

## 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 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.

Аналогічним методом 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.

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  $35,3 \text{ МДж/м}^3$  ( $8431 \text{ ккал/м}^3$ ) і газоподібного стану пропан-бутанової суміші скрапленого газу калорійністю  $46,8 \text{ МДж/м}^3$  ( $11178 \text{ ккал/м}^3$ ). 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 згорання 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 згорання природного газу.

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  $\pm 1,61\%$ ), який обґрунтовує можливість практичного застосування цього методу за місцем газоспоживання.

**Ключові слова:** природний газ, вуглеводневі гази, теплота згорання, 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.

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. №1А. 2020 р. с. 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.
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* : 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.
6. 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.
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. p. 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, 39-43.
9. Спосіб експрес-визначення теплоти згорання природного газу : пат. 112737 С2 Україна, МПК (2006.01) G01N25/20. Середюк О.Є., Лютенко Т.В.,

- Малісевич Н.М. № а201512215 ; заявл. 09.12.2015; опубл. 10.10.2016; Бюл. № 19.
10. Середюк О. Є., Воцинський В. С., Середюк Д. О., Малісевич Н. М. Калібрувальна поршнева установка для лічильників і витратомірів газу : пат. 120308 Україна. № а201712900 ; заявл. 26.12.2017 ; опубл. 11.11.2019, бюл. № 21. 5с.
  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* : збірник тез доповідей IV-а Міжнар. наук. конф., м.Вінниця, 31 жовтня – 2 листопада 2017р. Вінниця : 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., м. Ів.-Франківськ, 15-19 трав. 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* збірник тез доповідей IV-а Міжнар. наук. конф., м.Вінниця, 31 жовтня – 2 листопада 2017р. Вінниця : 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. 6-ої наук.-практ. конф. 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 нафтогазпромислового обладнання* : зб. матеріалів доп. 8-ої наук.-техн. конф. - 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 доповідей Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених у царині метрології, 13-18 лютого 2018 р., м. Славське: тези доповідей. 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., м. Київ 15 – 16 травня 2018 р. м. Київ : С. 204-205.
  18. 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, м. Славське, 29 січня - 2 лютого 2019 р. Львів: 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. 18 Міжнар. наук.о-техн. конф., м. Київ 15 - 16 травня 2019 р.
  20. 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. м. Івано-Франківськ 10-11 жовтня 2019р.
  21. 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, м. Одеса 16-17 травня 2019 р., м. Одеса, 2019. С.47-48.
  22. О.Є. Середюк, Н.М. Малісевич. Практичний спрощений алгоритм визначення коефіцієнта стисливості біогазу. *Системи-2018* : тези доп. Міжнар. наук.-техн. конф., м. Львів, 22-23 листопада 2018 р. 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* збірник тез доповідей V-а Міжнар. наук. конф., м.Вінниця, 29-30 жовтня 2019 р.
24. 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, м. Івано-Франківськ 19-20 листопада 2019 р., м. Івано-Франківськ. 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, м. Славське, 4-7 лютого 2020 р., Львів: 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*. Том 1: 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  $35.3 \text{ MJ/m}^3$  ( $8431 \text{ kcal/m}^3$ ) and gaseous propane-butane mixture of liquefied gas with the calorific value of  $46.8 \text{ MJ/m}^3$  ( $11178 \text{ kcal/m}^3$ ). 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.



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*. №1A. 2020 p. P. 134-135.
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.
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.
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 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. p. 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, 39-43.
9. Спосіб експрес-визначення теплоти згорання природного газу : пат. 112737 С2 Україна, МПК (2006.01) G01N25/20. Serediuk O.Є., Лютенко Т.В., Malisevych H.M. № a201512215 ; заявл. 09.12.2015; опубл. 10.10.2016; Бюл.

- № 19. The method of rapid determination of the heat of combustion of natural gas: pat. 112737 C2 Ukraine, IPC (2006.01) G01N25 / 20. Serediuk O.E., Lyutenko T.V., Malisevych N.M. № a201512215; declared 09.12.2015; publ. 10/10/2016; Bull. № 19.
10. Serediuk O. E., Вощинський В. С., Serediuk Д. О., Malisevych N. M. Калібрувальна поршнева установка для лічильників і витратомірів газу : пат. 120308 Україна. № a201712900 ; заявл. 26.12.2017 ; опубл. 11.11.2019, бюл. № 21. 5с. Serediuk O. E., Voshchinsky V. S., Serediuk D. O., Malisevych N. M. Calibration piston installation for meters and gas flow meters: pat. 120308 Ukraine. № a201712900; declared 26/12/2017; publ. 11/11/2019, bul. № 21. 5p.
  11. Serediuk O. E., Варша З. Л., Malisevych B. B., 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 : 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 : 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. 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. - 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: abstracts. 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: 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.
  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. Ivano-Frankivsk October 10-11, 2019.
  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, Odessa, May 16-17, 2019, Odessa, 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.*, Lviv, November 22-23, 2018, pp. 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., Vinnytsia, October 29-30, 2019.
24. Malisevych N. M. 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, м. Івано-Франківськ 19-20 листопада 2019 р., м. Івано-Франківськ. С. 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.