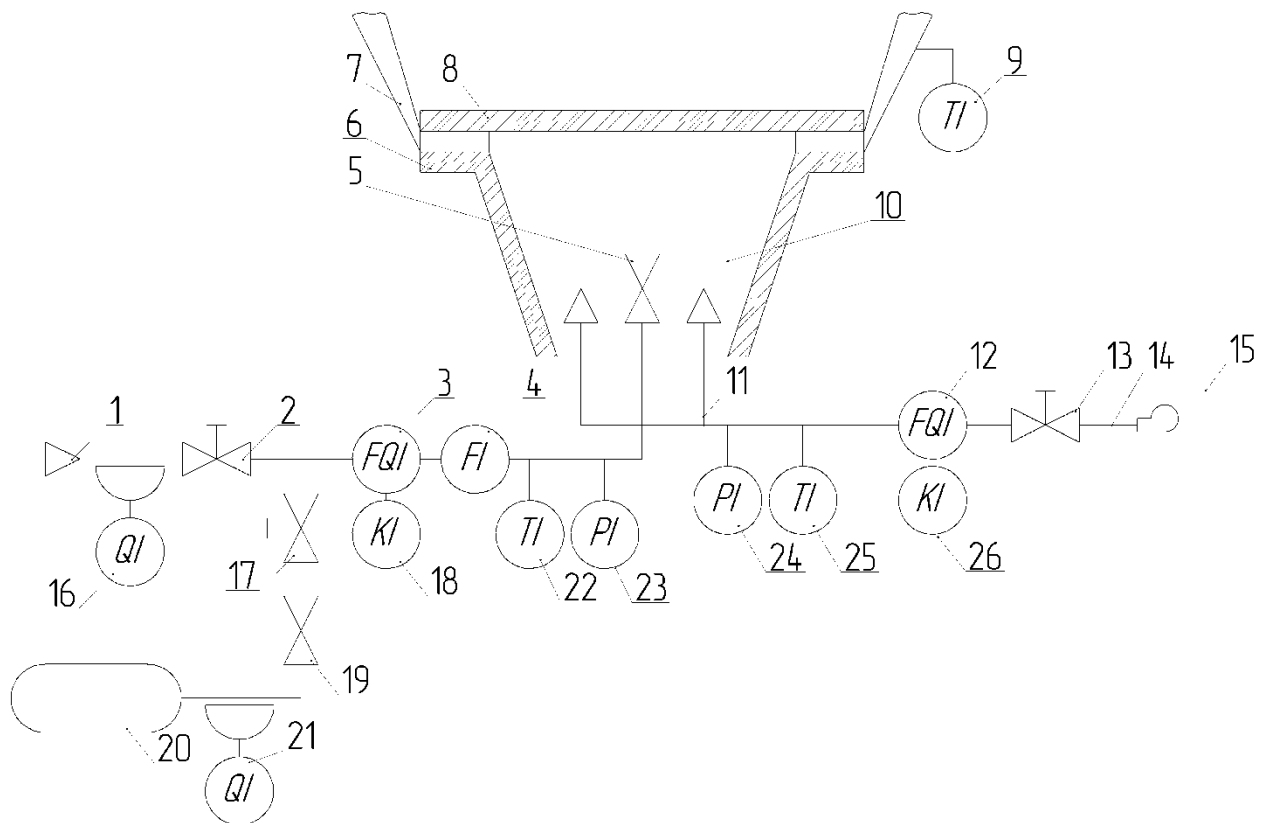


Рисунок 3.4 – Функціональна схема лабораторного стенда для дослідження температурного фактору при спалюванні газу



Рисунок 3.5 – Зовнішній вигляді конструктивно вдосконаленої атмосферної горілки

При дослідженнях для вимірювання температури полум'я використовувалися три види високотемпературних датчиків: термопара типу К (хромель-алюмель) у захисному керамічному корпусі (T_1), термопара типу НК-СА (нікель-копель – спеціальний алюмель) у захисному металевому корпусі (T_2) та мініатюрний температурний зонд типу К (хромель-алюмель) загального призначення з відкритим контактом моделі TP-10 (T_3) для роботи з цифровим мультиметром моделі UNI-T M890G [99], що ілюструється на рис. 3.6.

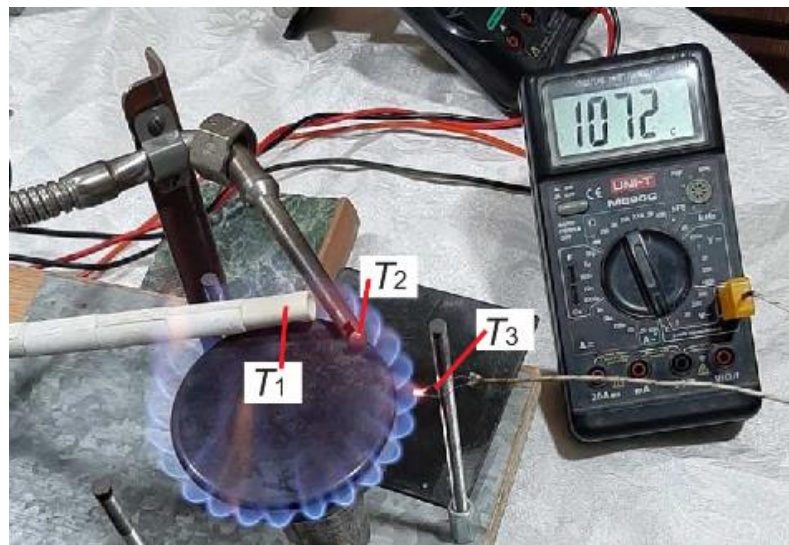


Рисунок 3.6 – Ілюстрація вимірювання температури полум'я трьома типами термоперетворювачів

Одним із варіантів практичної реалізації вимірювання температури згоряння газу може бути визначення температури за ступінню нагрівання пластини. Такий підхід за фіксованих значень витрати газу і витрати повітря буде опосередковано характеризувати теплоту згоряння природного газу. Однак необхідним при цьому є дослідження місця вимірювання температури пластини, під якою здійснюється згоряння газу.

Розроблена схема досліджень (рис. 3.7) містить пірометр 1, пластину 2, розсікач полум'я 5 із кришкою розсікача 4, витратомір газу 6 та витратомір повітря 7. Полум'я при згорянні газу вказано позицією 3.

Для досліджень [100] вибрано пальник з діаметром розсікача полум'я $d=80$ мм, дві металеві пластини діаметром $D=140$ мм та товщинами $\delta_1=0,8$ мм

та $\delta_2=2$ мм. Пластини розміщуються над пальником на висоті $h=10$ мм. При цьому витрата повітря становила $1,47 \cdot 10^{-4}$ м³/с, а витрата природного газу – $1,5 \cdot 10^{-5}$ м³/с.

При дослідженнях суміш природного газу і повітря потрапляє до камери розсікача полум'я 5, звідки виходить назовні через отвори, утворені кришкою розсікача полум'я 4 і згорає. Полум'я 3 нагріває пластину 2, температуру поверхні якої вимірювали пірометром моделі Venetech GM320.

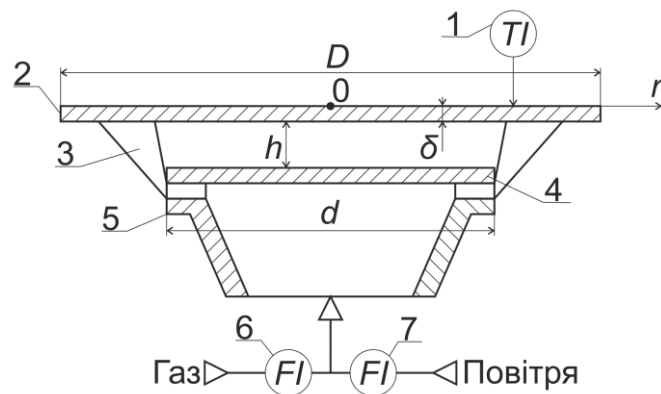


Рисунок 3.7 – Схема досліджень температурного поля пластини

Температуру поверхні пластини вимірювали після завершення перехідного процесу, тобто при стабілізації локальної температури на поверхні пластини. Після цього пірометром вимірювали температуру на поверхні пластини вздовж її радіуса з інтервалом 5 мм (рис. 3.8).

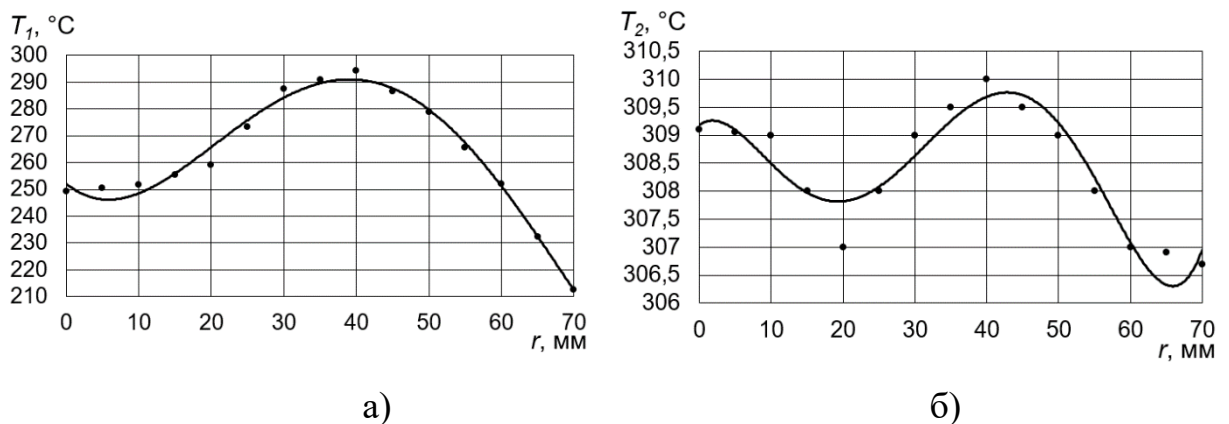


Рисунок 3.8 – Графічне зображення залежності температури T від координати r поверхні пластини товщиною 0,8мм (а) та 2,0 мм (б)

Отримані експериментальні точки можна апроксимувати такими виразами:

$$T_1 = 3 \cdot 10^{-5} \cdot r^4 - 4,9 \cdot 10^{-3} \cdot r^3 + 0,2321 \cdot r^2 - 2,2108 \cdot r + 252,1 \quad (3.1)$$

$$T_2 = 2 \cdot 10^{-7} \cdot r^5 - 3 \cdot 10^{-5} \cdot r^4 + 1,6 \cdot 10^{-3} \cdot r^3 - 0,0286 \cdot r^2 + 0,0889 \cdot r + 309,19 \quad (3.2)$$

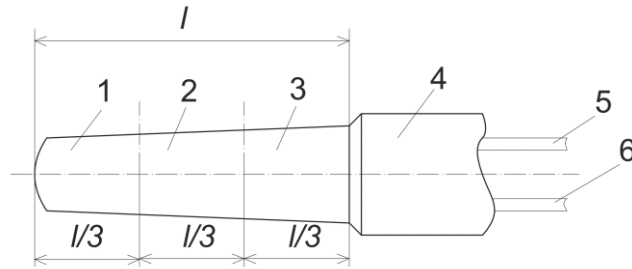
де T_1 , T_2 – температура першої і другої пластини відповідно.

На тоншій пластині є суттєвий градієнт температури вздовж поверхні пластини (зміна температури стосовно розмірів розсікача полум'я становить 40°C , причому максимальне значення 290°C близьке до радіуса розсікача полум'я). Товстіша пластина хоча і характеризується більш складною формою розподілу температури, однак також її максимальне значення близьке до радіуса розсікача полум'я, а градієнт температури є суттєво меншим (близько 4°C). В обох випадках очевидним є зменшення температури внаслідок теплообміну країв пластини з навколишнім середовищем.

Отримані результати вказують на необхідність врахування конструктивних параметрів пальника, а також товщини пластини.

Для вимірювання безпосередньо температури полум'я T_{III} досліджено можливість застосування термопари типу К (градувальна характеристика ТХА) [117]. Для цього проведені додаткові дослідження їх функціонування за умов визначення теплоти згоряння природного газу, які характеризуються перебуванням термопари безпосередньо в полум'ї спалюваного газу.

Зони нагрівання термопари умовно були поділені на три частини, як зображено на рис. 3.9. Експериментально встановлено оптимальність нагрівання в зоні 2, як найбільш чутливій до місця її нагріву полум'ям (кожна зона становить третю частину від загальної довжини $l=70$ мм чохла термопари).



1, 2, 3 – зони нагрівання термопар; 4 – під'єднувальний кабель;
5, 6 – під'єднувальні провідники

Рисунок 3.9 – Схема термопары при вимірюваннях температури полум'я природного газу

Також проводилися експериментальні дослідження динамічних характеристик термопар і процесу нагрівання пластин (рис. 3.10). Результати досліджень свідчать про експоненційний вид залежності вихідного сигналу перетворювача і зміни температури пластин при їх нагріванні полум'ям спалюваного газу. Отримані закономірності відповідають відомим видам динамічних характеристик перетворювачів, як аперіодичної ланки першого порядку. Експериментально встановлено, що постійна часу для термопар К (ТХА) є близькою до 150 с (рис. 3.10 а). При використанні пластини постійні часу суттєво відрізняються і становлять близько 35 с для тонкої пластини і 120 с – для товстої пластини (рис. 3.10 б). За останньої умови постійною часу пірометра, який вимірює температуру пластини, можна нехтувати.

Отримані результати вказують на необхідність вибору тривалості спалювання газу з врахуванням конструктивних особливостей застосовуваних термоперетворювачів і опосередкованого методу вимірювання температури полум'я газу при визначенні теплоти згоряння природного газу за його температурою спалювання.

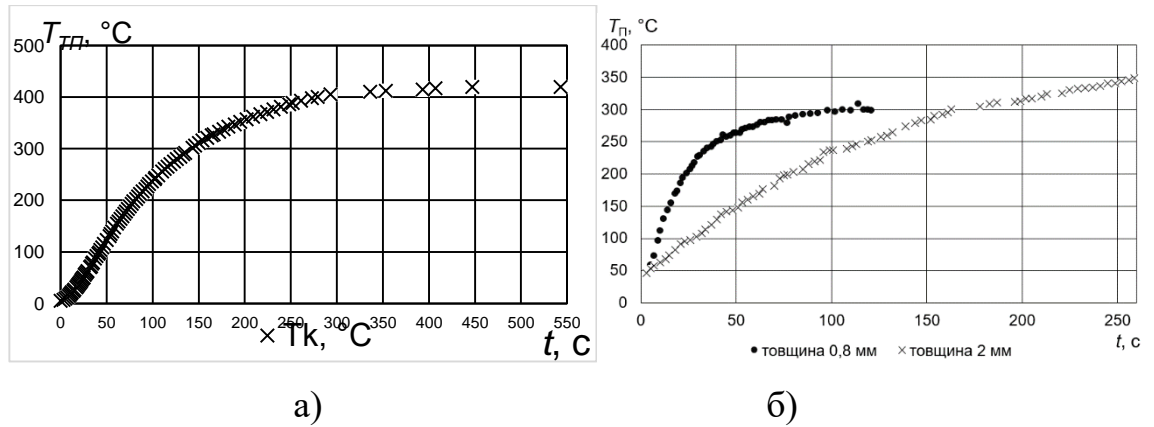


Рисунок 3.10 – Графічна ілюстрація динамічних характеристик термопар типу К (ТХА) (а) та зміни температури металевих пластин різної товщини (б)

Методологічний аспект вимірювання температури передбачав врахування умов спалювання досліджуваного газу. Для цього інформація про витрату газу та додаткового повітря під час досліджень, які були отримані за робочих умов функціонування лабораторного стенду, зводилися до стандартних умов за формулами:

$$q_{ГС} = q_{Г} \cdot \frac{p_{Г}}{p_{С}} \cdot \frac{T_{С}}{T_{Г}} \cdot \frac{1}{K_{Г}} \quad (3.3)$$

$$q_{ПДС} = q_{ПД} \cdot \frac{p_{ПД}}{p_{С}} \cdot \frac{T_{С}}{T_{ПД}} \cdot \frac{1}{K_{ПД}} \quad (3.4)$$

де $q_{ГС}$ і $q_{ПДС}$ – витрати газу і додаткового повітря за стандартних умов відповідно, $q_{Г}$ і $q_{ПД}$ – витрати газу і додаткового повітря за робочих умов відповідно, $p_{Г}$ і $T_{Г}$ – абсолютний тиск і абсолютна температура газу перед соплом пальника відповідно, $p_{ПД}$ і $T_{ПД}$ – абсолютний тиск і абсолютна температура додаткового повітря у змішувачі пальника (на виході сопла) відповідно, $p_{С}$ і $T_{С}$ – значення стандартного тиску і стандартної температури відповідно, $K_{Г}$ і $K_{ПД}$ – коефіцієнти стисливості газу і повітря відповідно.

Коефіцієнт співвідношення витрат додаткового повітря і газу γ розраховувався за формулою:

$$\gamma = q_{ПДС} / q_{ГС} \quad (3.5)$$

Спочатку було проведено вимірювання температури полум'я, використовуючи давач температури T_3 (термопара хромель-алюмель) без захисного кожуху. Температура полум'я вимірювалася в двох точках: внизу біля виходу з пальника T_H та у верхній частині полум'я – T_B . При цьому витрата природного газу змінювалася від 0,1 до 0,36 м³/год за умови подачі постійної витрати додаткового повітря $q_{ПДС}=0,55$ м³/год (рис. 3.11).

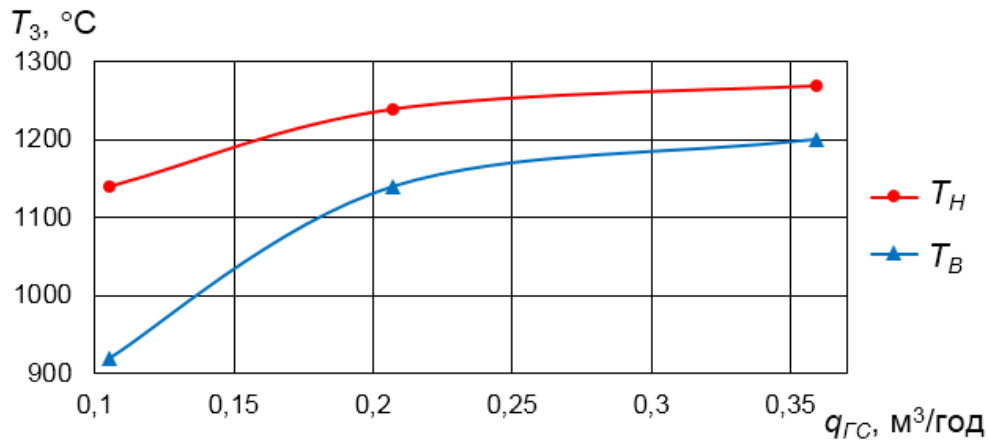


Рисунок 3.11 – Зміна температури в нижній T_H і верхній T_B частинах полум'я

Вимірювання температури полум'я мініатюрним безкорпусним зондом характеризується суттєвим розкидом (100...200) °C внизу і вверху полум'я за різних витрат газу, що практично унеможлиблює достовірно вимірювати температуру полум'я. Тому наведені на рис. 3 результати є усередненими, оскільки в кожній точці розкид вимірювання знаходився в діапазоні близькому до $\pm(40...50)$ °C. Водночас отримані значення температури спалювання суттєво відрізняються від даних із [118, 119], так як проведені експерименти стосувалися згоряння газу в середовищі повітря, а не в середовищі кисню.

Отримані результати вимірювання обґрунтовують доцільність вимірювання температури полум'я за допомогою давачів T_1 і T_2 із захисними кожухами, які можна розміщувати безпосередньо в полум'ї спалюваного газу, що ілюстровано на рис. 3.6.

З метою визначення можливої методичної похибки вимірювання температури термопарами T_1 і T_2 внаслідок деякої неідентичності процесів теплообміну при обтіканні кожухів термопар полум'ям газу були проведені одночасні вимірювання двома термопарами [102].

Результати вимірювання термопарою T_2 при спалюванні природного газу теплотворної здатності $35,3 \text{ МДж/м}^3$ наведені на рис. 3.11, а зміна похибки за цих умов при вимірюванні термопарою T_1 відносно T_2 наведена на рис. 3.12.

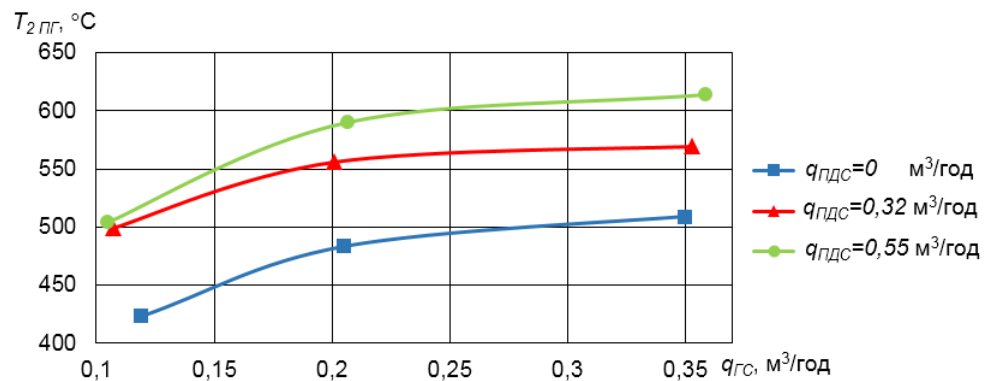


Рисунок 3.11 – Зміна температури згоряння природного газу при вимірюванні термопарою T_2 в залежності від його витрати $q_{Гс}$ і витрати додаткового повітря $q_{ПДС}$

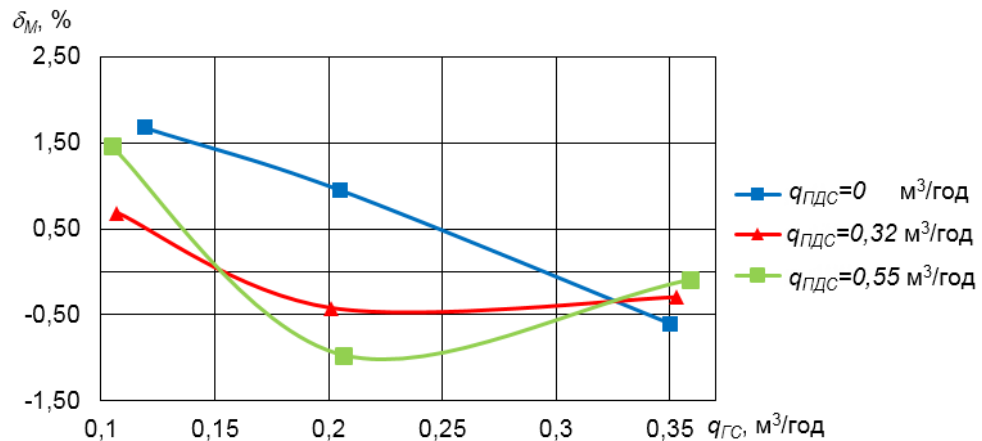


Рисунок 3.12 – Зміна методичної похибки від витрати газу і умов спалювання при вимірюванні температури полум'я термопарами T_1 і T_2

Наведені залежності на рис. 3.11 та 3.12 побудовані за умов відсутності витрати додаткового повітря $q_{ПДС}=0 \text{ м}^3/\text{год}$ і двох фіксованих витратах додаткового повітря $q_{ПДС}=0,32$ і $0,55 \text{ м}^3/\text{год}$. Графіки ілюструють зростання

температури полум'я спалюваного газу із зростанням як витрати газу так і витрати додаткового повітря. Однак залежності є нелінійними і більший вплив на зміну температури полум'я виявлено за малих витрат газу, тобто менших від $0,2 \text{ м}^3/\text{год}$. Навіть при відсутності додаткового повітря ця закономірність є близькою до умов із наявністю додаткового повітря, оскільки в процесі згоряння приймає участь кисень з навколишнього повітря, який змішується з газом безпосередньо на виході розсікача полум'я. Більша стабілізація наведених залежностей за витрат понад $0,2 \text{ м}^3/\text{год}$ свідчить про зменшення впливу витрати газу на температуру полум'я, що вказує на можливість вибору економної та раціональної витрати у пальнику при контролі калорійності природного газу. Також було встановлено появу оранжевих язиків в полум'ї при зменшенні витрати використовуваного додаткового повітря. При цьому зростання інтенсивності забарвлення полум'я в оранжевий колір при однаковій витраті газу свідчить про нижчу температуру згоряння газу, що характеризує зниження ефективності використання газового обладнання, тобто зниження його теплогенерації.

Рис. 3.12 характеризує про неперевіщення похибки $1,6 \%$ результатів вимірювання температури одночасно двома термопарами, причому при більших витратах газу ця похибка суттєво зменшується і за витрат газу $0,35 \text{ м}^3/\text{год}$ не перевищує $0,5 \%$.

При побудові залежностей на рис. 3.14 внаслідок різних значень витрати газу коефіцієнт γ був змінним. В той же час для функціонування пристрою експрес-контролю потрібно дотримувати постійне співвідношення компонентів газо-повітряної суміші. Тому використовуючи базу експериментально отриманих даних здійснено моделювання температурного параметра за різних витрат газу та різних значень коефіцієнта γ (рис. 3.13)

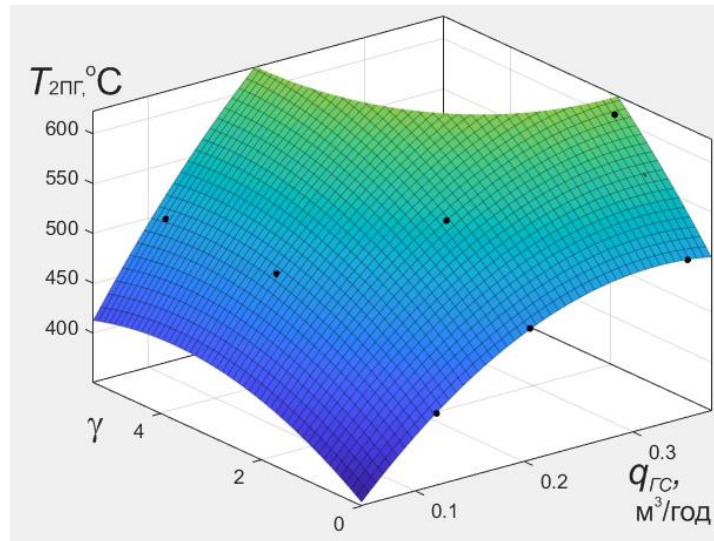


Рисунок 3.13 – Моделювання зміни температури полум'я T_2 від витрати $q_{ГС}$ природного газу та коефіцієнта γ

Результати моделювання вказують на нелінійну закономірність зростання температури полум'я із збільшенням як витрати газу так і коефіцієнта γ і характеризують про наявність оптимізаційного виду досліджуваних характеристик.

Отримане апроксимаційне рівняння по двох змінних записується у вигляді:

$$T_{2пг} = 292,4 + 1363 \cdot q_{ГС} + 32,24 \cdot \gamma - 2122 \cdot q_{ГС}^2 + 107,6 \cdot q_{ГС} \cdot \gamma - 5,015 \cdot \gamma^2 \quad (3.6)$$

де $T_{2пг}$ – температура полум'я при згорянні природного газу, °C; $q_{ГС}$ – витрата природного газу, м³/год; γ – коефіцієнт співвідношення витрат додаткового повітря і газу, м³/м³.

Результати експериментальних досліджень, які проведені при спалюванні пропан-бутанової суміші скрапленого газу калорійністю 46,8 МДж/кг наведені на рис. 3.14, а комп'ютерне моделювання за цих умов подане на рис. 3.15.

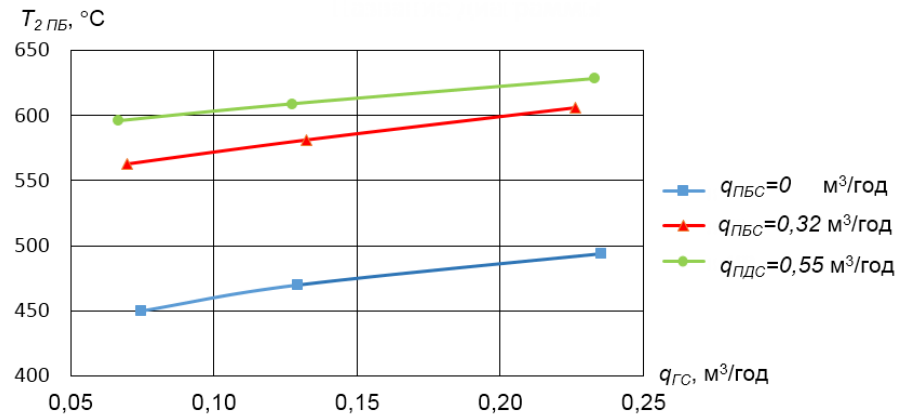


Рисунок 3.14 – Зміна температури згоряння пропан-бутанової газової суміші при вимірюванні термопарою $T_{2ПГ}$ в залежності від її витрати $q_{ГС}$ і витрати додаткового повітря $q_{ПДС}$

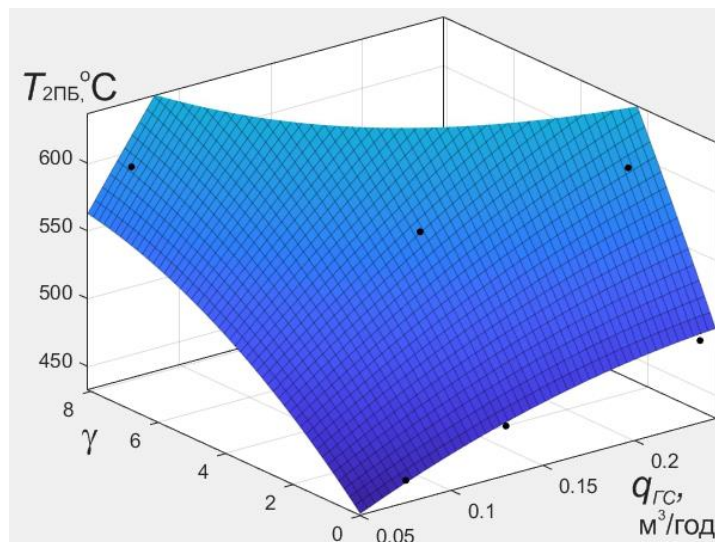


Рисунок 3.15 – Моделювання зміни температури полум'я $T_{2ПБ}$ від витрати $q_{ГС}$ пропан-бутанової газової суміші та коефіцієнта γ

В цілому закономірності зміни температури полум'я [102] є подібними до проведених досліджень на природному газі. Поряд з цим температура полум'я для пропан-бутанової суміші за однакових умов згоряння є вищою, а діапазон вимірюваних витрат парів газу є меншим, оскільки отвір сопла в пальнику горілки не змінювався.

Отримане апроксимаційне рівняння для пропан-бутанової суміші записується:

$$T_{2ПБ} = 402,6 + 704,5 \cdot q_{ГС} + 17,55 \cdot \gamma - 1257 \cdot q_{ГС}^2 + 182,2 \cdot q_{ГС} \cdot \gamma - 1,338 \cdot \gamma^2 \quad (3.7)$$

де $T_{2ПБ}$ – температура полум'я при згорянні пропан-бутанової газової суміші, °С; $q_{ГС}$ – витрата природного газу, м³/год; γ – коефіцієнт співвідношення витрат додаткового повітря і газу, м³/м³.

Отримані залежності (3.6, 3.7) дозволяють здійснити графічну ілюстрацію (рис. 3.16) впливу калорійності газу на температуру полум'я при його спалюванні [122]. Вони свідчать про більшу температуру полум'я пропан-бутанової суміші порівняно із температурою згорання природного газу за наявності суттєвої витрати ($\gamma=5$) додаткового повітря, що відображають криві 3 і 6. Водночас при $\gamma=2$ (криві 2 і 5) цей вплив є суттєво менший, а при відсутності додаткового повітря, тобто $\gamma=0$ (криві 1 і 4) закономірність впливу калорійності на температуру спалювання практично не виявлене. Це свідчить про необхідність проведення додаткових досліджень з метою конструктивного вдосконалення пальника і вибору оптимального режиму його функціонування при контролі теплоти згорання природного газу.

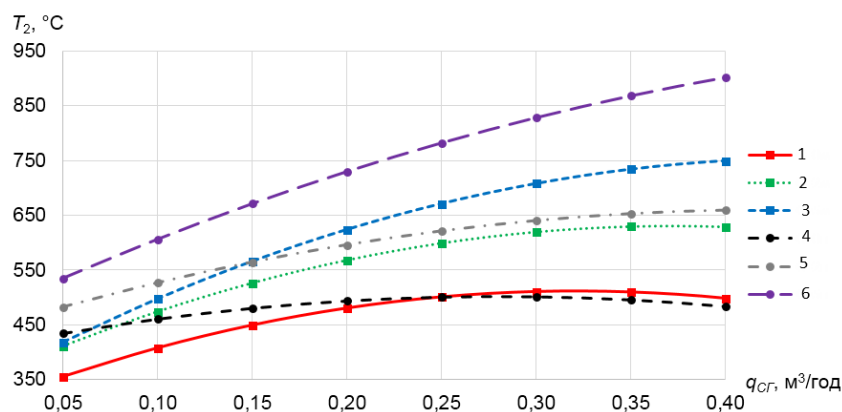


Рисунок 3.16 – Графічна ілюстрація зміни температури полум'я при спалюванні природного газу (криві 1, 2, 3 при $\gamma=0, 2, 5$ відповідно) і пропан-бутанової суміші (криві 4, 5, 6 при $\gamma=0, 2, 5$ відповідно)

Здійснено вимірювання фактичної температури полум'я для умов лабораторного стенду і встановлено відмінність цієї температури полум'я від довідкових даних. Досліджено нерівномірність температури полум'я вздовж його висоти, яка може сягати до 200 °С, що виявлено вимірюванням за допомогою мініатюрного безкорпусного температурного зонда. Виявлено можливість вимірювання температури полум'я термоперетворювачами з захисними кожухами і потрібним наступним її коригуванням до фактичного значення при реалізації алгоритму методу експрес-контролю теплоти згоряння природного газу. Оцінено кількісне значення методичної похибки при застосуванні різних термоперетворювачів із захисними кожухами, яке не перевищує $\pm 1,6$ %. Обґрунтовано можливість реалізації пристрою експрес-контролю теплоти згоряння природного газу шляхом використання інформативного параметра – температури згоряння досліджуваних газів. Експериментально підтверджено зростання температури полум'я досліджуваних газів із зростанням їх теплоти згоряння. Встановлено необхідність подальшого дослідження оптимізаційних конструктивних характеристик пальників і робочих умов спалювання досліджуваних газів для проведення експрес-контролю їх теплоти згоряння.

3.4 Прикладні аспекти застосування вимірювального контролю теплоти згоряння в сучасних засобах обліку природного газу

Одним із напрямків покращення обліку природного газу побутовими лічильниками є застосування в них елементів SMART-технологій. Серед перших європейських виробників таких лічильників є фірма ТМ Pietro Fiorentini, продукція якої вже використовується в низці областей України [103]. Основними їхніми перевагами є багатofакторний інформаційний облік спожитого природного газу (різні часові інтервали обліку, оперативне добове балансування газу, передача інформації про аварійні ситуації, можливість запровадження багатотарифного обліку, електронна температурна корекція), а

також дистанційне керування постачанням газу, наявність механізму запобігання несанкціонованих втручань, оперативне виявлення втрат газу в мережі та ін. Свідченням актуальності впровадження SMART-лічильників є їх розробка в Україні, зокрема, ТОВ «Самгаз» (м. Рівне), які акцент роблять на вдосконаленні інформаційного забезпечення цих лічильників, насамперед про облік спожитого газу і передавання інформації про його споживання [104].

З врахуванням сьогоденних вимог до обліку природного газу, який повинен здійснюватися в одиницях енергії [1], що вже практично запроваджено при роботі з побутовими споживачами, на наш погляд, доцільно застосувати нові вимірювальні технології в побутових лічильниках газу. Вони повинні би діагностувати про якість природного газу, а можливо також вимірювати його калорійність. На даний час авторам з літературних джерел не відомо про можливість застосування таких вимірювальних технологій у побутових лічильниках газу.

Розроблений побутовий лічильник газу запровадженням елементів SMART-технологій, які би могли здійснювати облік природного газу із діагностуванням фактичної калорійності або з вимірюванням її значення [105].

Розроблений SMART-лічильник передбачає конструктивне вдосконалення ПЛГ шляхом його додаткового обладнання спеціальними вимірювальними термоанемометричними давачами і блоками опрацювання інформації [106].

У лічильнику газу, який містить корпус з вхідним та вихідним отворами, вимірювальний механізм з електронним перетворювачем вимірюваного об'єму газу, патрубок вхідного отвору обладнаний двообмотковим кільцеподібним термочутливим давачем, який розміщений на теплоізольованій підкладці з внутрішньої поверхні патрубку. При цьому одна обмотка давача під'єднана до блоку визначення теплоти згоряння, а друга його обмотка під'єднана до блоку вимірювання температури природного газу. ПЛГ також додатково укомплектований блоком обчислення енергії вимірюваного

природного газу, який під'єднаний до блоку визначення теплоти згоряння газу і вузлів вимірювання температури і тиску газу в лічильнику.

Крім того, в лічильнику газу передбачається можливість його обладнання пристроєм сигналізації перевищення заданого допустимого діапазону зміни теплоти згоряння природного газу стосовно верхнього і нижнього її значень, який зв'язаний з блоками визначення теплоти згоряння, температури і тиску природного газу в лічильнику.

Розміщення у патрубку вхідного отвору двообмоткового термочутливого давача забезпечує можливість функціонування одної її обмотки в режимі термоанемометричного перетворювача, чим досягається визначення теплоти згоряння ПГ за його теплофізичними властивостями з використанням відповідного блоку визначення теплоти згоряння ПГ. При цьому друга обмотка термочутливого давача функціонує в режимі термометра опору, що забезпечує вимірювання відповідним блоком температури обліковуваного ПГ, а також забезпечує можливість коригування визначеної енергії об'єму ПГ з приведенням до стандартних умов вимірюваного об'єму газу, чим досягається отримання нормованих результатів обчислень в одиницях енергії.

Наявність в лічильнику газу блоку обчислення енергії вимірюваного ПГ, який під'єднаний до блоку визначення теплоти згоряння ПГ і електронного перетворювача вимірюваного об'єму газу забезпечує реалізацію функціонування лічильника згідно основного призначення – обчислення енергії, а електронне виконання цих блоків дозволяє підвищити точність вимірювання за рахунок зменшення тривалості вимірювального циклу, а також забезпечує можливість визначення енергії при нестационарних потоках газу.

Обладнання лічильника газу пристроєм сигналізації перевищення заданого допустимого діапазону зміни теплоти згоряння ПГ стосовно верхнього і нижнього її значень, дозволяє реалізувати у лічильнику додаткову функцію діагностування якості ПГ шляхом контролю за неперевищенням

допустимих границь зміни теплоти згоряння ПГ, що розширяє функціональні можливості приладу і його область застосування.

3.5 Розроблення еталонної установки для калібрування торцевих звужувальних пристроїв

Відомою є трубопоршнева установка для градуювання і повірки лічильників і витратомірів газу, яка містить калібрований вимірювальний трубопровід з поршневим розділювачем (ПР), споряджений кроковим приводом з регульованою швидкістю руху поршня, гофровану еластичну ділянку труби, що одною стороною герметично приєднана до ПР, а другою - до торця каліброваного вимірювального трубопроводу зі сторони крокового приводу, та джерело стисненого повітря, яке з'єднане з внутрішньою порожниною гофрованої ділянки труби. На вимірювальному трубопроводі розміщені детектори положення ПР, а вихідна ділянка вимірювального трубопроводу під'єднана до досліджуваного приладу [107]. В цій установці, незважаючи на те, що джерело стисненого повітря герметично розділене з внутрішньою порожниною вимірювального каліброваного трубопроводу, не виключені перетоки газу через ущільнення ПР до зовнішньої поверхні гофрованої еластичної ділянки труби, що за таких обставин приводить до зниження точності установки. Крім того, виконання гофрованої еластичної ділянки труби є конструктивно складним, що в цілому ускладнює конструкцію поршневої установки.

Іншим технічним рішенням є калібрувальна поршнева установка одиниць об'єму та об'ємної витрати газу на реальному середовищі при високих тисках, що містить циліндр з поршневим розділювачем (ПР), який приводиться в рух гідравлічною помпою, що заміщає газ мастилом з буферної ємності до циліндра, при цьому ПР споряджений штоком, який закріплений з двох сторін поршня з можливістю забезпечення рівномірного ходу поршня та усунення перекосу. Установка також споряджена пристосуванням для

підключення до магістралі з можливістю здійснення заповнення газом при високому тиску з магістралі і забезпечення відсутності контакту газу з мастилом [108]. Однак ця установка для досягнення відсутності контакту газу з мастилом і виключення перетоків газу через ущільнення ПР зумовлює високі технологічні вимоги до виготовлення внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу (циліндра), який розточують по високому класу точності з мінімальною еліпсністю і шорсткістю. Це робить установку дорогавартісною. Поряд з цим ущільнюючі манжети ПР зношуються у міру експлуатації установки, що вимагає періодичної їх заміни і перевірки метрологічних характеристик і, як наслідок, призводить до зростання її експлуатаційних затрат. Крім того, суттєве конструктивне ускладнення установки зумовлює необхідність герметизації рухомого штока ПР з двох сторін (торців) каліброваного циліндра. Такого типу газорідинні установки характеризуються обмеженістю за верхнім діапазоном робочих витрат внаслідок суттєвих конструктивно-технологічних складностей забезпечення відтворення гідравлічною помпою великих витрат рідини.

В розробленій калібрувальній поршневій установці для лічильників і витратомірів газу поршневий розділювач виконаний у вигляді пустотілого еластичного тора з наперед заданим внутрішнім тиском вище статичного тиску у вимірювальному трубопроводі, при цьому пустотілий еластичний тор споряджений ніпельним пристроєм, вмонтованим у його стінці [109].

Виконання ПР у вигляді пустотілого еластичного тора дозволяє вилучити тертя ковзання ущільнення поршневого розділювача і замінити його тертям кочення. При цьому для усунення явища зминання тора або зміни його форми внутрішній тиск у торі наперед задають більшим від статичного тиску у вимірювальному трубопроводі, що досягається його попереднім наповненням від додаткового джерела стисненого газу. Досягнення цих умов реалізується спорядженням еластичного тора ніпельним пристроєм, вмонтованим у його стінці, який дозволяє за рахунок додаткового джерела стисненого газу задавати необхідний тиск всередині тора до досягнення його

форми і фізичних властивостей тертя-кочення, і забезпечувати герметизацію ПР при переміщенні всередині вимірювального трубопроводу. За цих умов зовнішня поверхня тора ПР при його переміщенні контактує методом перекочування з внутрішньою поверхнею вимірювального трубопроводу. Таке ж явище перекочування має місце і на внутрішній (осьовій у напрямку руху) поверхні тора.

Наявність ніпельного пристрою у стінці еластичного тора дозволяє не тільки попередньо задавати але й регулювати значення внутрішнього тиску у вимірювальному трубопроводі, зокрема, зменшувати його при необхідності виймання ПР із трубопроводу для перевірки його технічного стану, або виконання ремонтних робіт та його заміни. З урахуванням обставини, що еластичний тор при обертанні зазнає значних деформацій стиснення і розтягування, він виготовляється з досить еластичних матеріалів, які забезпечують досягнення зазначених необхідних деформацій, як приклад, із бутилпропілену. Застосування поршневого розділювача у вигляді тора не вимагає додаткової обробки внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу, що дозволяє як останній використовувати труби, які серійно виготовляються. Цим суттєво зменшуються технологічні вимоги щодо допусків на виготовлення установки, які стосуються циліндричності, еліпсності і шорсткості внутрішньої поверхні вимірювального трубопроводу. Таке запропоноване конструктивне виконання ПР знижує вартість виготовлення установки в цілому, а також експлуатаційні витрати за рахунок усунення періодичних замін ПР, пов'язаних із ковзанням тертьової поверхні.

Наявність обертово-поступального руху ПР у вимірювальному трубопроводі без примусового його переміщення і відсутності при цьому тертя ковзання ПР сприяє підвищенню стабільності швидкості лінійного переміщення еластичного тора, чим досягається підвищення точності установки. Водночас відсутність додаткових вузлів ущільнення, зокрема рухомого штока ПР у торцях вимірювального трубопроводу для забезпечення високоточного центрування ПР під час руху, що в запропонованій установці

досягається самоцентруванням ПР, забезпечує досягнення спрощення конструкції установки. Поряд з цим виконання ПР у вигляді еластичного тора з малим коефіцієнтом тертя кочення, яким замінено тертя ковзання поршня, дозволяє установці функціонувати на низьких і великих робочих тисках і використовувати при цьому різні види робочих газових середовищ (повітря, природний газ та інші газові суміші). Заміна тертя ковзання ПР на тертя кочення реалізує практично однакові гідродинамічні явища при прямому і реверсному русі поршня, функції якого виконує тор, що дозволяє реалізувати вимірювальний цикл установки за двох напрямків руху ПР, чим досягається вилучення допоміжних операцій при вимірюваннях, а також підвищення продуктивності установки.

Установка (рис. 3.17) містить калібрований за об'ємом вимірювальний трубопровід 1, поршневий розділювач у вигляді порожнистого еластичного тора 2 з внутрішньою порожниною 3 і ніпельним пристроєм 4 у його стінці, а також два детектори 5 і 6 положення ПР, які керують роботою відлікового пристрою 7. До одного із входів вимірювального трубопроводу 1 приєднане реверсивне джерело витрати 8, а до іншого - випробовуваний прилад 9 (лічильник або витратомір), частотний вихід якого приєднаний до відлікового пристрою 7.

Установка працює так. У початковому стані поршневий розділювач 2 знаходиться в крайньому лівому положенні вимірювального трубопроводу 1. При цьому стиснутий стан еластичного тора 2 забезпечує герметичне перекриття вимірювального трубопроводу 1, що досягається попереднім заданням за допомогою джерела 8 і ніпельного пристрою 4 необхідного статичного тиску у внутрішній порожнині 3 тора 2, який задають вищим статичного тиску у вимірювальному трубопроводі 1. Досягнення цієї умови реалізують експериментальним шляхом при попередніх метрологічних дослідженнях установки. При включенні джерела витрати 8 на режим відтворення заданої витрати газу ПР у вигляді тора 2 починає переміщуватися вздовж вимірювального трубопроводу 1, проходячи послідовно повз двох

детекторів його положення 5 і 6. За відомим значенням попередньо визначеного контрольного об'єму газу при метрологічних дослідженнях установки, який фіксують відліковим пристроєм 7 за час руху ПР між першим 5 і другим 6 детекторами, визначають дійсне значення витрати і порівнюють її з показами каліброваного або повірюваного витратоміра 9.

При калібруванні або повірці лічильників газу здійснюють порівняння контрольного об'єму газу установки з об'ємом газу, який виміряв досліджуваний лічильник за час пропуску газу через нього. Рух тора ПР 2 вздовж вимірювального трубопроводу 1 відбувається під дією створюваного джерелом витрати перепаду тисків. При цьому еластичний тор 2 розділювача обертається навколо замкнутої кільцевої осі, що проходить через центр його поперечного перерізу, як це зазначено стрілками на кресленні. Після цього включають джерело витрати 8 у реверсному режимі, що приводить до зворотного переміщення тора ПР 2 у вимірювальному трубопроводі 1. При цьому потік газу проходить по байпасній лінії випробовуваного приладу 9 (на кресленні не вказана). Конструкція установки також може передбачати відповідну комутацію допоміжних трубопроводів установки за допомогою перекивних кранів (на кресленні не вказано), за якої при реверсному русі тора ПР 2 потік газу через прилад 9 буде протікати у прямому, тобто робочому напрямку. За таких умов реверсний режим роботи поршневої установки може бути вимірювальною метрологічною операцією.

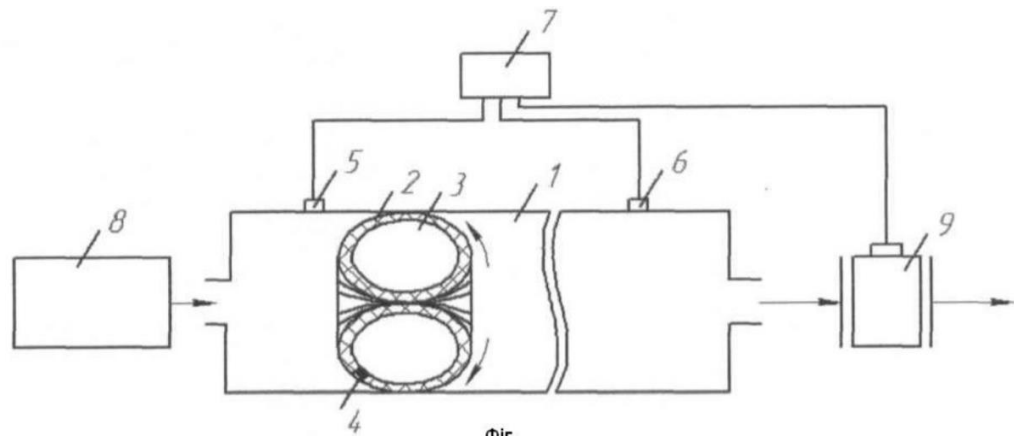


Рисунок 3.17 – Схема еталонної установки для калібрування торцевих звужувальних перетворювачів

3.6 Висновки до третього розділу

Розроблене технічне рішення методу визначення теплоти згорання природного газу, який реалізований на базі відповідної інформаційно-вимірювальної системи.

Розглянуто особливості конструктивного і технічного рішення лабораторного стенду для експериментальних досліджень методу вимірювання теплоти згорання природного газу за його температурою спалювання. Експериментально досліджено вплив якісного і кількісного складу газових сумішей на температуру полум'я досліджуваного газу за різних значень витрати газу і зміни умов його згорання.

Дослідження проводилися за умов згорання природного газу теплотворної здатності $35,3 \text{ МДж/м}^3$ (8431 ккал/м^3) на витратах до $9,7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ ($0,35 \text{ м}^3/\text{год}$) і газоподібного стану пропан-бутанової суміші скрапленого газу калорійністю $46,8 \text{ МДж/м}^3$ (11178 ккал/м^3) на витратах до $6,9 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ ($0,25 \text{ м}^3/\text{год}$). При цьому згорання газу здійснювалося як з формуванням різних об'ємних співвідношень додаткового повітря з досліджуваним газом (до 1,6 для природного газу і 2,2 для пропан-бутанової суміші) перед його спалюванням, та і без подавання всередину пальника додаткового повітря.

За результатами експериментальних досліджень встановлено зростання температури спалювання газу із зростанням його калорійності. При цьому експериментально підтверджено збільшення температури спалювання газу із збільшенням об'ємної доли додаткового повітря у суміші, яка згоряє. Водночас встановлено меншу чутливість до зміни витрати досліджуваного газу за більших значень його робочих витрат, завдяки чому встановлено один із факторів оптимізації функціонування газових пальників у складі засобу вимірювання теплоти згорання природного газу.

Експериментальним шляхом здійснено вимірювання фактичної температури полум'я для умов лабораторного стенду і встановлено відмінність цієї температури полум'я від довідкових даних. Досліджено

нерівномірність температури полум'я вздовж його висоти, яка може сягати до 200 °С, що виявлено вимірюванням за допомогою мініатюрного безкорпусного температурного зонда. Виявлено можливість вимірювання температури полум'я термоперетворювачами з захисними кожухами і врахування цього фактору при калібруванні засобу вимірювання теплоти згоряння природного газу. Оцінено кількісне значення методичної похибки при застосуванні різних термоперетворювачів із захисними кожухами, яка не перевищує $\pm 1,6$ %.

За результатами експериментальних досліджень обґрунтовано можливість реалізації пристрою експрес-контролю теплоти згоряння природного газу шляхом використання інформативного параметра – температури згоряння досліджуваних газів. Експериментально підтверджено зростання температури полум'я досліджуваних газів із зростанням їх теплоти згоряння.

Встановлено необхідність подальшого дослідження оптимізаційних конструктивних характеристик пальників і робочих умов спалювання досліджуваних газів при експрес-контролі їх теплоти згоряння.

Розглянуто прикладні аспекти застосування вимірювального контролю теплоти згоряння в сучасних лічильниках природного газу, які стосуються застосуванням в них елементів SMART-технологій, які забезпечують отримання результатів обліку природного газу в одиницях енергії і забезпечують можливість діагностування при цьому якості природного газу шляхом контролю за неперевищенням допустимих границь зміни теплоти згоряння природного газу.

Викладено суть патентозахищеної поршневої витратовимірювальної еталонної установки для калібрування торцевих звужувальних пристроїв перетворення витрати, яка може бути реалізована за малих об'ємних витрат з використанням робочого середовища природного газу.

РОЗДІЛ 4 МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОТИ ЗГОРЯННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

4.1 Дослідження впливу вмісту азоту і вуглекислого газу на похибку визначення теплоти згоряння природного газу

В роботі [119] на базі статистичного аналізу досліджено взаємозв'язок між теплотою згоряння природного газу і об'ємним вмістом його компонентів. Встановлено, що значення об'ємного вмісту має випадковий характер і практично не залежить від об'ємного вмісту інших компонентів природного газу. З врахуванням того, що вміст азоту можна визначити тільки хроматографічним методом, то при застосуванні методів, які реалізують опосередковане визначення теплоти згоряння природного газу, може бути похибка, яка зумовлена відсутністю кількісного значення азоту. Одночасно досить складними і обмеженими в практичній реалізації є прилади, які на сьогодні визначають вміст вуглекислого газу у природному газі. Тому доцільним є вивчення впливу вмісту азоту та вуглекислого газу на похибку визначення теплоти згоряння природного газу.

Як відомо, теплоту згоряння можна визначати на базі відомого компонентного складу природного газу. Однак, для моделювання такий метод є складний, так як вуглеводневі компоненти є різними за числовими значеннями. Тому за основу скористаємося фізичним параметром газу – густина за стандартних умов. Це дасть можливість використати для моделювання такий алгоритм визначення теплоти згоряння [69]:

$$H = 85,453 - (0,52190\rho_C + 0,04242 - 0,65197x_{N_2} - x_{CO_2}), \quad (4.1)$$

де H – нижча теплота згоряння природного газу, МДж/м³; ρ_C – густина природного газу за стандартних умов; x_a , x_y – мольні долі (у відносних одиницях) вмісту азоту і вуглекислого газу у природному газі відповідно.

Відносна похибка ε впливу вмісту неуглеводневих компонентів на

теплоту згоряння природного газу визначалася за формулами:

$$\varepsilon = (H - H_{0N_2} / H_{0N_2}) \cdot 100\%, \quad (4.2)$$

де H_{0N_2} – теплота згоряння природного газу без наявності азоту; H – теплота згоряння природного газу з вмістом азоту та з вмістом вуглекислого газу.

Для математичного моделювання теплоти згоряння числове значення густини природного газу задавали в діапазоні (0,65 – 0,8) кг/м³, мольний вміст азоту задавався дискретними значеннями 0,005 (0,5%), 0,01 (1%) та 0,02 (2%), а мольний вміст вуглекислого газу 0%, 0,5% та 1% відповідно.

Графічна ілюстрація зміни відносної похибки визначення теплоти згоряння для різної густини природних газів свідчить про зростання похибки на 2,57% при збільшенні мольного вмісту азоту на 1,5% за умови відсутності вуглекислого газу (рис. 4.1 а) та про зростання цієї похибки на 2,63% при збільшенні мольного вмісту азоту на 1,5% за умови мольної долі 1% вуглекислого газу (рис. 4.1 б) для газу з густиною 0,65 кг/м³.

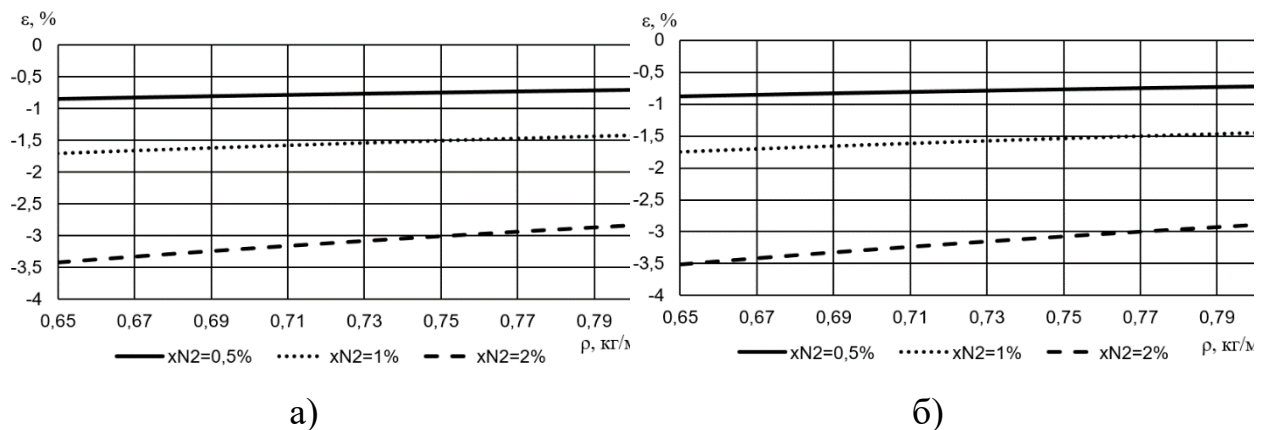


Рисунок 4.1 – Графічна ілюстрація зміни відносної похибки ε визначення теплоти згоряння для різної густини природних газів при мольному вмісті азоту 0,5%, 1% та 2% без наявності CO_2 (а) та при вмісті CO_2 1% (б)

Крім того, збільшення густини природного газу призводить до зменшення похибки визначення теплоти згоряння від неврахування вмісту азоту, що характеризує зменшення від'ємної похибки, наприклад, для газу з

мольним вмістом азоту 2% від 3,42 % для газу з густиною 0,65 кг/м³ до 2,84% для газу з густиною 0,8 кг/м³. Моделювання показало, що вплив азоту характеризується систематичною від'ємною похибкою на визначення теплоти згорання газу.

4.2 Дослідження методичної похибки експериментального оцінювання конструктивного коефіцієнта пальника при визначенні теплоти згорання природного газу

Як вже було вказано раніше запропонований спосіб для експрес-визначення теплоти згорання природного газу [78], базується на вимірюванні температури спалюваного у пальнику газу. При реалізації способу забезпечується згорання суміші постійного об'ємного співвідношення досліджуваного газу з повітрям із застосуванням у конструкції пальника додаткового забірної пристрою навколишнього повітря і проградуйованого по витраті торцевого звужувального пристрою, через який здійснюється витік газу для спалювання. Для оцінки можливостей і сфери застосування цього способу необхідно здійснити метрологічний аналіз такого методу вимірювання теплоти згорання природного газу. Тому проведено дослідження методичної похибки при експериментальному оцінюванні конструктивного коефіцієнта пальника для реалізації експрес-контролю теплоти згорання природного газу.

Алгоритм реалізації способу експрес-контролю записується формулою [78].

$$H_c = \frac{(A \cdot T - B \cdot K_1 \cdot \varphi)}{q_c \cdot \tau} \quad (4.3)$$

де H_c – нижча теплота згорання природного газу, A – конструктивний коефіцієнт виконання пальника, T – вимірювана температура полум'я пальника, B – питома теплота пароутворення води (вологи повітря

навколишнього середовища), K_1 – конструктивний коефіцієнт інжекторного пристрою пальника, φ – абсолютна вологість повітря навколишнього середовища, q_c – об'ємна витрата газу через торцевий звужувальний пристрій за стандартних умов, τ – тривалість пропуску об'єму газу через пальник.

Реалізація методу здійснюється в два етапи, перший з яких передбачає визначення конструктивного коефіцієнта пальника під час його калібрування, а наступний етап є вимірювальним, при якому відбувається використання конструктивного коефіцієнта як відомої величини при розрахунку теплоти згорання природного газу.

В даному дослідженні зупинимося на метрологічному аналізі першого етапу, тобто при визначенні конструктивного коефіцієнта пальника. При цьому значення конструктивного коефіцієнта виконання пальника A визначають під час попереднього калібрування пальника, на якому проводять вимірювання, щонайменше на трьох сумішах природного газу відомої теплоти згорання, як функцію від робочих параметрів згорання природного газу.

З врахуванням виразу $K_1 = K_i \cdot q_c \cdot \tau$ (K_i – коефіцієнт інжекції інжекторного пристрою пальника) алгоритм (4.3) подамо у вигляді (2.16).

Оскільки при калібруванні пальника необхідно кількісно оцінити значення конструктивного коефіцієнта A , то на підставі (2.16) вираз для його обчислення можна подати у вигляді:

$$A = \frac{H_c \cdot q_c \cdot \tau}{T} + \frac{B \cdot K_i \cdot \varphi \cdot q_c \cdot \tau}{T} \quad (4.4)$$

Така форма подання виразу (4.4) дає можливість сформулювати дві складових методичної похибки Δ_A , одна з яких Δ_{A0} формується на базі першої складової формули (4.4) і характеризує основну похибку, а друга складова похибки Δ_{Ad} формується на базі другої частини виразу (4.4) і розглядається як додаткова похибка, оскільки вона залежить від вологості навколишнього середовища (повітря), яке приймає участь у спалюванні газу.

На підставі двох складових формули (4.4) сумарна методична похибка визначення конструктивного коефіцієнта виконання пальника запишеться виразом:

$$\Delta_A = \Delta_{A0} + \Delta_{AD} \quad (4.5)$$

Кожну із складових похибки у формулі (4.5) можна розглядати як похибку, яка має місце при опосередкованих вимірюваннях. Оскільки число інформативних параметрів у кожній складовій становить чотири і більше, то з врахуванням рівномірного закону розподілу інструментальних похибок вимірювальних засобів можна скористатися формулою:

$$\Delta_A = \pm \frac{K_q}{\sqrt{3}} \cdot \left[\sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2} + \sqrt{\sum_{j=1}^m \Delta_j^2} \right] \quad (4.6)$$

де Δ_i , Δ_j – граничні значення оцінки похибок вимірювання i -их та j -их параметрів (аргументів) кількість яких становить n і m відповідно; K_q – квантиль, який для кількості аргументів від чотирьох і більше при довірчій ймовірності 0,95, становить $K_q=1,96$.

Конкретизація формули (4.6) стосовно виразу (4.4) набуває вигляду:

$$\Delta_A = \pm \frac{K_q}{\sqrt{3}} \cdot \left[\sqrt{\Delta_{H_c}^2 + \Delta_T^2 + \Delta_{q_c}^2 + \Delta_\tau^2} + \sqrt{\Delta_B^2 + \Delta_{K_i}^2 + \Delta_\varphi^2 + \Delta_T^2 + \Delta_{q_c}^2 + \Delta_\tau^2} \right] \quad (4.7)$$

На підставі довідкових даних і метрологічних характеристик застосовуваних вимірювальних засобів, які застосовуються при калібруванні пальника, приймаємо такі значення граничних похибок: $\Delta_{H_c}=\pm 1\%$; $\Delta_{q_c}=\pm 1,5\%$; $\Delta_B=0$ (вибирається з довідкових даних, що дозволяє знехтувати цією похибкою); $\Delta_{K_i}=\pm 0,2\%$ (враховується тільки зміна витрати повітря, яке використовується при спалюванні різної калорійності природного газу, що зумовлює зміну співвідношення між об'ємами газу і повітря); $\Delta_\varphi=\pm 1\%$ (похибка термогігрометра моделі TFA 305023).

Гранична похибка вимірювання температури визначається формулою:

$$\Delta_T = 0,5 \cdot \left(\frac{N_T}{273,15 + t} \right) \cdot S_T = \pm 0,68\% \quad (4.8)$$

де $S_T=1$ – клас точності термометра; $N_T=1600$ К – діапазон шкали вимірювання термометра.

Гранична похибка вимірювання тривалості пропуску об'єму газу через пальник визначається з виразу:

$$\Delta_\tau = \frac{\varepsilon_\tau}{\tau} \cdot 100\% = \pm 5,55 \cdot 10^{-3}\% \quad (4.9)$$

де $\varepsilon_\tau=0,1$ с – абсолютна похибка вимірювання часу.

Для кількісної оцінки похибки Δ_A задаємося такими значеннями параметрів при калібруванні пальника: $H_c=38 \cdot 10^6$ Дж/м³; $q_c=0,016$ м³/год; $B=2258,2 \cdot 10^3$ Дж/кг; $K_i=9,52$ м³/м³; $\varphi=10,27 \cdot 10^{-3}$ кг/м³; $\tau=180$ с; $t=800^\circ\text{C}$.

Після підстановки числових значень складових похибки у (4.7) отримаємо $\Delta_A=\pm 1,54\%$.

Кількісний метрологічний аналіз визначення конструктивного коефіцієнта пальника підтверджує можливість практичної реалізації нового методу експрес-контролю теплоти згорання природного газу буде характеризуватися достатньою простотою при одночасному досягненні необхідної для практики точності вимірювань.

4.3 Метрологічний аналіз експрес-контролю теплоти згорання природного газу

Алгоритм функціонування експрес-контролю теплоти згорання природного газу за формулою (2.16) можна записати у вигляді:

$$H_c = \frac{A \cdot T}{q \cdot \tau} - B \cdot K_i \cdot \varphi \quad (4.10)$$

Така форма подання виразу (4.10) дає можливість сформулювати дві складових методичної похибки Δ_H , одна з яких Δ_{H1} формується на базі першої

складової формули (4.10). Друга складова похибки Δ_{H2} формується на базі другої частини виразу (4.10), оскільки вона залежить від вологості навколишнього середовища (повітря), яке приймає участь у спалюванні газу.

На підставі двох складових формули (4.10), а також з врахування зміни коефіцієнта A від теплоти згорання природного газу при експериментальному визначенні цього параметра (калібрування пристрою), сумарна методична похибка експрес-контролю теплоти згорання природного газу запишеться виразом:

$$\Delta_{H_c} = \Delta_{H1} + \Delta_{H2} + \Delta_{HA} \quad (4.11)$$

де Δ_{HA} – апроксимаційна похибка калібрування пального, яка становить $\pm 0,2\%$.

Кожну із перших двох складових похибки у формулі (4.11) можна розглядати як похибку, яка має місце при опосередкованих вимірюваннях. Тому можна скористатися формулою:

$$\Delta_{H_c} = \left(\begin{array}{l} \sqrt{\left(\frac{\partial H}{\partial A} \cdot \Delta_A\right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial T} \cdot \Delta_T\right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial q} \cdot \Delta_q\right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial \tau} \cdot \Delta_\tau\right)^2} + \\ + \sqrt{\left(\frac{\partial H}{\partial B} \cdot \Delta_B\right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial K_i} \cdot \Delta_{K_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial \varphi} \cdot \Delta_\varphi\right)^2} + \Delta_{HA} \end{array} \right) \quad (4.12)$$

де $\partial H/\partial A$, $\partial H/\partial T$, $\partial H/\partial q$, $\partial H/\partial \tau$, $\partial H/\partial B$, $\partial H/\partial K_i$, $\partial H/\partial \varphi$ – коефіцієнти впливу для розрахунку похибок параметрів A , T , q , τ , B , K_i , φ відповідно.

На підставі довідкових даних, розрахованих вище похибок і метрологічних характеристик застосовуваних вимірювальних засобів, які застосовуються при роботі пристрою для експрес-контролю, приймаємо такі значення граничних похибок для складових у (4.12): $\Delta_q = \pm 1,5\%$; $\Delta_B = 0$ (вибирається з довідкових даних, що дозволяє знехтувати цією похибкою); $\Delta_{K_i} = \pm 0,2\%$; $\Delta_\varphi = \pm 1\%$, $\Delta_A = \pm 1,54\%$. Значення коефіцієнтів впливу становлять $\partial H/\partial A = 1,014 \cdot 10^6$ К/м³, $\partial H/\partial T = 3,542 \cdot 10^4$ Дж/(К·м³), $\partial H/\partial q = -6,375 \cdot 10^{12}$ Дж·с/м⁶,

$\partial H/\partial \tau = -1,574 \cdot 10^5 \text{ Дж}/(\text{с} \cdot \text{м}^3)$, $\partial H/\partial B = -0,098 \text{ кг}/\text{м}^3$, $\partial H/\partial K_f = -2,319 \cdot 10^4 \text{ Дж}/\text{м}^3$,
 $\partial H/\partial \varphi = -2,15 \cdot 10^7 \text{ Дж}/\text{кг}$.

Для кількісної оцінки похибки ΔH_c задаємося такими значеннями параметрів при вимірюванні теплоти згорання природного газу: $A=28,33 \text{ Дж}/\text{К}$, $q=0,016 \text{ м}^3/\text{год}$; $B=2258,2 \cdot 10^3 \text{ Дж}/\text{кг}$; $K_f=9,52 \text{ м}^3/\text{м}^3$; $\varphi=10,27 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{м}^3$; $\tau=180 \text{ с}$; $T=1070 \text{ К}$.

В результаті отримаємо такі значення похибки визначення теплоти згорання природного газу $\Delta H_c=0,95 \text{ МДж}/\text{м}^3$, що становить близько $\pm 2,5\%$.

4.4 Оцінювання невизначеності при експрес-контролі теплоти згорання природного газу

Для оцінювання невизначеності при експрес-контролі теплоти згорання природного газу запишемо нижчу теплоту згорання H природного газу при застосуванні вказаного способу алгоритмом (2.16)

Процес визначення теплоти згорання природного газу за допомогою такого пристрою складається з двох етапів. Перший передбачає визначення конструктивного коефіцієнта A пальника під час його калібрування. Другий етап є вимірювальним, при якому відбувається використання конструктивного коефіцієнта A як відомої величини при розрахунку теплоти згорання природного газу.

Враховуючи, що процес згорання природного газу для його різних компонентних складів буде впливати на значення коефіцієнта A , то спочатку здійснюють попередній підготовчий етап. При його реалізації експериментальним шляхом визначають не менше, ніж на трьох сумішах природного газу відомої теплоти згорання, залежність між відомим значенням теплоти згорання природного газу і температурою полум'я. При цьому враховують виміряні значення надлишкового тиску, температури, густини і вологості природного газу і виміряних значень тиску, температури і вологості повітря навколишнього середовища. Це дає можливість апроксимувати

закономірність зміни коефіцієнта A при роботі пальника при різних складах природного газу і для різних значень робочих параметрів досліджуваного газу і навколишнього середовища.

При калібруванні пальника необхідно кількісно оцінити значення конструктивного коефіцієнта A , тому на підставі (2.16) вираз для його обчислення можна подати у вигляді (4.4). Така форма подання виразу (4.4) дає можливість сформулювати дві складових невизначеності $u_B(A)$. Одна з яких $u_B(A)_0$ формується на базі першої складової формули (4.4), а друга складова невизначеності $u_B(A)_D$ формується на базі другої частини виразу (4.4).

На підставі двох складових формули (4.4) невизначеність визначення конструктивного коефіцієнта виконання пальника запишеться виразом:

$$u_B(A) = u_B(A)_0 + u_B(A)_D \quad (4.13)$$

Конкретизація формули (4.18) стосовно виразу (4.4) набуває вигляду:

$$u_B(A)_0 = \left[\left(\frac{\partial A}{\partial H_c} \cdot u_B(H) \right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial q_c} \cdot u_B(q) \right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial \tau} \cdot u_B(\tau) \right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial T} \cdot u_B(T) \right)^2 \right]^{0,5} \quad (4.14)$$

$$u_B(A)_D = \left[\left(\frac{\partial A}{\partial B} \cdot u_B(B) \right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial K_I} \cdot u_B(K_I) \right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial \tau} \cdot u_B(\tau) \right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial T} \cdot u_B(T) \right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial q_c} \cdot u_B(q) \right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial \varphi} \cdot u_B(\varphi) \right)^2 \right]^{0,5} \quad (4.15)$$

де $\partial A/\partial H_c$, $\partial A/\partial q_c$, $\partial A/\partial T$, $\partial A/\partial \tau$, $\partial A/\partial B$, $\partial A/\partial K_I$, $\partial A/\partial \varphi$, $u_B(H_c)$, $u_B(q_c)$, $u_B(T)$, $u_B(\tau)$, $u_B(B)$, $u_B(K_I)$, $u_B(\varphi)$ – вагові коефіцієнти впливу та стандартні невизначеності параметрів H_c , q_c , τ , T , B , K_I , φ відповідно.

Значення вагових коефіцієнтів та невизначеностей для формул (4.14)-(4.15) подано в табл. 4.1-4.3.

Таблиця 4.1 – Стандартні невизначеності

Позначення	Формули для розрахунку	Числові значення
$u_B(H)$	$\frac{2 \cdot \delta H \cdot H}{100 \cdot \sqrt{36}}$	$1,267 \cdot 10^5$ Дж/м ³
$u_B(q)$	$\frac{2 \cdot \delta q \cdot q}{100 \cdot \sqrt{36}}$	$2,222 \cdot 10^{-8}$ м ³ /ГОД
$u_B(T)$	$\frac{2 \cdot \delta T \cdot T}{100 \cdot \sqrt{36}}$	0,167 К
$u_B(\tau)$	$\frac{2 \cdot \delta \tau \cdot \tau}{100 \cdot \sqrt{36}}$	0,033 с
$u_B(B)$	$\frac{2 \cdot \delta B \cdot B}{100 \cdot \sqrt{24}}$	1843,381 Дж/кг
$u_B(\varphi)$	$\frac{2 \cdot \delta \varphi \cdot \varphi}{100 \cdot \sqrt{36}}$	$3,423 \cdot 10^{-5}$ кг/м ³
$u_B(K_I)$	$\frac{2 \cdot \delta K_I \cdot K_I}{100 \cdot \sqrt{36}}$	$6,347 \cdot 10^{-3}$ м ³ /м ³

Таблиця 4.2 – Вагові коефіцієнти для розрахунку $u_B(A)_0$

Позначення	Формули для розрахунку	Числові значення
$\frac{\partial A}{\partial H}$	$\frac{\tau \cdot q}{T}$	$1,143 \cdot 10^{-6}$ м ³ /К
$\frac{\partial A}{\partial q}$	$\frac{H \cdot \tau}{T}$	$9,771 \cdot 10^6$ (Дж·с)/(м ³ ·К)
$\frac{\partial A}{\partial T}$	$-\frac{H \cdot \tau \cdot q}{T^2}$	-0,062 Дж/кг
$\frac{\partial A}{\partial \tau}$	$\frac{H \cdot q}{T}$	0,241 Дж/(К·с)

Таблиця 4.3 – Вагові коефіцієнти для розрахунку $u_B(A)_D$

Позначення	Формули для обчислень	Числові значення
$\frac{\partial A}{\partial q_c}$	$\frac{B \cdot K_I \cdot \varphi \cdot \tau}{T}$	$9,828 \cdot 10^6$ (Дж·с)/(м ³ ·К)
$\frac{\partial A}{\partial T}$	$-\frac{B \cdot K_I \cdot \varphi \cdot \tau \cdot q}{T^2}$	-0,062 Дж/кг
$\frac{\partial A}{\partial \tau}$	$\frac{B \cdot K_I \cdot \varphi \cdot q}{T}$	0,243 Дж/(К·с)
$\frac{\partial A}{\partial B}$	$\frac{K_I \cdot \varphi \cdot \tau \cdot q_c}{T}$	$1,117 \cdot 10^{-7}$ кг/К
$\frac{\partial A}{\partial \varphi}$	$\frac{B \cdot K_I \cdot \tau \cdot q}{T}$	24,569 (Дж·м ³)/(кг·К)
$\frac{\partial A}{\partial K_I}$	$\frac{B \cdot \varphi \cdot \tau \cdot q_c}{T}$	0,027 Дж/К

На підставі довідкових даних, розрахованих вище невизначеностей і метрологічних характеристик застосовуваних вимірювальних засобів, які застосовуються при роботі пристрою для експрес-контролю, приймаємо такі значення граничних похибок для складових: $\delta_H = \pm 1\%$; $\delta_q = \pm 1,5\%$; $\delta_B = 0,02\%$; $\delta_{K_I} = \pm 0,2\%$; $\delta_\varphi = \pm 1\%$, $\Delta_T = 0,5^\circ\text{C}$; $\Delta_\tau = 0,1\text{с}$.

Для кількісної оцінки похибки невизначеності $u_B(A)$, задаємося такими значеннями параметрів при калібруванні пальника: $H = 38 \cdot 10^6$ Дж/м³; $q = 0,016$ м³/год; $B = 2258,2 \cdot 10^3$ Дж/кг; $K_I = 9,52$ м³/м³; $\varphi = 10,27 \cdot 10^{-3}$ кг/м³; $\tau = 180$ с; $t = 700$ °С.

Після підстановки числових значень складових невизначеності у (4.13)-(4.15) отримаємо $u_B(A) = 0,263$, а відносна стандартна невизначеність розрахунку коефіцієнта пальника становить $\pm 0,602\%$.

Алгоритм функціонування експрес-контролю теплоти згорання природного газу за формулою (2.16) можна записати у вигляді (4.10)

Така форма подання виразу (4.10) дає можливість сформулювати дві складових невизначеності $u_B(H)$, одна з яких $u_B(H)_1$ формується на базі першої складової формули (4.10), а друга складова невизначеності $u_B(H)_2$ формується на базі другої частини виразу (4.10).

На підставі двох складових формули (4.10), а також з врахування зміни коефіцієнта A від теплоти згорання природного газу при експериментальному визначенні цього параметра (калібрування пристрою), невизначеності експрес-контролю теплоти згорання природного газу запишеться виразом:

$$u_B(H) = u_B(H)_1 + u_B(H)_2 + u_B(H)_A \quad (4.16)$$

де $u_B(H)_A$ – невизначеність апроксимації калібрування пальника, яка на підставі проведених авторами експериментальних досліджень становить $\pm 0,3\%$.

Кожну із перших двох складових невизначеностей у формулі (4.16) можна розглядати як похибку, яка має місце при опосередкованих вимірюваннях. Тому можна скористатися формулою:

$$u_B(H) = \left(\left[\left(\frac{\partial H}{\partial A} \cdot u_B(A) \right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial T} \cdot u_B(T) \right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial q} \cdot u_B(q) \right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial \tau} \cdot u_B(\tau) \right)^2 \right]^{0,5} + \left[\left(\frac{\partial H}{\partial B} \cdot u_B(B) \right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial K_I} \cdot u_B(K_I) \right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial \varphi} \cdot u_B(\varphi) \right)^2 \right]^{0,5} + u_B(H)_A \right) \quad (4.17)$$

де $\partial H/\partial A$, $\partial H/\partial T$, $\partial H/\partial q$, $\partial H/\partial \tau$, $\partial H/\partial B$, $\partial H/\partial K_I$, $\partial H/\partial \varphi$, $u_B(A)$, $u_B(T)$, $u_B(q)$, $u_B(\tau)$, $u_B(B)$, $u_B(K_I)$, $u_B(\varphi)$, $u_B(H)_A$ – вагові коефіцієнти впливу та стандартні невизначеності параметрів A , T , q , τ , B , K_I , φ відповідно.

Таблиця 4.4 – Значення вагових коефіцієнтів та невизначеності $u_B(A)$
для розрахунку $u_B(H)$

Позначення	Формули для обчислень	Числові значення
$\frac{\partial H}{\partial A}$	$\frac{T}{\tau \cdot q}$	$8,75 \cdot 10^5 \text{ К/м}^3$
$\frac{\partial H}{\partial T}$	$\frac{A}{\tau \cdot q}$	$5,46 \cdot 10^4 \text{ Дж/(К} \cdot \text{м}^3)$
$\frac{\partial H}{\partial q}$	$-\frac{A \cdot T}{\tau \cdot q^2}$	$-8,6 \cdot 10^{12} \text{ Дж} \cdot \text{с/м}^6$
$\frac{\partial H}{\partial \tau}$	$-\frac{A \cdot T}{\tau^2 \cdot q}$	$-2,123 \cdot 10^5 \text{ Дж/(с} \cdot \text{м}^3)$
$\frac{\partial H}{\partial B}$	$-K_I \cdot \varphi$	$-0,098 \text{ кг/м}^3$
$\frac{\partial H}{\partial K_I}$	$-B \cdot \varphi$	$-2,19 \cdot 10^4 \text{ Дж/м}^3$
$\frac{\partial H}{\partial \varphi}$	$-K_I \cdot B$	$-2,15 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг}$
$u_B(A)$	$\frac{\delta H_A \cdot H_A}{100 \cdot \sqrt{3}}$	$6,582 \cdot 10^3 \text{ Дж/К}$

Для кількісної оцінки похибки ΔH_c задаємося такими значеннями параметрів при вимірюванні теплоти згорання природного газу: $A=43,681 \text{ Дж/К}$, $q=0,016 \text{ м}^3/\text{год}$; $B=2258,2 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$; $K_I=9,52 \text{ м}^3/\text{м}^3$; $\varphi=10,27 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$; $\tau=180 \text{ с}$; $T=700 \text{ }^\circ\text{C}$.

Після підстановки числових значень складових невизначеності у (4.17) отримаємо $u_B(H)=3,067 \cdot 10^5 \text{ МДж/м}^3$, а відносна стандартна невизначеність розрахунку теплоти згорання природного газу у відсотках буде становити $\pm 0,807\%$.

Для обчислення розширеної невизначеності визначення теплоти згорання природного газу H необхідно відносно стандартну невизначеність помножити на коефіцієнт охоплення k_0 для відповідної довірчої ймовірності. Приймаючи $k_0=2$ у відповідності до вибраної довірчої ймовірності $P=0,95$, отримаємо 1,614%.

4.5 Висновки до четвертого розділу

Викладено результати метрологічних досліджень розробленого методу вимірювання теплоти згорання природного газу. Досліджено і кількісно оцінено вплив окремих складових похибки, які стосуються вимірювання температури спалюваного газу, впливу вмісту азоту у досліджуваному газі, а також визначення методичної похибки теоретико-експериментального оцінювання конструктивного коефіцієнта пальника ($\pm 1,54\%$), яка є складовою похибки розробленого методу визначення теплоти згорання природного газу.

За результатами метрологічних досліджень формування впливу методичних, інструментальних та додаткових складових похибок проведений метрологічний аналіз методу визначення теплоти згорання природного газу на базі застосування теорії похибок (границя основної допустимої похибки вимірювання $\pm 2,5\%$) і концепції невизначеності (розширена невизначеність при коефіцієнті охоплення 2 і довірчій ймовірності 0,95 становить $\pm 1,61\%$), які обґрунтовують можливість практичного застосування методу експрес-контролю теплоти згорання за місцем газоспоживання.

ВИСНОВКИ

На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень вирішене актуальне науково-прикладне завдання у галузі вимірювання і контролю якісних параметрів природного газу, яке стосується удосконалення методу і технічних засобів для вимірювання теплоти згоряння природного газу за температурою його спалювання із застосуванням витратовимірювальних торцевих звужувальних пристроїв. При цьому отримані такі наукові і практичні результати:

1. Проведено аналіз методів, нормативних документів і засобів у сфері вимірювання і контролю теплоти згоряння природного газу, за результатами якого здійснено вибір і обґрунтування напрямку розвитку методу вимірювання теплоти згоряння природного газу за температурою його спалювання при застосуванні витратовимірювальних торцевих звужувальних пристроїв.

2. Розроблена математична модель взаємозв'язку теплоти згоряння природного газу із його температурою спалювання при згорянні сумішей газ-повітря різного об'ємного співвідношення, що дає можливість реалізувати процес вимірювання теплоти згоряння природного газу з використанням термоперетворювачів і торцевих звужувальних перетворювачів витрати.

3. Встановлені закономірності впливу теплофізичних характеристик природного газу (коефіцієнт стисливості, вміст неуглеводневих компонентів природного газу, показник адіабати, коефіцієнт розширення, вологість, густина) на теплоту згоряння природного газу, які на відміну від відомих моделей стану газу і гідродинамічних процесів при його русі, дозволяють опосередковано визначати теплоту згоряння природного газу за температурним і витратовимірювальним інформативними параметрами.

4. Здійснений метрологічний аналіз вимірювання теплоти згоряння природного газу з використанням температурних і витратовимірювальних інформативних параметрів шляхом використання теорії похибок у

вимірюваннях, що дозволило оцінити похибку методу визначення теплоти згоряння природного газу, яка може не перевищувати 2,5%, що в достатній мірі задовольняє метрологічним вимогам до робочих засобів вимірювання.

5. Розроблені нові концептуальні рішення пристрів, які захищені патентами Україна на винаходи, що забезпечують реалізацію методу експрес-контролю теплоти згоряння природного газу і підвищення точності градування торцевих звужувальних пристроїв на природному газі.

6. Розроблений лабораторний стенд, з допомогою якого здійснено апробацію розробленого методу вимірювання теплоти згоряння природного газу із застосуванням торцевих звужувальних пристроїв. Дослідження проводилися за умов згоряння природного газу теплотворної здатності 35,3 МДж/м³ (8431 ккал/м³) на витратах до $9,7 \cdot 10^{-5}$ м³/с (0,35 м³/год) і газоподібного стану пропан-бутанової суміші скрапленого газу калорійністю 46,8 МДж/м³ (11178 ккал/м³) на витратах до $6,9 \cdot 10^{-5}$ м³/с (0,25 м³/год). При цьому згоряння газу здійснювалося як з формуванням різних об'ємних співвідношень додаткового повітря з досліджуваним газом (до 1,6 для природного газу і 2,2 для пропан-бутанової суміші) перед його спалюванням, та і без подавання всередину пальника додаткового повітря. Результати апробації підтвердили правильність теоретичних підходів і практичних рішень для створення робочих засобів вимірювальної техніки, які можуть використовуватися для експрес-контролю теплоти згоряння різних видів газів, що згорають, в тому числі вуглеводневих вологих газів і біогазів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ ISO 15112:2009. Природний газ. Визначення енергії. Київ : Держспоживстандарт України, 2010. 48 с.
2. Андрієшин М. П., Домницький Р. А., Дехтярчук С. І. [та ін.]. Вплив фізико-хімічних показників газу на ефективність роботи газових приладів. *Нафтогазова галузь України*. 2014. № 6 С.34-39
3. Nitschke-Kowsky, P., Martino, A., Weßling, W., Vogt, M. Gasbeschaffenheit und ihre Schwankungen in E.ON-Verteilnetzen. *gwf-Gas Erdgas*. 2016, Nr2, S. 166-176.
4. Leicher, J., Giese, A. Änderung der Gasbeschaffenheit in Deutschland und Europa: Auswirkungen auf industrielle Feuerungsprozesse Teil 1. *gwf-Gas Erdgas*, 2013, Nr10, S. 754-760.
5. EN 1776:2015 Gas infrastructure. Gas measuring systems. Functional requirements.
6. ISO 15112:2007 Natural gas – Energy determination
7. Dorota Klęk. Pomiar jakości gazu ziemnego w świetle nowych wymagań. *FORGAZ 2016. Techniki i technologie dla gazownictwa – pomiary, badania, eksploatacja* : materiały konferencyjne Konferencji Naukowo-Technicznej, 13–15 stycznia 2016 r. Kraków, 2016. S. 57-62
8. Tadeusz Schuster. Analiza możliwości wykorzystania wyników systemu monitoringu jakości gazu do weryfikacji obszarów rozliczeniowych ciepła spalania. *FORGAZ 2016. Techniki i technologie dla gazownictwa – pomiary, badania, eksploatacja* : materiały konferencyjne Konferencji Naukowo-Technicznej, 13–15 stycznia 2016 r. Kraków, 2016. S. 173-183
9. ГОСТ 5542-87. Газы горючие природные для промышленного и коммунально-бытового назначения. М.: ИПК Издательство стандартов, 2000. 3 с.

10. Українці жалуються на якість газу. АССБуд : веб-сайт. URL: <http://www.accbud.ua/news/id/ukrainsy-zhalujtsja-na-kachestvo-gaza> (дата звернення 12.07.2020р.)
11. Андрієшин М. П., Карпаш О. М., Марчук Я. С., Петришин І. С., Середюк О. Є., Чеховський С. А. Облік природного газу : довідник. Івано-Франківськ: ПП «Сімик», 2008. 180 с.
12. Правила обліку природного газу під час його транспортування газорозподільними мережами, постачання та споживання. Затверджено наказом Мінпаливенерго України 27.12.2005 за № 618; Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 26.01.2006 за № 67/11941.
13. Дудолад А. С., Большаков В. Б., Косач Н. И., Слипущенко В. П. Стратегія розвитку метрологічного забезпечення учета природного газу в Україні. *Український метрологічний журнал*. 2012. № 4. С.31-35.
14. Кодекс газорозподільних систем. Затверджений постановою Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг від 30.09.2015 № 2494.
15. Measurement of gas calorific value: a new frontier to be reached with an optimised reference gas calorimeter. *23rd World Gas Conference, Amsterdam 2006* : веб-сайт. URL: <http://members.igu.org/html/wgc2006/pdf/paper/add12646.pdf> (дата звернення: 10.06.2020)
16. ГОСТ 30319.0-96. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Общие положения. Минск : Межгосударственный Совет по стандартизации метрологии и сертификации, 1997, 11 с.
17. ГОСТ 31369-2008. Газ природный. Вычисление теплоты сгорания, плотности, относительной плотности и числа Воббе на основе компонентного состава. Москва : Стандартинформ, 2009, 58 с.
18. Середюк О. Є., Малісевич Н. М., Хомик Г. В. Статистичні дослідження якісних характеристик природного газу в умовах ПАТ «ІВАНО-ФРАНКІВСЬКГАЗ». *Сучасні прилади, матеріали і технології для*

неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання : зб. матер. доп. 8-ої міжнар. наук.-техн. конф. пам'яті проф. Ігоря Кісіля, 14-16 листопада 2017р., Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2017. С. 89-91.

- 19.ДСТУ 3581-97. Енергозбереження. Методи вимірювання і розрахунку теплоти згоряння палива. Київ : Держспоживстандарт України, 1997. 11 с.
- 20.ГОСТ 22667-82. Газы горючие природные. Расчетный метод определения теплоты сгорания, относительной плотности и числа Воббе. Москва : ИПК Издательство стандартов, 1982. 9 с.
- 21.ДСТУ ISO 6976:2009 Природний газ. Обчислення теплоти згоряння, густини, відносної густини і числа Воббе на основі компонентного складу (ISO 6976:1995/Cor. 2:1997, Cor. 3:1999, IDT). Київ : Держспоживстандарт України, 2010. 55 с.
- 22.Чеховський С. А.,Петришин І. С., Піндус Н. М., Ващишак С. П., Кононенко М. А., Романів В. М., Середюк О. Є., Витвицька Л. А. Метрологія і технологічні вимірювання у нафтовій та газовій промисловості : Навчальний посібник. Івано-Франківськ. ІФНТУНГ, 2010. 534 с.
- 23.ДСТУ ISO 6974-1...5:2007. Природний газ. Визначення складу із заданою невизначеністю методом газової хроматографії. К. : Держспоживстандарт України, 2008.
24. Heating Value Measurement of Natural Gas using a Gas Chromatograph. *Process instruments* : веб-сайт. URL: <https://www.norskanalyse.com/wp-content/uploads/2018/06/heating-value-measurement-of-natural-gas.pdf> (дата звернення: 14.05.2020)
25. BTU Analysis Using a Gas Chromatograph. *Application note oil & gas* : веб-сайт. URL: <https://www.emerson.com/documents/automation/application-note-btu-analysis-using-a-gas-chromatograph-rosemount-en-72722.pdf> (дата звернення: 14.05.2020)

26. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества веществ. Справочник : Книга 2. СПб. Политехника, 2004. 412 с.
27. Малісевич В. В., Середюк О. Є., Середюк Д. О. Метрологічна модель напірного витратоміра при контролі енергетичної цінності природного газу. *Український метрологічний журнал*. 2015. № 1. С. 58-63.
28. Малісевич В. В., Середюк О. Є. Дослідження впливу якісних параметрів природного газу на функціонування парціального витратоміра. *Вимірвальна техніка та метрологія*. 2013. № 74. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. С. 158-163.
29. Стадник Б. І., Мотало В. П., Мотало А. В. Методика оцінювання якості природного газу як джерела енергії. *Стандартизація, сертифікація, якість*. 2009. №4. С.56-61.
30. Мотало В. П., Мотало А. В., Сендега О. С. Дослідження залежності теплотворної здатності природного газу від його фізико-хімічних властивостей. *Вісник НУ «Львівська політехніка»*. 2010. №665. С. 58-64.
31. Мотало В. П., Мотало А. П. Методи і засоби гігрометрії природного газу. *Вимірвальна техніка та метрологія*. 2006. Вип. 72. С. 210-219.
32. Білінський Й.Й., Городецька О.С., Новицький Д.В. Аналіз методів та засобів визначення температури точки роси за вологою та вуглеводнями. *Вісник ВПІ*. 2018. №4 (139). с. 110-120.
33. P. Schley, M. Jaeschke, K. Altfeld. New technologies for gas quality determination, in: Proceedings of the 22nd World Gas Conference. Tokyo. 2003. P. 1–12.
34. Jaeschke M., Schley P., R. Janssen–van Rosmalen. Thermodynamic research improves energy measurement in natural gas. *International journal of thermophysics* 23.4. 2002. P. 1013-1031.
35. Ulbig P., Hoburg D. Determination of the calorific value of natural gas by different methods. *Thermochim Acta*. 2002. P. 27–35.

36. Thurston R. R., Hammond P. S., Price B. L. Measuring volume and calorific value to determine an energy value of supplied gas. UK Patent Application GB 2340945. 1999.
37. Jaeschke M. Thermodynamic research improves energy measurement of natural gas. *Thermochim Acta*. 2002. P. 37–45.
38. Pannemann H. J., Koreman C. W., Kroon A., Horstink H., Jaeschke M., Schouten J. A., et al. A fast energy measurement system suitable for process control 144 and off-shore metering application. In: *Proceedings of 2001 International Gas Research Conference*. Amsterdam. The Netherlands, 2001. P. 5-8.
39. Loubar, Khaled, et al. A combustionless determination method for combustion properties of natural gases. *Fuel* 86.16. 2007. P. 2535-2544.
40. Le Corre, Olivier, and Khaled Loubar. Natural gas: physical properties and combustion features. *Natural Gas. InTech*, 2010. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.intechopen.com/download/pdf/11458>.
41. Способ определения теплоты сгорания природного газа и устройство для его осуществления / Карпаш М. О., Рибицкий И. В., Яворский А. В., Юрьев Э. В.; заявники і патентовласники: Карпаш М. О., Рибицкий И. В., Яворский А. В., Юрьев Э. В. пат. RU 2531842: МПК (2006.01) G01N 25/22. № 2011140504/28; заявл. 05.10.2011; опубл. 10.04.2013, Бюл. № 10.
42. Пристрій для експрес-визначення теплоти згоряння природного газу / Карпаш О. М., Дарвай І. Я. Пат. 48121 U Україна, МПК (2009) G01N25/20. заявник і патентовласник Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу: № u200908918; заявл. 27.08.09; опубл. 10.03.10, Бюл. № 5.
43. Рибицький І. В., Карпаш М. О., Яворський А. В., Райтер П. М., Орлов І. О., Болховітін М.І. Виготовлення, налагодження та промислова апробація в умовах ПАТ «Укртрансгаз» приладу для експрес-контролю теплоти згоряння природного газу. *Нафтогазова галузь України*. 2018. №4. С. 32-37.

44. Романів В. М., Чеховський С. А. Дослідження експериментального зразка системи контролю енерговмісту природного газу. *Метрологія та прилади*. 2014. № 1. С. 192-196.
45. Романів В. М. Удосконалення оптичного методу оцінювання енергетичних параметрів природного газу : дис. ... канд. техн. наук : 05.01.02. Харків, 2018. 222 с.
46. Horoshaylo Yu.E., Efimenko S.A., Shlyakhov V.V., Sotnik S. V. Application of the colour measurement optoelectronic method for quality control of natural gas. *Методи та прилади контролю якості*. 2017. №2 (39). С. 55-58.
47. Шинкарук Х. М., Чеховський С. А. Застосування термokatалітичного методу для визначення теплотворної здатності природного газу. *Системи обробки інформації*. 2018. № 4 (155). С. 161-165.
48. Portable Natural Gas Chromatograph. *Process instruments gas* : веб-сайт. URL: <https://pdf.directindustry.com/pdf/ametech-process-instruments/portable-natural-gas-chromatograph/14271-686509.html> (дата звернення: 21.05.2020).
49. GasCVD Natural Gas Calorimeter. *Azbil specification* : веб-сайт. URL: http://www.aselco.com.br/wp-content/uploads/SS2-CVM100-0100-02_0321.pdf (дата звернення: 13.06.2020).
50. Дарвай І. Я., Карпаш О. М. Експериментальне дослідження нового методу визначення теплоти згоряння природного газу. *Методи та прилади контролю якості*, 2010. № 24. С. 90-94.
51. Карпаш О. М., Рибіцький І. В., Карпаш М. О. Експериментальна установка для вимірювання товщини металоконструкцій безконтактним акустичним методом. *Методи та прилади контролю якості*. 2008. № 20. С. 7-12.
52. Петришин І., Присяжнюк Л., Бас О. Калориметр природного газу прямої дії. *Метрологія та прилади*. 2017. №4. С. 8-16.
53. Малісевич В. В. Контроль енергетичної цінності природного газу із застосуванням термоанемометричних перетворювачів : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.13. Івано-Франківськ, 2015. 210 с.

- 54.Малісевич Н. М., Середюк О. Є. Аналіз патентозахищених технічних рішень у сфері визначення теплоти згорання природного газу. *Методи та прилади контролю якості*. 2018. № 1. С. 58-69.
- 55.Method of and means for accurately measuring the calorific value of combustible gases : пат. US 4062236, МПК G 01 N 25/30. William H. Clingman, Jr.; заявники і патентовласники Precision Machine Products, Inc., Dallas, Тех. № 682578 ; опубл. 03.05.1976.
- 56.Microcalorimeter sensor for the measurement of heat content of natural gas : пат. US 5494826, МПК G 01 N 25/20. Joseph R. Stetter, G. Jorgan Maclay; заявник і патентовласник Gas Research Institute, Inc. № 228906 ; опубл. 18.04.1994.
- 57.Калориметрический способ прецизионного измерения теплоты сгорания природного газа и других видов газообразного топлива / Ю.И. Александров, В.И. Беляков: пат. RU 2169361, МПК (2000.01) G01N 25/22. заявник і патентовласник Государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева». № 99124710/28 ; заявл. 22.11.1999; опубл. 20.06.2001, Бюл. № 17.
- 58.Natural gas heating value measuring system, and calibration method of natural gas heating value measuring system : пат. JP 2013205109, МПК G01N 25/18. / Oishi Yasuharu; заявник і патентовласник Azbil Corp. № 2012072277 ; заявл. 27.03.2012; опубл. 07.10.2013.
- 59.Спосіб визначення теплоти згорання природних вуглеводневих горючих газів / И. М. Замулинский, В. Г. Здановский: пат. SU 1693504 A1, № 4693191/25. МПК5 G01N25/22. ; заявл. 19.05.1989; опубл. 23.11.1991; Бюл. № 43.
- 60.Спосіб оперативного визначення теплоти згорання газоподібних палив / В. І. Большаков, Г. А. Полевий, П. Г. Прокопенко, О. І. Жилка: пат. 84975 С2 Україна, МПК (2006.01) G01N25/22.; заявник і патентовласник Інститут

чорної металургії ім. З. І. Некрасова національної академії наук України. № а200703615 ; заявл. 02.04.07; опубл. 10.12.08, Бюл. № 23.

- 61.Спосіб експрес-визначення теплоти згоряння природного газу / О. М. Карпаш, І. Я. Дарвай, М. О. Карпаш [та ін.]: пат. 92846 С2 Україна, МПК (2009) G01N25/20. заявник і патентовласник Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. № а200905201 ; заявл. 25.05.09; опубл. 10.12.10, Бюл. № 23.
- 62.Середюк О. Є., Малісевич Н. М. Нормативне забезпечення визначення якості природного газу. *Нафтогазова енергетика 2017* : тези доп. міжнар. наук.-техн. конф., 15-19 трав. Івано-Франківськ : Голіней О. М., 2017. С. 295-297.
- 63.ДСТУ 2925-94. Якість продукції. Оцінювання якості. Терміни та визначення: К.: Держстандарт України, 1995. – 32 с.
64. Specification for general purpose natural gas : pat. AS 4564-2005. Published by Standards Australia, GPO Box 476, Sydney, NSW 2001, Australia, ISBN 0 7337 6880 64.
- 65.ISO 13686:2013. Natural gas. Quality designation. 2013. 48 p.
- 66.ДСТУ ISO 6975:2012. Природний газ. Розширений аналіз. Метод газової хроматографії. К.: Мінекономрозвитку України, 2013. 24 с.
- 67.ISO 10723:2012. Natural gas. Performance evaluation for analytical systems. 2012. 32 p.
- 68.EN 437:2003. Test gases. Test pressures. Appliance categories. 2003. 39 p.
- 69.ГОСТ 30319.1-96. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение физических свойств природного газа, его компонентов и продуктов его переработки. К. : Госстандарт Украины, 1999. 16 с. (Межгосударственный стандарт).
- 70.ГОСТ 27193-86. Газы горючие природные. Метод определения теплоты сгорания водяным калориметром. М.: Стандартиформ, 2006. – 9 с. (Межгосударственный стандарт).

- 71.ГОСТ 10062-75. Газы природные горючие. Метод определения удельной теплоты сгорания. М.: Стандартинформ, 2006. 19 с. (Межгосударственный стандарт).
- 72.ISO/TR 22302:2014. Natural gas. Calculation of methane number. 2014. 11 p.
- 73.ГОСТ 20060-83. Газы горючие природные. Методы определения содержания водяных паров и точки росы влаги. М.: ИПК издательство стандартов, 2004. 12 с.
- 74.ISO 11541:1997. Natural gas. Determination of water content at high pressure. 1997. 8 p.
- 75.ISO 10101-1...3:1993. Natural gas. Determination of water by the Karl Fischer method.
76. Височанський І. І. Удосконалення методів обслуговування та ремонту газових мереж з урахуванням енергетичних характеристик природного газу : дис. ... канд. техн. наук : 05.15.13. Івано-Франківськ, 2019. 216 с.
77. Сжигание газа и газовые горелки. Основы газоснабжения : веб-сайт. URL: <http://www.hillelspb.ru/gazosnabzhenie.php?wr=183> (дата звернення: 17.04.2019).
78. Спосіб експрес-визначення теплоти згорання природного газу / О.Є. Середюк, Т.В. Лютенко, Н.М. Малісевиц: пат. 112737 С2 Україна: МПК (2006.01) G01N25/20. № а201512215 ; заявл. 09.12.2015; опубл. 10.10.2016, Бюл. № 19.
79. Orest Serediuk, Nataliya Malisevych, Mariusz R. Rząsa. Wpływ wilgotności na błędy metody pomiarowej do wyznaczania wartości ciepła spalania gazu ziemnego. *Zeszytów Naukowych Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej* : L Międzyuczelniana Konferencja Metrologów (MKM 2018), 10-12 września 2018, Szczecin – Kopenhaga: Gdańsk, 2018. №59. S. 175-179.
80. Serediuk O., Malisevych V., Warsza Z., Metoda termooanemometryczna pomiaru wartości energetycznej gazu ziemnego. *Przemysł Chemiczny*, T. 96, Nr 11, 2017, 2243–2246. DOI: 10.15199/62.2017.11.5

81. Малісевич Н. М., Середюк О. Є. Моделювання впливу вологості при експериментальному визначенні теплоти згорання природного газу : *Приладобудування: стан і перспективи* : зб. тез доп. XVII міжнар. наук.-техн. конф., м. Київ 15 – 16 травня 2018 р. м. Київ. Київ: НТУУ «КПІ», ПБФ, 2018. С. 204-205.
82. Середюк О. Є., Варша З. Л., Малісевич В. В., Малісевич Н. М. Дослідження впливу теплофізичних параметрів природного газу на його теплоту згорання. *Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах* : збірник тез доповідей IV-а міжнар. наук. конф., м.Вінниця, 31 жовтня – 2 листопада 2017р. Вінниця: ВНТУ, 2017. С. 47.
83. Serediuk O. Ye., Malisevych N. M. Evaluation of Unauthorization at the Express-Control of Heating of Natural Gas. *Measurement Uncertainty: Scientific, Normative, Applied and Methodical Aspects* : Scientific Workshop 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL 2019), Sozopol, Bulgaria, 06-08 September 2019. Sozopol, 2019. P. 694-697.
84. Середюк О., Малісевич Н.. Моделювання впливу теплоти згорання природного газу на вимірювання його витрати торцевими соплами. *Перспективні технології та прилади*. 2020. № 16. С. 63-72
85. ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009. Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 2. Діафрагми. Технічні вимоги: [Чинний від 2010-04-01]. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України, 2009. 92 с. (Державний стандарт України).
86. Середюк О. Є., Малісевич Н. М. Дослідження методичної похибки вимірювання температури полум'я при згоранні природного газу. *Technical using of measurement–2020*: тези доп. VI всеукр. наук.-техн. конф. молодих вчених у царині інформаційно-вимірювальних технологій та метрології, 4-7 лютого 2020 р., Славське : ТзОВ «Галицька видавнича спілка», 2020. С. 146-149.

87. Малісевич Н. М., Середюк О. Є. Лабораторний стенд для визначення теплоти згорання природного газу. *Прикладні науково-технічні дослідження* : матеріали III міжнар. наук.-практ. конф., 3-5 квітня 2019 р., м. Івано-Франківськ: Симфонія форте, 2019. С. 81.
88. Височанський І. І., Яворський А. В., Карпаш О. М., Карпаш М. О. Технічна реалізація удосконаленої технології експрес-контролю теплоти згорання природного газу. *Нафтогазова енергетика*. 2017. № 1. С. 70-78.
89. Середюк О. Є., Малісевич Н. М., Лютенко Т. В. Новий спосіб контролю теплоти згорання природного газу : *Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах* збірник тез доповідей IV-а міжнар. наук. конф., 31 жовтня – 2 листопада 2017р. Вінниця: ВНТУ, 2017. С. 93-94.
90. Середюк О. Є., Малісевич Н. М. Метрологічний аналіз практичного алгоритму визначення коефіцієнта стисливості біогазу. *Technical Using of Measurement – 2019* : тези доповідей V всеукр. наук.-техн. конф. молодих вчених у царині метрології, 29 січня - 2 лютого 2019 р. Славське : ТзОВ «Галицька видавнича спілка», 2019. С. 53-55.
91. Матіко Ф. Д., Павлюк І. П. Розрахунок фактора стискуваності вологого природного газу в задачах його обліку. *Методи та прилади контролю якості*. 2002. № 9. С. 79-81.
92. Плотников В. М., Подрешетников В. А., Тетеревятников Л. Н. Приборы и средства учета природного газа и конденсата : 2-е изд., перераб. и доп. Ленингр. отд-ние, 1989. 237с.
93. Середюк О. Є., Малісевич В. В., Малісевич Н. М. Експериментальні дослідження методу термоанемометричного контролю енергетичної цінності природного газу. *Методи та прилади контролю якості*, 2015. № 2 (35) С. 64-71.
94. Малісевич Н. М., Середюк О. Є. Лабораторний стенд для апробації нового способу експрес-контролю теплоти згорання природного газу. *Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання* : зб. тез доп. VI-

- ої всеукр. наук.-практ. конф. студентів і молодих учених, 15-16 листопада 2017р., Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2017. С. 43.
95. ДСТУ EN 12405-2:2018 (EN 12405-2:2012, IDT). Лічильники газу. Пристрої перетворювання. Частина 2. Перетворювання в енергію: [Чинний від 2020-01-01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 46 с. (Національний стандарт України).
96. ГОСТ Р 56021-2014. Газ горючий природный сжиженный. Топливо для двигателей внутреннего сгорания и энергетических установок. Технические условия. Изд. офиц. Москва : Стандартинформ, 2014. 16 с.
97. Свойства и характеристики горючих газов (Properties and characteristics of combustible gases). *Svarpost* : веб-сайт. URL: <http://www.svarpost.ru/stati/54-svojstva-i-kharakteristiki-goryuchikh-gazov.html> (дата звернення: 15.02.2020)
98. ГОСТ 30319.2-96 Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости.
99. Термопара Ezodo TP-10. *Маркет вимірювальних приладів «SIMVOLT»* (Ezodo TP-10 thermocouple. *SIMVOLT measuring devices market*) : веб-сайт. URL: <https://simvolt.ua/termopara-ezodo-tp-10.html> (дата звернення: 15.02.2020)
100. Малісевич Н. М. Моделювання температурного поля поверхні пластини перетворювача теплоти згорання природного газу. *Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості* : тези доп. 4-я всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених і студентів. 10-11 жовтня 2019р. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2019. С. 202-204.
101. Малісевич Н. М. Дослідження динамічних характеристик термоперетворювачів при визначенні теплоти згорання природного газу. *Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання* : збірник тез доп., VII всеукр. наук.-практ. конф. студ. і молодих вчених, 19-20 листопада 2019 р., Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2019. С. 83-84.
102. Середюк О., Малісевич Н. Дослідження впливу конструктивних факторів на технічну реалізацію методу експрес-контролю теплоти

- згорання природного газу. *Перспективні технології та прилади* : 2019. № 15. С. 81-89
103. SMART-лічильники газу – перший крок до енергоефективності // *БТК-центр комплект* : веб-сайт. URL: <https://btk-center.com.ua/news/news%2070> (дата звернення 01.03.2019)
104. Основні переваги впровадження розумних лічильників // *САМГАЗ* : веб-сайт. URL: <https://www.samgas.com.ua/osnovni-perevagy-vprovadzhennya-rozumnyh-lichylnykyv> (дата звернення 06.12.2016)
105. Середюк О. Є., Малісевич Н. М., Ткачук В. В., Середюк Д. О. Нові вимірювальні технології у побутових SMART-лічильниках природного газу. *Український метрологічний журнал*. 2020 р. №1А. с. 134-135.
106. Середюк О. Є., Малісевич В. В. Теоретичні засади застосування напірного витратоміра для визначення енергетичної цінності природного газу. *Метрологія та прилади*. 2014. № 5. С. 38-47.
107. Трубопоршневая установка для градуировки и поверки счетчиков и расходомеров, авт. свид. № 687345, G01F 25/00, Бюл. № 35, 1979 г.
108. Калібрувальна поршнева установка одиниць об'єму та об'ємної витрати газу на реальному середовищі при високих 30 тисках, патент на корисну модель, Україна, № 85973 U, G01F 25/00, Бюл. № 23, 2013 р.
109. Калібрувальна поршнева установка для лічильників і витратомірів газу / О.Є. Середюк, В.С. Воцинський, Д.О. Середюк, Н.М. Малісевич: пат. 120308 С2 Україна: МПК G01N 25/20 (2006.01), G01N 25/22 (2006.01), G01N 25/26 (2006.01). № а201712900 ; заявл. 26.12.2017 ; опубл. 11.11.2019, Бюл. № 21.
110. Середюк О. Є., Малісевич Н. М. Експериментальні дослідження методу вимірювання температури спалювання газу при визначенні його теплоти згорання : *Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах* збірник тез доповідей V-а міжнар. наук. конф., 29-30 жовтня 2019 р. Вінниця: ВНТУ, 2019. С. 30-31.

111. Seredyuk O. E., Malisevych N., Rząsa M. R., Analiza błędów metody pomiarowej do wyznaczania ciepła spalania gazu ziemnego. *Pomiary Automatyka Robotyka*. R. 23, Nr 2/2019, P. 39-43
112. Середюк О. Є., Малісевич Н. М. Метрологічні дослідження методу експрес-визначення теплоти згорання природного газу. *Приладобудування: стан і перспективи* : тези доп. 18 міжнар. наук.-техн. конф., 15 - 16 травня 2019 р. Київ: НТУУ «КПІ», ПБФ, 2019. С. 204-205.
113. Малісевич Н. М. Дослідження впливу вмісту азоту на похибку визначення теплоти згорання природного газу. *Технічне регулювання, метрологія, якість, інформаційні та транспортні технології* : матеріали 10 всеукраїнська наук.-практ. конф. молодих учених і студентів, 16-17 травня 2019 р., Одеса, Бондаренко М. О., 2019. С.47-48.
114. Середюк О. Є., Малісевич Н. М. Дослідження методичної похибки експериментального оцінювання конструктивного коефіцієнта пальника при визначенні теплоти згорання природного газу. *Technical Using of Measurement – 2018*: тези доповідей всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених у царині метрології, 13-18 лютого 2018 р., Львів : ТзОВ «Галицька видавнича спілка», 2018. С. 49-50.
115. ГОСТ 17357-71. Горелки газовые. Классификация. Москва : Издательство стандартов, 1972. 4с.
116. Середюк О. Є., Малісевич Н. М. Практичний спрощений алгоритм визначення коефіцієнта стисливості біогазу. *Системи-2018* : тези доп. міжнар. наук.-техн. конф., 22-23 листопада 2018 р., Львів: ТзОВ «Галицька видавнича спілка», 2018. С. 37-38.
117. ГОСТ Р 56021-2014. Газ горючий природный сжиженный. Топливо для двигателей внутреннего сгорания и энергетических установок. Технические условия. Изд. офиц. Москва : Стандартинформ, 2014. 16 с.
118. Свойства и характеристики горючих газов (Properties and characteristics of combustible gases). *Svarpost* : веб-сайт. URL:

<http://www.svarpost.ru/stati/54-svojstva-i-kharakteristiki-goryuchikh-gazov.html> (дата звернення: 15.02.2020)

119. Середюк О. Є., Малісевич В. В., Малісевич Н. М. Експериментальні дослідження об'ємних співвідношень компонентів природного газу. *Technical Using of Measurement – 2016* : тези доповідей всеукр. наук.-техн. конф. молодих вчених у царині метрології:, 1-5 лютого 2016 р. Славське: Академія метрології України, 2016. С. 10-13.
120. Малісевич Н. М., Середюк О. Є. Апробація експрес-контролю теплоти згорання паливних газів за їх температурою при спалюванні. *Прикладні науково-технічні дослідження*. Том 1: тези доп. IV міжнар. наук.-практ. конф., 1-3 квітня 2020 р., Івано-Франківськ: Академія технічних наук України, 2020. С. 97-98.
121. Середюк О.Є., Малісевич В.В. Теоретичні засади застосування напірного витратоміра для визначення енергетичної цінності природного газу. *Метрологія та прилади*. 2014. № 5. С. 38-47.
122. Середюк О. Є., Малісевич Н. М. Дослідження впливу температурного фактору за експрес-контролю теплоти згорання природного газу. *Метрологія та прилади*. 2020. №2(82). С. 44-50.
123. Малісевич Н. М., Середюк О. Є. Лабораторний стенд для визначення теплоти згорання природного газу. *Прикладні науково-технічні дослідження* : матеріали III міжнар. наук.-практ. конф., 3-5 квітня 2019 р., Івано-Франківськ. Симфонія форте, 2019. С. 81.

Додаток А

Таблиця А.1

Вимірювання температури полум'я при спалюванні досліджуваного газу за відсутності подачі додаткового повітря
(теплота згоряння природного газу $H=35,289$ МДж/м³)

Час	Об'єм газу	Тиск газу		Температура газу	Витрата газу		Об'єм повітря	Тиск повітря	Температура повітря	Витрата повітря		Температура полум'я		Температура полум'я	
		$P_{г, мм вод ст.}$	$P_{г, Па}$		$Q_{г, м^3/год}$	$Q_{г ст, м^3/год}$				$Q_{п, м^3/год}$	$Q_{п ст, м^3/год}$	$T_{пол1, мВ}$	$T_{пол2, мВ}$	$T_{пол1, °C}$	$T_{пол2, °C}$
482	15,4	279	2737	20,8	0,232	3,338	-	-	22	-		18,0	1,9	436,6	424,6
480	15,5	280	2746	20,9	0,233	3,349	-	-	22	-		17,9	1,9	435,1	423,6
479	15,6	281	2760	21,0	0,234	3,366	-	-	22	-		17,8	1,9	432,9	422,7
240	13,5	271	2661	22,2	0,200	2,727	-	-	24	-		20,1	2,9	487,5	483,3
240	13,4	270	2648	22,1	0,199	2,713	-	-	24	-		20,2	2,9	490,0	483,3
242	13,3	268	2632	22,0	0,198	2,697	-	-	24	-		20,3	2,93	493,0	487,8
209	20,2	250	2452	23,9	0,345	4,330	-	-	28	-		20,8	3,4	504,4	509,0
210	20,2	250	2452	23,9	0,345	4,330	-	-	28	-		20,8	3,4	504,4	509,0
211	20,1	249	2445	23,8	0,344	4,318	-	-	28	-		20,9	3,4	505,7	509,0

Продовження додатку А

Таблиця А.2

Вимірювання температури полум'я при спалюванні досліджуваного газу за витрати додаткового повітря
0,32 м³/год (теплота згоряння природного газу Н=35,289 МДж/м³)

Час	Об'єм газу		Тиск газу		Температура газу	Витрата газу		Об'єм повітря	Тиск повітря		Температура повітря	Витрата повітря		Температура полум'я		Температура полум'я	
	t, с	V _г ·10 ³ , м ³	P _г , мм вод ст.	P _г , Па	T _г , °С	Q _г , м ³ /год	Q _{г ст} , м ³ /год	V _п ·10 ³ , м ³	P _п , мм вод ст.	P _п , кПа	T _п , °С	Q _п , м ³ /год	Q _{п ст} , м ³ /год	T _{пол1} , МВ	T _{пол2} , МВ	T _{пол1} , °С	T _{пол2} , °С
538	16,0	289,3	2837,6	24,3	0,107	0,108	48,7	1,5	101,34	28,0	0,325	0,315	20,8	3,1	496,8	491,6	
540	15,8	285	2 795	23,9	0,105	0,107	48	1,5	101,34	28,0	0,320	0,313	20,8	3,2	504,4	499,1	
543	15,7	282,3	2769,0	23,7	0,104	0,106	47,6	1,5	101,34	28,0	0,317	0,310	20,8	3,3	509,1	503,8	
327	18,3	270,2	2649,2	24,5	0,200	0,202	30,0	1,5	101,34	28,0	0,328	0,320	22,8	4,4	552,6	551,6	
330	18,2	268	2 628	24,3	0,199	0,201	29,8	1,5	101,34	28,0	0,325	0,317	22,8	4,5	552,6	556,1	
331	18,0	265,3	2602,0	24,1	0,197	0,199	29,5	1,5	101,34	28,0	0,322	0,314	22,8	4,7	552,6	561,6	
269	26,8	252,0	2471,5	26,3	0,358	0,359	26,8	1,5	101,34	28,0	0,358	0,346	23,4	4,6	567,0	560,5	
270	26,4	248	2 432	25,9	0,352	0,353	26,4	1,5	101,34	28,0	0,352	0,340	23,4	4,9	567,0	569,6	
273	26,1	245,6	2408,3	25,6	0,349	0,350	26,1	1,5	101,34	28,0	0,349	0,337	23,4	5,1	567,1	575,2	

Продовження додатку А

Таблиця А.3

Вимірювання температури полум'я при спалюванні досліджуваного газу за витрати додаткового повітря 0,55 м³/год
(теплота згоряння природного газу Н=35,289 МДж/м³)

Час	Об'єм газу	Тиск газу		Температура газу	Витрата газу		Об'єм повітря	Тиск повітря		Температура повітря	Витрата повітря		Температура полум'я		Температура полум'я	
	t, с	V _г ·10 ³ , м ³	P _г , мм вод ст.	P _г , Па	T _г , °C	Q _г , м ³ /год	Q _{г ст} , м ³ /год	V _п ·10 ³ , м ³	P _п , мм вод ст.	P _п , кПа	T _п , °C	Q _п , м ³ /год	Q _{п ст} , м ³ /год	T _{пол1} , мВ	T _{пол2} , мВ	T _{пол1} , °C
544	15,7	272	2667	25,3	0,105	0,106	83,0	4	101364,2	27,8	0,553	0,539	21,1	3,3	511,7	504,1
540	15,6	270	2 648	25,1	0,104	0,105	82,4	4	101364,2	27,8	0,549	0,535	21,3	3,3	515,4	504,1
530	15,3	265	2599	24,6	0,102	0,103	80,9	4	101364,2	27,8	0,539	0,525	21,7	3,3	525,1	504,1
333	18,4	256	2514	25,1	0,207	0,209	52,2	4	101364,2	27,8	0,569	0,556	24	6,0	581,5	597,6
330	18,8	254	2 491	24,9	0,205	0,207	51,7	4	101364,2	27,8	0,564	0,551	24	6,3	581,5	603,0
327	18,6	251	2466	24,7	0,203	0,205	51,2	4	101364,2	27,8	0,564	0,546	24	6,7	581,5	609,0
240	23,8	252	2 471	25,6	0,357	0,359	40,5	4	101364,2	27,8	0,608	0,591	25,3	7,3	612,9	613,6
240	23,8	252	2 471	25,6	0,357	0,359	40,5	4	101364,2	27,8	0,608	0,591	25,3	7,3	612,9	613,6
240	23,8	252	2 471	25,6	0,357	0,359	40,5	4	101364,2	27,8	0,608	0,591	25,3	7,3	612,9	613,6

Додаток Б

Таблиця Б.1

Вимірювання температури полум'я при спалюванні досліджуваної суміші за відсутності витрати додаткового повітря
(теплота згоряння пропан-бутанової суміші $H=46,8$ МДж/м³)

Час	Об'єм ПБ-суміші	Тиск ПБ-суміші		Температура ПБ-суміші	Витрата ПБ-суміші		Об'єм повітря	Тиск повітря	Температура повітря	Витрата повітря		Температура полум'я		Температура полум'я	
		$V_{г} \cdot 10^3, \text{ м}^3$	$P_{г}, \text{ мм вод ст.}$		$P_{г}, \text{ Па}$	$T_{г}, \text{ }^{\circ}\text{C}$				$Q_{г}, \text{ м}^3/\text{год}$	$Q_{г \text{ ст}}, \text{ м}^3/\text{год}$	$V_{п} \cdot 10^3, \text{ м}^3$	$P_{п}, \text{ мм вод ст.}$	$T_{п}, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$Q_{п}, \text{ м}^3/\text{год}$
121	2,5	68	663	22,8	0,076	0,075	-	-	25,1	-	-	20,0	2,4	484,0	453,7
120	2,5	67	657	22,6	0,075	0,075	-	-	24,9	-	-	19,8	2,3	480,6	450,0
118	2,5	66	647	22,3	0,074	0,074	-	-	24,5	-	-	19,5	2,2	472,8	443,2
298	10,7	109	1 071	23,2	0,129	0,129	-	-	26,3	-	-	20,3	2,6	491,2	466,4
300	10,8	110	1 079	23,4	0,130	0,129	-	-	26,5	-	-	20,4	2,7	495,7	470,0
297	10,7	109	1 067	23,1	0,128	0,128	-	-	26,2	-	-	20,2	2,6	489,5	464,8
243	15,8	255	2 500	25,7	0,237	0,238	-	-	30,9	-	-	21,3	3,2	515,8	499,6
240	15,6	252	2 471	25,4	0,234	0,235	-	-	30,5	-	-	21,0	3,1	510	493,9
241	15,7	253	2 484	25,5	0,235	0,237	-	-	30,7	-	-	21,1	3,1	512,5	496,4

Продовження додатку Б

Таблиця Б.2

Вимірювання температури полум'я при спалюванні досліджуваної суміші за витрати додаткового повітря
0,32 м³/год (теплота згоряння пропан-бутанової суміші Н=46,8 МДж/м³)

Час	Об'єм газу		Тиск газу		Температура газу	Витрата газу		Об'єм повітря	Тиск повітря		Температура повітря	Витрата повітря		Температура полум'я		Температура полум'я	
	t, с	V _г ·10 ³ , м ³	P _г , мм вод ст.	P _г , Па		Q _г , м ³ /год	Q _{г ст} , м ³ /год		V _п ·10 ³ , м ³	P _п , мм вод ст.		P _п , кПа	T _п , °С	Q _п , м ³ /год	Q _{п ст} , м ³ /год	T _{1пол} , МВ	T _{2пол} , МВ
303	6,1	70	682	31,6	0,072	0,673	6,1	1,5	14,71	24,9	0,363	4,275	21,7	4,8	525,6	567,5	
300	6,0	69	677	31,3	0,072	0,679	6,0	1,5	14,71	24,9	0,360	4,239	21,5	4,7	521,2	562,7	
296	5,9	68	667	30,8	0,072	0,689	5,9	1,5	14,71	24,9	0,355	4,175	21,2	4,5	513,4	554,3	
238	8,9	113	1 110	29,2	0,135	1,371	6,1	1,5	14,71	26,5	0,363	4,019	22,3	5,1	541,3	576,8	
240	9,0	114	1 118	29,4	0,135	1,361	6,1	1,5	14,71	26,5	0,366	4,049	22,5	5,3	545,3	581,2	
237	8,9	113	1 106	29,1	0,135	1,376	6,0	1,5	14,71	26,5	0,362	4,005	22,4	5,2	542,5	579,6	
152	9,7	258	2 529	33,2	0,230	2,087	6,5	1,5	14,71	30,5	0,388	3,734	23,6	7,2	571,1	613,0	
150	9,6	255	2 501	32,8	0,230	2,110	6,4	1,5	14,71	30,5	0,384	3,691	23,3	6,5	564,6	606,1	
151	9,6	256	2 513	33,0	0,230	2,100	6,4	1,5	14,71	30,5	0,386	3,710	23,4	6,7	567,5	609,0	

Продовження додатку Б

Таблиця Б.3

Вимірювання температури полум'я при спалюванні досліджуваної суміші за витрати додаткового повітря 0,55 м³/год
(теплота згоряння пропан-бутанової суміші Н=46,8 МДж/м³)

Час	Об'єм газу	Тиск газу		Температура газу	Витрата газу		Об'єм повітря	Тиск повітря		Температура повітря	Витрата повітря		Температура полум'я		Температура полум'я	
		Р _г , мм вод ст.	Р _г , Па		Q _г , м ³ /год	Q _{г ст} , м ³ /год		Р _п , мм вод ст.	Р _п , кПа		Q _п , м ³ /год	Q _{п ст} , м ³ /год	Т _{1пол} , МВ	Т _{2пол} , МВ	Т _{1пол} , °С	Т _{2пол} , °С
454	8,6	71	692	27,6	0,068	0,726	9	0,545	4,713	3	29,42	33,9	24,2	6,2	585,3	600,6
450	8,5	70	686	27,4	0,068	0,732	9	0,540	4,713	3	29,42	33,6	24,0	5,9	580,4	595,6
443	8,4	69	676	27,0	0,068	0,744	9	0,532	4,713	3	29,42	33,1	23,6	5,5	571,74	586,7
238	8,5	112	1 100	26,4	0,129	1,448	13	0,524	4,994	3	29,42	30,8	24,6	6,4	596,3	604,0
240	8,6	113	1 108	26,6	0,129	1,437	13	0,528	4,994	3	29,42	31,0	24,8	6,7	600,8	608,6
237	8,5	112	1 096	26,3	0,129	1,453	13	0,522	4,994	3	29,42	30,7	24,5	6,2	594,2	601,9
303	19,8	248	2 430	29,9	0,235	2,358	10	0,607	4,847	3	29,42	36,7	25,9	7,3	627,2	613,5
300	19,6	245	2 403	29,6	0,235	2,385	10	0,600	4,847	3	29,42	36,3	25,6	7,5	620,1	614,3
302	19,7	246	2 415	29,7	0,235	2,373	10	0,603	4,847	3	29,42	36,5	25,7	6,9	623,2	610,5

Додаток В

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор

Івано-Франківського національного технічного
університету нафти і газу

проф. Мандрик О.М.

22.06.2020р.
АКТ

про використання у навчальному процесі Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу наукових результатів дисертаційної роботи Малісевич Н.М. “Вимірювання теплоти згорання природного газу із застосуванням торцевих звужувальних пристроїв”, яка представлена на здобуття наукового ступеня доктор філософії

В Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу у навчальному процесі кафедри метрології та інформаційно-вимірювальної техніки (МІВТ) при підготовці магістрів за спеціальністю 152 – “Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка” використовуються матеріали аспірантки Малісевич Н.М. при вивченні дисципліни “Опосередковані вимірювання в нафтогазовій промисловості”, зокрема:

- при засвоєнні лекційного матеріалу за темою Т 1.2 “Методи опосередкованого визначення фізичних властивостей і параметрів природного газу” – вивчення нових методів і технічних рішень при визначенні теплоти згорання природного газу;

- при проведенні практичного заняття за темою П 1.2 “Математичне моделювання опосередкованих методів розрахунку якісних характеристик природного газу” – про можливість моделювання при визначенні теплоти згорання природного газу з використанням інформативних параметрів – температури полум’я при згоранні природного газу і його витрати через звужувальний пристрій пальника.

При вивченні вказаної дисципліни використовуються як додаткова література наступні наукові праці Н.М. Малісевич:

1. Малісевич Н. М., Середюк О. Є.. Аналіз патентозахищених технічних рішень у сфері визначення теплоти згорання природного газу. *Методи та прилади контролю якості*. 2018. № 1 (40). С. 58-69.

2. Середюк О.Є., Малісевич Н.М.. Дослідження впливу температурного фактору за експрес-контролю теплоти згорання природного газу. *Метрологія та прилади*. 2020. №2(82). С. 44-50.

3. Спосіб експрес-визначення теплоти згорання природного газу / О.Є. Середюк, Т.В. Лютенко, Н.М. Малісевич: пат. 112737 С2 Україна, МПК (2006.01) G01N25/20. № а201512215; заявл. 09.12.2015; опубл. 10.10.2016; Бюл. № 19.

Начальник навчального відділу

Доцент каф. МІВТ, к.т.н., доц.

Я.В. Штанько

А.Г. Винничук