

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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ТКАЧУК ВІТАЛІЙ ВАЛЕРІЙОВИЧ

УДК 006.91:681.121.833

ДИСЕРТАЦІЯ

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ
ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИРОДНОГО ГАЗУ З
ВИКОРИСТАННЯМ ТЕРМОАНЕМОМЕТРІЇ**

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

В. В. Ткачук
(підпис, ініціали та прізвище
здобувача)

Науковий керівник:

Середюк Орест Євгенович,
доктор технічних наук, професор

АНОТАЦІЯ

Ткачук В. В. Удосконалення методу та засобів для вимірювання енергетичних характеристик природного газу з використанням термоанемометрії. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка. Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Міністерство освіти і науки України, Івано-Франківськ, 2024.

Дисертація присвячена вирішенню актуального науково-прикладного завдання у галузі вимірювання і контролю якісних та енергетичних параметрів природного газу – удосконалення методу та технічних засобів вимірювання якісних та енергетичних характеристик природного газу з використанням термоанемометрії.

Об'єктом дослідження є теплофізичні процеси взаємодії термоанемометричного сенсора та рухомого робочого середовища з врахуванням впливу вологи, як одного із якісних показників природного газу, що безпосередньо впливає на його енергетичні характеристики.

Предметом дослідження є засоби вимірювальної техніки, до складу яких входять термоанемометричні сенсори, їх математичні та метрологічні моделі.

В роботі здійснено аналіз сучасного стану наукового, нормативного і технічного забезпечення при вимірюванні об'ємної та масової витрати з врахуванням енергетичних характеристик та якісних параметрів природного газу.

У дисертаційній роботі вирішена теоретико-практична задача, що пов'язана із удосконаленням методу та засобів вимірювання енергетичних характеристик природного газу з використанням термоанемометрії. А саме врахування фізико-хімічних показників середовища, з подальшим моделюванням, апробацією теоретичних результатів та побудовою методико-концептуальних підходів задля вирішення поставлених цілей та завдань дослідження.

У вступі розкрито актуальність проблеми визначення енергетичних та

якісних характеристик газу методами та засобами термоанемометрії, обґрунтовано необхідність вирішення даних проблем та їх значущість, відображено зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами, темами; сформульовано мету та поставлено основні завдання для даного напрямку дослідження; визначено **об'єкт та предмет дослідження**; вказано наукову новизну та викладено практичне значення отриманих результатів, зазначено особисті внески здобувача, які викладені в публікаціях за темою роботи, подано відомості про кількість публікацій автора та ступінь апробації роботи.

У **першому** розділі проведено аналіз сучасного стану наукового, нормативного і технічного забезпечення при вимірюванні енергетичних та якісних характеристик вологого природного газу.

В процесі дослідження нових вимірювальних технологій у побутових smart-лічильниках природного газу встановлено актуальність їх удосконалення шляхом встановлення додаткового обладнання зі спеціальними вимірювальними термоанемометричними сенсорами і блоками опрацювання інформації.

Визначено сучасні тенденції розвитку термоанемометрії у сфері обліку природного газу. Встановлено шляхи розвитку термоанемометрії, які зосереджені у вдосконаленні методик вимірювання, безпосередній розробці вимірювальних сенсорів, витратовимірювальних установок та систем на їх базі.

Розроблено новий методологічний підхід, що передбачає використання одного індивідуально каліброваного лічильника на природному газі для калібрування набору паралельно встановлених лічильників газу одного типорозміру. Такий підхід дозволить оцінювати метрологічні характеристики еталонних лічильників, що створить передумови для побудови еталонних установок для проведення метрологічних досліджень і перевірки побутових лічильників на природному газі.

У **другому** розділі здійснено теоретичні дослідження процесу вимірювання енергетичних характеристик вологого природного газу.

Розглянуто актуальність дослідження вологовмісту пластового природного газу. Виходячи з класичних рівнянь розрахунку вологовмісту та довідкових даних

змодельовано графік, що відображає залежність теплоємності природного газу від його вологості та температури. Що вказує на зв'язок теплофізичних властивостей природного пластового газу при його термоанемометричних дослідженнях.

Теоретично досліджено вплив вологості повітря на теплофізичні характеристики при функціонуванні термоанемометричних сенсорів. За результатами моделювання встановлено суттєвий вплив вологи на теплофізичні характеристики робочого середовища, що повинно бути враховано при функціонуванні термоанемометричних сенсорів. При постійній швидкості вологого повітря встановлено, що вихідний сигнал термоанемометричного сенсора може бути використаний як інформативний параметр для контролю вологості повітря.

Змодельовано вплив вологи природного газу при термоанемометричних вимірюваннях. Дослідження показують безпосередній вплив вологи на теплофізичні характеристики природного газу при його термоанемометричних дослідженнях. Більш суттєвими є зміни при вищих температурах газового середовища. Тому цей фактор необхідно враховувати при виконанні термоанемометричних вимірювань.

За використання методів комп'ютерного моделювання досліджено взаємозв'язок якісних характеристик вологості та компонентного складу природного газу з його теплофізичними характеристиками, зокрема теплопровідністю та теплоємністю. Отримані регресійні залежності впливу відносної вологості та компонентного складу на теплофізичні характеристики природного газу, які вказують на зменшення теплопровідності та теплоємності зі збільшенням вуглеводневої групи: етану, пропану, бутану, пентану та неуглеводневої групи – азоту та вуглекислого газу. Здійснено чисельне моделювання впливу зміни компонентного складу природного газу на його теплофізичні параметри за різних значень його вологості.

Змодельовані залежності встановлюють важливість врахування впливу якісних та теплофізичних характеристик природного газу при його термоанемометричних дослідженнях.

Змодельовано функціонування термоанемометричних перетворювачів за умов газоводневих сумішей. Встановлено, що зростання основних теплофізичних параметрів суміші напряму залежить від вмісту метану та водню, адже суміші з більшим вмістом метану характеризуються більшими числовими значеннями теплофізичних параметрів.

Досліджено алгоритми визначення теплопровідності природного газу для різних компонентних складів, значень вологості та вмісту додаваного водню. Встановлено, що алгоритми з врахуванням водню потребують додаткових досліджень.

У **третьому** розділі розроблено та проведено експериментальні дослідження вимірювальної техніки при функціонуванні на вологих газоплинних середовищах.

Розроблено концепцію побудови лабораторного стенду для дослідження впливу вологи газового потоку на функціонування засобів термоанемометрії. Викладена концепція відкриває можливість експериментального дослідження впливу вмісту водяної пари на зміну вихідного сигналу термоанемометричного засобу вимірювання при різних значеннях витрат газового потоку та їх температури.

Викладено методологію визначення впливу вологості робочого середовища на покази термоанемометричних перетворювачів за різних значень параметрів газового середовища (тиск, температура, вологість, витрата) при використанні повітря або виду певного робочого газу, або природного газу.

Досліджено вплив теплофізичних характеристик газового середовища на чутливість термоанемометричного перетворювача. Результати виконаних досліджень обґрунтовують необхідність розроблення вдосконалених технічних рішень, які забезпечили би одночасно визначення якісних та кількісних характеристик досліджуваного газу з врахуванням вологості та вмісту водню у суміші.

Теоретично досліджено вплив швидкості руху та складу газового потоку на чутливість термоанемометричних перетворювачів. Результати моделювання показали, що чутливість термоанемометричного давача зростає із зменшенням

швидкості потоку. При цьому чутливість при вимірюванні витрати повітря є більшою від чутливості при вимірюванні природного газу, а також сумішей природного газу з воднем. Збільшення об'ємного вмісту водню приводить до зменшення чутливості термоанемометричного методу вимірювання.

Закладено основи для концепції метрологічної моделі еталонної установки для відтворення вологого потоку з врахуванням концепції невизначеностей.

Метрологічно досліджено еталонну установку для відтворення масової витрати вологого повітря. За результатами теоретичних досліджень розроблено алгоритми оцінки стандартних невизначеностей вимірювань контрольного об'єму еталонної установки, часу її відтворення, маси утвореної вологи, відносної вологості робочого середовища та параметрів роботи установки, а також алгоритм розрахунку коефіцієнта стисливості вологого повітря, необхідного для метрологічної оцінки еталонних установок для відтворення масових витрат вологого повітря. Викладено вирази для оцінки комбінованих і розширених невизначеностей під час роботи розглянутої установки. Розроблена метрологічна модель може бути використана для оцінки метрологічних характеристик еталонних установок, що працюють на різних видах газового середовища, включаючи природний газ.

Викладено концепцію фізичного моделювання впливу вологи на роботу термоанемометричних сенсорів. Розроблено модель макету лабораторної установки для дослідження впливу вологи на роботу витратовимірювальних засобів та викладено функціональну схему установки, яка може реалізовуватися на повітряному середовищі.

Розроблений алгоритм функціонування лабораторної установки з наведенням розробленої методології розрахунку вологості, масової і об'ємної витрати генерованого робочого середовища відповідно до вибраних параметрів роботи установки.

Здійснено математичне моделювання режимів роботи лабораторної установки і встановлені граничні режими його функціонування, які визначаються максимально можливим насиченням вихідного потоку водяною парою.

Проведено експериментальні дослідження функціонування термоанемометра на повітрі різної вологості. Експериментально встановлено нелінійний вплив зростання вологості потоку повітря на роботу термоанемометра.

У **четвертому** здійснено метрологічний аналіз еталонної установки для відтворення масових витрат вологого повітря на базі теорії невизначеності.

Розроблено алгоритми розрахунку стандартних невизначеностей вимірювання контрольного об'єму еталонної установки, часу його відтворення, маси генерованої вологи, відносної вологості робочого середовища та робочих параметрів установки, а також алгоритм розрахунку коефіцієнта стисливості вологого повітря, що необхідно для метрологічного оцінювання еталонної установки для відтворення масових витрат вологого повітря.

Ключові слова: природний газ, термоанемометр, вологість, енергетичні характеристики, якість, повітря, невизначеність, теплопровідність, теплоємність, витратомір, лічильник, тиск, температура, компонентний склад, трубопровід.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

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. 131–132. (журнал входить до міжнародної наукометричної бази *Web of Science*)

2. Середюк О. Є., Криницький О. С., Ткачук В. В., Жонса М. Оцінювання невизначеності калібрування еталонних лічильників малих типорозмірів на природному газі. *Метрологія та вимірювальна техніка* : зб. тез. доп. XII міжнар. наук.-тех. конф., 6–8 жовт. 2020 р., Харків, 2020. С. 160.

3. Ткачук В. В., Середюк О. Є. Дослідження впливу теплофізичних параметрів природного газу його термоанемометричних дослідженнях. *Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості* : зб. тез доп. всеукр. наук.-практ. конф. мол. уч. і студ., м. Івано-Франківськ, 8 жовт. 2020р. Івано-Франківськ, 2020. С. 220–221.

4. Середюк О. Є., Ткачук В. В., Саманів Л. В. Дослідження впливу вологості повітря на теплофізичні характеристики при функціонуванні термоанемометричних сенсорів. *Приладобудування та метрологія: сучасні проблеми, тенденції розвитку*: зб. тез IV всеукр. наук.-практ. конф., м. Луцьк, 29-30 жовт. 2020 р. Луцьк, 2020. С. 82–84.

5. Середюк О. Є., Криницький О. С., Ткачук В. В. Сучасні тенденції розвитку термоанемометрії у сфері обліку природного газу. *Український метрологічний журнал*. 2020. № 3А. С. 51–55 (журнал входить до міжнародної наукометричної бази *Web of Science*)

6. Середюк О. Є., Ткачук В. В. Моделювання впливу вологи природного газу при термоанемометричних вимірюваннях. *Прикладні науково-технічні дослідження*: зб. матер. V міжнар. наук.-практ. конф., м. Івано-Франківськ, 5–7 квіт. 2021 р. Івано-Франківськ, 2021. С. 222–224.

7. Ткачук В. В., Середюк О. Є., Боднар Р. Т., Саманів Л. В. Моделювання впливу компонентного складу та вологості природного газу на його теплофізичні характеристики. *Перспективні технології та прилади*. 2021. № 18. С. 129–137. (фахове видання України)

8. Ткачук В. В., Середюк О. Є. Моделювання функціонування термоанемометричних перетворювачів за умов газоводневих сумішей. *Нафтогазова енергетика 2021*: зб. матер. міжнар. конф., м. Івано-Франківськ, 21–24 вер. 2021 р. Івано-Франківськ, 2021. С. 209–211.

9. Ткачук В. В. Дослідження алгоритмів визначення теплопровідності природного газу. *Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості*: зб. тез доп. всеукр. наук.-практ. конф. мол. уч. і студ., м. Івано-Франківськ, 7 жовт. 2021 р. Івано-Франківськ, 2021. С. 131–132.

10. Ткачук В. В., Середюк О. Є. Лабораторний стенд для дослідження впливу водяної пари на функціонування засобів термоанемометрії. *Приладобудування: стан і перспективи*: зб. матер. XXI міжнар. наук.-тех. конф., м. Київ, 17–18 трав. 2022р. Київ, 2022. С. 233–234.

11. Ткачук В. В., Середюк О. Є., Саманів Л. В. Методологія дослідження теплофізичних характеристик газового середовища засобами термоанемометрії. *Прогресивні напрямки розвитку автоматичних технологічних комплексів*: зб. наук. пр. VII міжнар. наук.-тех. конф. з пробл. вищ. осв. і наук., м. Луцьк, 28–30 трав. 2022р. Луцьк, 2022. С. 151–152.

12. Ткачук В. В., Середюк О. Є. Дослідження впливу теплофізичних характеристик газового середовища на чутливість термоанемометричного перетворювача. *Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості*: зб. тез доп. всеукр. наук.-практ. конф. мол. уч. і студ., м. Івано-Франківськ, 13 жовт. 2022 р. Івано-Франківськ, 2021. С. 131–132.

13. Ткачук В. В., Середюк О. Є. Дослідження впливу швидкості руху та складу газового потоку на чутливість термоанемометричних перетворювачів. *Інформаційно-вимірвальні технології IBT-2022*: зб. тез доп. міжнар. наук.-практ. конф., м. Львів, 9–10 лист. 2022 р. Львів, 2022. С. 127–128.

14. Serediuk O.Y., Malisevych V.V., Serediuk D.O., Tkachuk V.V., Dzividzinska I.S. Metrological model of the reference installation for the reproduction of moist air flow based on the concept of uncertainty. *Uncertainty in Measurement: Scientific, Normative, Applied and Methodical Aspects: XIX International Scientific and Technical Seminar*, Sozopol, December 7–8 2022. Bulgaria, 2022. P. 38–40.

15. Середюк О. Є., Малісевич В. В., Ткачук В. В. Метрологічні дослідження еталонної установки для відтворення масових витрат вологого повітря. *Український метрологічний журнал*. 2023. № 1. С. 61–66. (журнал входить до міжнародної наукометричної бази *Web of Science*)

16. Ткачук В. В., Середюк О. Є. Концепція фізичного моделювання впливу вологи на роботу термоанемометричних сенсорів. *Методи та прилади контролю якості*. 2023. № 1(50). С. 31–40. (фахове видання України)

17. Serediuk O., Malisevych V., Tkachuk V. Eksperymentalne badania wpływu wilgotności gazu ziemnego na działanie czujników termoanemometrycznych. *Metrologia: studia i monografie*. Opole: Politechnika Opolska. 2023. Vol. 585. P. 221–228. (періодичне закордонне видання)

18 Середюк О.Є., Малісевич В.В., Середюк Д.О., Ткачук В.В. Установка для перевірки витратомірів і лічильників газу. *Інтелектуальний продукт вчених, винахідників і раціоналізаторів Прикарпаття: XIV випуск щорічного каталогу найвагоміших винаходів, корисних моделей, промислових зразків і раціоналізаторських пропозицій Галицьких кмітливців*. м. Івано-Франківськ, 2023. С. 36-37.

19. Установка для перевірки витратомірів і лічильників газу / О. Є. Середюк, В. В. Малісевич, Д. О. Середюк., В. В. Ткачук: пат. 153729 U Україна: МПК (2023.01) G01F 25/00. № u 202301207; заявл. 23.03.2023; опубл. 16.08.2023, Бюл. № 33. 4 с. (Патент на корисну модель)

ABSTRACT

Tkachuk, V. V. Improvement of the method and means for measuring the energy characteristics of natural gas using thermoanemometry. Qualification scientific work on the rights of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 152 - Metrology and information-measuring technique. Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ministry of Education and Science of Ukraine, Ivano-Frankivsk, 2024.

The dissertation is devoted to solving the urgent scientific and applied problem in the field of measuring and controlling the quality and energy parameters of natural gas - improving the method and technical means of measuring the quality and energy characteristics of natural gas using thermoanemometry.

The **object** of the research is the thermophysical processes of interaction between the thermoanemometric sensor and the moving working medium, taking into account the influence of humidity as one of the quality indicators of natural gas, which directly affects its energy characteristics.

The **subject** of the research is measuring instruments that include thermoanemometric sensors, their mathematical and metrological models.

The work analyzes the current state of scientific, normative and technical support for measuring volumetric and mass flow rate, taking into account the energy characteristics and quality parameters of natural gas.

The dissertation solves a theoretical and practical problem related to the improvement of the method and means of measuring the energy characteristics of natural gas using thermoanemometry. Namely, taking into account the physicochemical indicators of the environment, followed by modeling, approbation of theoretical results and the construction of methodological and conceptual approaches to solve the set goals and objectives of the study.

The introduction highlights the urgency of determining the energy and quality characteristics of gas using thermoanemometry methods. It justifies the necessity of

addressing these problems and their significance, reflects the connection of the dissertation work with scientific programs, plans, and topics; formulates the goal and sets the main tasks for this research direction; defines the **object** and **subject** of the research; indicates the scientific novelty and presents the practical significance of the obtained results, notes the personal contributions of the applicant, which are presented in publications on the topic of the work, provides information about the number of the author's publications and the degree of approbation of the work.

The **first** chapter analyzes the current state of scientific, regulatory, and technical support for measuring the energy characteristics of humid natural gas.

In the process of researching new measurement technologies in household smart gas meters, the relevance of their improvement by installing additional equipment with special thermoanemometric sensors and information processing units has been established.

Modern trends in the development of thermoanemometry in the field of natural gas accounting have been identified. The ways of developing thermoanemometry have been established, which are focused on improving measurement methods, the direct development of measuring sensors, flow meters, and systems based on them.

A new methodological approach has been developed that involves using one individually calibrated natural gas meter to calibrate a set of parallel-installed gas meters of the same size. This approach will allow assessing the metrological characteristics of reference meters, which will create the prerequisites for building reference installations for conducting metrological studies and verification of household gas meters.

In the **second** chapter, theoretical studies of the process of measuring the energy characteristics of humid natural gas were carried out.

The relevance of studying the moisture content of reservoir natural gas has been considered. Based on the classical equations for calculating moisture content and reference data, a graph was modeled that reflects the dependence of the heat capacity of natural gas on its humidity and temperature. This indicates the connection between the thermophysical properties of natural reservoir gas during its thermoanemometric studies.

A theoretical study of the impact of air humidity on the thermophysical characteristics during the operation of thermoanemometric sensors has been conducted. Modeling results have established a significant influence of humidity on the thermophysical characteristics of the working medium, which must be considered when operating thermoanemometric sensors. At a constant velocity of humid air, it was established that the output signal of the thermoanemometric sensor can be used as an informative parameter for controlling air humidity.

The influence of natural gas humidity on thermoanemometric measurements has been modeled. The studies show a direct impact of humidity on the thermophysical characteristics of natural gas during its thermoanemometric studies. Changes are more significant at higher temperatures of the gas medium. Therefore, this factor must be considered when performing thermoanemometric measurements.

Using computer modeling methods, the relationship between the quality characteristics of humidity and the component composition of natural gas and its thermophysical characteristics, namely thermal conductivity and heat capacity, has been investigated. The obtained regression dependencies of the influence of relative humidity and component composition on the thermophysical characteristics of natural gas indicate a decrease in thermal conductivity and heat capacity with an increase in the hydrocarbon group: ethane, propane, butane, pentane, and the non-hydrocarbon group - nitrogen and carbon dioxide. Numerical modeling of the influence of changes in the component composition of natural gas on its thermophysical parameters at different values of its humidity has been carried out.

The modeled dependencies establish the importance of considering the influence of the quality and thermophysical characteristics of natural gas during its thermoanemometric studies.

The operation of thermoanemometric transducers under conditions of gas-hydrogen mixtures has been modeled. It has been established that the increase in the main thermophysical parameters of the mixture directly depends on the content of methane and hydrogen, since mixtures with a higher content of methane are characterized by higher numerical values of thermophysical parameters.

Algorithms for determining the thermal conductivity of natural gas for various component compositions, humidity values, and hydrogen content have been investigated. It has been established that algorithms taking into account hydrogen require additional research.

In the **third** chapter, experimental studies of measuring equipment during operation in humid gas-flow environments were developed and conducted.

A concept for building a laboratory stand for studying the influence of gas flow humidity on the operation of thermoanemometry means has been developed. The presented concept opens up the possibility of experimental research on the influence of water vapor content on the change in the output signal of a thermoanemometric measuring instrument at different values of gas flow rate and their temperature.

A methodology has been presented for determining the influence of the humidity of the working environment on the readings of thermoanemometric transducers at different values of gas environment parameters (pressure, temperature, humidity, flow rate) when using air or a type of working gas, or natural gas.

The influence of the thermophysical characteristics of the gas environment on the sensitivity of the thermoanemometric transducer has been investigated. The results of the studies carried out justify the need to develop advanced technical solutions that would simultaneously determine the qualitative and quantitative characteristics of the gas under study, taking into account the humidity and hydrogen content in the mixture.

A theoretical investigation was conducted into the influence of flow velocity and gas composition on the sensitivity of thermoanemometric transducers. Modeling results showed that the sensitivity of the thermoanemometric sensor increases with decreasing flow velocity. Moreover, the sensitivity when measuring air flow rate is higher than when measuring natural gas or natural gas-hydrogen mixtures. An increase in the volumetric content of hydrogen leads to a decrease in the sensitivity of the thermoanemometric measurement method.

The foundations for a metrological model of a reference setup for reproducing humid flow, considering the concept of uncertainties, have been laid.

A reference setup for reproducing the mass flow rate of humid air was metrologically investigated. Based on the results of theoretical studies, algorithms were developed to evaluate the standard uncertainties of measurements of the reference setup's control volume, its reproduction time, the mass of generated moisture, the relative humidity of the working environment, and the operating parameters of the setup, as well as an algorithm for calculating the compressibility factor of humid air, necessary for metrological evaluation of reference setups for reproducing the mass flow rates of humid air. Expressions are presented for evaluating the combined and expanded uncertainties during the operation of the considered setup. The developed metrological model can be used to evaluate the metrological characteristics of reference setups operating on various types of gas environments, including natural gas.

The concept of physical modeling of the influence of humidity on the operation of thermoanemometric sensors has been presented. A model of a laboratory setup for studying the influence of humidity on the operation of flow measuring devices has been developed, and a functional diagram of the setup that can be implemented in an air environment has been presented.

An algorithm for the operation of a laboratory setup has been developed with the introduction of the developed methodology for calculating humidity, mass and volumetric flow rate of the generated working environment according to the selected operating parameters of the setup.

Mathematical modeling of the operating modes of the laboratory setup has been carried out, and the limiting operating modes have been established, which are determined by the maximum possible saturation of the output flow with water vapor.

Experimental studies of the operation of a thermoanemometer in air of various humidity have been conducted. Experimentally, a nonlinear influence of the increase in air flow humidity on the operation of the thermoanemometer has been established.

In the **fourth** chapter, a metrological analysis of the reference setup for reproducing mass flow rates of humid air was carried out based on the uncertainty theory.

Algorithms have been developed for calculating the standard uncertainties of measuring the control volume of the reference setup, its reproduction time, the mass of

generated moisture, the relative humidity of the working environment, and the operating parameters of the setup, as well as an algorithm for calculating the compressibility factor of humid air, which is necessary for the metrological evaluation of the reference setup for reproducing the mass flow rates of humid air.

Key words: natural gas, hot-wire anemometer, humidity, energy characteristics, quality, air, uncertainty, thermal conductivity, heat capacity, flow meter, meter, pressure, temperature, composition, pipeline.

LIST OF PUBLICATIONS ON THE SUBJECT OF THE DISSERTATION

Scientific works presenting the main results of the dissertation:

1. Serediuk, O. E., Malisevych, N. M., Tkachuk, V. V., Serediuk, D. O. New Measurement Technologies in Household Smart Gas Meters. *Ukrainian Metrological Journal*. 2020. No. 1A. pp. 131-132. (Indexed in Web of Science)

2. Serediuk, O. E., Krynytskyi, O. S., Tkachuk, V. V., Zhonsa, M. Uncertainty Evaluation of Calibration of Small-Size Reference Gas Meters. *Metrology and Measurement Technique: Proceedings of the XII International Scientific and Technical Conference, Kharkiv, October 6-8, 2020*, pp. 160.

3. Tkachuk, V. V., Serediuk, O. E. Investigation of the Influence of Thermophysical Parameters of Natural Gas on Its Thermoanemometric Studies. *Information Technologies in Education, Engineering and Industry: Proceedings of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students, Ivano-Frankivsk, October 8, 2020*, pp. 220-221.

4. Serediuk, O. E., Tkachuk, V. V., Samaniv, L. V. Investigation of the Influence of Air Humidity on Thermophysical Characteristics during the Operation of Thermoanemometric Sensors. *Instrument Engineering and Metrology: Modern Problems, Development Trends: Proceedings of the IV All-Ukrainian Scientific and Practical Conference, Lutsk, October 29-30, 2020*, pp. 82-84.

5. Serediuk, O. E., Krynytskyi, O. S., Tkachuk, V. V. Modern Trends in the Development of Thermoanemometry in the Field of Natural Gas Accounting. *Ukrainian Metrological Journal*. 2020. No. 3A, pp. 51-55. (Indexed in Web of Science)

6. Serediuk, O. E., Tkachuk, V. V. Modeling the Influence of Natural Gas Humidity on Thermoanemometric Measurements. *Applied Scientific and Technical Research: Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference, Ivano-Frankivsk, April 5-7, 2021*, pp. 222-224.

7. Tkachuk, V. V., Serediuk, O. E., Bodnar, R. T., Samaniv, L. V. Modeling the Influence of Component Composition and Humidity of Natural Gas on Its Thermophysical Characteristics. *Perspective Technologies and Devices*. 2021, No. 18,

pp. 129-137. (*Professional Publication of Ukraine*)

8. Tkachuk, V. V., Serediuk, O. E. Modeling the Operation of Thermoanemometric Transducers under Conditions of Gas-Hydrogen Mixtures. *Oil and Gas Energy 2021: Proceedings of the International Conference, Ivano-Frankivsk, September 21-24, 2021*, pp. 209-211.

9. Tkachuk, V. V. Research of Algorithms for Determining the Thermal Conductivity of Natural Gas. *Information Technologies in Education, Engineering and Industry: Proceedings of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students, Ivano-Frankivsk, October 7, 2021*, pp. 131-132.

10. Tkachuk, V. V., Serediuk, O. E. Laboratory Stand for Studying the Influence of Water Vapor on the Operation of Thermoanemometric Devices. *Instrument Engineering: State and Prospects: Proceedings of the XXI International Scientific and Technical Conference, Kyiv, May 17-18, 2022*, pp. 233-234.

11. Tkachuk, V. V., Serediuk, O. E., Samaniv, L. V. Methodology for Studying the Thermophysical Characteristics of a Gaseous Medium Using Thermoanemometry. *Progressive Directions of Development of Automatic Technological Complexes: Proceedings of the VII International Scientific and Technical Conference on Higher Education and Science Problems, Lutsk, May 28-30, 2022*, pp. 151-152.

12. Tkachuk, V. V., Serediuk, O. E. Investigation of the Influence of Thermophysical Characteristics of a Gaseous Medium on the Sensitivity of a Thermoanemometric Transducer. *Information Technologies in Education, Engineering and Industry: Proceedings of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students, Ivano-Frankivsk, October 13, 2022*, pp. 131-132.

13. Tkachuk, V. V., Serediuk, O. E. Investigation of the Influence of the Velocity and Composition of a Gas Flow on the Sensitivity of Thermoanemometric Transducers. *Information and Measurement Technologies IVT-2022: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Lviv, November 9-10, 2022*, pp. 127-128.

14. Serediuk, O.Y., Malisevych, V.V., Serediuk, D.O., Tkachuk V.V., Dzividzinska I.S. Metrological Model of the Reference Installation for the Reproduction of Moist Air Flow Based on the Concept of Uncertainty. *Uncertainty in Measurement:*

Scientific, Normative, Applied and Methodical Aspects: XIX International Scientific and Technical Seminar, Sozopol, December 7-8, 2022, Bulgaria, pp. 38-40.

15. Serediuk, O. E., Malisevych, V. V., Tkachuk, V. V. Metrological Research of a Reference Setup for Reproducing Mass Flow Rates of Moist Air. *Ukrainian Metrological Journal*. 2023. No. 1, pp. 61-66. (*Indexed in Web of Science*)

16. Tkachuk, V. V., Serediuk, O. E. The Concept of Physical Modeling of the Influence of Humidity on the Operation of Thermoanemometric Sensors. *Methods and Instruments for Quality Control*. 2023. No. 1(50), pp. 31-40. (*Professional Publication of Ukraine*)

17. Serediuk, O., Malisevych, V., Tkachuk, V. Experimental Studies of the Influence of Natural Gas Humidity on the Operation of Thermoanemometric Sensors. *Metrology: Studies and Monographs*. Opole: Politechnika Opolska. 2023. Vol. 585, pp. 221-228. (*International periodical publication*)

18. Serediuk, O. E., Malisevych, V. V., Serediuk, D. O., Tkachuk, V. V. Device for Checking Flow Meters and Gas Meters. *Intellectual Product of Scientists, Inventors and Rationalizers of Prykarpattya: XIV Issue of the Annual Catalog of the Most Significant Inventions, Utility Models, Industrial Designs and Rationalization Proposals of Halychyna Inventors*. Ivano-Frankivsk, 2023, pp. 36-37.

19. A Device for Testing Gas Flow Meters and Counters / O. Ye. Serediuk, V. V. Malisevych, D. O. Serediuk, V. V. Tkachuk: patent 153729 U Ukraine: IPC (2023.01) G01F 25/00. No. u 202301207; filed 23.03.2023; published 16.08.2023, Bull. No. 33. 4 p. (*Utility model patent*)

ЗМІСТ

ВСТУП.....	22
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ НАУКОВОГО, НОРМАТИВНОГО І ТЕХНІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРИ ВИМІРЮВАННІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОГОГО ПРИРОДНОГО ГАЗУ	
1.1 Аналіз основних термінів і понять при дослідженні якісних і енергетичних характеристик у сфері обліку природного газу	30
1.2 Аналіз нормативного забезпечення контролю енергетичних характеристик природного газу.....	40
1.3 Аналіз сучасних методів та засобів технічної реалізації дослідження енергетичних характеристик природного газу.....	47
1.4 Сучасний стан наукових досліджень енергетичних характеристик природного газу	62
1.5 Вибір та обґрунтування напрямку дослідження.....	73
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИМІРЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОГОГО ПРИРОДНОГО ГАЗУ	
2.1 Теоретичні дослідження впливу вологості природного газу на енергетичні характеристики.....	75
2.2 Моделювання впливу компонентного складу та вологості природного газу на його теплофізичні характеристики.....	83
2.3 Дослідження впливу вологості повітря на теплофізичні та енергетичні характеристики при функціонуванні термоанемометричних сенсорів	97
2.4 Моделювання функціонування термоанемометричних перетворювачів за умов газозводневих сумішей.....	99
2.5 Дослідження впливу швидкості руху та складу газового потоку на чутливість термоанемометричних перетворювачів.....	104
2.6 Моделювання впливу вологи на градууювальну характеристику термоанемометричних сенсорів	108

РОЗДІЛ 3 РОЗРОБЛЕННЯ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ ПРИ ФУНКЦІОНУВАННІ НА ВОЛОГИХ ГАЗОПЛИННИХ СЕРЕДОВИЩАХ

3.1 Концепція фізичного моделювання впливу вологи на роботу термоанемометричних сенсорів.....111

3.2 Розроблення лабораторного стенду для дослідження впливу водяної пари на функціонування засобів термоанемометрії.....122

3.3 Експериментальні дослідження впливу вологого потоку на роботу термоанемометрів при вимірюванні витрати та об'єму129

РОЗДІЛ 4 МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ УДОСКОНАЛЕНОГО МЕТОДУ ТА ЗАСОБУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИРОДНОГО ГАЗУ

4.1 Метрологічні дослідження еталонної установки для відтворення масових витрат вологого повітря на базі теорії невизначеності.....141

ВИСНОВКИ.....151

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....153

ДОДАТОК А165

ДОДАТОК Б166

ВСТУП

Актуальність теми. В теперішній час розвитку економіки держави енергоносії займають рушійну роль в діяльності підприємств, а точність кількісної оцінки енергоносіїв займає важливе місце в питаннях обліку. На сьогодні одним із головних енергоносіїв є природний газ, який і надалі відіграватиме значну роль в енергозабезпеченні української та світової економіки [1]. В комерційних цілях розрахунок природного газу проводиться в об'ємних одиницях, що ставить ряд питань необхідних для вирішення щодо достовірності кількісної оцінки доставленого та спожитого газу для суб'єктів комерційного процесу.

Враховуючи фізико-хімічні властивості природного газу як енергоносія, такий фізичний параметр як його об'єм не можна вважати основною одиницею при його обліку без встановлення його якісних характеристик. Відомо [2], що тиск та температура безпосередньо впливають на об'єм вимірюваного природного газу. Також за різних компонентних складів природний газ буде мати різні якісні та кількісні характеристики, що вже вказує на "двовимірність" оцінювання природного газу в енергетичних одиницях [3].

При вирішенні питання кількісної оцінки спожитої енергії газу досить суттєву відповідь можуть надати термоанемометричні перетворювачі, які наділені високою точністю, швидкодією, широким діапазоном вимірювань та малою інерційністю [4]. Термоанемометричні перетворювачі безпосередньо можуть визначити об'ємну та масову витрату облікованого середовища, адже за різних якісних характеристик природного газу взаємодія давача із середовищем буде різною. В процесах обліку енергоносіїв при застосуванні термоанемометричного методу необхідно враховувати теплофізичні характеристики газового середовища, зокрема теплопровідність та теплоємність.

Отже, при термоанемометричних методах обліку природного газу необхідно враховувати окрім фізико-хімічних властивостей газового середовища його теплофізичні характеристики. Тому актуальними є дослідження теплофізичних

властивостей природного газу не тільки при витратометрії, але й з наукової точки зору при моделюванні процесів термоанемометрії.

Також на сьогодні в питаннях енергетичного обліку промислового і побутового сектору України важливого значення набуває контроль якості, в тому числі природного газу. Одним із основних параметрів при цьому виступають його енергетичні та якісні характеристики як енергоносія, наприклад, теплота згоряння (вища та нижча) та вологість. В свою чергу, вологість, як правило, не визначається на нормативному рівні в абсолютних або відносних одиницях для споживачів. Інформативним параметром в цьому випадку виступає температура точки роси при відповідних значеннях тиску та температури газу.

Щоб відповідати вимогам до чистого, сухого, повністю газоподібного палива, придатного для транспортування по трубопроводах і подачі до споживачів, газ повинен пройти через кілька етапів обробки, включаючи видалення рідин з газу, а саме осушення для зменшення вмісту водяної пари. Дегідратація природного газу має суттєве значення для ефективної економічної діяльності споживачів.

Також термін служби трубопроводу залежить від швидкості корозії, яка безпосередньо пов'язана з наявною вологістю в газі та сприяє окисленню металу і його руйнуванню. З цих причин стандартною практикою на підприємствах з видобутку і транспортуванню природного газу є безперервне вимірювання вмісту вологи в природному газі в критичних точках [2], щоб забезпечити надійне та правильне його транспортування до споживачів.

Водночас внаслідок пошкоджень трубопроводів або порушенню їх герметичності, в тому числі підземних, можливе попадання вологи в газопроводи. Це може призвести до зміни точності функціонування засобів обліку природного газу після точок контролю його вологості. Аналіз напрямків наукових досліджень показує, що практично відсутні результати досліджень впливу вологи на роботу лічильників газу, наприклад, турбінних, роторних, вихрових, термоанемометричних та інших.

Таким чином, актуальним є дослідження впливу вологи на функціонування засобів обліку природного газу, зокрема лічильників або витратомірів різних типів та принципів дії.

Точність та відтворюваність фізичних величин є актуальними у сфері обліку газоплинних середовищ. Достатньої уваги потребують метрологічні дослідження вимірювання витрати з врахуванням різних фізико-хімічних характеристик робочого середовища, які здійснюються за допомогою еталонних установок відтворення об'єму та витрати газових середовищ. Вони реалізують наукову і методологічну основу при визначенні метрологічних характеристик для таких засобів вимірювальної техніки як витратоміри та лічильники газу.

Як відомо [2], більшість еталонних засобів та установок для визначення метрологічних характеристик засобів у сфері витратометрії газових середовищ функціонують на сухому повітрі або сухому природному газі. Це зумовлено насамперед технічними вимогами до якісних характеристик природного газу (наприклад, молярна частка води не повинна перевищувати 0,00015 [5]), який транспортується газовими мережами. Крім того, чинні нормативні документи, які регламентують умови повірки побутових і промислових лічильників газу [6-8] передбачають функціонування еталонних установок на повітрі за умов, коли вміст вологи у ньому практично не впливає на зміну метрологічних характеристик досліджуваних лічильників газу. Такий підхід обґрунтований тим, що волога зменшує калорійність природного газу при одночасному збільшенні його об'єму і при цьому зростає можливість виникнення гідратних утворень в газових мережах низького тиску. Наявність вологи в природному газі на стадії видобування пов'язане з походженням та режимами експлуатації газових родовищ, а на стадії доставки до кінцевого споживача залежить від рівня осушення на промислових комплексах та безпосередньо від стану газотранспортної системи та умов в яких вона функціонує.

Тому актуальними є розроблення та метрологічні дослідження еталонних установок для відтворення витрат вологих газових середовищ.

Значний внесок у розвиток витратометрії та оцінювання калорійності природного газу зробили такі закордонні та вітчизняні вчені, як: Л. В. Кінг, Р. Перрі, О. Є. Середюк, С. А. Чеховський, П. М. Райтер, О. М. Карпаш, М. О. Карпаш, І. В. Рибіцький, А. В. Мотало, В. П. Мотало, Б. І. Стадник, В. В. Малісевич та інші. Водночас потребує дослідження функціонування відповідних перетворювачів, в тому числі термоанемометричних, при розширенні видів робочого середовища, зокрема вологого природного газу і газоводневих сумішей, які безпосередньо впливають на їх енергетичні характеристики.

Дисертаційна робота присвячена удосконаленню методів та засобів вимірювання енергетичних характеристик природного газу з використанням термоанемометрії та спрямована на підвищення точності результатів вимірювань шляхом удосконаленню методів та засобів із застосуванням сучасних методів обробки результатів та елементної бази.

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

Результати досліджень, що викладені у дисертаційній роботі, виконувались здобувачем відповідно до плану навчання в аспірантурі на кафедрі метрології та інформаційно-вимірювальної 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 вимірювальної техніки в нафтогазовій галузі» (2018-2021 рр.) №0119U002949, а також держбюджетної науково-дослідної роботи кафедри МІВТ ІФНТУНГ «Вдосконалення вимірювальних технологій і метрологічного забезпечення у неруйнівному контролі та обліку енергоносіїв» (2021–2023 рр.) №0121U113386. Здобувач був виконавцем окремих підрозділів, пов'язаних з удосконаленням методів та вимірювальної техніки для контролю енергетичних та якісних параметрів природного газу.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є вирішення актуального науково-прикладного завдання у галузі вимірювання і контролю якісних параметрів природного газу – удосконалення методу і технічних засобів для

визначення теплофізичних характеристик вологих газових середовищ при застосуванні термоанемометричних засобів вимірювальної техніки для сфери обліку природного газу.

Для досягнення зазначеної мети необхідно розв'язати такі **задачі**:

1) Здійснити аналіз сучасних методів і засобів вимірювання якісних характеристик природного газу та обґрунтувати шляхи реалізації при дослідженні вологості природного газу;

2) Дослідити взаємозв'язки між вологістю природного газу і його енергетичними характеристиками з врахуванням теплофізичних властивостей газових середовищ;

3) Розробити методичні засади створення установки для дослідження витрати вологих газів із застосуванням термоанемометричних сенсорів;

4) Розробити, виготовити та дослідити функціонування лабораторного стенду для відтворення і вимірювання витрат вологих газів і провести експериментальну апробацію можливостей його практичного застосування;

5) Здійснити метрологічний аналіз розробленого удосконаленого методу та засобу вимірювання енергетичних характеристик природного газу із застосуванням термоанемометричних сенсорів.

Об'єктом дослідження є теплофізичні процеси взаємодії термоанемометричного сенсора та рухомого робочого середовища з врахуванням впливу вологи, як одного із якісних показників природного газу, що безпосередньо впливає на його енергетичні характеристики.

Предметом дослідження є засоби вимірювальної техніки, безпосередньо до складу яких входять термоанемометричні сенсори, їх математичні та метрологічні моделі.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше отримано математичну модель взаємозв'язку параметрів вологих газових середовищ з їх теплофізичними характеристиками, зокрема теплопровідністю та теплоємністю, що дає можливість реалізувати процес вимірювання витрати та енергії вологих газоплинних потоків;

- вперше отримано математичну модель вимірювання масової і об'ємної витрати газу з врахуванням його вологості і коефіцієнта стисливості, що дає можливість створювати інформаційно-вимірювальні системи для вимірювання витрат і енергії вологих газів;

- теоретично досліджено вплив швидкості руху та складу вологого газового потоку на чутливість термоанемометричних перетворювачів, що забезпечує визначення оптимальних режимів їх функціонування;

- набула подальшого розвитку теорія метрологічних досліджень засобів вимірювання об'ємної та масової витрат природного газу з метою коректного оцінювання їх метрологічних характеристик з використанням концепції невизначеності вимірювань.

Практичне значення отриманих результатів:

- розроблено концепцію побудови установки для дослідження впливу вологи газового потоку на функціонування засобів термоанеметрії, яка відкриває можливість експериментального дослідження впливу вмісту вологи на зміну вихідного сигналу термоанеметра за різних значень витрат газового потоку та їх температури;

- розроблено та виготовлено макет лабораторної установки для відтворення та вимірювання об'ємної витрати вологого повітря;

- запропоновано нове технічне рішення при створенні пристроїв для метрологічного дослідження засобів вимірювання витрати вологих газових середовищ, яке захищене патентом України на корисну модель.

Особистий внесок здобувача. Основні положення, теоретико-розрахункові, аналітичні, експериментальні дані та результати дисертаційної роботи одержані автором самостійно. Це стосується дослідження алгоритмів визначення теплопровідності природного газу для різних його компонентних складів, і вмісту вологості [103]. В опублікованих у співавторстві роботах здобувачу належить:

- дослідження нових вимірювальних технологій у побутових smart-лічильниках природного газу [40];

- теоретичні дослідження впливу вологості повітря на теплофізичні характеристики при функціонуванні термоанемометричних сенсорів [62, 63];
- визначення сучасних тенденцій розвитку термоанемометрії у сфері обліку природного газу [30];
- моделювання впливу вологи природного газу при термоанемометричних вимірюваннях [65];
- комп'ютерне моделювання при дослідженні взаємозв'язку вологості та компонентного складу природного газу з його теплофізичними характеристиками [71];
- моделювання функціонування термоанемометричних перетворювачів за умов газоподобних сумішей [82];
- розроблення концепції побудови лабораторного стенду для дослідження впливу вологи газового потоку на функціонування засобів термоанемометрії [104];
- розроблення комп'ютерної методології визначення впливу вологості робочого середовища на покази термоанемометричних перетворювачів [90] за різних значень параметрів газового середовища;
- дослідження впливу теплофізичних характеристик газового середовища на чутливість термоанемометричного перетворювача [89];
- дослідження впливу швидкості руху та складу газового потоку на чутливість термоанемометричних перетворювачів [87];
- дослідження складових метрологічної моделі установки для відтворення об'ємних витрат вологого повітря [94, 105];
- розроблення концепції фізичного моделювання впливу вологи на роботу термоанемометричних сенсорів [95];
- розроблення наукових підходів до створення лабораторної установки для експериментальних досліджень лічильників та витратомірів газу, яка захищена патентом на корисну модель [96, 99];
- розроблення програми і реалізації обробки результатів

експериментальних досліджень лабораторної установки для дослідження впливу вологи на роботу термоанемометрів [97]

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на 7 міжнародних та 5 всеукраїнських науково-технічних конференціях: *Метрологія та вимірвальна техніка* : XII міжнар. наук.-тех. конф., 6–8 жовт. 2020 р., Харків, *Невизначеність вимірювань: наукові, нормативні, прикладні та методичні аспекти*: XIX міжнар. наук.-тех. семінар, Болгарія, Созополь, 2022р., *Нафтогазова енергетика 2021*: міжнар. конф., м. Івано-Франківськ, 21–24 вер. 2021 р., *Прикладні науково-технічні дослідження*: V міжнар. наук.-прак. конф., м. Івано-Франківськ, 5–7 квіт. 2021 р., *Приладобудування: стан і перспективи*: XXI міжнар. наук.-тех. конф., м. Київ, 17–18 трав. 2022р., *Прогресивні напрямки розвитку автоматичних технологічних комплексів*: VII міжнар. наук.-тех. конф. з пробл. вищ. осв. і наук., м. Луцьк, 28–30 трав. 2022р., *Інформаційно-вимірвальні технології ІВТ-2022*: міжнар. наук.-прак. конф., м. Львів, 9–10 лист. 2022 р., *Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості* : всеукр. наук.-практ. конф. мол. уч. і студ., м. Івано-Франківськ, 8 жовт. 2020р., 7 жовт. 2021р., 13 жовт. 2022р. *Приладобудування та метрологія: сучасні проблеми, тенденції розвитку* : IV всеукр. наук.-практ. конф., м. Луцьк, 29–30 жовт. 2020 р., *Інтелектуальний продукт вчених, винахідників і раціоналізаторів Прикарпаття XIV*, м. Івано-Франківськ, 2023.

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано 19 наукових публікацій, у тому числі 6 статей у виданнях що входять до переліку МОН України (серед них 3 статті у фаховому виданні України, включеного наукометричної бази Web of Science, 2 статті у фахових виданнях України), 1 стаття у закордонному періодичному виданні, 1 патент на корисну модель, 12 публікацій (із них 1 одноосібно) за матеріалами праць міжнародних і всеукраїнських науково-технічних конференцій.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ НАУКОВОГО, НОРМАТИВНОГО І ТЕХНІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРИ ВИМІРЮВАННІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОГОГО ПРИРОДНОГО ГАЗУ

Головними енергетичними характеристиками природного газу є теплота згоряння та число Воббе. Для визначення якісних показників важливими є компонентний склад газу, вологість та інші фізико-хімічні показники. До теплофізичних характеристик природного газу належить теплопровідність та теплоємність.

На нормативному рівні визначається енергія та якісні показники природного газу, якщо закріплені на міжнародному рівні стандартами ISO та гармонізовано із національними ДСТУ .

В основному методи для визначення енергетичних характеристик природного газу поділяються на прямі та непрямі. Більшість технічних рішень у вигляді приладів та установок розроблено іменитими корпораціями в галузі нафтогазової промисловості як Emerson, Siemens, Honeywell, Yokogawa та ін.

Сучасний стан наукових досліджень в галузі визначення енергетичних та якісних характеристик природного газу демонструє стрімкий ріст досліджень на вітчизняному та міжнародному рівні, що відображено у наукових працях та патентах.

1.1 Аналіз основних термінів і понять при дослідженні якісних і енергетичних характеристик у сфері обліку природного газу

На сьогодні для розвитку економіки держави енергоносії займають все-таки рушійну роль в діяльності підприємств, а точність кількісної оцінки енергоносіїв займає важливе місце в питаннях обліку. На сьогодні одним із головних енергоносіїв є природний газ, який і надалі відіграватиме значну роль в енергозабезпеченні української та світової економіки [9]. Для комерційного обліку

розрахунок природного газу проводиться в об'ємних одиницях, що ставить необхідність вирішення ряду питань щодо достовірності кількісної оцінки доставленого та спожитого газу для суб'єктів комерційного процесу. Об'єм природного газу як міра його кількості є недостатнім для визначення його енергетичної цінності. Це пов'язано з тим, що різні гази можуть мати різну теплоту згоряння при однаковому об'ємі. Крім того, на об'єм газу чинять безпосередній вплив умови вимірювання: тиск та температура [2]. Тому для точного обліку природного газу необхідно використовувати комплексний підхід, який враховує не тільки об'єм, але й його енергетичні та якісні характеристики. Також за різних компонентних складів природний газ буде мати різні якісні та кількісні характеристики, що вже вказує на важливість оцінювання природного газу в енергетичних одиницях [3].

Дослідження енергетичних характеристик природного газу – це комплексний процес, який вимагає чіткого розуміння специфічної термінології. Ці знання є основою для проведення точних вимірювань, аналізу отриманих даних та прийняття обґрунтованих рішень.

Так як природний газ є сумішшю вуглеводнів, основним з яких є: метан, CH_4 (80-95%); етан, C_2H_6 (1-5%); пропан, C_3H_8 (>2%); вуглекислий газ, CO_2 (> 2%); азот, N_2 (>5%) та інші домішки - сліди важких вуглеводнів, сірководень тощо в залежності від родовища, то доцільно враховувати й іншу компонентну частку вуглеводнів, які наділені відмінними від основного компонента характеристиками, які за певних значень температури та тиску можуть змінювати свої властивості, агрегатні стани, що в свою чергу, призводить до загальної зміни характеристик газу.

В основному природний газ використовують як паливо та сировину для промисловості, споживчого сектору та інших потреб, де важлива кінцева якість продукту. Так як було сказано вище, що природний є складною сумішшю, тому одним показником досить складно описати його кінцеву якість, не розглянувши ряд показників, що підводять до розрахунку та виведення цього кінцевого поняття. Тому, на думку автора, доцільно враховувати його енергетичні характеристики, які

є комплексом показників, що характеризують здатність природного газу виконувати корисну роботу під час спалювання для генерації тепла та для подальшої роботи у функціональних вузлах систем. До енергетичних характеристик газу відносяться теплотворна здатність (вища та нижча), число Воббе, а якісними характеристиками є вологість, густина, в'язкість тощо.

Вища теплота згоряння є кількістю теплоти, що виділяється при повному згорянні з киснем заданої кількості газу таким чином, що тиск p_1 (при якому відбувається реакція), залишається постійним, а всі продукти згоряння повертаються до тієї ж заданої температури t_1 , що і у вихідних речовин, причому всі ці продукти перебувають у газоподібному стані, за винятком води, яка конденсується в рідкий стан при t_1 [10]:

$$(Hc)_G(t_1) = (Hc)_G^0(t_1) = \sum_{i=1}^N x_i \cdot [(Hc)_G^0]_i(t_1), \quad (1.1)$$

де $(Hc)_G(t_1)$ – реальна молярна вища теплота згоряння суміші, кДж/моль;
 $(Hc)_G^0(t_1)$ – ідеальна молярна вища теплота згоряння суміші, кДж/моль; x_i – молярна доля i -го компонента у суміші; $[(Hc)_G^0]_i(t_1)$ – ідеальна молярна вища теплота згоряння i -го компонента, кДж/моль.

Досить важливо розрізняти одиниці в яких задається склад природного газу, адже його склад, та як наслідок, теплоту згоряння можна відобразити в [10]:

- масових одиницях (Hm), кДж/кг;
- молярних одиницях (Hc) кДж/моль;
- об'ємних одиницях (Hv) кДж/м³.

Від цього в подальшому залежить формульне відображення й узгодженість обрахунків в теоретико-аналітичній складовій дослідження. Тому в подальшому дослідженні будуть використовуватися масові одиниці складу природного газу й повітря та їх компонентів у тому числі. В разі необхідності, компонентний склад із аналітичних баз даних буде переводитися в масовий згідно із стандартними формулами для переведення.

Нижча теплота згоряння складає кількість теплоти, яка виділяється при повному згорянні в кисні заданої кількості газу при постійному тиску реакції p_1 та всі продукти згоряння повертаються до тієї ж заданої температури t_1 , що і у вихідних речовин, причому всі ці продукти перебувають у газоподібному стані [10]:

$$(Hc)_N(t_1) = (Hc)_N^0(t_1) = (Hc)_G^0(t_1) - \sum_{i=1}^N x_i \cdot \frac{b_i}{2} \cdot L^0(t_1), \quad (1.2)$$

де $(Hc)_N(t_1)$ – реальна молярна нижча теплота згоряння суміші, кДж/моль; $(Hc)_N^0(t_1)$ – ідеальна молярна теплота згоряння суміші, кДж/моль; $L^0(t_1)$ – це стандартна ентальпія випаровування води при температурі t_1 , кДж/моль. Іншими словами, це кількість теплоти, яку потрібно підвести до одного моля води при температурі t_1 , щоб перетворити її з рідкого стану в газоподібний при постійному тиску; b_i – це кількість атомів водню в молекулі i -го компоненту суміші. Іншими словами, це атомний індекс водню для i -го компоненту, для метану (CH_4), $b_i = 4$.

Як наслідок розрахунок теплотворної здатності на масовій основі проводиться із урахуванням ідеальної молярної теплоти згоряння за наступними формулами [10]:

$$(Hm)_G(t_1) = (Hm)_G^0(t_1) = \frac{(Hc)_G^0(t_1)}{M}, \quad (1.3)$$

де $(Hm)_G(t_1)$ – реальна масова вища теплота згоряння суміші, кДж/кг; $(Hm)_G^0(t_1)$ – ідеальна масова вища теплота згоряння суміші, кДж/кг; M – молярна маса суміші, звідси: $M = \sum_{i=1}^N x_i \cdot M_i$, де M_i – молярна маса i -го компонента, кг/моль.

Для нижчої масової теплоти згоряння доцільно використовувати наступну формулу [10]:

$$(Hm)_N(t_1) = (Hm)_N^0(t_1) = \frac{(Hc)_N^0(t_1)}{M}, \quad (1.4)$$

де $(Hm)_N(t_1)$ – реальна масова нижча теплота згоряння суміші, кДж/кг;
 $(Hm)_N^0(t_1)$ – ідеальна масова нижча теплота згоряння суміші, кДж/кг.

Таким чином, вища теплота згоряння – це кількість теплоти, що виділяється при згорянні газу, коли вода в продуктах згоряння конденсується, а нижча теплота згоряння – це кількість теплоти, що виділяється при згорянні газу, коли вода в продуктах згоряння залишається паром.

Важливим параметром при дослідженні енергетичних характеристик газу є його густина, що відповідає масі газової проби (за умови відомих даних про компонентний склад) по відношенню до її об'єму за заданих умов тиску і температури. Для розрахунку густини реального газу необхідно спочатку обчислити його ідеальну густину [10]:

$$\rho_0(t_2 p_2) = \frac{M}{V_0}, \quad (1.5)$$

де $\rho_0(t_2 p_2)$ – ідеальна густина газу, кг/м³; V_0 – ідеальний молярний об'єм суміші, м³/моль, звідси:

$$V_0 = R \cdot \frac{T_2}{p_2}, \quad (1.6)$$

R – універсальна газова стала (8,314 462 1 Дж/(моль·К)).

Тоді реальна густина газу буде рівна [10]:

$$\rho(t_2 p_2) = \frac{\rho_0(t_2 p_2)}{Z(t_2 p_2)}, \quad (1.7)$$

де $\rho(t_2 p_2)$ – густина реального газу, кг/м³; $\rho_0(t_2 p_2)$ – густина ідеального газу, кг/м³; $Z(t_2 p_2)$ – коефіцієнт стисливості реального газу.

Також варто відмітити, що відносна густина газу є досить інформативним параметром, коли необхідно дізнатись на скільки поточна проба газу відрізняється від еталонної проби сухого повітря, аналітично відобрається як відношення густини газу до густини сухого повітря еталонного складу за тих самих заданих умов тиску і температури.

Для характеристики здатності газу горіти і для порівняння різних видів газового палива часто використовується число Воббе. Воно залежить від теплоти згоряння газу та його густини. Розрізняють вище та нижче число Воббе, що відображає вищу та нижчу теплоту згоряння в об'ємних одиницях за заданих еталонних умов, відносно квадратного кореню відносної густини за тих самих заданих еталонних умов вимірювання відповідно [10].

$$W_G(t_1; t_2; p_2) = \frac{(Hv)_G(t_1; t_2; p_2)}{\sqrt{D(t_2; p_2)}}, \quad (1.8)$$

$$W_N(t_1; t_2; p_2) = \frac{(Hv)_N(t_1; t_2; p_2)}{\sqrt{D(t_2; p_2)}}, \quad (1.9)$$

де $W_G(t_1; t_2; p_2)$, $W_N(t_1; t_2; p_2)$ – вище та нижче число Воббе, кДж/м³;
 $(Hv)_G(t_1; t_2; p_2)$, $(Hv)_N(t_1; t_2; p_2)$ – вища та нижча об'ємна теплота згоряння реального газу, кДж/м³; $\sqrt{D(t_2; p_2)}$ – відносна густина реального газу.

Задля об'єднання P , V , T параметрів реального газу використано модифіковану формулу із рівняння стану ідеального газу, наступного виду [10]:

$$p \cdot V = Z(p, T) \cdot R \cdot T, \quad (1.10)$$

де p – абсолютний тиск, Па; T – термодинамічна температура, К; V – об'єм, який займає одна моль реального газу (молярний об'єм реального газу), м³/моль; $Z(p, T)$ – коефіцієнт стисливості.

У багатьох реальних ситуаціях газу не поведуться як ідеальні. Наприклад, при високих тисках молекули газу стискаються і починають взаємодіяти між собою, а при низьких температурах кінетична енергія молекул зменшується, і вони можуть конденсуватися в рідину. Так як зростання взаємодії молекул газу між собою стає значним, то ідеальний газовий закон вже не може бути використаний для опису поведінки газу. Тому для точних розрахунків необхідно використовувати рівняння стану для реальних газів (формула 1.10). Варто відзначити, що різні газу мають різні молекулярні маси і сили взаємодії між молекулами, що також впливає на їхню поведінку й ставить нові виклики для досліджень.

Основним із важливих параметрів газу, у тому числі природного газу та повітря є коефіцієнт стисливості, що складає фактичний (реальний) об'єм заданої кількості газу при заданому тиску і температурі, відносно об'єму за тих самих умов, розрахованих за ідеальним газовим законом. Він є важливим для точних розрахунків, адже дозволяє враховувати відхилення реальних газів від ідеального поведінки і отримувати більш точні результати розрахунків [10].

$$Z(t_2, p_2) = 1 - \left(\frac{p_2}{p_0} \right) \times \left[\sum_{i=1}^N x_i \cdot s_i(t_2, p_0) \right], \quad (1.11)$$

де t_2, p_2 - виміряна температура та тиск, °С та кПа; p_0 – нормальний тиск (101,325кПа). $s_i(t_2, p_0)$ – фактора сумування при різних значеннях температур. Сумування здійснюється за всіма N компонентами суміші; x_i – мольна частка компоненту у суміші.

Вологість природного газу є одним з найважливіших параметрів, що характеризують його якість і впливають на процеси транспортування, зберігання та використання. Наявність водяної пари в газі може призводити до зниження теплотворної здатності, утворення гідратів, корозії обладнання, спотворювати покази вимірювальних приладів та до інших небажаних явищ [2].

Для кількісної оцінки цього параметра використовують різноманітні характеристики вологості, кожна з яких має свої особливості та сферу застосування.

Абсолютна вологість є однією з найпоширеніших характеристик вологості газу. Вона визначається як маса водяної пари, яка міститься в одиниці об'єму сухого газу за стандартних умов (0°С і 101,325 кПа). Математично абсолютну вологість (ρ) можна розрахувати за формулою [2]:

$$A = \frac{m_B}{V_{C.G}}, \quad (1.12)$$

де A – абсолютна вологість газу, г/м³; m_B – маса водяної пари, г; $V_{C.G}$ – об'єм сухого газу, м³.

Одним із ключових параметрів, що характеризують вологість газу, є пружність e (парціальний тиск) водяної пари, вказує на ту частину загального тиску газової суміші, яка зумовлена присутністю водяної пари.

Важливо розрізняти пружність водяної пари (e) та пружність насиченої пари (E), коли насичена пара перебуває в динамічній рівновазі зі своєю рідиною (у даному випадку, водою) при даній температурі [2]. Це означає, що кількість молекул води, які переходять із рідкої фази в газоподібну, дорівнює кількості молекул, які конденсуються з газової фази в рідку.

Вологовмісткість газу (d) є важливою характеристикою, яка кількісно визначає вміст водяної пари в газі. Вона виражається як відношення маси водяної пари ($m_{В.П.}$) до маси сухого газу ($m_{С.Г.}$) в тому ж об'ємі [2]:

$$d = \frac{m_{В.П.}}{m_{С.Г.}}, \quad (1.13)$$

Відносна вологість (φ , %) характеризує ступінь насичення газу водяною парою порівняно з максимально можливим насиченням при даній температурі. Вона показує, наскільки близький газ до стану, коли будь-яке подальше додавання водяної пари призведе до конденсації.

$$\varphi = \frac{A}{A_n} \cdot 100, \quad (1.14)$$

де A – фактична абсолютна вологість газу, г/м³; A_n – абсолютна вологість насиченого газу, г/м³;

Теплопровідність та теплоємність є основними теплофізичними характеристиками природного газу для дослідження взаємодії процесу теплопередачі між термоанемометричним сенсором та досліджуваним середовищем.

Теплоємність є інтегральною термодинамічною характеристикою речовини, що відображає її здатність акумулювати та трансформувати теплову енергію в процесі температурних змін.

Ізобарна теплоємність (C_p) та ізохорна (C_v) теплоємності є кількістю теплоти, необхідної для нагрівання одиниці маси речовини на один градус за умови постійного тиску та об'єму відповідно [11]:

$$c_p(T, \rho, \bar{x}) = \left[\frac{\partial h}{\partial T} \right]_{\rho, \bar{x}}, \quad (1.15)$$

$$c_v(T, \rho, \bar{x}) = \left[\frac{\partial u}{\partial T} \right]_{v, \bar{x}} \quad (1.16)$$

де u – молярна внутрішня енергія, кДж/кмоль; ρ – молярна густина, кмоль/кг; \bar{x} – молярний склад. h – молярна ентальпія, кДж/кмоль; v – молярний об'єм, м³/кмоль;

Теплопровідність є фундаментальним процесом передачі теплової енергії в речовинах. Розуміння цього явища має ключове значення для широкого спектру наукових дисциплін та інженерних застосувань, від матеріалознавства до енергетики. Теплопровідність обумовлена хаотичним рухом частинок речовини (атомів, молекул, іонів), які при зіткненнях передають одна одній свою кінетичну енергію. Чим інтенсивніший цей рух, тим швидше відбувається передача теплоти. Основним законом, що описує теплопровідність, є закон Фур'є [11, 57]:

$$q = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx}, \quad (1.17)$$

де q – густина теплового потоку (Вт/м²); λ – коефіцієнт теплопровідності (Вт/(м·К)); dT/dx – температурний градієнт (К/м)

Таким чином, визначення енергетичних характеристик природного газу є фундаментальним завданням у сфері його обліку та використання. Цей процес вимагає чіткого розуміння ключових термінів і понять, які відображають різноманітні аспекти цього складного енергоносія. Знання цих термінів та методів обрахунку відповідно до офіційних джерел дозволяє точно розраховувати кількість теплової енергії, яку можна отримати від певного об'єму та компонентного складу газу. Так як енергетичні характеристики природного газу можуть змінюватися залежно від родовища, умов видобутку та транспортування, а наявність домішок у

газі може впливати на його теплоту згоряння та інші характеристики. То завдяки цим знанням можна оптимізувати використання природного газу в різних галузях. Чітке знання складу газу дозволяє контролювати його якість і відповідність стандартам. Якісні та енергетичні характеристики є основою для комерційних розрахунків при купівлі-продажу газу, а стандарти ISO, відіграють ключову роль у забезпеченні єдиного підходу до визначення енергетичних характеристик природного газу. Вони встановлюють чіткі методики вимірювання та розрахунків, що сприяє порівняльності результатів різних лабораторій та підвищує довіру до отриманих даних. Так як стандарти забезпечують міжнародну уніфікацію методів вимірювання та розрахунків, що сприяє розвитку газової галузі та забезпеченню енергетичної безпеки, доцільно детально розглянути нормативне забезпечення контролю енергетичних характеристик природного газу.

Основною якісною характеристикою природного газу слугує його теплотворна здатність, яка характеризується кількістю теплової енергії, що виділяється під час повного спалювання встановленої маси газового палива в окисному середовищі. У науково-технічній літературі дану характеристику диференціюють на два принципові показники: вищу та нижчу теплоту згоряння, що відображають повноту та особливості термохімічних перетворень газоподібного палива [2].

Відповідно до сучасних міжнародних стандартів та вітчизняних нормативних вимог [3], облік природного газу здійснюється за допомогою спеціалізованих інформаційно-вимірювальних комплексів. Такі системи забезпечують комплексну оцінку та визначення енергії газового середовища через визначення кількісних параметрів його маси або об'єму з подальшим перерахунком у відповідні енергетичні одиниці МДж або кВт·год.

Теплотворна здатність природного газу характеризується питомими показниками енергії в розрахунку на одиницю об'єму або маси, що представляють в МДж/м³ або МДж/кг. У практичній площині обліку та транспортування газових потоків використовується поняття енергетичної цінності, яке відображає інтенсивність витрати енергії газу за одиницю часу [3].

Кількісна оцінка сумарної енергії природного газу здійснюється шляхом інтегрального обчислення добутку зафіксованої маси (або об'єму) та відповідної теплоти згорання за встановлених умов.

Згідно з [3] енергетичну цінність (або витрату енергії) E газоплинних потоків, що проходять через поперечний переріз трубопроводу, визначають за формулою:

$$E = Q \cdot H, \quad (1.18)$$

де Q – об'ємна витрата природного газу, м³/с; H – теплота згорання природного газу Дж/м³.

Рівняння (1.18) відображає аддитивність теплоти згорання газової суміші. Це означає, що загальна теплота згорання природного газу може бути представлена як сума теплот згорання його окремих компонентів, зважених за масовими долями. Такий підхід дозволяє оцінити вплив кожного компонента на загальну енергетичну цінність газу і застосовується в методиках розрахунку теплоти згорання газових сумішей [3].

1.2 Аналіз нормативного забезпечення контролю енергетичних характеристик природного газу

Природний газ є основним енергоносієм України. Згідно даних НАК «Нафтогаз Україна» (рис. 1.1), за час незалежності України, споживання газу зменшилося, приблизно втричі. Промисловий та побутові сектори розвивалися за умов достатку природного газу та більше половини спожитого газу припадало на побутовий сектор. Цей факт визначає об'єм роботи, який необхідно виконати на шляху до енергоефективності та свідомого споживання природного газу [12].

Першими кроками до забезпечення енергоефективності споживання природного газу в Україні було прийняття національного стандарту ДСТУ EN ISO 15112:2020 «Природний газ. Визначення енергії» [3]. Який ввів поняття “енергія газу” та можливість обрахунку газу в “енергетичних одиницях” – МДж, Гкал, кВт·год.



Рисунок 1.1 – Обсяги використання та імпорту природного газу в Україні [12]

Даний стандарт [3] містить методи визначення енергії природного газу. Він охоплює як прямі, так і непрямі методи вимірювання теплоти згоряння, а також розрахунок енергетичної вартості газу. Прямі методи передбачають безпосереднє вимірювання кількості теплоти, що виділяється при згорянні певної кількості газу в калориметрі. Непрямі методи засновані на розрахунку теплоти згоряння на основі даних про склад газу та його фізичні властивості (густина, теплоємність).

Стандарт забезпечує єдиний підхід до визначення енергетичної вартості природного газу, що важливо для комерційних розрахунків та торгівлі газом. Враховуючи енергетичну цінність газу, облік природного газу стане більш об'єктивним [13]. Адже показники енергетичної цінності природного газу будуть напряму залежати від характеристик газу та оточуючого середовища в якому він транспортується. Більша увага буде приділятися калорійності газу та встановленню відповідної плати за об'єм більш або менш калорійного газу.

Обсяг енергії природного газу – кількість теплової енергії, яка виділяється під час повного згоряння виміряного об'єму природного газу [13]. Для визначення

енергії природного газу необхідне попереднє приведення отриманого об'єму природного газу до стандартних умов та визначення теплоти згоряння при цьому.

Для визначення об'єму природного газу зведеного до стандартних умов необхідне врахування показників оточуючого середовища, виходячи з фізичних властивостей газу, об'єм газу визначений лічильником може змінюватись відносно температури оточуючого середовища (при низькій температурі - стискатись, а за вищої – розширюватись). Для приведення газу до стандартних умов доцільно вводити коригувальні коефіцієнти, які враховують температурні показники оточуючого середовища та розташування лічильника [13].

Дослідження нормативного забезпечення контролю енергетичних характеристик природного газу в Україні набуває особливої актуальності в контексті енергетичної незалежності країни та її інтеграції в європейський енергетичний простір [14]. Природний газ є одним з основних енергоносіїв в Україні, і точне визначення його енергетичних характеристик є критично важливим для ефективного використання ресурсів. Адже точні дані про теплотворну здатність газу дозволяють оптимізувати процеси спалювання, підвищити ККД енергоустановок та знизити витрати на енергоносії. Гарантування якості через контроль енергетичних характеристик є необхідним для забезпечення відповідності якості газу встановленим стандартам та вимогам споживачів. Проведення справедливого обліку є ключовим для споживчого сектору, бо точне визначення об'єму та теплотворної здатності газу є основою для справедливого розрахунку вартості постачання. А найголовніше для інтеграції в європейський енергетичний ринок, адже дотримання європейських стандартів і норм є необхідною умовою для участі в міжнародній торгівлі газом.

Таким чином, нормативне забезпечення контролю енергетичних характеристик природного газу є головним в питаннях стандартизації, виступаючи сукупністю стандартів, правил і положень, які визначають методи, процедури та вимоги до вимірювання, оцінки та контролю енергетичних властивостей природного газу. Ці норми необхідні для забезпечення точності

вимірювань, порівнянності результатів різних лабораторій та довіри до отриманих даних.

Міжнародна організація зі стандартизації (ISO) розробила низку стандартів, які стосуються вимірювання, оцінки енергетичних характеристик та якості природного газу. Ці стандарти забезпечують міжнародну уніфікацію методів вимірювання та обчислень, що сприяє розвитку міжнародної торгівлі газом та чітко гармонізуються з українською нормативно-технічною базою ДСТУ [15]

Основний стандарт, що стосується природного газу та розрахунку основних енергетичних та якісних характеристик ДСТУ EN ISO 6976:2020 «Природний газ. Обчислення теплоти згоряння, густини, відносної густини та числа Воббе на основі компонентного складу» [10]. Цей стандарт надає методи розрахунку ключових енергетичних характеристик природного газу, таких як теплота згоряння, густина та число Воббе, виходячи з його хімічного складу. Знання цих характеристик необхідне для ефективного використання природного газу як палива, а також для забезпечення безпечної експлуатації газових приладів. Число Воббе, наприклад, використовується для оцінки взаємозамінності різних видів газу. Стандарт описує процедури відбору проб газу, аналізу його складу (визначення вмісту метану, етану, пропану, бутану та інших компонентів) та подальшого розрахунку необхідних параметрів за допомогою емпіричних формул.

Стандарт, що встановлює критерії якості для природного газу, який пройшов обробку і, за необхідності, змішування та визначає, яким має бути природний газ, що подається споживачам ДСТУ ISO 13686:2015 «Природний газ. Показники якості»: [16]. Встановлює базові показники якості, а саме фізико-хімічні параметри (ФХП): компонентний склад, теплотворна здатність, густина, число Воббе, точка роси. Основними компонентами природного газу виступають: метан (CH_4), етан (C_2H_6), пропан (C_3H_8), бутани (C_4H_{10}), азот (N_2), вуглекислий газ (CO_2).

Методологія вимірювання включають наступні типи аналізу: хроматографічний, калориметричний та спектрометричний. Критерії оцінки якості для природного газу в межах: теплотворна здатність: мінімум 33 МДж/м³,

максимум 45 МДж/м³; число Воббе: 47-52 МДж/м³; температурні обмеження для точки роси: -10°C до +5°C.

Практичне застосування стандарту в сферах міжнародної торгівлі газом, транспортуванні газу, енергетичному секторі, промислового виробництва. У порівнянні з іншими стандартами має більш жорсткі вимоги порівняно з локальними стандартами, має уніфікований підхід до оцінки якості, враховує міжнародні вимоги. Тому ДСТУ ISO 13686:2015 є фундаментальним документом, що визначає якість природного газу. Дотримання його вимог забезпечує безпеку, ефективність та екологічність використання цього важливого енергоресурсу.

Рішучим кроком до декарбонізації стало прийняття наступного стандарту ДСТУ ISO 14687:2021 «Якість водневого палива» [17], що поставило питання для більш стрімкого наукового розгляду водню, як нового джерела енергії у газорозподільчих системах України. Документ встановлює вимоги до якості водневого палива, що використовується в різних галузях, таких як транспорт, енергетика та промисловість. Стандарт надає чітке визначення водневого палива та його основних компонентів. Визначаються різні класи водневого палива залежно від його чистоти та призначення. Встановлюються гранично допустимі концентрації домішок у водневому паливі, таких як кисень, азот, вуглеводні та водяна пара. Ці домішки можуть впливати на ефективність роботи водневих паливних елементів та інших пристроїв. Описуються методи відбору проб, підготовки проб до аналізу та проведення вимірювань різних параметрів водневого палива. Стандарт містить загальні вимоги до безпечного поводження з водневим паливом та гарантує, що водневе паливо, яке постачається на ринок, відповідає вимогам якості та безпеки. Застосування єдиних методів випробувань дозволяє порівнювати результати різних лабораторій. Стандарт є важливим інструментом для розвитку водневої енергетики в Україні та інтеграції українського ринку водню в міжнародний, бо встановлює вимоги до якості водневого палива. Дотримання цього стандарту сприяє розвитку водневої енергетики в Україні та забезпечує безпечне та ефективне використання водню як енергоносія.

Важливий національний стандарт України, який встановлює чіткий зв'язок між двома ключовими параметрами природного газу: вмістом водяної пари та точкою роси ДСТУ EN ISO 18453:2021 «Природний газ. Кореляція між вмістом вологи та точкою роси за водою» [18]. Необхідність встановлення взаємозв'язку між вмістом вологи та точкою роси, полягає у їх прямому впливі на теплотворну здатність, бо велика кількість водяної пари знижує теплотворну здатність газу. Також високий вміст вологи та низька температура можуть призвести до утворення твердих кристалів гідратів, які можуть закупорювати трубопроводи та обладнання. Водяна пара може прискорювати корозію металевих елементів газопроводів. Знання цих параметрів дозволяє оптимізувати процеси осушення газу, а також запобігати проблемам, пов'язаним з утворенням гідратів. Стандарт надає надійний математичний зв'язок між вмістом води в природному газі та температурою точки роси. Цей зв'язок базується на розрахунках, розроблених GERG [19]. За допомогою цього стандарту можна як розрахувати вміст води за відомою точкою роси, так і навпаки. Стандарт застосовується в газовій промисловості для контролю якості природного газу, а також для проектування та експлуатації газопроводів та газового обладнання. Застосування стандарту забезпечує високу точність розрахунків вмісту вологи та точки роси. Тому даний нормативний документ є важливим інструментом для забезпечення якості природного газу та безпечної його експлуатації. Знання взаємозв'язку між вмістом вологи та точкою роси дозволяє запобігати проблемам, пов'язаним з утворенням гідратів та корозією обладнання. Стандарт сприяє підвищенню ефективності використання природного газу та забезпеченню його відповідності сучасним вимогам.

Важливість визначення вологості природного газу висвітлено у ДСТУ ISO 6327:2004 «Аналіз газів. Визначання точки роси природних газів. Конденсаційні гігрометри з охолоджуваною поверхнею» [20]. Даний стандарт встановлює вимоги та методику для визначення точки роси природного газу за допомогою конденсаційних гігрометрів. Конденсаційні гігрометри визначають точку роси шляхом охолодження поверхні до температури, при якій на ній починає конденсуватися водяна пара з газу. Ця температура і є точкою роси. ДСТУ ISO

6327:2004 є важливим документом для забезпечення якості природного газу. Він встановлює чіткі вимоги до вимірювання точки роси за допомогою конденсаційних гігрометрів і сприяє безпечній експлуатації газопроводів та газового обладнання.

Необхідним для розуміння основних теплофізичних характеристик природного газу є стандарт ISO 20765-2:2015 «Natural gas – Calculation of thermodynamic properties. Part 2: Single-phase properties (gas, liquid, and dense fluid) for extended ranges of application» [11], який встановлює метод розрахунку об'ємних та калорійних властивостей природного газу, штучних горючих газів та газоподібних сумішей за умов, коли суміш може перебувати в однорідному (однофазному) газоподібному стані, однорідному рідкому стані або однорідному надкритичному стані. Цей стандарт є фундаментальним для багатьох галузей, пов'язаних з видобутком, транспортуванням, зберіганням та використанням природного газу. Розрахунки дозволяють за ISO 20765-2 оптимізувати енергоспоживання в різних технологічних процесах. Даний документ є основою для розробки нових технологій у газовій промисловості, таких як технології захоплення та зберігання вуглекислого газу [21].

Натомість ISO/AWI 20765-3 «Natural gas-Calculation of thermodynamic properties-Part 3: Two-phase properties (vapour-liquid equilibria)» [22] знаходиться тільки в розробці станом на 2024 рік, що вказує на актуальність дослідження в напрямку двофазних рівноважних станів пар-рідина в природному газі.

Важливим технічним звітом є ISO/TR 29922:2017 «Природний газ. Додаткова інформація для розрахунку фізичних властивостей відповідно до ISO 6976» [23], який надає детальні пояснення та методики для розрахунку фізичних властивостей природного газу. Документ слугує важливим доповненням до стандарту ISO 6976, який визначає основні методи аналізу природного газу. Основні аспекти, що розглядаються в стандарті: 1) поведінка реального газу; 2) розрахунок енергетичних властивостей; 3) визначення стандартних вихідних умов температури та тиску, які використовуються як основа для розрахунків. 4) коефіцієнт стисливості; 5) властивості газових та інших сумішей.

ISO/TR 29922:2017 є важливим для забезпечення точності, надаючи детальні рекомендації щодо розрахунків, стандарт допомагає забезпечити точне визначення властивостей природного газу та цінним інструментом для інженерів, науковців та фахівців галузі, які займаються аналізом та використанням природного газу.

Таким чином, дотримання стандартів ISO, ДСТУ, TR (і тд.) при контролі енергетичних характеристик природного газу забезпечують точність вимірювань, адже стандарти встановлюють вимоги до обладнання, процедур та обчислень, що мінімізує похибки вимірювань. Застосування єдиних методів і процедур дозволяє порівнювати результати різних лабораторій та аналітичних центрів. Дотримання міжнародних стандартів підвищує довіру до отриманих результатів як в межах України, так і на міжнародному рівні. Завдяки уніфікації методів вимірювання та оцінки енергетичних характеристик спрощується міжнародна торгівля природним газом. Тому дотримання цих стандартів є необхідною умовою для ефективного функціонування газового ринку та забезпечення енергетичної безпеки України й подальших наукових досліджень й пошуку шляхів удосконалень поточної нормативної бази. Адже більшість нормативних документів побудована на наукових дослідженнях, зборі експериментальних даних задля кінцевої уніфікації науково-технічних знань. В більшості зі стандартів не розкрито повністю питання впливу вологи на енергетичні характеристики газу та якість загалом. Тому необхідно детальніше розглянути дане питання в наступних пунктах дисертаційного дослідження.

1.3 Аналіз сучасних методів та засобів технічної реалізації дослідження енергетичних характеристик природного газу

Дослідження енергетичних характеристик природного газу є одним з найважливіших напрямків сучасної енергетики. Природний газ, як чисте та ефективне паливо, широко використовується в промисловості, комунальному господарстві та енергетиці. Точна оцінка його теплотворної здатності, густини та

інших параметрів є необхідною умовою для ефективного використання цього ресурсу, оптимізації технологічних процесів та забезпечення безпеки.

Об'єктами в даному пункті для дослідження є сучасні методи та засоби, які застосовуються для визначення енергетичних характеристик природного газу. А саме теоретичні основи та практичні аспекти застосування різних методів дослідження енергетичних характеристик природного газу, а також аналіз реальних вимірювальних засобів, заснованих на даній методиці..

Для визначення енергетичних характеристик природного газу застосовується широкий спектр методів та засобів. Теплота згоряння визначається переважно лабораторно методами хроматографії, калориметрії або спектроскопії. Найбільш поширені з них [24]:

- калориметричні методи. Пряма калориметрія для вимірювання кількості теплоти, що виділяється при повному згорянні зразка газу. Непряма калориметрія через розрахунок теплотворної здатності за результатами аналізу компонентного складу газу.
- хроматографічні методи, а саме газова хроматографія: для визначення кількісного складу газу, що дозволяє розрахувати його теплотворну здатність.
- спектроскопічні методи, у тому числі інфрачервона спектроскопія для визначення концентрації окремих компонентів газу.
- термоанемометричні методи вимірювання енергетичних характеристик природного газу.

Принцип дії газова хроматографії (ГХ) (рис.1.2) базується на розділенні компонентів газової суміші за рахунок різної швидкості їх сорбції на стаціонарній фазі [24], яка нанесена на носій всередині хроматографічної колонки. Газ-носій транспортує компоненти через колонку, і в залежності від їхньої взаємодії зі стаціонарною фазою, вони виходять з колонки в різний час.

Перевагами ГХ є: висока роздільна здатність, переважна більшість ГХ здатна розділити складні суміші на індивідуальні компоненти, при наявності стандартних зразків проб газу; висока чутливість, дозволяє виявляти навіть незначні домішки;

швидкість аналізу, в новітніх ГХ аналіз займає від кількох хвилин до декількох десятків хвилин.; широкий діапазон застосування, через це може бути використана для аналізу різноманітних газових сумішей. Проте основними недоліками ГХ вважають: необхідність калібрування, бо для кількісного аналізу потрібні стандартні зразки; складна підготовка проб, тому що зразки повинні бути очищені від механічних домішок; висока вартість обладнання.

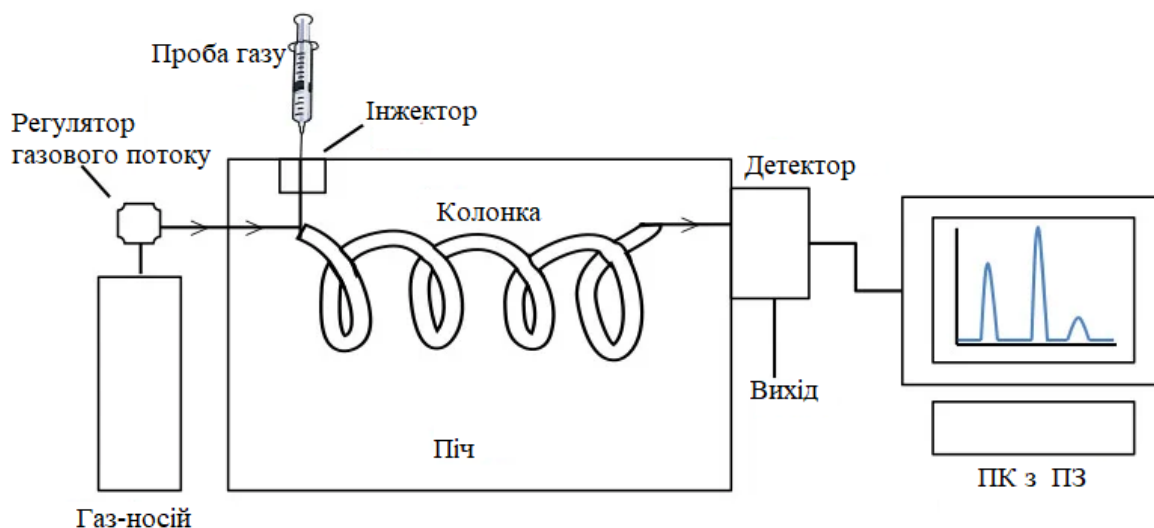


Рисунок 1.2 – Схематичне зображення газового хроматографа [25]

Сучасні газові хроматографи обладнані різноманітними детекторами, здатними фіксувати найменші зміни фізико-хімічних властивостей газового потоку. Серед них особливо виділяються детектор іонізації в полум'ї (ДІП) та детектор теплопровідності (ДТП, рис. 1.3) [26], які завдяки своїй універсальності, високій чутливості та надійності знайшли широке застосування в аналітичній хімії.

Принцип роботи детектора теплопровідності заснований на зміні теплопровідності газового потоку. Чутливий елемент детектора, нагрітий до високої температури, передає тепло оточуючому газу. Різні гази мають різну здатність відводити тепло, що призводить до зміни температури чутливого елемента та, відповідно, зміни його електричного опору. Реєструючи ці зміни, можна кількісно визначити концентрацію аналізованої речовини в газовій суміші.

Для підвищення точності вимірювань використовується диференціальна схема включення детектора. Вона передбачає використання двох або чотирьох

чутливих елементів, один з яких контактує з чистим газом-носієм, а інший – з аналізованою газовою сумішшю. Порівнюючи сигнали від цих елементів, вдається виявити навіть незначні зміни складу газової суміші та підвищити точність аналізу.

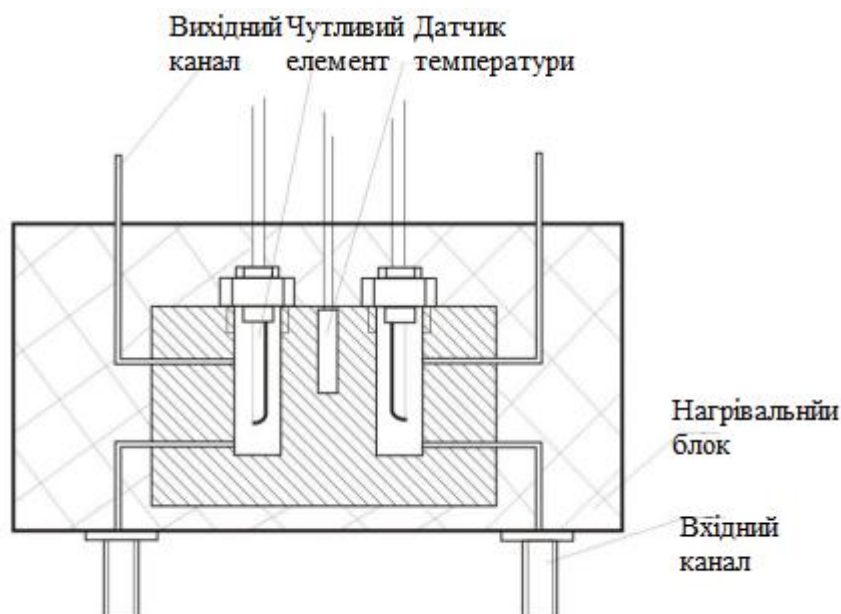


Рисунок 1.3 – Схематичне зображення детектора теплопровідності [27]

Для дослідження енергетичних характеристик газу застосовується калориметричний метод, який передбачає пряме вимірювання теплового ефекту (енталпії) [24] фізичних або хімічних процесів (рис. 1.4). У випадку з газом, це теплота згоряння. Зразок газу спалюється в калориметрі, а виділене тепло поглинається робочим тілом калориметра (зазвичай водою), змінюючи його температуру. За зміною температури обчислюють кількість виділеної теплоти [24].

$$Q = \frac{c \cdot \Delta T}{m}, \quad (1.19)$$

де Q – теплотворна здатність газу, кДж/м³; c – теплоємність калориметричної системи, кДж/°С; ΔT – зміна температури води в калориметрі, К; m – маса згорілого газу, кг.

Основними перевагами калориметричного методу вимірювання енергетичних характеристик газу є: пряме вимірювання теплоти згоряння, бо надає точне значення теплотворної здатності газу; універсальність, адже може бути використаний для визначення теплоти згоряння різних видів палива. Але зважаючи

на недоліки: висока вартість обладнання; тривалість аналізу, бо процес спалювання і вимірювання температури займає певний час; небезпека роботи з горючими газами., даний метод потребує удосконалень.

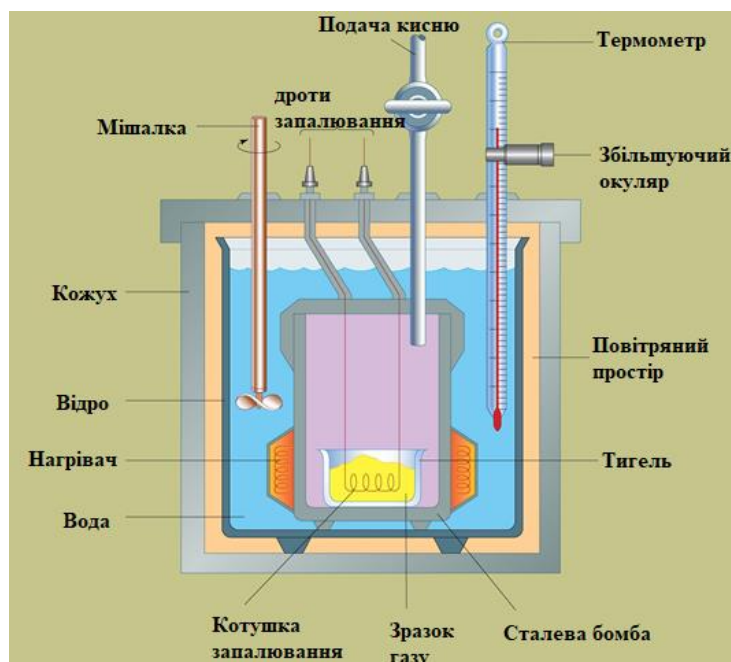


Рисунок 1.4 – Схематичне зображення калориметра [28]

Інфрачервона спектроскопія (ІЧ-спектроскопія, рис. 1.5) базується на взаємодії молекул з інфрачервоним випромінюванням. Кожна молекула має характерний спектр поглинання в інфрачервоній області, який залежить від її структури. Аналізуючи спектр поглинання, можна визначити якісний і кількісний склад газу.

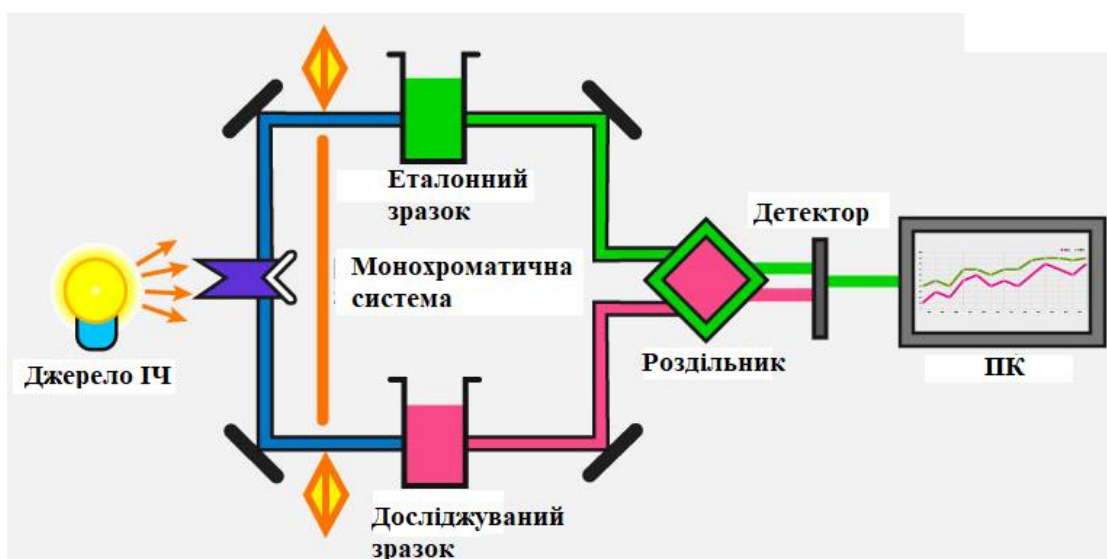


Рисунок 1.5 – Схематичне зображення ІЧ-спектроскопії [29]

Істотними перевагами даного методу є: швидкість аналізу, адже спектр досліджуваного газу можна отримати за кілька секунд; неруйнівний контроль, бо не руйнує зразок, дозволяє проводити багаторазові вимірювання одного і того ж зразка; можливість одночасного визначення кількох компонентів, за одним спектром можна визначити концентрацію декількох газів. Головними недоліками можна вважати: чутливість до перешкод, бо на спектр можуть впливати інші компоненти суміші, вологість, пил; необхідність калібрування та для кількісного аналізу потрібні стандартні зразки.

Практичним і досить точним рішенням в питанні обліку газу природного газу та вимірювання енергетичних характеристик є використання термоанемометричного методу [30], який наділений: широким діапазоном вимірювання швидкостей витрати потоку; можливістю вимірювання нестационарних та пульсуючих потоків; малою інерційністю.

Термоанемометри (ТА) засновані на використанні залежності між втратою тепла неперервно нагрітого тіла і швидкістю газу, в якому це тіло знаходиться (рис.1.6). Тому можуть використовуватися для обліку природного газу.



Рисунок 1.6 – Функціональна схема роботи термоанемометричного давача

Залежно від швидкості потоку та компонентного складу процес взаємодії сенсор-середовище має різний характер, що вказує на важливість дослідження даного зв'язку та встановлення теоретико-експериментальних залежностей, задля розширення діапазону застосування сенсорів даного типу. Основним елементом

давача є нагрівальний елемент, який може бути виготовлений з популярних провідникових матеріалів з високою температуропровідністю (вольфрам, платина) та у різних конфігураціях (рис 1.7) (нитка, пластина та інші геометричні фігури) [30]. Наприклад, невеликий терморезистор із скляним покриттям часто використовується у схемах із постійною температурою.

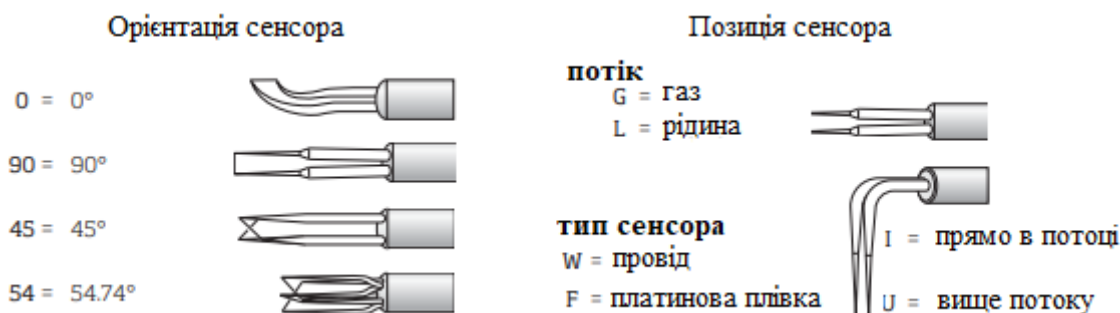


Рисунок 1.7 – Типи виконання термоанемометричних сенсорів [31]

Термоанемометричні сенсори можуть працювати в режимах постійного струму або постійної температури [32]. У більшості випадків нагрівальний елемент включений до мостової схеми, як один із балансувальних елементів. Головною особливістю термоанемометра з постійною температурою є той факт, що відповідний змінний резистор, який знаходиться у балансі із нагрівальним елементом є функцією температури. При певній температурі нагрівального елемента опір змінного резистору знаходиться в певному значенні, яке можна привести до рівноваги відносно іншого плеча мостової схеми. Відповідно до збільшення чи зменшення швидкості потоку газового середовища змінюється температура нагрівального елемента та відповідно опір змінного резистора. Таким чином, потік призводить до розбалансування в мостовій схемі, що в свою чергу, викликає різницю в вольтажі або струмі між двома плечами схеми, яку можна виміряти. Ця різниця буде дорівнювати відповідній швидкості потоку.

Потік в якому функціонує термоанемометричний сенсор характеризується певними фізико-хімічними властивостями, але вони не можуть повноцінно описати взаємозв'язок термоанемометричного давача відносно середовища. Тому основними для опису взаємодії нагрівального елемента є теплофізичні

характеристики середовища в якому він функціонує [30]. Одним із основних теплофізичних параметрів газового середовища при його термоанемометричних дослідженнях є теплопровідність λ . Теплопровідність є властивістю, яка вказує на швидкість, з якою переноситься енергія в процесі теплопередачі. А параметр, що характеризує затримування тілом тепла є теплоємність. Розрізняють ізобарну (c_p , при постійному тиску системи) та ізохорну (c_v , при постійному об'ємі системи) теплоємності. Більш практичною при розрахунках тепло-та масообміну є ізобарна теплоємність, адже вона не потребує постійного об'єму системи, що в питаннях витратометрії з термоанемометричними сенсорами досить складно реалізувати. Ізобарною теплоємністю робочого тіла є відношення нескінченно малої кількості питомої теплоти при постійному тиску, яка підводиться до одиниці тіла або відводиться від неї в процесі нескінченно малої зміни температури цього тіла.

Залежно від конструкції розрізняють такі ТА чутливі елементи [31, 32]:

- дротяний перетворювач, чутливим елементом дротяного перетворювача є тонкий та короткий провід з платини, вольфраму, нікелю. Переваги: широкий спектр характеристик по витраті. Недоліки: крихкість за умови тривалого застосування.
- напівпровідниковий перетворювач, виготовлений із напівпровідника, зазвичай із кремнію, який змінює свої електричні властивості (опір, напругу) залежно від температури. Переваги: простота конструкції; механічна міцність; висока чутливість. Недоліки: широкий розкид параметрів температурного коефіцієнта опору.
- плівковий перетворювач де чутливим елементом виступає тонка плівка з напівпровідникового матеріалу, нанесена на підкладку. Ця конструкція забезпечує високу чутливість, швидку реакцію та компактні розміри прилад. Переваги: досить широкий спектр швидкостей газу; міцність. Недоліки інерційність трохи більша ніж у дротяних та збільшується зі зменшенням швидкості потоку .

Таким чином, шляхи розвитку термоанемометрії зосереджені у вдосконаленні методик вимірювання, безпосередній розробці вимірювальних сенсорів, витратовимірювальних установок та систем на їх базі (рис. 1.8).

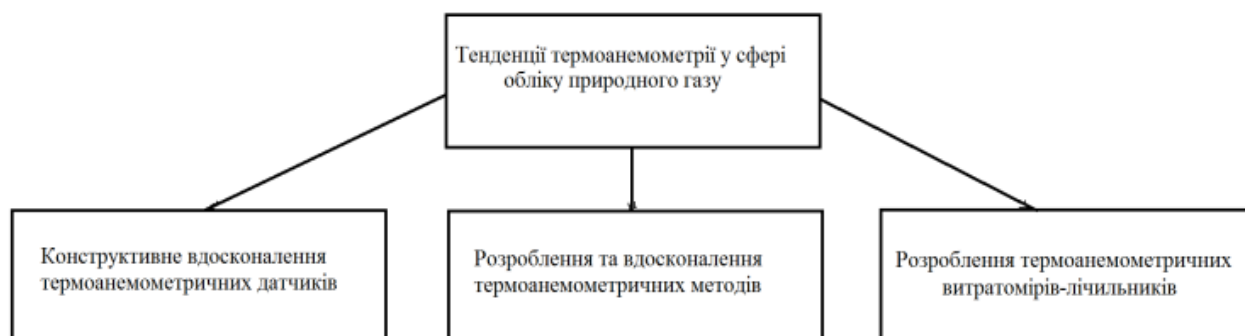


Рисунок 1.8 – Тенденції розвитку термоанемометрії у сфері обліку природного газу

Концептуально розв’язуються нові підходи до моделювання процесу потоку, розподіленню швидкостей та взаємодії вимірювальних термоанемометричних сенсорів опираючись на характеристики газу, враховуючи густину потоку, компонентний склад. Також важливим є дослідження теплоємності та теплопровідності газового середовища при функціонуванні термоанемометричних перетворювачів. Дослідження витрати газу має проводитися багатопараметрично, досліджуючи газовий потік як середовище зі складовими та параметрами змінюваними в часі. Встановлення аналітичних залежностей між вхідними та вихідними параметрами газу дасть можливість тривимірно досліджувати газ як середовище, а термоанемометричний сенсор служитиме інструментом для його дослідження.

Методи визначення енергетичних характеристик природного газу реалізовані в наступних технічних рішеннях:

Газовий хроматограф Rosemount 700XA (рис 1.9) має широкий динамічний діапазон вимірювань від процентних концентрацій до слідів компонентів. Доступні детектори: теплопровідності (ДТП), полум’яно-іонізаційний (ПІД), мікрополум’яний-фотометричний. Стабільна робота в широкому діапазоні температур навколишнього середовища (-20 °C до 60 °C) та надійний розрахунок

точки роси вуглеводнів на основі розширеного аналізу C9+. Здатність до комплексного аналізу природного газу, застосування в процесах нафтопереробки, хімічної промисловості, зрідженого природного газу, електростанціях та інших галузях.



Рисунок 1.9 – Газовий хроматограф Rosemount 700XA [33]

Найкраща в галузі повторюваність вимірювання теплотворної здатності C6+: $\pm 0,010\%$ ($\pm 0,10$ BTU/1000 BTU) у контрольованому середовищі. $\pm 0,20\%$ ($\pm 0,20$ BTU/1000 BTU) у неконтрольованому середовищі (-20 °C до 60 °C) з циклом три хвилини, повторюваність вимірювання C9+: $\pm 0,0125\%$ теплотворної здатності ($\pm 0,125$ BTU/1000 BTU) у контрольованому середовищі. $\pm 0,025\%$ ($\pm 0,25\%$ BTU/1000 BTU) теплотворної здатності у неконтрольованому середовищі (-20 °C до 60 °C) з п'ятихвилинним циклом. Максимальний тиск зразкового газу та газу-носія 6 бар.

Калориметр Setaram C80 Calvet (рис 1.10) оснащений високочутливими тепловими сенсорами, що дозволяють інтегрувати в часі повну теплову потужність, яка виділяється або поглинається в процесі дослідження. Принцип дії калориметрів Кальве базується на диференціальному тепловому аналізі. Паралельно розміщені

дві ідентичні вимірювальні комірки: робоча, яка містить зразок, та референтна, заповнена інертною речовиною. Порівняння теплових потоків у цих комірках дозволяє виокремити тепловий ефект, пов'язаний безпосередньо з досліджуваним процесом, мінімізуючи вплив паразитних теплових явищ. Завдяки такому підходу забезпечується висока чутливість та точність вимірювань. Діапазон температур: кімнатна температура - 300 °С, точність температури $\pm 0,3$ °С, швидкість нагрівання/охолодження 0,001 - 2 °С/хв, точність вимірювання ентальпії $\pm 0,4\%$; точність калориметричних вимірювань $\pm 0,4\%$, робочий тиск 350 бар (5075 psi); 600 бар (8700 psi); 1000 бар (14600 psi).



Рисунок 1.10 – Калориметр Setaram C80 Calvet [34]

Калориметр C80 оснащений високочутливими тепловими сенсорами, що дозволяють інтегрувати в часі повну теплову потужність, яка виділяється або поглинається в процесі дослідження. Принцип дії калориметрів Кальве базується на диференціальному тепловому аналізі. Паралельно розміщені дві ідентичні вимірювальні комірки: робоча, яка містить зразок, та референтна, заповнена інертною речовиною. Порівняння теплових потоків у цих комірках дозволяє виокремити тепловий ефект, пов'язаний безпосередньо з досліджуваним процесом, мінімізуючи вплив паразитних теплових явищ. Завдяки такому підходу забезпечується висока чутливість та точність вимірювань. Діапазон температур:

кімнатна температура - 300 °С, точність температури $\pm 0,3$ °С, швидкість нагрівання/охолодження 0,001 - 2 °С/хв, точність вимірювання ентальпії $\pm 0,4\%$; точність калориметричних вимірювань $\pm 0,4\%$, робочий тиск 350 бар (5075 psi); 600 бар (8700 psi); 1000 бар (14600 psi).

Інфрачервоний газовий аналізатор MAX-iR FTIR [35] від Thermo Fisher Scientific (рис. 1.11) є одним з провідних інфрачервоних спектрометричних приладів для аналізу газових сумішей в реальному часі. Він використовується в широкому спектрі галузей, включаючи нафтогазову, хімічну, фармацевтичну та екологічну. Аналізатор дозволяє виявляти компоненти в концентраціях від декількох частин на мільярд (ppb) до декількох частин на трильйон (ppt), що робить його ідеальним для аналізу високочистих газів. Забезпечує швидкий відгук, що дозволяє проводити моніторинг процесів в реальному часі. Визначає широкий спектр газів, включаючи органічні та неорганічні сполуки. Робочий тиск 1 – 5 бар, температура 5-191°C, охоплює весь середній інфрачервоний діапазон (4000-400 cm^{-1}), що дозволяє ідентифікувати широкий спектр молекул. Наявні складності у виявленні сполук, які складають менше 5% від зразка.



Рисунок 1.11 – Інфрачервоний газовий аналізатор MAX-iR FTIR [35]

Зразком комерційної розробки є високоточні сенсори витрати газу моделей Zephyr фірми “Honeywell (рис 1.12). Основна особливість сенсорів цієї серії - наявність в структурі не тільки схем управління сесором і підсилювача

диференціального сигналу з мостової схеми терморезисторів [36] а й спеціалізованої інтегральної мікросхеми для додаткової обробки сигналу. Ця мікросхема містить схеми управління нагрівачем, узгодження з термосенсором, модулі АЦП і ЦАП, а також мікроконтролер і цифровий інтерфейс I2C для зв'язку з керуючим мікроконтролером вимірювального приладу. Це забезпечує можливість калібрування і термокомпенсації сигналу в діапазоні температур від 0 до +50 °С. Точність: $\pm 0,5\%$ (0-14,3% FS(Full Scale)), $\pm 3,5\%$ (14,3-100% FS). Недоліком цих сенсорів є висока чутливість до забруднення середовища потоку та його режиму, що буде призводити до збільшення похибки сенсора.



Рисунок 1.12 – Типологія давача витрати газу [36]

Прикладом комерційної реалізації та практичного застосування термоанемометрії може бути лічильник газу ГОРН (рис 1.13) [37], який призначений для вимірювання об'єму природного газу або скрапленого вуглеводневого газу на об'єктах житлово-комунального господарства і в побуті з можливістю передачі інформації в централізовану систему обліку. Лічильники газу марки "ГОРН" виробляються у чотирьох типорозмірах: G1,6, G2,5, G4, G6 [37].

Межі відносної похибки в нормальних умовах в діапазоні витрат від Q_{\min} до Q_t , не більше $\pm 3,0 \%$, в діапазоні витрат від Q_t до Q_{\max} , не більше $\pm 1,5 \%$. Абсолютна похибка вимірювання температури, не більше $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$.



Рисунок 1.13 – Побутовий лічильник газу ГОРН [38]

Принцип дії лічильника заснований на термоанемометричному методі вимірювання витрати об'єму газу, що пройшов через лічильник. Лічильник ГОРН дозволяє дистанційно передавати дані. Лічильник оснащений аварійним сповіщенням при різного роду відхиленнях та спроб доступу до передаваної інформації. Інформація передається захищеним каналом в зашифрованому вигляді. Даний лічильник розширює можливості вимірювальних систем на новий рівень з можливістю безконтактного моніторингу та контролю споживання газу в побутовому секторі.

Узагальненим завданням при розробленні та вдосконаленні чутливих елементів термоанемометрів можна вважати конструктивне удосконалення сенсорів та розширення діапазону вимірюваної величини з врахуванням параметрів середовища потоку.

Прикладом таких досліджень є розроблення інваріантного до температури довкілля термоанемометра (рис. 1.14) [39] на основі сенсорів р-п переходу, які спроможні працювати в досить широкому температурному діапазоні, наділені досить малою споживаною електричною потужністю схеми. Для досягнення

оптимальної точності вимірювань термоанемометром, необхідно забезпечити робочу швидкість потоку на рівні не нижче ніж 0,85 м/с, тоді відносна похибка вимірювань складає $\pm 0,5\%$. Дані датчики мають ряд недоліків, зокрема проблему уніфікації характеристик середовища з вихідним сигналом, досить високий рівень шумів, які вимагають подальших розробок щодо удосконалення математичних моделей передавальних характеристик сенсорів та вимірювальних систем загалом.

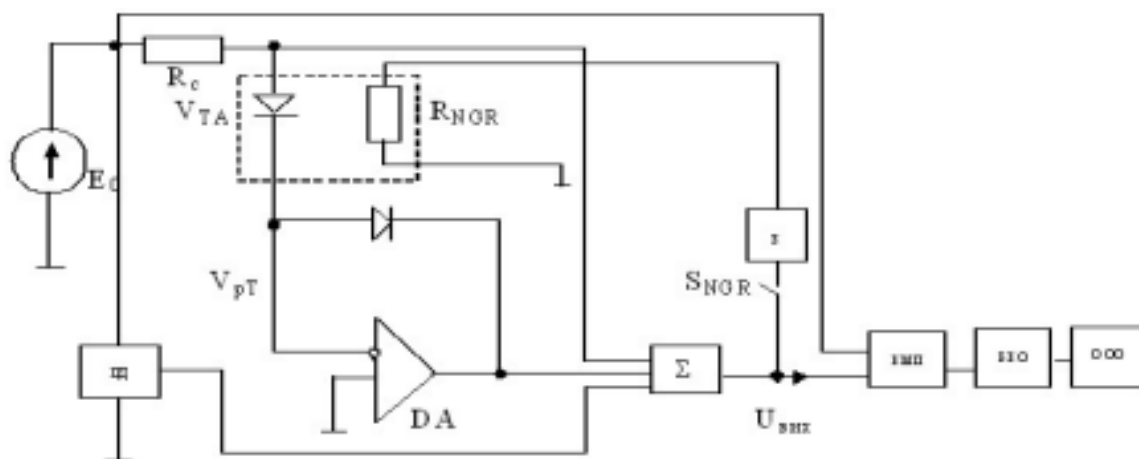


Рисунок 1.14 – Структурна схема термоанемометра, інваріантного до зміни температури газового потоку [39]

Актуальним є застосування SMART-лічильників [40] у системі обліку природного газу обумовлена необхідністю підвищення точності та функціональності вимірювань (рис.1.15).



Рисунок 1.15 – Smart-лічильник газу G1,6 RSE/1,2 LA [41]

Компанія Pietro Fiorentini є одним із лідерів у виробництві таких приладів, що вже успішно застосовуються в Україні. Їхні переваги полягають у можливості багатофакторного аналізу споживання газу, дистанційного моніторингу та підвищеної безпеки системи. Лічильники обладнані електронною системою температурної корекції, параметри якої встановлюються виробником відповідно до вимог замовника. Особистий кабінет дозволяє відстежувати споживання газу не лише в кубічних метрах, а й в енергетичних одиницях - кВт·год.

1.4 Сучасний стан наукових досліджень енергетичних характеристик природного газу

За прогнозами British Petroleum попит на природний газ буде зростати до 2050 року [42] (рис. 1.16), що на пряму вказує на важливість підвищення обліку та ефективного використання природного газу як енергоносія.

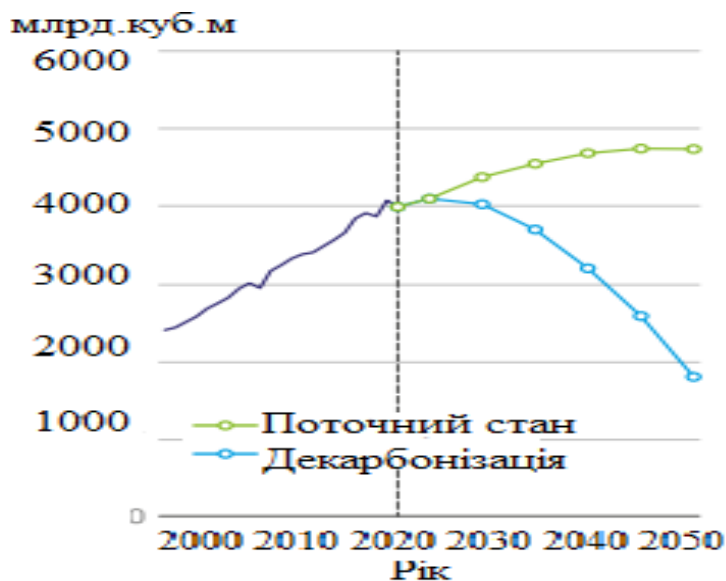


Рисунок 1.16 – Прогноз попиту на природний газ [42]

Перспективи природного газу формуються двома значними, але протилежними тенденціями [42]: зростаючим попитом в країнах з економікою, що розвивається, у міру їхнього зростання та індустріалізації, компенсованим переходом від природного газу до більшої електрифікації та палива з низьким

рівнем вуглецю, оскільки світ декарбонізується. Домінуючою тенденцією в поточному сценарії є зростаюче використання природного газу в країнах з економікою, що розвивається (за винятком Китаю), яке зростає на трохи більше 50% до 2050 року, що більше ніж компенсує все зростання глобального попиту на газ протягом прогнозного періоду. Зростання споживання газу в країнах з економікою, що розвивається, обумовлене збільшенням використання в енергетичному та промисловому секторах у міру зростання та індустріалізації цих економік. Дана тенденція чітко підкреслює важливість пошуку шляхів оптимізації використання та споживання природного газу.

Актуальність дослідження енергетичних характеристик природного газу обумовлена постійно зростаючими потребами світової економіки в енергоресурсах та прагненням досягти стійкого розвитку. Глибоке розуміння фізико-хімічних властивостей цього енергоносія є необхідною умовою для оптимізації процесів його видобутку, транспортування, зберігання, обліку та ефективного використання.

Сучасні тенденції в галузі вимірювальної техніки спрямовані на розширення функціоналу побутових газових лічильників. Крім обліку об'єму, перспективним є вимірювання теплової енергії газу та діагностика його якості. Проте, на сьогоднішній день, подібні рішення для побутових лічильників є недостатньо розробленими.

Дослідження в сфері обліку природного газу, в тому числі його енергетичних та якісних характеристик за допомогою методів та засобів попередньо розглянутих, викладено у наступних роботах:

Значний вклад в розвиток термоанемометрії в сфері обліку газу зроблено вченими із Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. Зокрема розроблено лабораторну установку для експериментальних досліджень енергетичної цінності природного газу методом термоанемометричного контролю (рис 1.17) [43].

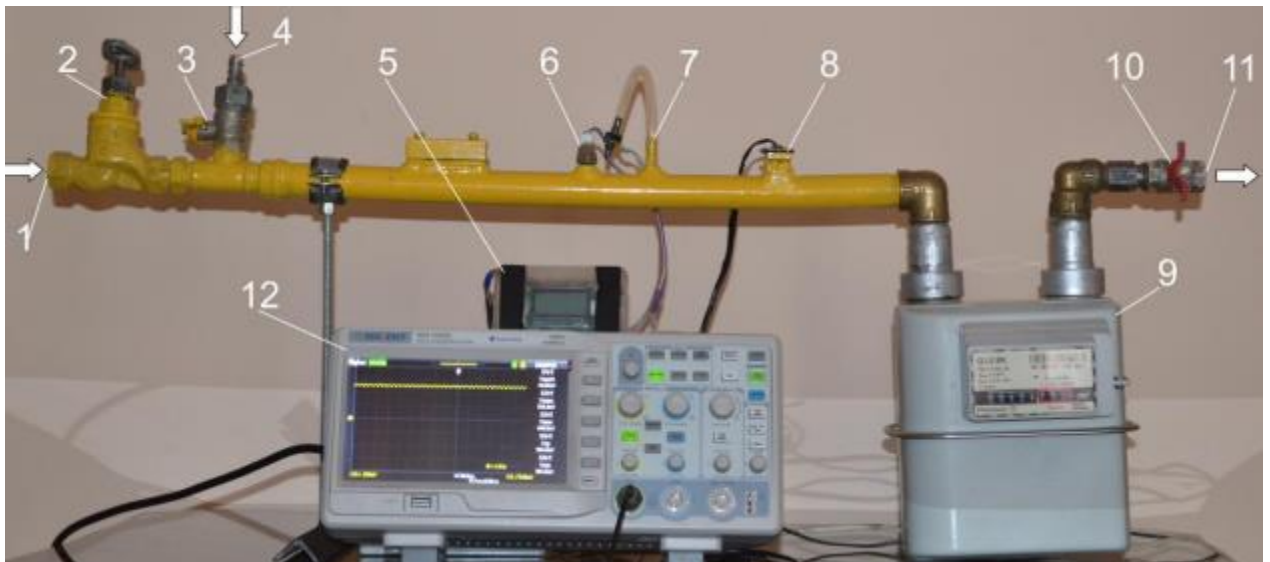


Рисунок 1.17 – Загальний вигляд лабораторної установки для експериментальних досліджень методу термоанемометричного контролю енергетичної цінності природного газу [43]

До складу установки входять (рис. 1.17): вхідний патрубок 1, балон 2 з пропан-бутановою сумішшю, джерело витрати повітря 3, задавачі витрати 4, 6, 12, редуктор 5, джерело нагрівання потоку робочого середовища 7, напірнотермоанемометричний пристрій контролю 10 з первинними давачами (трубка Піто 8 та термоанемометричний перетворювач 9), еталонний лічильник 11 об'єму робочого середовища, випускний патрубок 13 та ПЕОМ 14. Дані про тиск p і температуру T робочого середовища, перепад тиску на трубці Піто Δp та напругу вихідного сигналу термоанемометричного перетворювача U надходять до ПЕОМ.

Експериментально встановлено закономірності зміни вихідного сигналу вимірювача енергетичної цінності природного газу для діапазону теплоти згоряння (7759 – 8538) ккал/м³ і на витратах до 0,6 м³ / год. Викладені дослідження поклали основу для технічних рішень в побудові пристроїв для реалізації термоанемометричного методу контролю енергетичної цінності природного газу. Проте дана установка не враховує вологість досліджуваного середовища та не передбачає роботу із іншими газовими середовищами з домішуванням водню.

Розроблено та промислово апробовано новий експрес-метод визначення теплоти згоряння газу (рис 1.18) [44], який ґрунтується на вимірюванні фізико-

хімічних властивостей газової суміші. Запропонована методика дозволила значно скоротити час аналізу та підвищити точність вимірювань. Експериментально підтверджено, що використання ультразвукового методу в поєднанні з вимірюванням концентрації діоксиду вуглецю є ефективним інструментом для визначення теплоти згоряння.



Рисунок 1.18 – Прилад для експрес-контролю теплоти згоряння газу[44]

Функціональною основою пристрою слугує вимірювальна камера, в якій вимірюються такі інформативні параметри як: концентрація вуглекислого газу та швидкість поширення ультразвукових хвиль у природному газі. Ці параметри є вихідними даними для подальшого визначення теплотворної здатності газового палива. Розроблена установка може бути використана в різних галузях, де виникає необхідність оперативного контролю якості палива.. Для промислового дослідження було відібрано 13 проб природного газу з різних точок Івано-Франківщини. За результатами хроматографічного аналізу встановлено, що нижча теплота згоряння проб коливається в межах від 7950 до 8596 ккал/м³. Порівняння отриманих даних з результатами, отриманими в хіміко-аналітичній лабораторії підтвердило високу точність проведених досліджень. Похибка вимірювань не перевищила 3%.

Відомим є патентозахищене рішення [45] на базі парціального витратоміра та [46], яке стосується пристрою для вимірювання витрати та енергетичної цінності природного газу (рис 1.19) [46].

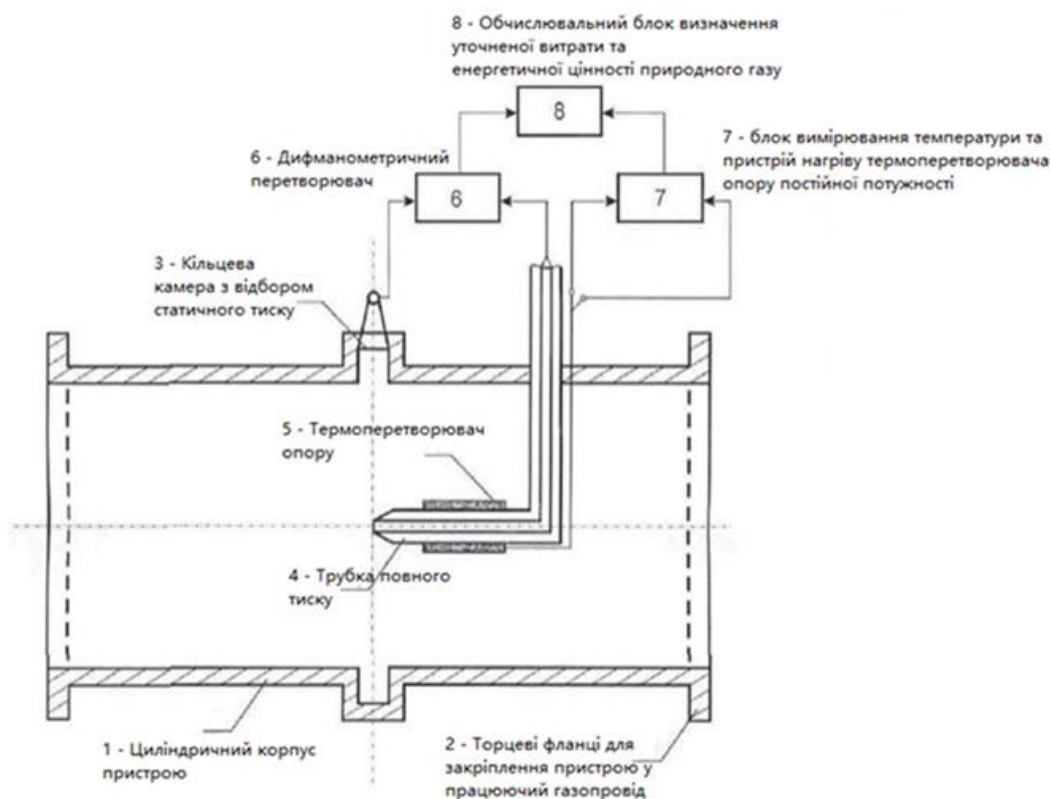


Рисунок 1.19 – Принципова схема пристрою для вимірювання витрати та енергетичної цінності природного газу [46]

Складається з витратоміра пневмометричного типу на базі модернізованої трубки Піто-Прандтля, яка в свою чергу складається із трубки повного тиску та трубки статичного тиску, яка виконана у вигляді кільцевої камери. Край трубки повного тиску співпадає з віссю центру трубопроводу та кільцевої камери. Температурний давач та дифманометричний перетворювач підключені імпульсними лініями до трубок повного і статичного тиску, до яких під'єднаний обчислювально-запам'ятовуючий блок. Особливістю конструкції є виконаний сенсора температури у вигляді поверхневого термоперетворювача опору, напиленого на зовнішній поверхні трубки повного тиску на відстані від її торця, не меншій за п'ятикратний зовнішній діаметр трубки повного тиску. При цьому зовнішня поверхня напиленого шару термоперетворювача опору виконана у

вигляді черв'яка із напівсферичних заглибин та виступів. За рахунок взаємодії термоперетворювача опору з середовищем газу формується сигнал, пропорційний теплотворній здатності газу. Виступи та заглибини є особливістю конструкції термоперетворювача, які посилюють конвективний теплообмін, та підвищують інформативність сигналу. Так як принцип роботи пристрою передбачає, що склад газу є однорідним по всьому перерізу трубопроводу, то на практиці це припущення може не виконуватися, особливо при нестабільних умовах роботи. Термоперетворювач, який безпосередньо контактує з газом, може піддаватися корозії, особливо при наявності агресивних компонентів у газі. Це може призвести до зміни його характеристик і погіршення точності вимірювань, що одразу відкидає можливість роботи з вологим газовим потоком.

Запропонований удосконалений метод вимірювання теплотворної здатності природного газу, реалізований в експериментальному зразку ізоперіболічного калориметра з мікропроцесорною системою (рис. 1.20) [47]. Дослідження з використанням чистого метану та трьох зразків природного газу (діапазон вищої теплоти згоряння 35,6-37,1 МДж/м³, число Воббе 46,8-49,8 МДж/м³) показали високу точність отриманих результатів при порівнянні з даними хроматографа "Кристалл 2000М". Відхилення не перевищували 0,5 МДж/м³ для теплоти згоряння та 0,86 МДж/м³ для числа Воббе.



Рисунок 1.20 – Аналізатор енергетичних характеристик газу [47]

Аналізатор енергетичних характеристик газу являє собою моноблочний прилад, виготовлений з нержавіючої сталі. Його конструкція включає в себе високоточний калориметр, густиномір та інтегровану систему управління та обробки даних.

Попри широкі функціональні можливості, прилад не враховує вологість досліджуваного газу, також великі габарити призводять до стаціонарності при дослідженнях.

Розроблено експериментальну установку для перевірки нового методу визначення теплотворної здатності природного газу за допомогою спеціальних звужувальних пристроїв (рис.1.21).

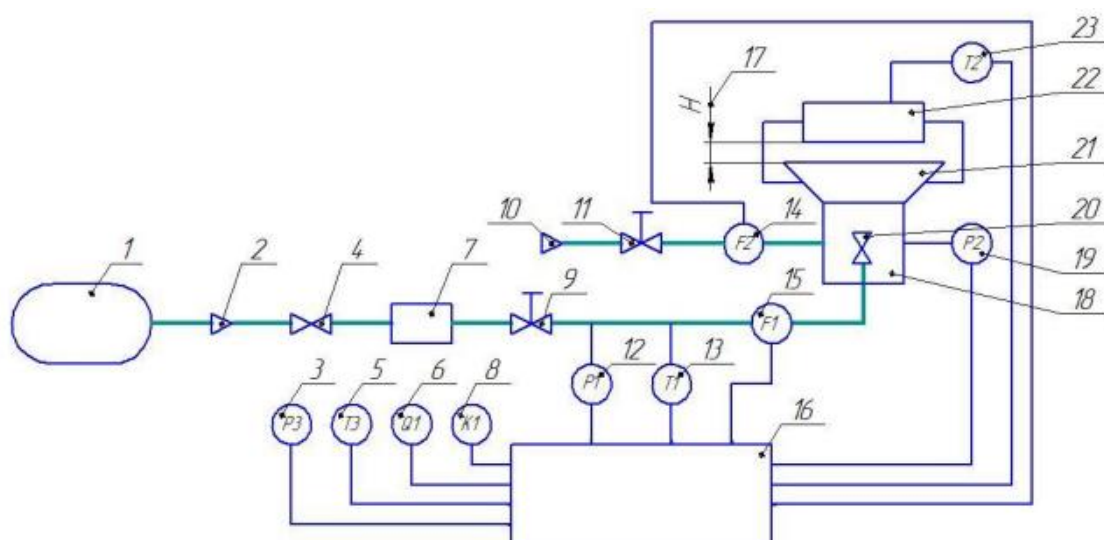


Рисунок 1.21 - Схема лабораторного стенду для контролю теплоти згорання природного газу [48]

Лабораторний стенд (рис. 1.21) призначений для дослідження процесів горіння газових сумішей. Він складається з таких основних елементів: Балон зі стисненим природним газом (1) слугує джерелом досліджуваного газу. Лінія (2) та кран (4) забезпечують подачу газу з балона до системи. Осушувач (7) видаляє вологу з газового потоку перед подачею до пальника. Регулятор витрати (9) дозволяє точно встановлювати необхідну витрату газу. Витратомір (15) вимірює об'ємний витрати газу, що подається до пальника. Пальник (21) з торцевим звужувальним пристроєм (20) забезпечує стабільне горіння газової суміші. Інжектор (18) подає додаткове повітря до пальника, необхідне для горіння.

Витратомір (14) та регулятор (11) контролюють витрату повітря, що подається до інжектора. Нагрівальна пластина (22) нагрівається полум'ям пальника, дозволяючи вимірювати теплову потужність. Пристрій (17) дозволяє регулювати відстань між пальником та нагрівальною пластиною. Система збору та обробки даних (16) включає в себе: Давачі тиску (12, 19) для вимірювання тиску газу в різних точках системи. Давачі температури (13, 23) для вимірювання температури газу та нагрівальної пластини відповідно. Давач тиску (3), температури (5) та вологості (6) для вимірювання параметрів навколишнього середовища. Цифровий хронометр (8) для фіксації часу проведення експерименту.

Проведені дослідження з природним газом (теплотворна здатність 35,3 МДж/м³) та пропан-бутановою сумішшю (теплотворна здатність 46,8 МДж/м³) при різних витратах та співвідношеннях газів і повітря показали високу точність запропонованого методу. Дослідження проводились на зразках природного газу (витрати до $9,7 \cdot 10^{-5}$ м³/с) та пропан-бутанової суміші (витрати до $6,9 \cdot 10^{-5}$ м³/с) при різних співвідношеннях з повітрям (до 1,6 для природного газу і 2,2 для пропан-бутанової суміші). Отримані результати підтвердили ефективність використання звужувальних пристроїв для цих цілей.

За допомогою цього стенду можна проводити дослідження, пов'язані з процесами горіння газових сумішей, визначати теплотворну здатність газів, оптимізувати умови горіння та вирішувати інші науково-дослідницькі завдання. Але основним недоліком є те, що він працює на сухих газах, задля забезпечення процесу горіння в пальнику, що в свою чергу ставить виклики для подальших наукових досліджень для врахування вологи газового потоку.

Значний вклад в розробку інформаційно-вимірювального забезпечення робіт пов'язаних з декарбонізацією постачання природного газу здійснено у роботі [49]. На основі рівняння p-mod було розроблено спеціальне програмне забезпечення, із точністю визначення об'єму від -15958 до +1471 м³. На основі даного рівняння та сучасних термодинамічних моделей було розроблено програмне забезпечення для обчислення коефіцієнта стисливості та об'єму газоподобних сумішей. Програма

дозволяє проводити детальний аналіз поведінки таких сумішей за різних умов і є потужним інструментом для наукових досліджень та інженерних розрахунків у галузі газової промисловості. Проте основним недоліком роботи є відсутність експериментального дослідження вищевказаних процесів та не врахування вологості природного газу, а саме взаємозв'язку вологості із воднем.

Комплексне експериментальне та теоретичне дослідження взаємодії природного газу та водню в газових сумішах. В якому досліджено вплив різних концентрацій водню на основні характеристики газових сумішей, такі як теплотворна здатність, швидкість поширення полум'я, межі вибуховості, а також на роботу газових приладів здійснено у роботі [50]. Дослідження показало, що за певних умов водень може бути успішно використаний як добавка до природного газу без суттєвої модифікації існуючих газових систем. Однак, для широкого впровадження водневих технологій необхідні подальші дослідження та розробка відповідних нормативно-правових актів.

Розроблено спрощену методику прогнозування споживання палива [51] та специфічних викидів діоксиду вуглецю при заміні палива в технологічних установках та впровадженні енергозберігаючих заходів без математичного моделювання процесів горіння палива, руху газу та теплообміну в робочій камері безперервної печі. Встановлено, що при заміні природного газу його сумішшю з відновлюваним воднем або при повному переведенні установки на відновлюваний водень максимальна похибка розрахунку прогнозних даних не перевищує 1,5%. Дані роботи вказують на важливість застосування нових джерел енергії із домішуванням водню.

Закордонне дослідження присвячено аналізу впливу рідини на вимірювання витрати газорідинної суміші за допомогою диференціального манометричного витратоміра (рис. 1.22) [52] виявило, що наявність рідини в газовому потоці призводить до зміни диференціального тиску, виміряного на діафрагмах витратоміра.

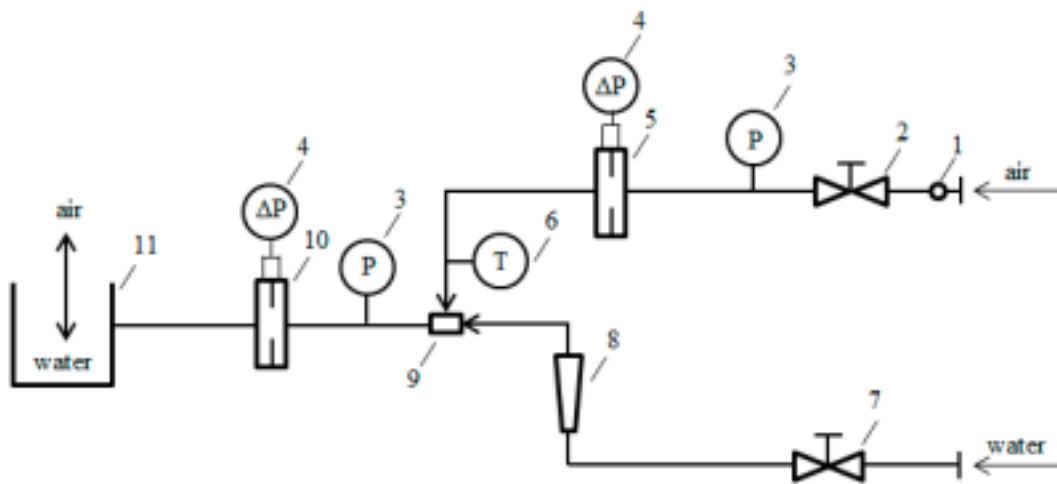


Рисунок 1.22 - Схема експериментальної установки для дослідження витрати двофазної суміші: 1 – манометр, який використовується для регулювання витрати повітря до 0,5 бар, 2 – регулювальний клапан витрати повітря, 3 – датчик перенапруги, 4 – диференціальний манометр, 5 – витратомір з перепадом тиску, який використовується для вимірювання витрати повітря (стандартна діафрагма), 6 – датчик температури повітря, 7 – регулювальний клапан витрати води, 8 – ротаметр витрати води, 9 – форсунка, 10 – витратомір з перепадом тиску, який використовується для вимірювання витрати двофазної суміші (набір змінних стандартних діафрагм та щілинних діафрагм), 11 – сепаратор фаз [52]

У висновку дослідження показало, що використання щілинних діафрагм у диференціальних манометричних витратомірах дозволяє підвищити точність

вимірювання витрати двофазних газорідних сумішей. Але для досягнення максимальної точності необхідно розробляти спеціальні кореляційні залежності для кожного типу діафрагми.

Новий крок в розширенні термоанемометрії при обліку природного газу викладено в патенті на лічильник газу (рис. 1.23) [53].

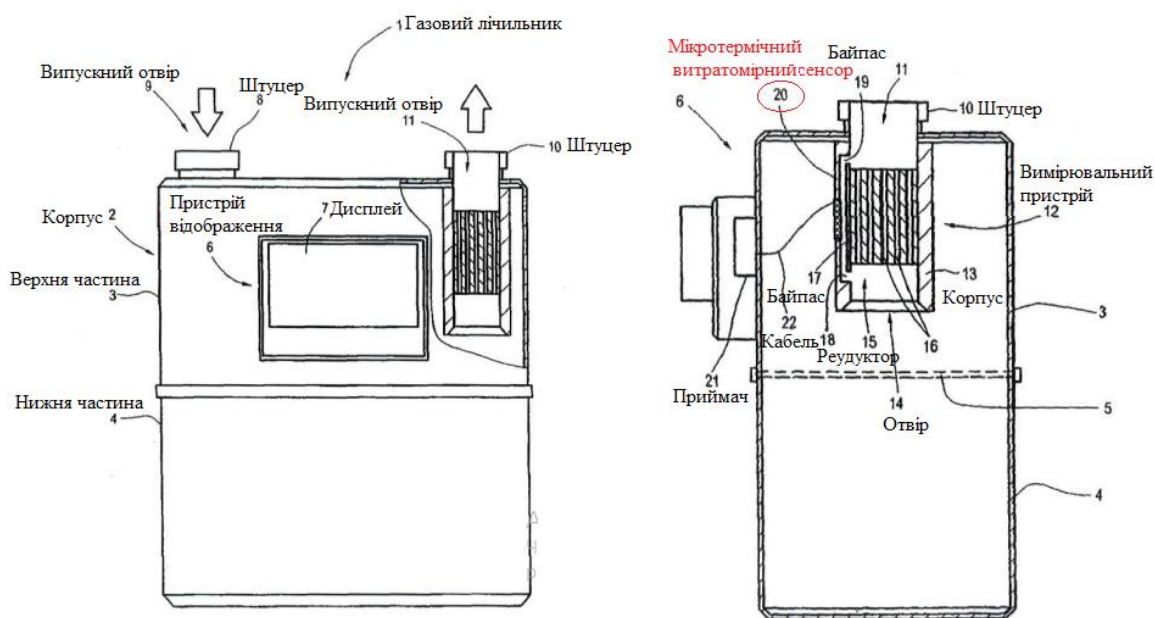


Рисунок 1.23 – Схема лічильника із термоанемометричним сенсором [53]

В корпусі мембранного газового лічильника, на випускному отворі розташований вимірювальний елемент, в корпус якого вбудований мікротермічний витратомірний сенсор. Високоточний сенсорний вимірювальний пристрій вбудований в мембранний газовий лічильник і використовується замість механічного мембранного вимірювального елемента. В порівнянні з механічними мембранними вимірювальними елементами сенсорні вимірювальні пристрої можуть визначати й інші вимірювані величини, а не тільки чистий потік, наприклад, склад газу, відповідно, можливі забруднення та інші параметри в потоці газу. Мікротермічний витратомірний сенсор створений по технології CMOS, та працює за принципом термоанемометрії. Сенсор розташований поблизу заднього кінця байпасної ділянки, таким чином, що перед сенсором міститься впускна ділянка трубопроводу достатньої довжини, на якій відбувається заспокоювання

поток. В лічильнику міститься перемикальний клапан, що керується радіосигналом задля контролю подачі газу. Лічильник наділений бездротовими технологіями передачі даних результатів вимірювання. Недоліком є Бездротова передача даних, що робить прилад вразливим до впливу електромагнітних перешкод, що може призвести до помилкових показань. Для визначення складу газу може знадобитися додаткове обладнання для порівняння результатів.

1.5 Вибір та обґрунтування напрямку дослідження

Точні вимірювання енергетичних характеристик природного газу є критично важливими для ефективного управління енергоресурсами та оптимізації технологічних процесів. Зважаючи на існуючі методи вимірювання, зокрема засновані на термоанемометрії, існує потреба в їх подальшому удосконаленні та розробці нових методологічних засад для забезпечення високої точності та достовірності результатів, особливо в умовах енергетичного переходу та зростаючої ролі водневих технологій. Вологість постає, як основний фактор якості природного газу, а теплофізичні параметри теплопровідності та теплоємності газу складають основу поняття енергетичних характеристик для досліджень взаємодії нагрітого тіла в досліджуваному потоці природного газу.

Метою роботи є вирішення актуального науково-прикладного завдання у галузі вимірювання і контролю якісних параметрів природного газу – удосконалення методу і технічних засобів для вимірювання енергетичних характеристик вологого природного газу із застосуванням термоанемометричних засобів вимірювальної техніки.

Для досягнення зазначеної мети необхідно розв'язати такі **задачі**:

- 1) Здійснити аналіз сучасних методів і засобів вимірювання якісних характеристик природного газу та обґрунтувати шляхи реалізації при дослідженні вологості природного газу;

2) Дослідити взаємозв'язки між вологістю природного газу і його енергетичними характеристиками з врахуванням теплофізичних властивостей газових середовищ;

3) Розробити методичні засади створення установки для дослідження витрати вологих газів із застосуванням термоанемометричних сенсорів;

4) Розробити, виготовити та дослідити функціонування лабораторного стенду для відтворення і вимірювання витрат вологих газів і провести експериментальну апробацію можливостей його практичного застосування;

5) Здійснити метрологічний аналіз розробленого удосконаленого методу та засобу вимірювання енергетичних характеристик природного газу із застосуванням термоанемометричних сенсорів.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИМІРЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОГОГО ПРИРОДНОГО ГАЗУ

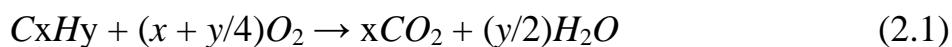
Актуальність дослідження енергетичних характеристик вологого природного газу обумовлена необхідністю підвищення точності вимірювань та контролю процесів у газовій промисловості. Наявність вологи в природному газі суттєво впливає на його теплофізичні властивості, що, в свою чергу, впливає на точність вимірювань за допомогою термоанемометрів.

Мета даного розділу полягає в теоретичному дослідженні впливу вологості природного газу та його компонентного складу на енергетичні характеристики та роботу термоанемометричних перетворювачів. Будуть розроблені математичні моделі, які описують залежність теплофізичних властивостей газових сумішей від температури, тиску та вмісту вологи. На основі цих моделей буде проведено аналіз впливу різних факторів на чутливість та точність термоанемометрів.

2.1 Теоретичні дослідження впливу вологості природного газу на енергетичні характеристики

Якість природного газу [54] є головним питанням ефективного використання енергоресурсів України. Одним із якісних показників природного газу є вологість – кількість водяної пари, що міститься в одиниці об'єму природного газу при заданих умовах. Впливовими факторами на вологовміст природного газу є тиск, температура, компонентний склад газової суміші та вміст неуглеводневих компонентів, в тому числі азот, вуглекислий газ, кисень. Основними параметрами, що характеризують вміст водяної пари в природному газі є його абсолютна, відносна вологість та точка роси. Вміст водяної пари в природному газі та газових сумішах вказує на ступінь осушення газу, який використовується в технологічних процесах і газоспоживному обладнанні. Волога напряму впливає на процес горіння природного газу.

Процес горіння природного газу – це хімічна реакція з киснем, в результаті якої утворюються вуглекислий газ (CO_2) та вода (H_2O). Аналітично процес горіння вуглеводнів обраховується [55]:



де C_xH_y – загальна формула вуглеводню, x – кількість атомів вуглецю, y – кількість атомів водню, O_2 – кисень, CO_2 – вуглекислий газ, H_2O – вода.

Прямої універсальної формули для обчислення точного об'єму повітря, необхідного для спалювання вуглеводнів, не існує. Це пов'язано з великою кількістю змінних, які впливають на цей процес, таких як: вид вуглеводню, бо різні вуглеводні мають різні співвідношення атомів вуглецю та водню, що впливає на кількість необхідного кисню. Співвідношення повітря і палива – це відношення може бути стехіометричним (ідеальне співвідношення для повного згорання), збагаченим (надлишок повітря) або збідненим (недостача повітря). Температура і тиск, адже зміна температури і тиску впливає на об'єм повітря і палива. Вологість повітря, тому що наявність водяної пари в повітрі впливає на концентрацію кисню і теплоємність суміші. Однак, існує загальний підхід до розрахунку теоретично необхідного об'єму повітря [55]: 1) Записується рівняння хімічної реакції згорання конкретного вуглеводню та визначається стехіометричне співвідношення між паливом і киснем. 2) Розрахунок кількості молів кисню: За відомим співвідношенням визначається кількість молів кисню, необхідна для згорання 1 моля палива. 3) Розрахунок об'єму кисню: За законом Авогадро обчислюється об'єм кисню за нормальних умов ($0^\circ C$, 1 атм). 4) Розрахунок об'єму повітря - оскільки повітря містить приблизно 21% кисню за об'ємом, то об'єм повітря обчислюється діленням об'єму кисню на 0,21.

Наприклад для горіння метану:



З рівняння видно, що для згорання 1 моля метану необхідно 2 молі кисню. За нормальних умов 1 моль будь-якого газу займає об'єм 22,4 літра. Отже, для згорання 1 моля метану потрібно $2 \cdot 22,4 = 44,8$ літра кисню. А для згорання 1 моля метану в повітрі потрібно $44,8 / 0,21 \approx 213,3$ літра повітря.

На практиці завжди використовується надлишок повітря для забезпечення повного згоряння і зниження шкідливих викидів. Для точних розрахунків необхідно враховувати склад палива, температуру, тиск, вологість повітря і інші фактори. Для складних сумішей вуглеводнів використовують спеціальні програмні комплекси, які дозволяють проводити детальний термодинамічний аналіз процесу горіння. Таким чином, розрахунок об'єму повітря для спалювання вуглеводнів є складним завданням, яке вимагає врахування багатьох факторів.

На підставі теоретичних засад процесу горіння газових сумішей розроблено алгоритм [56] функціонування приладу для визначення теплоти згоряння природного газу. Теплота згоряння природного газу H_C визначається пристроєм у стандартних умовах відповідно до формули:

$$H_C = \frac{(A \cdot T - B \cdot K_i \cdot \varphi \cdot q_c \cdot \tau)}{q_c \cdot \tau}, \quad (2.3)$$

де A – коефіцієнт конструктивного виконання пальника; T – температура полум'я пальника; B – коефіцієнт теплоти випаровування вологи 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.

Згідно з рівнянням (2.3), на результати визначення теплоти згоряння природного газу суттєвий вплив має вологість навколишнього середовища.

Рівняння (2.2) показує, що продуктами згоряння природного газу є не лише діоксид вуглецю (CO_2), а й водяна пара (H_2O). Утворення водяної пари супроводжується поглинанням певної кількості теплоти, що виділяється під час горіння. З огляду на це, при визначенні теплової ефективності використання природного газу зазвичай розраховують нижчу теплоту згоряння, яка характеризує кількість теплоти, що виділяється при згоранні газу і конденсації утвореної водяної пари (формула 1.4).

На процес горіння природного газу значний вплив мають також домішки водяної пари, що містяться як у самому газі, так і в повітрі, яке подається в пальник. Таким чином, фактична нижча масова теплота згоряння природного газу $(Hm)_{NF}$ в реальних умовах експлуатації визначається за формулою [48]:

$$(Hm)_{NF} = (Hm)_N - (Hm)_R - (Hm)_\phi, \quad (2.4)$$

де $(Hm)_N$ – нижча масова теплота згоряння, яка розраховується при хроматографічному аналізі сухого газу, наприклад, за методикою [16]; $(Hm)_R$ – енергія, яка витрачається на випаровування вологи, що міститься в природному газі; $(Hm)_\phi$ – енергія, яка витрачається на випаровування вологи, що міститься в навколишньому повітрі, яке приймає участь у згорянні газу

Енергія $(Hm)_R$, що витрачається на випаровування вологи, що міститься в природному газі за стандартних умов (тиск 101,325 кПа, температура 20 °С), може бути розрахована за наступним рівнянням [48]:

$$H(m)_R = c_W \cdot m_1 \cdot (T_{TO} - T_S) + r \cdot m_1 + c_P \cdot m_1 \cdot (T_P - T_{TO}), \quad (2.5)$$

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.

Проведені дослідження [48] дозволили зробити висновок про неоднаковий кількісний та якісний вплив вологості газу та вологості навколишнього повітря на теплоту згоряння природного газу. Так, для природного газу з нижчою теплотою згоряння 8409 ккал/м³, фактична теплота згоряння з урахуванням зниження калорійності газу при випаровуванні вологи $((Hm)_{FR})$ змінюється в межах від 8408 до 8402 ккал/м³ при зміні температури точки роси від -20 °С до 5 °С. Водночас, зміна відносної вологості повітря від 30% до 80% призводить до більш значного варіювання $(Hm)_{FR}$ в межах від 8362 до 8283 ккал/м³. Отримані результати свідчать про домінуючий вплив вологості навколишнього середовища на теплоту згоряння.

З урахуванням того, що точність обліку природного газу залежить від якісних характеристик, в тому числі і від вологості, доцільним є дослідження впливу вологи

природного газу при роботі термоанемометричних засобів вимірювальної техніки. За ними майбутнє, бо вони наділені достатньою точністю та чутливістю і не містять рухомих елементів. Акцент в термоанемометричних дослідженнях поставлено на вивченні закономірностей зміни основних теплофізичних характеристик робочого газового середовища, насамперед таких як теплоємність та теплопровідність за впливу вологи у природному газі.

Основним компонентом природного газу є метан (його вміст становить більше 90%), дослідженню властивостей якого приділено досить детальну увагу багатьма дослідниками в широкому діапазоні параметрів стану. Газ в покладах зазвичай контактує з водою, тому він насичений парами води. Водяна пара, що міститься в природному газі, може помітно змінювати об'ємні властивості природного газу, що вказує на необхідність її врахування при дослідженнях природного газу. При недосконалому контролі вологості природного газу, подальші похибки при обчисленні параметрів природного газу можуть збільшуватись.

Виходячи з рівняння Бюкачека[55] та довідкових справочних даних [59, 61] змодельовано графік(рис.2.1), що відображає залежність теплоємності природного газу від вологості та температури природного газу та графік залежності вологості природного газу від теплоємності та температури. Це вказує на зв'язок теплофізичних властивостей природного газу з вологістю і температурою, що необхідно враховувати при його термоанемометричних дослідженнях [62].

Так як константи A і B в рівнянні Бюкачека підбираються експериментально для кожного конкретного газу, то це обмежує універсальність рівняння. Рівняння часто застосовується для газопроводів високого тиску, тому має досить обмежений діапазон застосування за температурою і тиском. Воно добре описує поведінку газів за високих тисків, але може давати значні відхилення при дуже низьких температурах або дуже високих тисках. Рівняння Бюкачека має свої обмеження і не є універсальним інструментом для опису поведінки всіх газів за будь-яких умов.

Тому необхідно більш детально розглянути дане питання пошуку оптимальної формули для розрахунку вологості в природному газі.

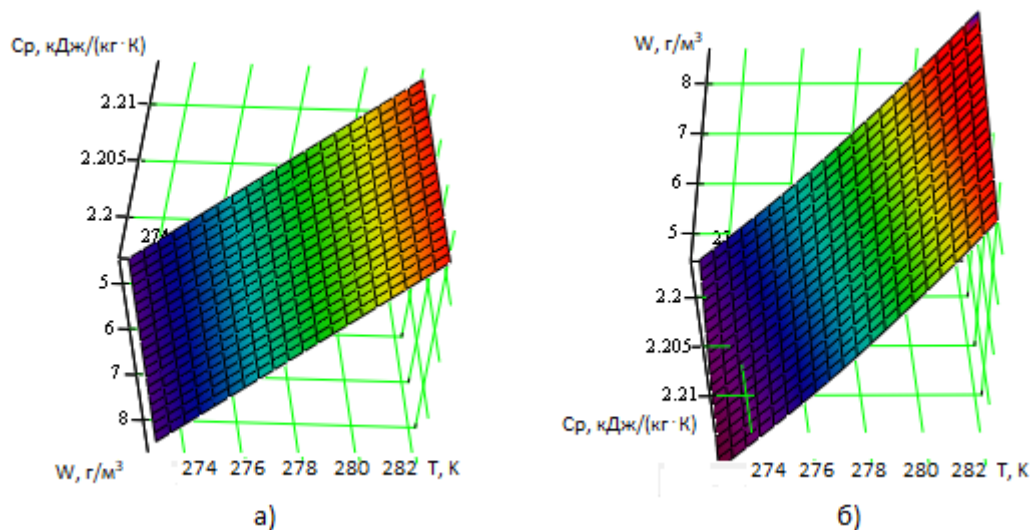


Рисунок 2.1 – Графічна ілюстрація зміни теплоємності від вологості та температури природного газу (а), вологості від теплоємності та температури природного газу

Зважаючи на значну кількість наукових досліджень, питання впливу вологи у природному газі на його теплофізичні характеристики на сьогодні вивчено ще недостатньо.

Дослідження впливу вологи природного газу при термоанемометричних вимірюваннях проводилося за допомогою методів комп'ютерного моделювання за температури (t) від 0 до 40°C, постійного тиску (p) 0,1 МПа та відносної вологості (φ) від 10 до 90%. Значення теплоємності та теплопровідності задавалися згідно довідкових даних [61] за умов моделювання (відповідно до температури та тиску).

Для моделювання використаний алгоритм, який запропонований нами у роботі [63]. Згідно нього теплофізичні характеристики вологого газу розраховувалися як сума компонентів сухих часток природного газу та вологи у суміші. Це відповідає концептуальному підходу фізичного моделювання термодинамічних параметрів газових сумішей [64].

Ізобарна теплоємність газової суміші $C_{p,cm}$ розраховувалась за формулою [64]:

$$C_{p,cm} = C_{p1}g_1 + C_{p2}g_2 + \dots + C_{pn}g_n + C_{p\varphi}g_\varphi = \sum_{i=1}^n C_{pi}g_i + C_{p\varphi}g_\varphi \quad (2.6)$$

де C_{pi} – теплоємність i -го компонента, g_i – масовий вміст i -го компонента газової суміші, $C_{p\varphi}$, g_φ – ізобарна теплоємність та масовий вміст вологи.

Теплопровідність газової суміші λ_{cm} розраховувалась за формулою [64]:

$$\lambda_{cm} = \lambda_1g_1 + \lambda_2g_2 + \dots + \lambda_ng_n + \lambda_\varphi g_\varphi = \sum_{i=1}^n \lambda_i g_i + \lambda_\varphi g_\varphi \quad (2.7)$$

де λ_i – теплопровідність i -го компонента, g_i – масовий вміст i -го компонента газової суміші. λ_φ , g_φ – теплопровідність та масовий вміст вологи.

Параметри g_i , g_φ розраховувалися за формулами:

$$g_i = \frac{m_i}{\sum_{i=1}^n m_i + m_\varphi}, \quad g_\varphi = \frac{m_\varphi}{\sum_{i=1}^n m_i + m_\varphi} \quad (2.8)$$

де m_i , m_φ – маса i -го компонента природного газу і водяної пари у вологому газі відповідно. Розрахунок маси окремо взятого складового компонента газової суміші проводився за даними об'ємного вмісту (результати хроматографічного аналізу) згідно відомих методик перерахунку [2].

Масовий вміст водяної пари у вологому газі при досліджуваних робочих умовах розраховувався як [64]:

$$\rho_{в.п} = \varphi \cdot \rho_{в.п \max} \quad (2.9)$$

де φ – відносна вологість, %; $\rho_{в.п \max}$ – максимальна густина водяного пару при заданих умовах.

Для дослідження був вибраний природний газ компонентний склад якого наведений у табл.2.1.

Таблиця 2.1 – Компонентний склад досліджуваного природного газу

Компонент	Метан	Етан	Пропан	Бутан	Пентан	Гексан	Кисень	Азот	Вугл.газ
Мас.вміст(%)	93.115	3.232	1.459	0.611	0.121	0.057	0.008	1.135	0.262

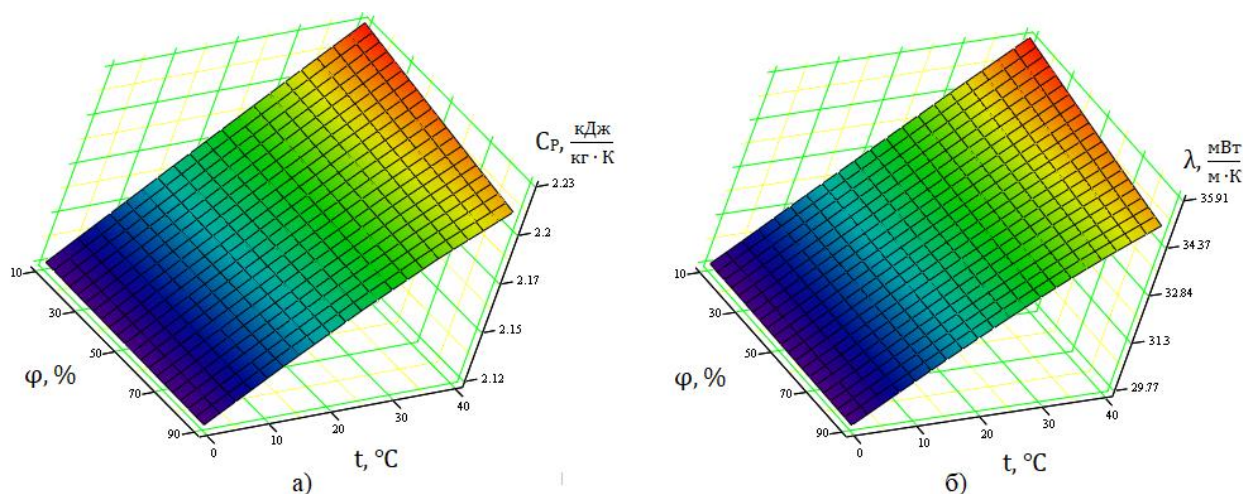


Рисунок 2.2 – Графічна ілюстрація зміни теплоємності(а), та теплопровідності(б) від відносної вологості φ та температури t природного газу

За результатами моделювання (рис.2.2а) встановлено, незначне зменшення теплоємності вологого газу при зростанні його вологості. Однак при вищій температурі вологого природного газу вплив вологості є більш суттєвий. За температури 0°C при зростанні відносної вологості від 10 до 90% теплоємність вологого природного газу зменшується з 2,118 до 2,117(кДж/кг·К), а при 40°C зменшення теплоємності становить від 2,231 до 2,214(кДж/кг·К), в першому випадку зменшення теплоємності становить 0,05%, а в другому випадку – 0.76% .

Моделювання зміни теплопровідності волого природного газу (рис.2.2б) показало, що збільшення вмісту вологи також приводить до зменшення теплопровідності. При цьому вплив вологи на теплопровідність є більший ніж на зміну теплоємності природного газу. При температурі 0°C та зростанні відносної вологості від 10 до 90% теплопровідність вологого природного газу спадає з 29,832 до 29,766(мВт/м·К), а при 40°C зменшення теплопровідності становить від 35,906 до 34,982(мВт/м·К) (додаток А). Це зменшення теплопровідності у відносних одиницях становить 0,22% та 2.57% [65].

Порівнюючи вплив вологи у природному газі та повітрі (рис. 2.3), можна стверджувати, що з ростом температури зростають теплофізичні характеристики досліджуваного газу, але із зростанням вмісту вологи у природному газі

спостерігається зменшення його теплоємності та теплопровідності, а у повітря навпаки - теплоємність зростає, але теплопровідність спадає.

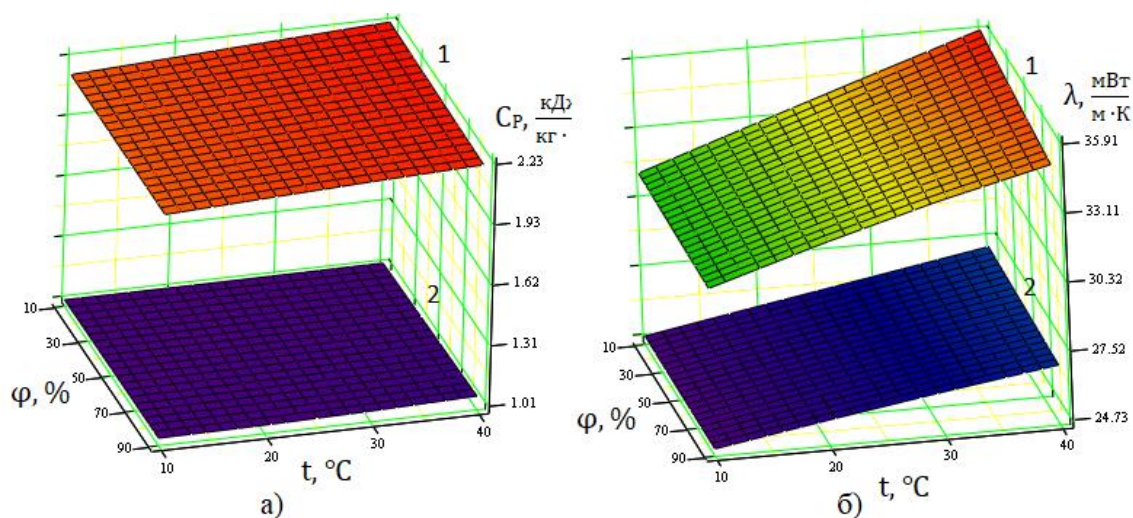


Рисунок 2.3 – Графічна ілюстрація зміни теплоємності (а) та теплопровідності (б) від відносної вологи φ та температури t природного газу(1) та повітря(2)

Результати дослідження показують, що волога безпосередньо впливає на теплофізичні характеристики природного газу при його термоанемометричних дослідженнях. Більш суттєвими є зміни при вищих температурах газового середовища. Тому цей фактор необхідно враховувати при виконанні термоанемометричних вимірювань. При подальших дослідженнях необхідно вивчити вплив вологи за різних робочих тисків природного газу та різних концентраціях вуглеводневих та неуглеводневих компонентів в ньому на термоанемометричні вимірювання.

2.2 Моделювання впливу компонентного складу та вологості природного газу на його теплофізичні та енергетичні характеристики

У сучасних умовах розвитку економіки енергоносії відіграють ключову роль у функціонуванні підприємств. Точна кількісна оцінка енергоресурсів є критично

важливою для ефективного обліку. Природний газ як один з основних енергоносіїв продовжує займати значне місце в енергетичному балансі України та світу [66]. Однак, використання об'ємних одиниць для комерційних розрахунків газу породжує необхідність вирішення питань щодо достовірності обліку спожитого та поставленого газу.

Фізико-хімічні властивості природного газу як складного енергетичного ресурсу обумовлюють необхідність комплексного підходу до визначення його облікових параметрів. Об'єм природного газу не може слугувати самостійною та репрезентативною метрикою без урахування системи якісних та енергетичних характеристик газу. Експериментальними дослідженнями встановлено, що зміна термодинамічних параметрів, зокрема тиску та температури [2], справляє визначальний вплив на характеристики природного газу. Більше того, варіативність компонентного складу газової суміші призводить до суттєвих трансформацій якісних та енергетичних властивостей, що об'єктивно потребує багатовекторного підходу до енергетичної параметризації природного газу як енергоносія [3].

Проблема високоточної кількісної оцінки спожитої газової енергії знаходить ефективне вирішення через застосування термоанемометричних перетворювачів, які характеризуються комплексом унікальних метрологічних властивостей. Зазначені вимірювальні системи демонструють принципово новий рівень інструментального забезпечення процесів газового обліку, що виражається в максимальній інформативності, мінімальній інерційності та широкому функціональному діапазоні вимірювань.

Принципова особливість термоанемометричних перетворювачів полягає в здатності диференційованої оцінки об'ємних та масових параметрів газового середовища через варіативність його теплофізичних характеристик. Взаємодія первинного перетворювача з газовим потоком відбувається на основі складних термодинамічних механізмів, де визначальними факторами слугують теплопровідність, теплоємність та компонентний склад газової суміші.

Наукова перспективність досліджень термоанемометричним методом полягає в комплексному аналізі теплофізичних властивостей газового середовища.

Теоретичні дослідження зміни теплофізичних параметрів природного газу при зміні компонентного складу (межі зміни: метан 89–97 %, етан 0–6%, пропан 0–3 %, азот 0–3%, вуглекислий газ 0–0,8 %) за тисків 0,1–2 МПа і температур 283,15–303,15 К викладені у роботі [67]. Проведені експериментальні дослідження підтвердили вплив неодинакового компонентного складу природного газу на його теплофізичні характеристики та обґрунтували можливість обліку природного газу термоанемометричним методом [68].

Сучасні тенденції розвитку термоанемометрії у сфері обліку природного газу вказують, що за цим методом є майбутнє, однак він потребує подальшого удосконалення з метою підвищення точності і модельного врахування впливових факторів [30]. Це стосується не тільки апаратного та конструктивного удосконалення, але і удосконалення математичних моделей, які би враховували зміну різних впливових факторів, які стосуються компонентного складу облікованого середовища. Так ні в одній з відомих нами статей не досліджується вплив вологи на функціонування термоанемометричних сенсорів. Це питання є актуальним, оскільки хроматографічний метод аналізу природного газу передбачає його попереднє осушування [2], а метод змінного перепаду тиску передбачає також облік сухого природного газу з коефіцієнтом відносної вологості не більше 0,1 [69]. Тому невивченим є питання впливу вологості робочого середовища на функціонування термоанемометричних сенсорів.

Перші дослідження цього напрямку викладені в роботі [63], де робочим середовищем виступало повітря. За цих умов було теоретично досліджено вплив вологості повітря на його теплофізичні характеристики при функціонуванні термоанемометричних сенсорів при зміні температури 10–40°C, тиску 0,1 МПа та відносної вологості 10–90%. За результатами моделювання встановлено, що при зростанні вологості та температури повітря відбувається збільшення його теплоємності та зменшення теплопровідності. При цьому за вищої температури

вологого повітря вплив вологості є більш суттєвий на його теплопровідність та теплоємність.

Наступним напрямком теоретичних досліджень було дослідження зміни теплофізичних параметрів вологого природного газу [65]. Для теоретичних досліджень було вибрано природний газ сталого компонентного складу за масовим вмістом (93,11% – метан, 3,23% – етан, 1,45% – пропан, 0,61% – бутан, 0,12 – пентан, 0,057% – гексан, 1,13% – азот, 0,26% – вуглекислий газ). Вплив вологи природного газу на зміну його теплопровідності та теплоємності проводилося за допомогою комп'ютерного моделювання за зміни температури 0–40°C, абсолютного тиску 0,1МПа та відносної вологості 10–90%. Результати дослідження підтвердили, що волога безпосередньо впливає на зміну теплофізичних характеристик природного газу, що може бути впливовим фактором при термоанемометричних вимірюваннях. Виявлено також, що більш суттєвою є зміна теплофізичних параметрів за більших температур газового середовища.

Таким чином, зазначені наукові дослідження вказують на необхідність дослідження впливу вологи досліджуваного газового середовища на його теплофізичні характеристики при різних концентраціях вуглеводневих та неуглеводневих компонентів природного газу, що є актуальним при здійсненні термоанемометричних вимірювань якісних характеристик, об'єму та енергії природного газу.

З урахуванням того, що вологий природний газ є сумішшю окремих його вуглеводневих і неуглеводневих компонентів [70], для розрахунку значень теплофізичних характеристик використовувався метод Кея [58], який передбачає розрахунок параметрів газової суміші на базі сумування характеристик кожного компонента і його молярної концентрації в газовій суміші.

За основу при моделюванні вибрано наступний компонентний склад природного газу за об'ємним вмістом, який відображений в табл. 2.2

Таблиця 2.2 – Об’ємний та масовий компонентний склад базового природного газу

Компонент	Метан	Етан	Пропан	Бутан	Пентан	Гексан	Кисень	Азот	Вугл.газ
Об. Вміст, C_i , %	96,66	1,79	0,55	0,17	0,028	0,011	0,004	0,67	0,099
Мас.вміст, X_i , %	93,11	3,23	1,46	0,61	0,121	0,057	0,008	1,13	0,262

При цьому масовий вміст компонентів для табл. 2.2 розраховується за формулою [2]:

$$X_i = \frac{C_i \cdot M_i \cdot 100}{\sum_{i=1}^n C_i \cdot M_i}, \quad (2.10)$$

де X_i – масова доля компонента i , %; C_i – об’ємна(молярна) доля компонента i , %; M_i – молярна маса компонента i , г/моль; n – число компонентів в базовій пробі.

У формулі (2.18) при розрахунку масової долі у параметрі C_i не враховувалися значення фактора стисливості компонентів. Тому для практичних розрахунків за умов близьких до стандартних можна вважати, що молярна концентрація компоненти практично відповідає об’ємній.

Для моделювання були сформовані такі межі зміни компонентного складу природного газу в об’ємних долях (табл. 2.3).

Таблиця 2.3 – Межі зміни компонентного складу природного газу

Компонент	Метан	Етан	Пропан	Бутан	Пентан	Азот	Вугл.газ	Волога
Межі зміни, об. вмісту (%)	87 – 97	1 – 11	0,1 – 6	0,1 – 4	0,1 – 4	1 – 11	1 - 11	0,06 – 6,7

Моделювання здійснювалося за фіксованих значень тиску 0,1 МПа та температури 20°C.

Спочатку відносно складу базового природного газу за об’ємним вмістом визначалися об’ємні долі кожного компоненту [63]. Після цього за формулою (2.10) розраховувалися масові долі компоненту та їх співвідношення. Наступним кроком дискретно змінювався об’ємний вміст досліджуваного впливового компоненту, наприклад, метану і пропорційно розраховувалися об’ємні значення інших

компонентів з урахуванням співвідношення між складовими, які вказані в табл. 1, щоб забезпечити досягнення загального об'єму суміші до 100%. Після цього знову розраховувалися отримані масові співвідношення компонентів.

Значення теплопровідностей λ та теплоємності C_p кожного компонента визначалися відповідно до довідкових даних [61] за визначених умов моделювання.

Теплопровідність газової суміші λ_{cm} розраховувалась як сума основних компонентів газової суміші з додаванням вмісту вологи, враховуючи масовий вміст кожної складової газової суміші відповідно до правила Кея [58], викладений у пункті 2.1 формула (2.7):

Для розрахунку ізобарної теплоємності газової суміші $C_{p,cm}$ використаний алгоритм ідентичний як для розрахунку теплопровідності, з урахуванням відповідного масового вмісту кожного компонента [58], формула (2.6).

Розрахунок параметрів g_i , g_ϕ проводився за формулами (2.8):

Масовий вміст вологи $\rho_{в,п}$ в природному газі, розраховувався за формулою (2.9)[51]:

Таким чином, використання алгоритму дозволяє реалізувати тривимірне моделювання зміни параметрів λ та C_p від вологості ϕ і кожного окремого впливового параметра (метан, етан, пропан, бутан, пентан, азот, вуглекислий газ).

Результати моделювання подаються графічними ілюстраціями (рис.2.4 – 2.10) та отриманими апроксимаційними рівняннями, які подаються далі за текстом.

Моделювання зміни вмісту метану проводилося в межах 87 – 97%, при зміні вологості 10 – 90% за фіксованого значення температури 20°C та тиску 0,1МПа. При цьому зміна теплопровідності за вмісту метану 87% складає 0,24 (мВт/м·К), а теплоємності 0,003(кДж/кг·К). При вмісту метану 97% теплопровідність зменшувалась на 0,28 (мВт/м·К), а теплоємність на 0,005(кДж/кг·К). Це відповідає зміні теплопровідності на 0,78%, теплоємності на 0,14% при 87% метану, а за вмісту метану 97% зміна теплопровідності склала 0,86% та теплоємності – 0,24%.

Результати моделювання дозволили отримати такі апроксимаційні залежності зміни теплопровідності та теплоємності від цих досліджуваних параметрів:

$$\lambda_{\text{CH}_4} = 9,8596 + 0,2383 \cdot X_{\text{CH}_4} - 0,0032 \cdot \varphi \quad (2.11)$$

$$C_{p\text{CH}_4} = 1,03998 + 0,011732 \cdot X_{\text{CH}_4} - 0,00005 \cdot \varphi \quad (2.12)$$

де, λ_{CH_4} – теплопровідність природного газу за зміни вмісту метану; X_{CH_4} – вміст метану; φ – відносна вологість природного газу.

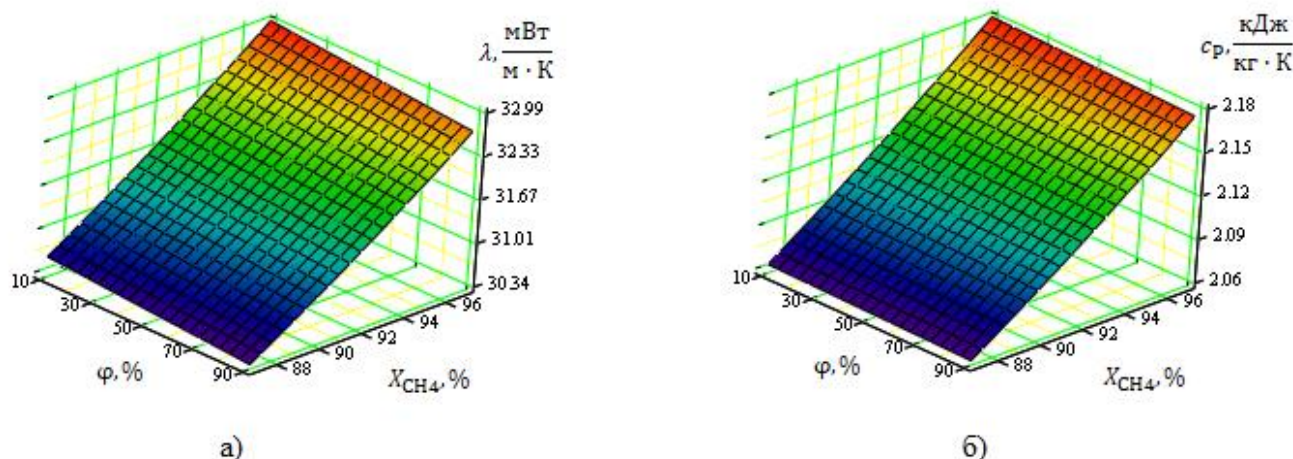


Рисунок 2.4 – . Графічна ілюстрація зміни теплопровідності(а), та теплоємності (б) природного газу від відносної вологості φ та об'ємного вмісту метану X_{CH_4}

Моделювання теплопровідності та теплоємності природного газу за зміни вмісту етану від 1 до 11%, показало при 1% етану зміну теплопровідності від 33,07 до 32,78 ($\text{МВт}/\text{м} \cdot \text{К}$), теплоємності від 2,182 до 2,177 ($\text{кДж}/\text{кг} \cdot \text{К}$) та при 11% етану зміна була від 31,12 до 30,87 ($\text{МВт}/\text{м} \cdot \text{К}$), 2,106 до 2,102 ($\text{кДж}/\text{кг} \cdot \text{К}$). У відсотках це становить зміну 0,87 % та 0,24 %, 0,8 % та 0,18 %.

За цим моделюванням зміни теплопровідності та теплоємності від вологості та концентрації етану(рис. 2.6), отримано такі апроксимаційні залежності:

$$\lambda_{\text{C}_2\text{H}_6} = 33,2167 - 0,1914 \cdot X_{\text{C}_2\text{H}_6} - 0,0033 \cdot \varphi \quad (2.13)$$

$$C_{p\text{C}_2\text{H}_6} = 2,187446 - 0,007505 \cdot X_{\text{C}_2\text{H}_6} - 0,000055 \cdot \varphi \quad (2.14)$$

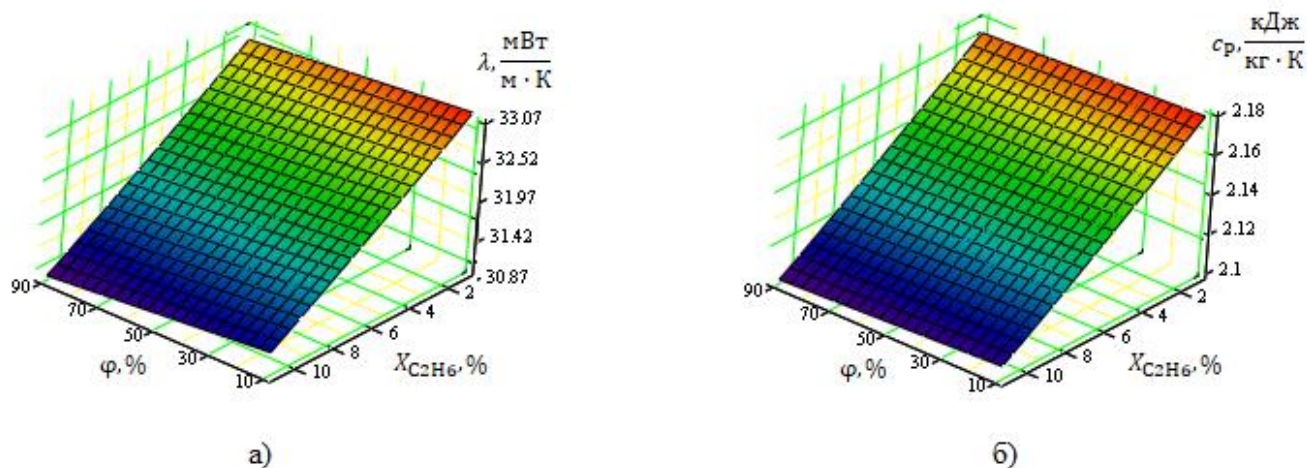


Рисунок 2.5 – Графічна ілюстрація зміни теплопровідності(а), та теплоємності (б) природного газу від відносної вологості φ та об'ємного вмісту етану $X_{\text{C}_2\text{H}_6}$

Результати аналогічних моделювань від решти досліджуваних впливових параметрів подано на рис. (2.6) – (2.10), де конкретизовані діапазони зміни досліджуваних параметрів.

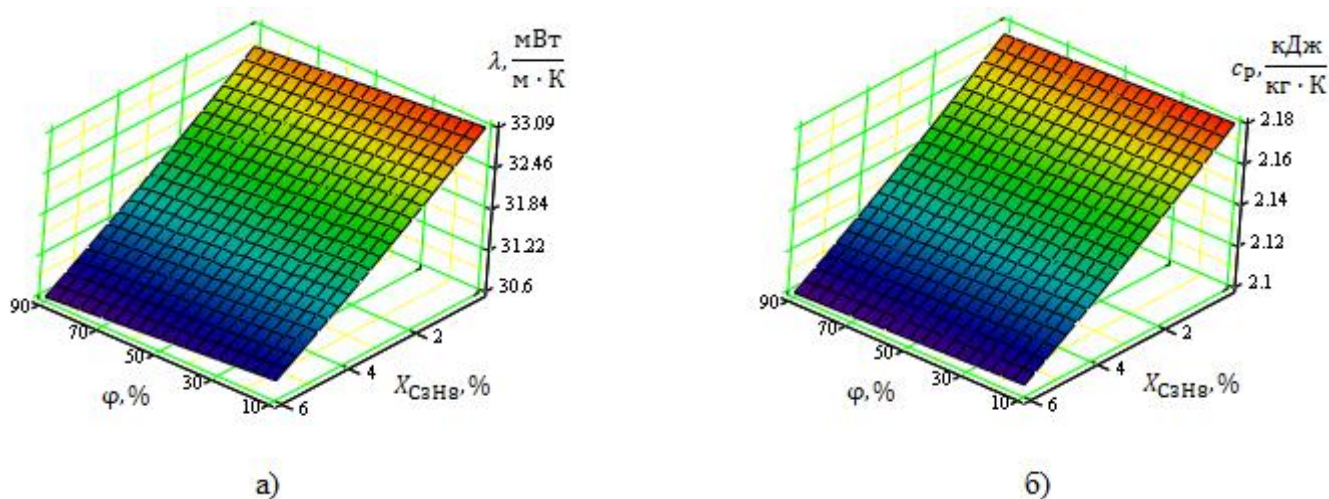


Рисунок 2.6 – Графічна ілюстрація зміни теплопровідності(а), та теплоємності (б) природного газу від відносної вологості φ та об'ємного вмісту пропану $X_{\text{C}_3\text{H}_8}$

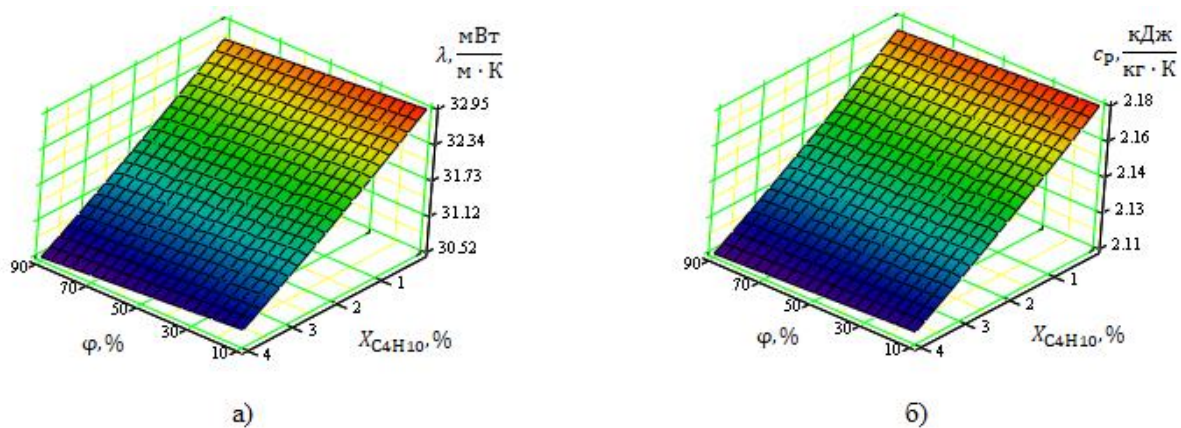


Рисунок 2.7 – Графічна ілюстрація зміни теплопровідності(а), та теплоємності (б) природного газу від відносної вологості φ та об'ємного вмісту бутану $X_{\text{C}_4\text{H}_{10}}$

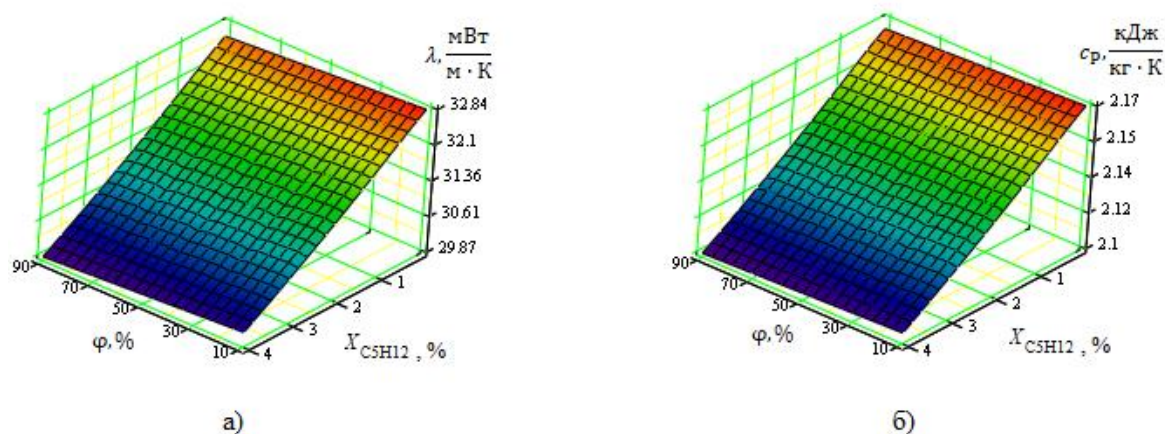


Рисунок 2.8 – Графічна ілюстрація зміни теплопровідності(а), та теплоємності (б) природного газу від відносної вологості φ та об'ємного вмісту пентану $X_{\text{C}_5\text{H}_{12}}$

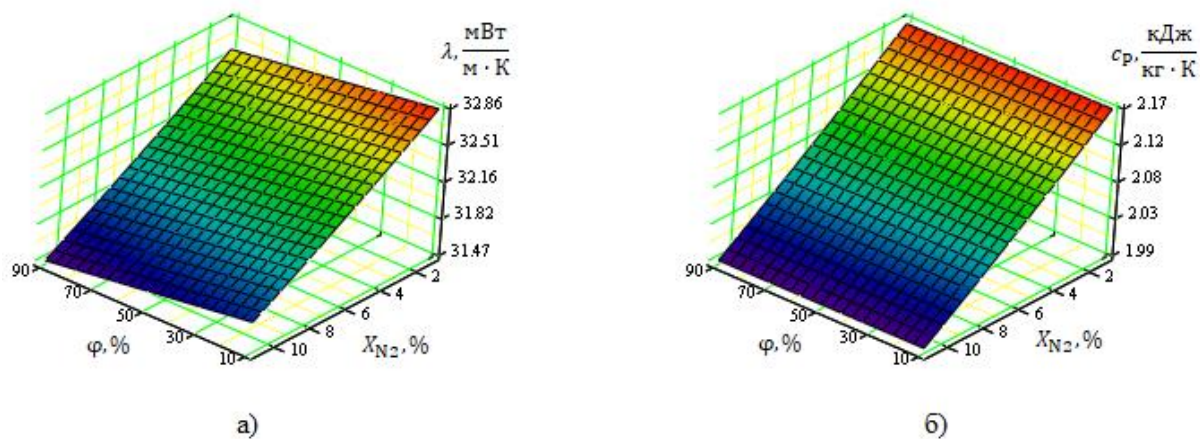


Рисунок 2.9 – Графічна ілюстрація зміни теплопровідності(а),

та теплоємності (б) природного газу від відносної вологості φ та об'ємного вмісту азоту X_{N_2}

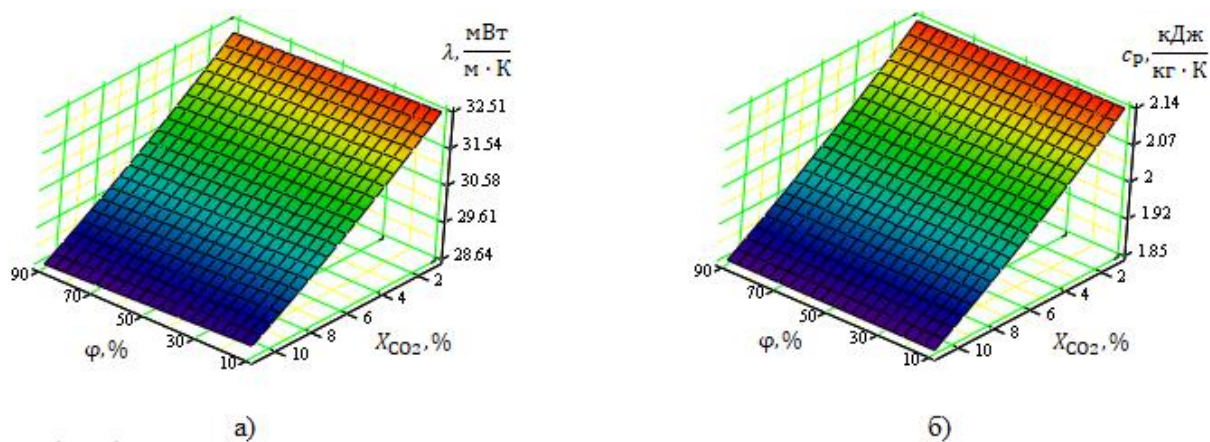


Рисунок 2.10 – Графічна ілюстрація зміни теплопровідності(а), та теплоємності (б) природного газу від відносної вологості φ та вмісту вуглекислого газу X_{CO_2}

За поточним моделюванням отримано наступні апроксимаційні залежності зміни теплопровідності та теплоємності природного газу від вологості та концентрації окремих досліджуваних параметрів, вказаних індексами при позначенні теплопровідностей λ та теплоємностей C_p :

$$\lambda_{C_3H_8} = 33,1153 - 0,3772 \cdot X_{C_3H_8} - 0,0033 \cdot \varphi \quad (2.15)$$

$$C_{pC_3H_8} = 2,182351 - 0,012963 \cdot X_{C_3H_8} - 0,000056 \cdot \varphi \quad (2.16)$$

$$\lambda_{C_4H_{10}} = 32,9938 - 0,5563 \cdot X_{C_4H_{10}} - 0,0033 \cdot \varphi \quad (2.17)$$

$$C_{pC_4H_{10}} = 2,177812 - 0,015723 \cdot X_{C_4H_{10}} - 0,000057 \cdot \varphi \quad (2.18)$$

$$\lambda_{C_5H_{12}} = 32,9125 - 0,7035 \cdot X_{C_5H_{12}} - 0,0032 \cdot \varphi \quad (2.19)$$

$$C_{pC_5H_{12}} = 2,175605 - 0,018682 \cdot X_{C_5H_{12}} - 0,000055 \cdot \varphi \quad (2.20)$$

$$\lambda_{N_2} = 32,9886 - 0,1121 \cdot X_{N_2} - 0,0034 \cdot \varphi \quad (2.21)$$

$$C_{pN_2} = 2,184794 - 0,017846 \cdot X_{N_2} - 0,000004 \cdot \varphi \quad (2.22)$$

$$\lambda_{CO_2} = 32,7991 - 0,3624 \cdot X_{CO_2} - 0,003 \cdot \varphi \quad (2.23)$$

$$C_{pCO_2} = 2,165218 - 0,029257 \cdot X_{CO_2} - 0,000002 \cdot \varphi \quad (2.24)$$

Для узагальнення впливу кожного компонента природного газу на зміну теплофізичних властивостей проведені обчислення, які наведені в табл. 2.4, 2.5.

Таблиця 2.4 – Зміна теплопровідності природного газу на 1% зміни відповідного компонента в його складі за різних значень вологості (за об'ємним вмістом компонента)

$\Delta\lambda$, мВт/(м · К)	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	N ₂	CO ₂
Вологість 10%	0,24071	0,19492	0,37443	0,54739	0,68572	0,11325	0,36642
Вологість 90%	0,23617	0,19125	0,36737	0,53707	0,67278	0,11112	0,35951

Таблиця 2.5 – Зміна теплоємності природного газу на 1% зміни відповідного компонента в його складі за різних значень вологості (за об'ємним вмістом компонента)

ΔC_p , кДж/(кг · К)	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	N ₂	CO ₂
Вологість 10%	0,01186	0,00764	0,01287	0,01547	0,0182	0,01802	0,02959
Вологість 90%	0,01164	0,00749	0,01263	0,01518	0,01786	0,01768	0,02903

Результати аналізу таблиць 2.4, 2.5. свідчать, що зростання вмісту компонента з більшою молярною масою приводить збільшення параметрів λ та C_p . Однак цій закономірності не задовольняє зміна етану, оскільки його вплив є менший від зміни впливу метану. Вплив зміни азоту є найменший серед досліджуваних впливів досліджуваних компонентів. Вплив зміни вуглекислого газу є близький до впливу зміни пропану. Також виявлені загальні закономірності зменшення впливу кожного досліджуваного компонента із зростанням вологості газу. Очевидним є також незначний вплив зміни вологості природного газу на його теплофізичні параметри порівняно із впливом від зміни досліджуваних компонентів природного газу. При цьому ці закономірності якісно є подібними для двох досліджуваних теплофізичних параметрів: теплопровідності і теплоємності. Отримані результати в ході комп'ютерного моделювання визначають необхідність врахування вологості природного газу та його компонентного складу при виконанні термоанемометричних вимірювань

За використання методів комп'ютерного моделювання досліджено взаємозв'язок якісних характеристик вологості та компонентного складу природного газу з його теплофізичними характеристиками, зокрема теплопровідністю та теплоємністю.

Отримані регресійні залежності впливу відносної вологості та компонентного складу на теплофізичні характеристики природного газу [71], які вказують на зменшення теплопровідності та теплоємності зі збільшення вуглеводневої групи: етану, пропану, бутану, пентану та неуглеводневої групи – азоту та вуглекислого газу.

Здійснено чисельне моделювання впливу зміни компонентного складу природного газу на його теплофізичні параметри за різних значень його вологості.

Змодельовані залежності встановлюють важливість врахування впливу якісних та теплофізичних характеристик природного газу при його термоанемометричних дослідженнях.

Згідно з вимогами стандарту [3], нижня межа теплоти згорання природного газу встановлена на рівні 31,8 МДж/м³. Цей параметр є одним з ключових показників якості газу і безпосередньо залежить від його компонентного складу. Варто зазначити, що зміна концентрації компонентів природного газу впливає не лише на теплоту згорання, але й на інші фізико-хімічні властивості, такі як густина, в'язкість, теплопровідність та теплоємність.

Теплота згорання природного газу за стандартних умов (абсолютна температура 293,15 К, абсолютний тиск 101,325 кПа) розраховується як сума добутків масових часток кожного компонента на їх відповідні масові теплоти згорання. Для визначення теплоти згорання газу за робочих умов H_p , які відрізняються від стандартних за тиском та температурою, застосовують корекційні залежності, що враховують зміну об'єму газу в залежності від термодинамічних параметрів. Ці залежності базуються на відомих рівняннях стану газів та термодинамічних залежностях [2]:

$$H_p = H_c \frac{P_p T_c}{P_c T_p K}, \quad (2.25)$$

де H_C – теплота згорання природного газу при стандартних умовах, МДж/м³;
 T_P, T_C – абсолютна температура за робочих і стандартних умов відповідно P_P, P_C –
абсолютний тиск за робочих і стандартних умов відповідно, Па; K – коефіцієнт
стисливості природного газу.

Проведені математичні моделювання (рис. 2.11 та 2.12) дозволили дослідити вплив зміни концентрації основних компонентів природного газу (метан, етан, азот, вуглекислий газ) на його енергетичні та теплофізичні характеристики за різних значень тиску (0,1; 0,3; 1 МПа) та постійної температури 293,15 К [67]. Отримані результати свідчать про те, що зміна компонентного складу суттєво впливає на теплопровідність, теплоємність та теплоту згорання газу. При цьому характер цієї залежності значною мірою визначається тиском у системі [67]. Зокрема, було встановлено:

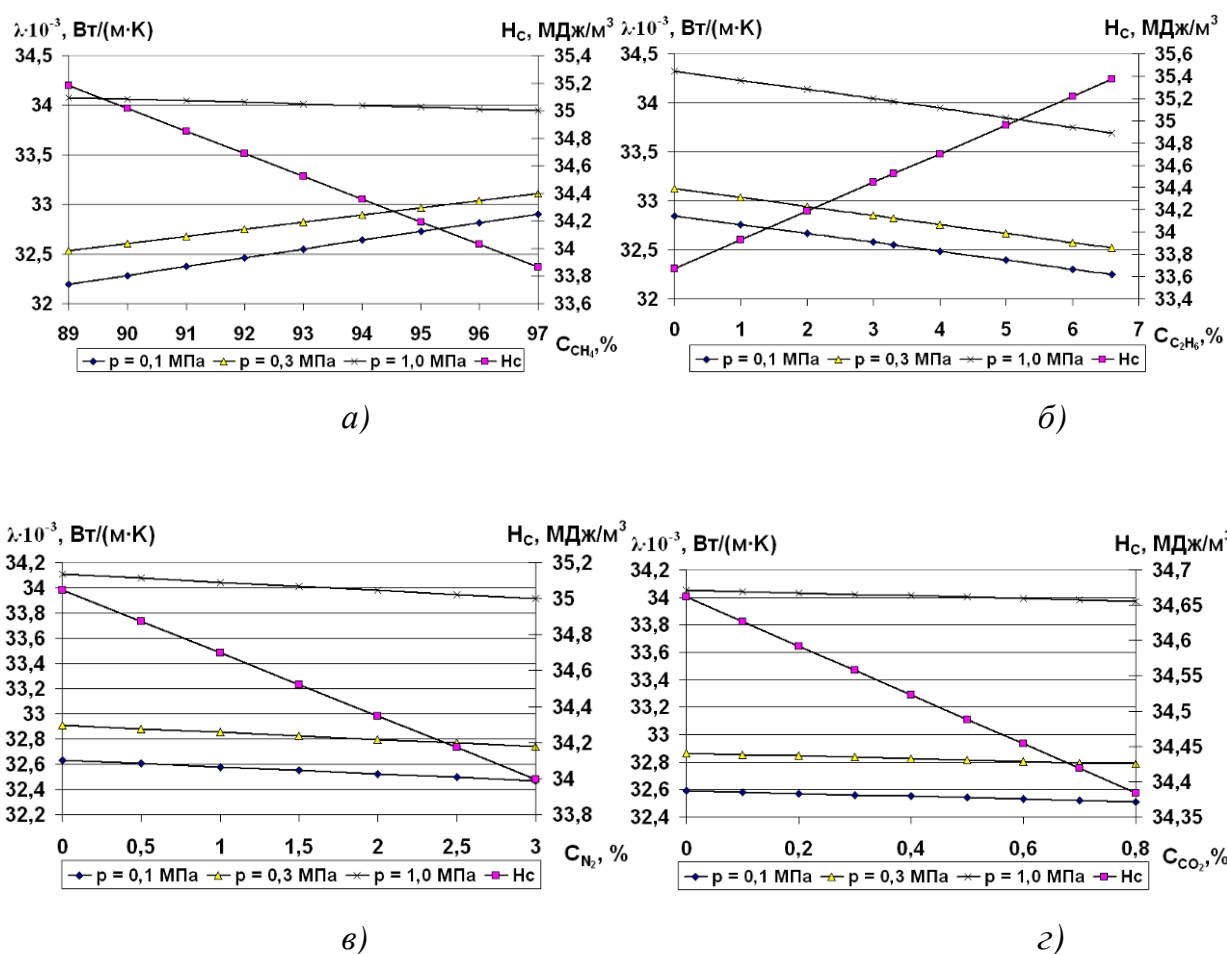


Рис. 2.11. Залежність теплопровідності і теплоти згорання природного газу при зміні вмісту метану (а), етану (б), азоту (в) і вуглекислого газу (г)

Так, наприклад, при абсолютному тиску 0,1 МПа зростання вмісту метану на 1 % приводить до зменшення теплоти згорання природного газу на 0,49 % при одночасному зростанні теплопровідності на 0,28 % (рис.2.11, а), а при зростанні абсолютного робочого тиску до 1,0 МПа зростання концентрації метану на 1 % приводить до зменшення теплопровідності на 0,05 % (рис. 2.11, а). В той же час теплоємність зростає як при 0,1МПа на 0,33 % (рис. 2.12,а) так при 1МПа зростання складає 0,2% (рис. 2.12, а).

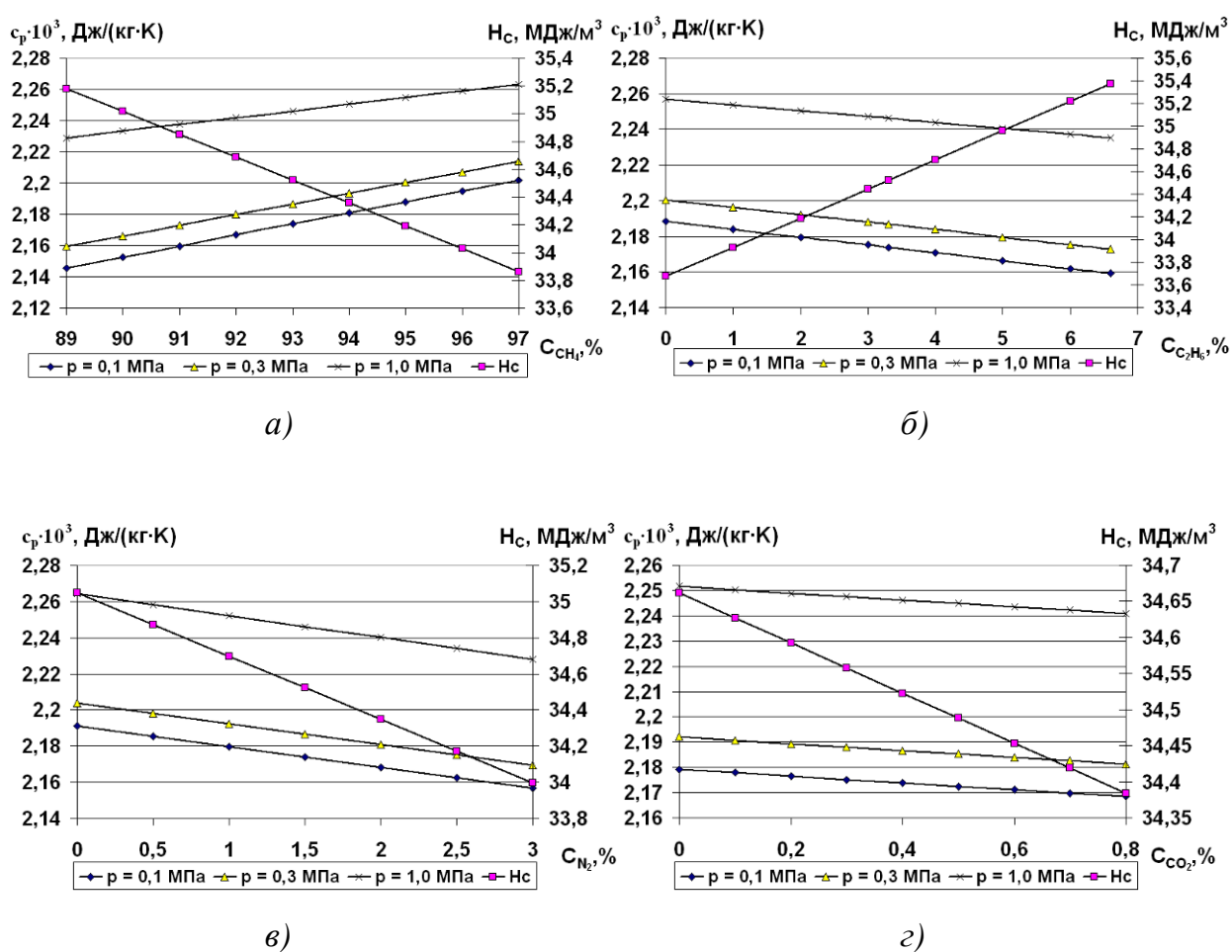


Рис. 2.12. Залежність теплоємності і теплоти згорання природного газу при зміні вмісту метану (а), етану (б), азоту (в) і вуглекислого газу (г)

До зворотних явищ за якісним впливом приводить зростання концентрації етану. Так при зростанні концентрації етану на 1 % зростання теплоти згорання складає 0,77 %. При цьому як при високих, так і при низьких тисках зростання

концентрації етану на 1 % приводить до зменшення теплопровідності на 0,3 % (рис. 2.11,б) і зменшення теплоємності на 0,21 % (рис. 2.12,б).

Вплив концентрації негорючих компонентів (вуглекислий газ та азот) якісно між собою є аналогічним. Теплота згорання, теплопровідність та ізобарна теплоємність зменшуються зі зростанням концентрації як азоту, так і вуглекислого газу при різних робочих тисках.

Значення теплоти згорання, відображені на графіках, були отримані за стандартних умов і представлені у вигляді однієї лінії для кожного параметра H_C . Розрахунок теплоти згорання за інших умов здійснюється за допомогою формули (2.25), наведеної вище.

2.3. Дослідження впливу вологості повітря на теплофізичні характеристики при функціонуванні термоанемометричних сенсорів

Практичним та актуальним на даний час рішенням в питаннях обліку природного газу є використання витратомірів на базі термоанемометричних сенсорів, яким властиві широкий діапазон вимірювання швидкостей потоку, мала інерційність, можливість вимірювання нестационарних та пульсуючих потоків. Основою термоанемометрії є функціональна залежність втрати тепла нагрітого тіла від швидкості потоку та якісних характеристик середовища, в якому це тіло знаходиться. Цю залежність можна оцінювати, наприклад, за зміною електричного опору сенсора. Оскільки взаємодія термоанемометричного сенсора із газовим середовищем характеризується теплообмінними процесами, впливовими факторами, які характеризують цю взаємодію є теплоємність та теплопровідність контрольованого середовища.

Незважаючи на значну кількість наукових досліджень у сфері функціонування термоанемометричних сенсорів відсутніми є дослідження, які би враховували вплив вологи як компонента газової суміші на зміну інформативного параметра термоанемометрії.

Досліджування здійснювалося з використанням методу комп'ютерного моделювання за умови зміни відносної вологості повітря від 10% до 90% при температурах від 10°C до 40°C і постійному абсолютному тиску 0,1МПа.

Для моделювання використовувався алгоритм, за яким приймався вплив властивостей сухого повітря і води в ньому як складових компонентів суміші, формули (2.6 – 2.8)

Для обчислення маси води m_φ використовувалася формула для переведення відносної вологості φ у абсолютну для різних значень температури t [72]:

$$m_\varphi = (13,247 \cdot e^{\frac{17,67 \cdot t}{t+243,5}} \cdot \varphi) / (273,15 + t) \quad (2.26)$$

Значення параметру λ_2 визначалися із довідкових даних для умов моделювання (за значеннями тиску і температури), параметри g_1, g_2 розраховувалися за формулою (2.14), а параметр λ_1 обчислювався за формулою:

$$\lambda_1 = -0.9474 + 11.961 \left(\frac{T}{100}\right) - 2.3632 \left(\frac{T}{100}\right)^2 + 0.8406 \left(\frac{T}{100}\right)^3 - 0.1747 \left(\frac{T}{100}\right)^4 + 1.904 \cdot 10^{-2} \left(\frac{T}{100}\right)^5 - 1.035 \cdot 10^{-3} \left(\frac{T}{100}\right)^6 + 2.228 \cdot 10^{-5} \left(\frac{T}{100}\right)^7, \text{ мВт/(м} \cdot \text{К)}, \quad (2.27)$$

За результатами моделювання (рис.2.13 а) встановлено [63], що збільшення теплоємності вологого повітря має місце як при зростанні його вологості, так і при зростанні температури. При цьому за вищої температури вологого повітря вплив вологості є більш суттєвий.

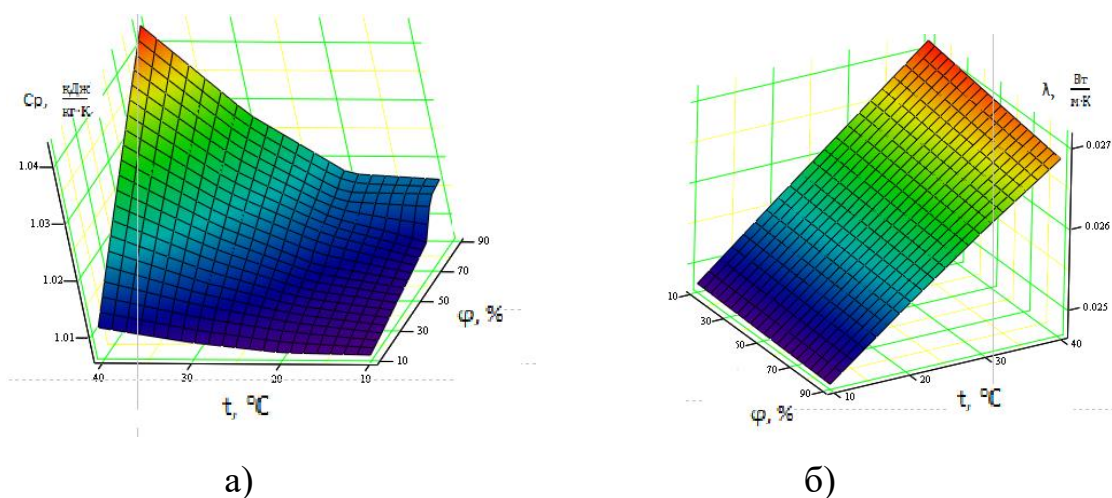


Рисунок 2.13 – Графічна ілюстрація зміни теплоємності (а), і теплопровідності(б) від відносної вологості φ і температури t повітря

Так при температурі 10°C при зростанні відносної вологості від 10 до 90% теплоємність вологого повітря зростає з 1,0067 до 1,0166, а при 40°C зростання теплоємності становить від 1,0112 до 1,0433, тобто в першому випадку зростання теплоємності становить 0,98%, а для другого випадку – 3,17% .

Моделювання зміни теплопровідності волого повітря (рис.2.13 б) показало, що при зростанні температури вологого повітря відбувається зростання його теплопровідності, але збільшення вмісту вологи приводить до зменшення теплопровідності. Так при температурі 10°C при зростанні відносної вологості від 10 до 90% теплопровідність вологого повітря спадає з 0,02477 до 0,02472, а при 40°C зменшення теплопровідності становить від 0,02712 до 0,02685. Це зменшення у відносних одиницях становить відповідно 0,20% і 0,99%.

Результати моделювання показують, що волога має суттєвий вплив на теплофізичні характеристики робочого середовища, що повинно бути враховано при функціонуванні термоанемометричних сенсорів. Також у випадку постійної швидкості вологого повітря вихідний сигнал термоанемометричного сенсора може бути використаний як інформативний параметр для контролю вологості повітря.

2.4. Моделювання функціонування термоанемометричних перетворювачів за умов газоводневих сумішей

Природний газ є світовим важливим ресурсом, насамперед в індустріальному секторі та на глобальній політичній мапі світу. Однією з новітніх технологій є додавання водню до природного газу, що забезпечує його економію та сприяє досягненню більшої енергетичної ефективності кінцевої газової суміші.

Необхідність розвитку водневих технологій визнана на рівні ЄС у відповідних документах: Європейській угоді від 11.12.2019 р. [73] та Європейській водневій стратегії [74], в тому числі її застосування як компонентна природного газу. Вплив водню на фізичні властивості природного газу та метрологічні характеристики систем теоретично досліджено у роботі [75] та встановлено, що

домішування водню від 2% до 25% суттєво не впливають на газотранспортні системи та засоби для їх обліку. Дослідженню фізико-хімічних властивостей водню у складі природного газу приділено чимало уваги у роботі [76] та розраховано термодинамічні та транспортні властивості потоків, що містять водень. Також досліджена герметичність газорозподільних систем при використанні в них водню [77]. Це показало їх невідповідність нормам герметичності за високих значень тиску, а за низьких значень тиску зміни важко помітні. Використання суміші природного газу і водню як палива в комунально-побутових, промислових, паливоспалювальних, теплогенеруючих установках досліджено в роботі [79].

Достатньої уваги приділено у дослідженнях по використанню газоводневих сумішей у побутовому секторі [78, 79]. Встановлено, що необхідне більш детальне дослідження та впровадження новітніх стандартів та технологій при роботі з воднем.

Одним із практичних рішень при контролі якісних та кількісних параметрів природного газу з домішуванням водню можуть бути інформаційно-вимірювальні системи із застосуванням термоанемометричних перетворювачів. Тому дослідження теплофізичних характеристик для різних вуглеводневих сумішей є актуальною задачею в питаннях термоанемометрії.

Так як природний газ є сумішшю компонентів, найбільший вміст серед яких займає метан то вибрано для дослідження три види природного газу: з великим (97%), середнім (92%) та малим (87%) об'ємним вмістом метану. Так як правило Кея [58] для розрахунку теплофізичних властивостей газів застосовується для масового вмісту компонентів, тому було переведено склад газу з об'ємного у масовий вміст. Для дослідження впливу водню здійснювалося доповнення ним трьох типів газу з об'ємним вмістом в межах від 0 до 50%. Зміна об'ємного вмісту кожного компоненту газової суміші з урахуванням додавання водню, проводилася пропорційним збільшенням або зменшенням досліджуваного компоненту відносно загального значення складових компонентів з досягненням кінцевого значення суміші в 100% згідно формули :

$$V_{iH_2} = \frac{V_i(100 - V_{H_2})}{100} \quad (2.28)$$

де, V_i – об’ємний вміст компонента до домішування водню, %; V_{H_2} – об’ємний вміст водню, що домішується, %.

Результати розрахунку об’ємного та масового компонентного складу природного газу за умов моделювання наведені у табл.2.6, в якій подано об’ємний та масовий вміст компонентів газоводневої суміші при відсутності водню, а також коли він складає за об’ємом 30% та 50% відповідно у газі з великим вмістом водню. Алгоритми для розрахунку теплофізичних параметрів викладені в публікації [71].

Таблиця 2.6 – Об’ємний та масовий компонентний склад природного газу при вмісті водню

Компонент	Метан	Етан	Пропан	Бутан	Пентан	Азот	Вугл.газ	Водень
Об.вміст V_i , %	97	1,7	0,41	0,15	0,1	0,45	0,19	0
Мас. Вміст X_i , %	93.616	3.076	1.088	0.525	0.434	0.758	0.503	0
Об.вміст V_i , %	67.9	1.19	0.287	0.105	0.07	0.315	0.133	30
Мас. Вміст X_i , %	91.244	2.998	1.06	0.511	0.423	0.739	0.49	2.533
Об.вміст V_i , %	48.5	0.85	0.205	0.075	0.05	0.225	0.095	50
Мас. Вміст X_i , %	88.263	2.9	1.026	0.495	0.409	0.715	0.474	5.718

Результати моделювання залежності теплофізичних характеристик газоводневої суміші наведені на рис.2.14. Моделювання здійснювалося при фіксованих значень тиску 0,1 МПа та температури 20°C.

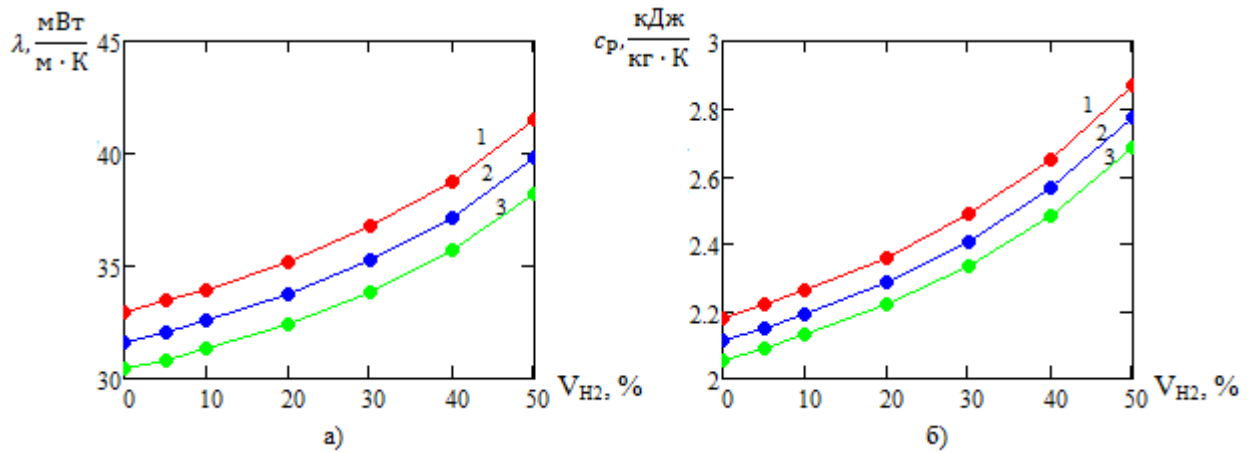


Рисунок 2.14 — Зміна теплопровідності(а) та теплоємності (б) природного газу з вмістом метану 97%(1), 92%(2), 87%(3) при збільшенні вмісту водню

Висновки. Встановлено [82], що зростання теплопровідності λ та теплоємності c_p має місце при зростанні вмісту метану у газовій суміші. Це збільшення з 0% до 50% об'ємного вмісту водню становить практично для всіх змодельованих проб газу зростання теплопровідності на 26% та теплоємності на 31%. При цьому закономірності зростання теплофізичних параметрів є практично однаковими. Суміші з більшим вмістом метану характеризуються більшими числовими значеннями теплофізичних параметрів.

Дане дослідження встановлює можливість застосування методу термоанемометрії для контролю якості газоводневих сумішей.

Так як природний газ є сумішшю компонентів, кінцевий розрахунок теплопровідності цієї суміші можна проводити за різними алгоритмами.

Перший алгоритм згідно з правилом Кея [58] для розрахунку теплофізичних властивостей газів застосовується для масового вмісту компонентів. Тому першим кроком було переведення складу газу з об'ємного у масовий вміст. Наступним кроком теплопровідність газової суміші $\lambda_{\text{см}}$ розраховувалась як сума основних компонентів газової суміші з врахуванням масового вмісту кожного компоненту [58]:

$$\lambda_I = \lambda_1 g_1 + \lambda_2 g_2 + \dots + \lambda_n g_n = \sum_{i=1}^n \lambda_i g_i, \quad (2.29)$$

де λ_i – теплопровідність i -го компонента; g_i – масовий вміст i -го компонента газової суміші.

Другий алгоритм застосовується при вхідних даних по мольному компонентному складу газу та молярній масі окремого компонента та передбачає розрахунок теплопровідності для газових сумішей при низьких значеннях тиску за формулою[80]:

$$\lambda_{II} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot \lambda_i \cdot (M_i)^{\frac{1}{3}}}{\sum_{i=1}^n y_i \cdot (M_i)^{\frac{1}{3}}}, \quad (2.30)$$

де y_i – мольна доля i -го компонента газової суміші, M_i – молярна маса i -го компонента.

Третій алгоритм задається вмістом в мольних долях та з урахуванням поправки на коефіцієнт взаємозв'язку окремих газів між собою [81]:

$$\lambda_{III} = \sum_{i=1}^n \frac{y_i \cdot \lambda_i}{\sum_{j=1}^n y_j \cdot A_{ij}}, \quad (2.31)$$

де A_{ij} – параметр взаємозв'язку між компонентами суміші газів; $k = 1$.

$$A_{ij} = k \cdot \frac{[1 + (\lambda_i/\lambda_j)^{1/2} \cdot (M_i/M_j)]^{1/4}}{[8 \cdot (1 + M_i/M_j)]^{1/2}}, \quad (2.32)$$

За допомогою наведених формул та законів змішування сумішей [58, 80, 81] було досліджено алгоритми визначення теплопровідності природного газу із врахуванням водню та вологості природного газу [103].

Було сформовано 3 види газів – сухий, вологий та з додаванням водню, компонентний склад яких за об'ємним вмістом викладено в табл. 2.7 Розрахунки здійснювались за значень тиску 0.1 МПа та температури 20°C.

Таблиця 2.7 – Об'ємний компонентний склад природних газів

№	Мет.	Етан	Проп.	Бут	Пент.	Азот	Вуг.г.	Водень	$\varphi, \%$
1	97	1,7	0.41	0.15	0.1	0.45	0.19	-	-
2	87	7.296	1.799	0.65	0.433	1.999	0.823	-	-
3	95	1.998	0.979	0.596	0.236	0.883	0.307	-	80
4	90	3.439	2.124	1.134	0.863	1.508	0.932	-	80
5	87.3	1.53	0.369	0.135	0.09	0.405	0.171	10	-
6	67.9	1.19	0.287	0.105	0.07	0.315	0.133	30	-

Таблиця 2.8 – Значення теплопровідностей при використанні різних алгоритмів

№	λ_I	λ_{II}	λ_{III}	$\Delta_{I,II}, \%$	$\Delta_{I,III}, \%$	$\Delta_{II,III}, \%$
1	32.971	33.347	31.991	1.14	3.063	4.239
2	30.41	31.699	29.599	4.239	2.667	7.095
3	31.95	32.939	30.793	3.095	3.757	6.969
4	30.269	31.939	28.083	2.345	16.398	13.731
5	33.969	39.591	34.556	16.55	1.728	14.571
6	36.747	54.823	44.585	49.19	21.33	22.963

У ході моделювання встановлено, що алгоритми для розрахунків теплопровідності (табл. 2.8.) у сухого газу співпадають, а для газів з домішуванням водню є розходження, що потребує досліджень.

2.5 Дослідження впливу швидкості руху та складу газового потоку на чутливість термоанемометричних перетворювачів

Зважаючи на потенційне зменшення обсягів постачання значної кількості природного газу до нашої держави та наявність реальних проблем у збільшенні видобутку природного газу в Україні було та залишається актуальним питання покращення метрологічних аспектів обліку цього виду енергоносія, в тому числі із застосуванням нових технічних реалізацій методів вимірювання [30] .

Поряд з цим одним із напрямків збереження природного газу при одночасному забезпеченні або підвищенні енергетичної цінності газового палива є додавання газоподібного водню як компонента утворюваної газової суміші. Тому це також потребує дослідження і удосконалення засобів для обліку таких сумішей. На погляд авторів для цього можуть бути використані термоанемометричні методи вимірювання витрати [46.]. Однак на сьогодні практично відсутні математичні моделі функціонування засобів обліку газоводневих сумішей.

Метою роботи є дослідження впливу швидкості як кількісної характеристики потоку газових середовищ різного складу на чутливість термоанемометричних перетворювачів.

Як відомо, принцип дії термоанемометрів полягає у використанні залежності між втратою тепла неперервно нагрітого тіла, наприклад дроту чи пластини, які омиваються газовим потоком, і швидкістю газового потоку з врахуванням наявного впливу якісних характеристик потоку. Використання даної залежності між втратою тепла неперервно нагрітого тіла і швидкістю газу, в якому це тіло знаходиться [83] вказує на необхідність врахування параметрів потоку в якому функціонує термоанемометричний датчик. Виходячи із закону теплопровідності Фур'є та рівняння закону охолодження Ньютона отримуємо критерій подібності Нуссельта для конвективного теплообміну нагрівального елемента термоанемометра для ламінарного потоку [84]:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \quad (2.33)$$

, де α – коефіцієнт тепловіддачі; l – геометричні розміри об'єкта, що нагрівається; λ – теплопровідність середовища.

Так як середовище є рухомих необхідно врахувати число Рейнольдса, яке характеризує режим течії рідини або газу та виражає відношення сил інерції (напору) до сил внутрішнього тертя (в'язкості) [85]:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} \quad (2.34)$$

, де v - швидкість потоку; d – розміри тіла, що взаємодіє; ν - кінематична в'язкість; ρ – густина; μ – динамічна в'язкість.

Фізичні властивості середовища, в якому відбувається передача теплоти чи речовини, характеризується числом Прандтля [86]:

$$Pr = \frac{\alpha}{\nu} = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} \quad (2.35)$$

, де μ – динамічна в'язкість; c_p – ізобарна теплоємність; λ – теплопровідність.

Для дослідження чутливості термоанемометричних перетворювачів від якісного складу та швидкості газового потоку використане така математична залежність зміни електричного опору чутливого елемента (інформативний параметр) від впливових параметрів [4]

$$R_D = \frac{R_C \pi l_D \lambda (k(T_C - T_G)(0,42 \text{Pr}^{0,2} + 0,57 \text{Pr}^{0,33} (\text{Re})^{0,5}))}{I^2 k R_C - \pi l_D \lambda (0,42 \text{Pr}^{0,2} + 0,57 \text{Pr}^{0,33} (\text{Re})^{0,5})}, \quad (2.36)$$

де R_C , l_D , T_C , k – опір, довжина, температура та температурний коефіцієнт зміни електричного опору платиногового чутливого елемента (дроту) за стандартних умов відповідно; I – робочий струм нагрівання термоанемометричного перетворювача; λ – коефіцієнт теплопровідності газового потоку; T_G – температура газу за робочих умов; $\text{Pr} = \mu \cdot c_p / \lambda$ – число Прандтля; $\text{Re} = \rho \cdot v \cdot d_D / \mu$ – число Рейнольдса стосовно функціонування термоанемометра.

У формульному записі чисел Pr і Re використані позначення: μ – динамічна в'язкість; c_p – ізобарна теплоємність; ρ – густина робочого середовища; v – швидкість газового потоку; d_D – діаметр дроту термоанемометричного перетворювача.

Так як у формулі (2.36) швидкість потоку не виражена безпосередньо, а числа Re і Pr опосередковано враховують характеристики газового потоку, то достатньо складною задачею є диференціювання цього виразу відносно параметрів швидкості і якісних характеристик газового потоку. Тому при визначенні чутливості, як часткової похідної, використовувався імітаційний метод розрахунку приростів вхідних параметрів і отримуваних змін інформативного сигналу (опору термоперетворювача).

При моделюванні задавалися такі значення параметрів швидкості потоку від 0,5 м/с до 5 м/с при температурі робочого середовища 20 °С та його абсолютному тиску 0,1 МПа. Отримувані зміни електричного опору відносно цих значень дали можливість встановити відношення зміни електричного опору чутливого елемента ΔR до заданої зміни швидкості потоку Δv . Відповідно до вхідних параметрів отримано такі графіки зміни чутливості термоанемометричного перетворювача щодо швидкості потоку в повітряному, газовому та газозводневих середовищах (рис. 2.15).

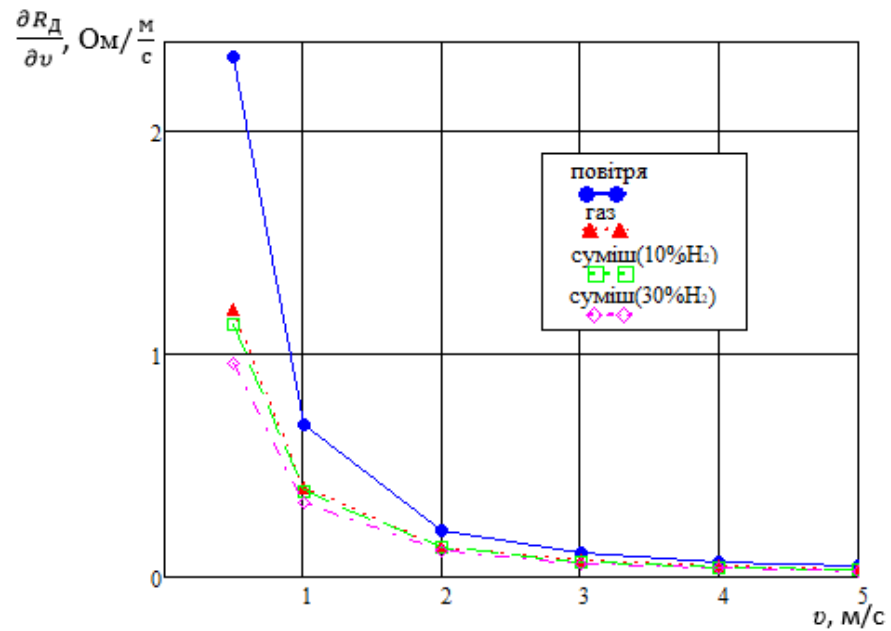


Рисунок 2.15 – Залежність чутливості термоанемометричного датчика від швидкості потоку

При моделюванні складу природного газу та сумішей природного газу з воднем 10% та 30% за об'ємним вмістом (табл. 2.9) враховувався вплив на значення теплофізичних (λ , c_p) і якісних (μ , ρ) характеристик газового середовища, які додатково розраховувалися з використанням відповідних алгоритмів [71].

Таблиця 2.9 – Об'ємний компонентний склад досліджуваних газів (у відсотках)

Назва	Метан	Етан	Пропан	Бутан	Пентан	Гексан	Азот	Вуг.газ	Водень
Природний газ	90,84	2.623	1.384	1.011	0.861	0.844	1.508	0.932	0
Газова суміш	87.3	1.53	0.369	0.135	0.09	0	0.405	0.171	10
Газова суміш	67.9	1.19	0.287	0.105	0.07	0	0.315	0.133	30

За результатами моделювання отримано апроксимаційні залежності чутливості термоанемометричного датчика від швидкості потоку від 0,5 м/с до 5 м/с для повітряного, газового та газозводневих середовищ за температури 20 °С та абсолютному тиску 0,1 МПа.

$$\frac{\partial R_D}{\partial v_{II}} = 0.6992v_{II}^{-1.6897}, \quad \frac{\partial R_D}{\partial v_{II}} = 0.4030v_{II}^{-1.5656},$$

$$\frac{\partial R_D}{\partial v_{H10}} = 0.3837v_{H10}^{-1.5523}, \quad \frac{\partial R_D}{\partial v_{H30}} = 0.3837v_{H30}^{-1.5523} \quad (2.37)$$

Результати моделювання показують [87], що чутливість термоанемометричного давача зростає із зменшенням швидкості потоку. При цьому чутливість при вимірюванні витрати повітря є більшою від чутливості при вимірюванні природного газу, а також сумішей природного газу з воднем. Збільшення об'ємного вмісту водню приводить до зменшення чутливості термоанемометричного методу вимірювання.

Результати виконаних досліджень обґрунтовують необхідність розроблення та удосконалення технічних рішень в сфері обліку, які забезпечать одночасну якісну та кількісну оцінку досліджуваного середовища.

2.6 Моделювання впливу вологи на градувальну характеристику термоанемометричних сенсорів

Зважаючи на стрімке зростання тенденції щодо заощадження енергоносіїв [88], кількісний та якісний їх облік виходить на перше місце. Важливу роль в питаннях обліку з врахуванням вищевказаних характеристик енергоносія відіграють термоанемометричні перетворювачі, які наділені високою точністю та можливістю кількісно та якісно оцінити досліджуване середовище.

Так як основним явищем, що покладено в основі функціонування термоанемометричного перетворювача є процес переносу тепла, який на пряму залежить від якісних характеристик середовища, в якому він функціонує, встановлено за мету дослідити вплив таких теплофізичних характеристик як теплопровідність та теплоємність на його чутливість.

Вхідною залежністю для дослідження опору платинової дротини в режимі постійного струму електричного кола є формула (2.36)

Внаслідок зміни компонентного складу газу та непостійності зміни швидкості потоку робочого середовища – кількість тепла, що віддає дротина робочому середовищу, буде змінною. Разом з тим температура дротини буде змінюватися та її електричний опір, який виступає в ролі інформативного параметра.

Моделювання проводилося за відсутності потоку, при температурі робочого середовища 20 °С та абсолютному тиску 0,1 МПа. Компонентний склад природного газу при дослідженнях наведено в табл. 1.

Таблиця 2.10 – Об’ємний компонентний склад природного газу

Компонент	Метан	Етан	Пропан	Бутан	Пентан	Гексан	Кисень	Азот	Вуг. газ
Об.вміст, %	96	1.873	0.634	0.258	0.111	0.094	0.087	0.758	0.185

При моделюванні впливу теплопровідності на чутливість давача теплоємність середовища фіксувалась на відповідному значенні, відповідно при моделюванні впливу теплоємності – фіксувалась теплопровідність.

Зважаючи на те, що геометричні параметри термоанемометричного перетворювача були незмінними, можна зробити висновок, що найбільшого впливу на зміну чутливості давача дають такі параметри газового середовища як: температура, густина, в’язкість та теплофізичні параметри – теплопровідність та теплоємність, які при використанні критерія подібності входять до складу чисел Прандтля та Рейнольдса у відповідних формулах (2.33–2.36)

Відповідно до вхідних параметрів отримано градувальні характеристики опору дротини відповідно до теплопровідності та теплоємності газу та повітря (рис. 2.16-2.17).

Результати моделювання [89] показують, що взаємодія нагрітого тіла буде більше виражена із газовим середовищем яке містить більше легких вуглеводнів. При зростанні теплопровідності та теплоємності природного газу опір дротини зростає, а у випадку з повітрям – при зростанні теплопровідності опір зростає, а при зростанні теплоємності навпаки спадає. Це зумовлено, на наш погляд, малим

інтервалом зміни значення теплоємності повітря та більшим значенням динамічної в'язкості повітря у порівнянні з природним газом.

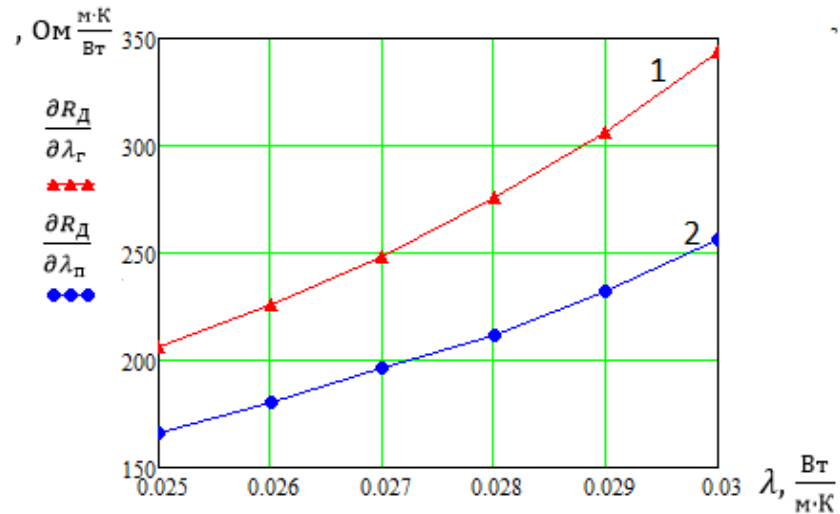


Рисунок 2.16 – Залежність чутливості термоанемометричного давача від теплопровідності природного газу(1) та повітря(2)

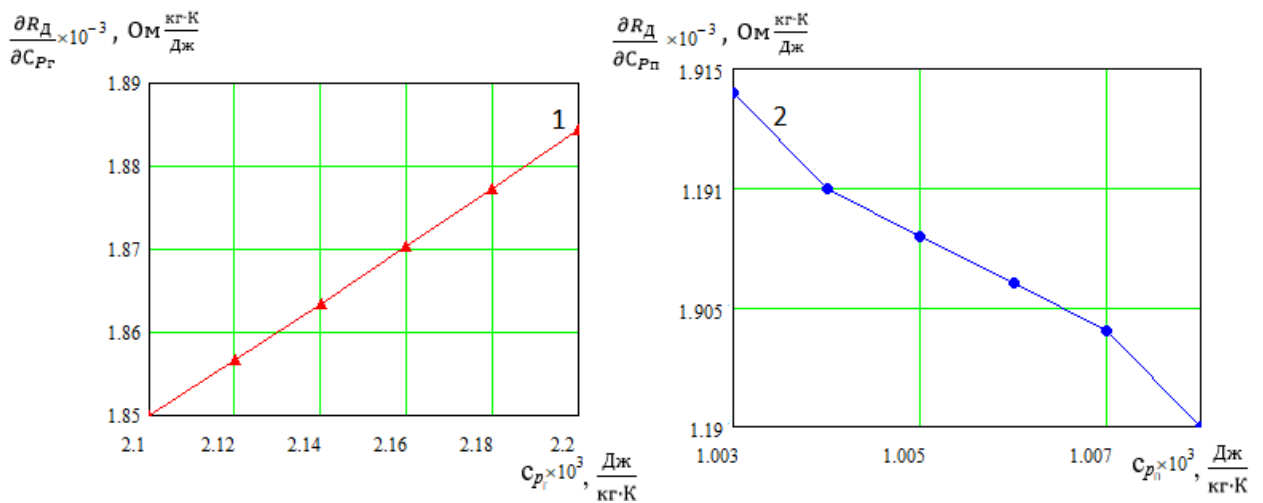


Рисунок 2.17 – Залежність чутливості термоанемометричного давача від теплоємності природного газу(1) та повітря(2)

Результати виконаних досліджень обґрунтовують необхідність розроблення нових технічних рішень, які забезпечили би одночасно визначення якісних та кількісних характеристик досліджуваного газу з врахуванням вологості та вмісту водню у суміші.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБЛЕННЯ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ ПРИ ФУНКЦІОНУВАННІ НА ВОЛОГИХ ГАЗОПЛИННИХ СЕРЕДОВИЩАХ

Одним з ключових факторів, що впливають на точність вимірювань за допомогою термоанемометрів, є вологість газового середовища. Наявність водяної пари в потоці призводить до зміни теплових характеристик сенсора, що, в свою чергу, може суттєво змінювати результати вимірювань.

Мета даного розділу полягає в розробці фізичної моделі, яка описує вплив вологості на роботу термоанемометричних сенсорів, а також у проведенні експериментальних досліджень для верифікації цієї моделі. Буде розроблено лабораторний стенд, який дозволить симулювати різні умови вологості та виміряти їхній вплив на характеристики термоанемометра. Результати експериментів будуть використані для оцінки точності вимірювання витрати та об'єму газу в умовах вологих газоплинних потоків.

3.1 Концепція фізичного моделювання впливу вологи на роботу термоанемометричних сенсорів

В наш час достатньої уваги приділяється дослідженням в паливно-енергетичному секторі України, який стосується питань вирішення обліку енергетичних ресурсів, зокрема природного газу, у контексті з питаннями метрологічного забезпечення відповідних вимірювань. Тому більшої уваги потребують термоанемометричні методи та засоби для дослідження витрати природного газу, бо вони наділені високою точністю та конструктивною практичністю.

Одним із напрямків для дослідження впливу вологості на теплофізичні характеристики газової суміші є врахування робочих умов оточуючого середовища. При цьому необхідним є приведення параметрів досліджуваної суміші

газів до стандартних умов газу. При експериментальних дослідженнях проводиться осушення досліджуваного газу або фіксується його вологість до проведення експерименту. Після визначення вхідних параметрів газу проводиться контрольована подача газу до секції змішування. Генерування вологого повітря відбувається в окремому блоці системи, де контрольовано подається до секції змішування з сухим повітрям. Наступним кроком є подача вологи або повітря до вимірювальної секції. До складу вимірювальної секції входить термоанемометричний прилад (вимірює витрату або швидкість потоку), вологомір, давачі температури та тиску, вихідні сигнали із вимірювальної секції до ПЕОМ та подальша обробка інформації.

Розроблена методологія дозволяє визначати вплив вологості робочого середовища на покази термоанемометричних перетворювачів за різних значень параметрів газового середовища (тиск, температура, вологість, витрата) при використанні повітря, певного газу, а також природного газу.

Реалізація викладеної методики [90] дозволить встановити основи щодо дослідження впливу вологості газової суміші на засоби термоанемометрії та відкриває шлях до реалізації подальших експериментальних досліджень.

Необхідним є розроблення методології експериментального дослідження впливу вологи на роботу засобів вимірювання витрати газу.

Відомими є нормативні документи, які регламентують вплив вологи на роботу засобів обліку газу, які використовують при вимірюванні метод змінного перепаду тиску [69]. Для їх функціонування необхідно знати вміст вологи, який визначається за допомогою відповідних вологомірів [2]. Тому практично вплив вологості враховується при вимірюванні витрати методом змінного перепаду тиску з використанням звужувальних пристроїв. Стосовно впливу вологи на інші методи вимірювання, наприклад, турбінними чи роторними лічильниками, таких досліджень немає.

Було теоретично досліджено вплив вологи на роботу термоанемометричних перетворювачів. Результати, які нами викладені в роботі [71], показали, що волога суттєво впливає на результати вимірювання з використанням

термоанемометричних перетворювачів, при їх роботі на середовищах природного газу і вологого повітря.

Відомі також дослідження щодо впливу вологи на результати вимірювання об'єму і витрати природного газу [52]. При цьому метою дослідження ставилося визначення впливу двофазового (рідинної та газової фази) складу природного газу на перепад тиску при стандартному і спеціальному звужувальному пристрої. Дослідження стосувалися стандартних діафрагм та спеціальних звужувальних пристроїв з різними формами і видами отворів в них, наприклад, секторно-кільцевого типу і декількох наборів отворів еліпсоподібного виду. Використовувані алгоритми в публікації стосуються вимірювання двофазних потоків в яких волога знаходиться вже в скрапленому стані, тобто в стані насичення. Дослідження не стосуються визначення впливу пароподібної частини вологи в потоці. В цій роботі досліджується двофазне середовище в якому волога є в рідкому стані, а природний газ в газоподібному стані, а метою нашого дослідження є перебування вологи і повітря у газовому стані. Тому цей результат не може бути використаний згідно поставленої нами задачі дослідження.

Пошук конкретних технічних рішень з генерації вологих газоплинних середовищ показали, що їх на сьогодні практично немає у вигляді спеціальних лабораторних установок. Аналіз патентних рішень показав, що можуть бути принципово створені пристрої, які можуть вимірювати (проводити) облік вологого природного газу, наприклад [91]. Він реалізований на базі витратоміра змінного перепаду тиску, принципово забезпечує вимірювання маси, об'єму та масової витрати робочого середовища. Однак генерувати еталонний потік вологого середовища практично неможливо, оскільки як еталонний засіб використовується дзвонова установка, для функціонування якої використовується сухе повітря.

Також може бути застосоване технічне рішення на прикладі установки, яка функціонує на базі ємності із стиснутим газом [92]. Однак ця установка та аналоги також передбачає відсутність вологи у згенерованому середовищі, оскільки у них лінія подачі газу обладнана осушувачем газу. Можна також формально створювати установки на базі критичного сопла із системою забезпечення критичного потоку

[93]. При цьому, вимірювання витрати вологого газу є алгоритмічно достатньо складним, оскільки для їх функціонування необхідно знати функцію критичних витрат вологого газу через сопло, а на даний час таких залежностей практично немає і нормативні документи, які зараз є відомими закордоном також не передбачають використання вологого робочого середовища.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми вказує на необхідність врахування впливу вологи у питаннях витратометрії термоанемометричними перетворювачами з використанням принципів технічної реалізації.

В роботі нами теоретично змодельовано вплив вологи на функціонування термоанемометричних сенсорів. Фізичне обґрунтування впливу полягає в тому, що термоанемометр вимірює швидкість потоку. Основним елементом давача є нагрівальний елемент, який може бути виготовлений з провідникових матеріалів із високою температуропровідністю (вольфрам, платина) та у різних конфігураціях (нитка, пластина та інші геометричні фігури) [30]. Термоанемометричні сенсори можуть працювати в режимах постійного струму або постійної температури. У більшості випадків нагрівальний елемент включений до мостової схеми, як один із балансувальних елементів. Головною особливістю термоанемометра з постійною температурою є той факт, що відповідний змінний резистор, який знаходиться у балансі із нагрівальним елементом є функцією температури. Відповідно при збільшенні чи зменшенні швидкості потоку газового середовища змінюється температура нагрівального елемента та відповідно опір змінного резистора.

Потік, в якому функціонує термоанемометричний сенсор, характеризується певними фізико-хімічними властивостями і вони, поряд з швидкістю потоку, також впливають на зміну вихідного сигналу сенсора. Тому основними для опису взаємодії нагрівального елемента є теплофізичні характеристики середовища в якому він функціонує [87]. Одним із основних теплофізичних параметрів газового середовища при його термоанемометричних дослідженнях є теплопровідність. Теплопровідність є властивістю, яка вказує на швидкість, з якою переноситься енергія в процесі теплопередачі, а параметр, що характеризує затримування тілом

енергії є теплоємністю. Розрізняють ізобарну(при постійному тиску системи) та ізохорну(при постійному об'ємі системи) теплоємності. Більш практичною при розрахунках тепло-та масообміну є ізобарна теплоємність, адже вона не потребує постійного об'єму системи, що в питаннях витратометрії з термоанемометричними сенсорами досить складно реалізувати. Ізобарною теплоємністю робочого тіла є відношення нескінченно малої кількості питомої теплоти при постійному тиску, яка підводиться до одиниці тіла або відводиться від неї в процесі нескінченно малої зміни температури цього тіла.

Отже, такі теплофізичні характеристики газового середовища як теплопровідність та теплоємність поряд із швидкістю потоку є визначальними при дослідженні взаємозв'язку нагрітого тіла та середовища в якому воно функціонує.

Нами розроблено макет лабораторної установки, який реалізує концепцію фізичного моделювання впливу вологи на роботу засобів обліку та складається з наступних секцій: генерування витрати, генерування вологи та досліджувальної. Для проведення спочатку аналітичних розрахунків та в подальшому для експериментальних досліджень авторами буде використано як газ повітря. Функціональна схема макету лабораторної установки наведена на рис. 3.1.

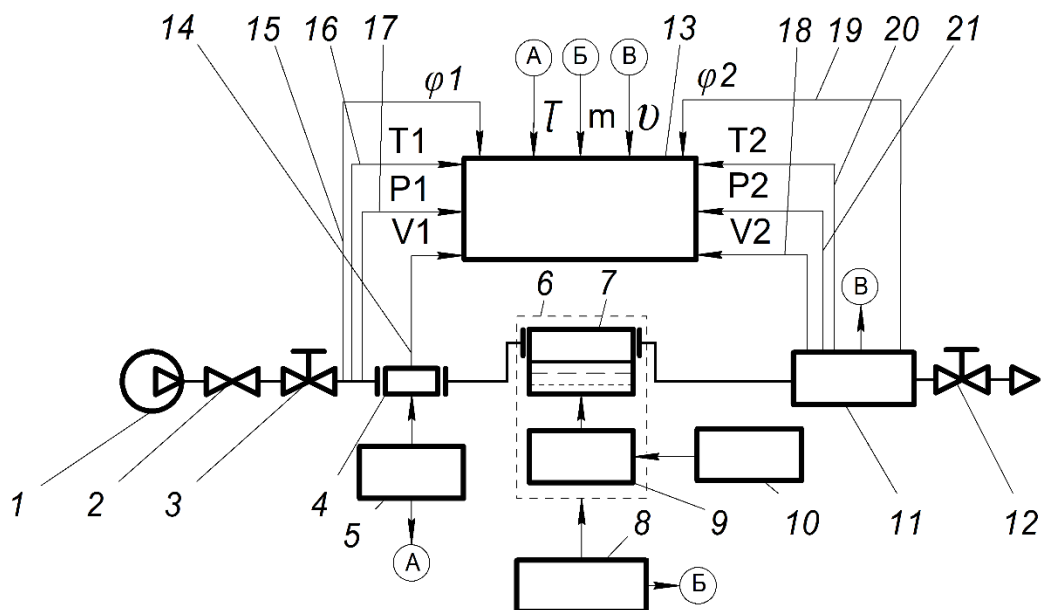


Рисунок 3.1 – Функціональна схема установка для фізичного моделювання впливу вологи на роботу термоанемометричних сенсорів. 1 – джерело витрати; 2 – відсічний клапан; 3, 12 – регулятор тиску; 4 – лічильник газу; 5 – хронометр; 6 –

вузол генерації вологи; 7 – ємність з водою; 8 – еталонні ваги; 9 – мембрана ультразвукового генератора; 10 – керувальний блок ультразвукового генератора; 11 – досліджувальна секція установки; 13 – обчислювальний блок установки; інформативні параметри: 14, 18 – об’єм, 15, 19 – вологість, 16, 20 – температура, 17, 21 – тиск на вході та виході із лабораторної установки відповідно.

Установка функціонує наступним чином: перед початком випробувань відкривають відсічний клапан 2, за допомогою джерела витрати 1 і регулятора тиску 3 встановлюють режим функціонування лабораторної установки. Водночас за допомогою задавача 10 вибирають режим роботи ультразвукового генератора 9 відповідно до встановленої витрати на вході та вмикають лабораторну установку з попередньо заданими параметрами генерування витрати та вологи, відповідно до алгоритму роботи установки, який наведено далі за текстом. Газ поступає через вхідний трубопровід до лічильника газу 4. Хронометром 5 формується тривалість вимірювального циклу установки. При цьому вхідний потік газу змішується із вологою, яка створена секцією генерації вологи 6. До складу секції генерації вологи входить ємність з водою 7, що розміщена на еталонній вазі 8 (індивідуального виготовлення, з ціною поділки 0.01 грама). Фіксація значення маси ємності з водою до та після проведення експерименту дає можливість визначити масу генерованої водяної пари. Для здійснення водяної пари використовується ультразвукова мембрана 9, інтенсивність генерування водяної пари встановлюється задавачем 10. Після змішування вхідного потоку із вологою секції генерації вологи потік поступає на досліджувальну секцію установки 11, в якій встановлений перетворювач витрати, наприклад, термоанемометричний сенсор.

Всі інформативні параметри із вхідної та вихідної лінії установки поступають в обчислювальний блок 13. Визначаються такі параметри як: об’єм повітря 14, 18, вологість 15, 19, температура 16, 20, тиск 17, 21 – на вході та виході із лабораторної установки відповідно. Також фіксується хронометрично час (лінія А) експерименту, значення маси генерованої вологи секцією 6 (лінія Б) та швидкість потоку в досліджувальній секції установки (лінія В), яка вимірюється, наприклад,

досліджуваним термоанемометричним сенсором.

Після завершення експерименту формується команда закінчення вимірювального циклу та реалізується обробка вимірювальної інформації блоком 13.

Оскільки, попередні наші дослідження показали, що при незначній кількості генерованої вологи досягається 100% відносна вологість, а далі відбувається її перетворення у рідку фазу. Також технічно важко реалізувати малу зміну генерованої вологи в одиницю часу при малій зміні діапазону робочих витрат. Тому в установці використаний ультразвуковий генератор індивідуального виготовлення, а для забезпечення точного визначення вологи, яка масово генерується зволожувальною установкою, використовуються ваги з цифровим відліком. Тому алгоритм роботи установки передбачає вимірювання об'ємної і масової витрати вологого газу в певному діапазоні при зміні як витрати так і вологості.

Алгоритм роботи установки описується рівнянням, виходячи із закону балансу масової витрати:

$$Q_{m_{\text{вих}}} = Q_{m_{\text{вх}}} + Q_{\text{в}} \quad (3.1)$$

де $Q_{m_{\text{вих}}}$ – масова витрата на виході установки, кг/с; $Q_{m_{\text{вх}}}$ – масова витрата газу на вході установки, кг/с; $Q_{\text{в}}$ – масова витрата вологи (водяної пари) вузлом генерування вологи; кг/с.

Математично алгоритм (1) можна подати наступним виглядом [94]:

$$Q_{m_{\text{вих}}} = \frac{V}{\tau} \left(2,89 \cdot 10^{-3} \rho_c \frac{P - \varphi_{\text{вх}} \cdot P_{\text{вп max}}}{T \cdot K} + \rho_{\text{вп вх}} \right) + \frac{m_{\text{в}}}{\tau}, \quad (3.2)$$

де V – об'єм повітря на вході установки впродовж вимірювального циклу, м³; τ – тривалість вимірювального циклу, с; $\varphi_{\text{вх}}$, P , T – відносна вологість, абсолютний тиск та абсолютна температура повітря за робочих умов установки (φ – у відносних одиницях; P – Па; T – К); $P_{\text{вп max}}$ – парціальний тиск водяної пари у насиченому стані за робочих умов установки, Па; K – коефіцієнт стисливості робочого середовища на вході установки (безрозмірна одиниця); ρ_c – густина робочого середовища

(повітря) за стандартних умов, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\rho_{\text{впвх}}$ – густина водяної пари у повітрі на вході установки, $\text{кг}/\text{м}^3$; $m_{\text{в}}$ – маса генерованої вологи в установці, кг .

Для визначення довідкових даних $P_{\text{впмак}}$ і $\rho_{\text{впмак}}$ за робочих умов установки можна використати такі отримані нами апроксимаційні залежності на базі відомих довідкових табличних даних [61, 64], для значень вхідної температури від 0,1 до 30°C, з коефіцієнтами кореляції та детермінації рівними 1, відносною похибкою апроксимації 0,1%:

$$P_{\text{впмак}} = 0,05 \cdot t^3 + 0,93 \cdot t^2 + 47,74 \cdot t + 606,21; \text{ Па}, \quad (3.3)$$

$$\rho_{\text{впмак}} = 3 \times 10^{-7} \cdot t^3 + 74 \times 10^{-7} \cdot t^2 + 3523 \times 10^{-7} \cdot t + 48228 \times 10^{-7}; \text{ кг}/\text{м}^3, \quad (3.4)$$

де t – температура повітря за робочих умов установки, °C; $\rho_{\text{впмак}}$ – густина водяної пари у насиченому стані за робочих умов установки, $\text{кг}/\text{м}^3$.

В формулах (3.3) і (3.4) відсутні значення робочого тиску в установці, оскільки їх значення в розробленій моделі лабораторної установки становить (1...2)кПа надлишкового тиску, який визначається тиском джерела витрати. Це дає можливість нехтувати на фоні атмосферного тиску (близько 101кПа) і використовувати відомі довідкові дані для параметрів водяної пари при стандартних умовах.

Масова витрата газу на вході установки складається із масової витрати сухого повітря і масової витрати вологи, яка міститься в ньому. Тому алгоритм (2) роботи установки подамо у вигляді:

$$Q_{\text{п вих}} = \frac{V \cdot (\rho_{\text{сух вх}} + \rho_{\text{впвх}}) + m_{\text{в}}}{\tau}, \quad (3.5)$$

де $\rho_{\text{сух вх}}$ – густина сухої частки газу на вході установки, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Густина водяної пари повітря на вході установки розраховується як:

$$\rho_{\text{впвх}} = \rho_{\text{впмак}} \cdot \varphi_{\text{вх}} \quad (3.6)$$

Таким чином, масу сухого повітря $m_{\text{сух г}}$ і масу вологи $m_{\text{в вих}}$ на виході установки впродовж вимірювального циклу можна записати:

$$m_{\text{сух г}} = V \cdot \rho_{\text{сух г}}, \quad (3.7)$$

$$m_{\text{в вих}} = V \cdot \rho_{\text{впвх}} + m_{\text{в}}. \quad (3.8)$$

Тому абсолютна вологість згенерованого потоку газу на виході установки описується формулою:

$$W_{\text{вих}} = \frac{V \cdot \rho_{\text{вл.вх}} + m_{\text{в}}}{V}, \text{ кг/м}^3, \quad (3.9)$$

а його густину $\rho_{\text{вих.г}}$ можна обчислити за формулою:

$$\rho_{\text{вих.г}} = \rho_{\text{сух.г}} + \rho_{\text{вл.вх}} + \frac{m_{\text{в}}}{V}. \quad (3.10)$$

Оскільки при фізичному моделюванні роботи установки доцільно оперувати параметром відносної вологості газу φ , то необхідно отримати залежність зміни саме цього параметра від робочих умов роботи установки.

Для цього запишемо рівняння взаємозв'язку масової витрати вологи на виході та вході установки, оскільки об'ємна витрата сухого газу на вході і виході установки є незмінною:

$$Q_o \cdot \varphi_{\text{вих}} \cdot \rho_{\text{вл.мах}} = Q_o \cdot \varphi_{\text{вх}} \cdot \rho_{\text{вл.мах}} + Q_{\text{в}}, \quad (3.11)$$

де Q_o – об'ємна витрата сухого газу в установці, м³/с.

На базі (11) отримуємо:

$$\varphi_{\text{вих}} = \varphi_{\text{вх}} + \frac{Q_{\text{в}}}{Q_o \cdot \rho_{\text{вл.мах}}} \quad (3.12)$$

Так як вологість газу на виході залежить не тільки від маси генерованої вологи, але і від робочої витрати установки та вологи вхідного газу (навколишнє повітря), то доцільно здійснити моделювання робочих умов установки, бо очевидним є той факт, що генерування вологи може призвести до максимального насичення вологою вихідного газу.

Результати моделювання [86] (рис. 3.2) реалізовані на базі залежності (12) для фіксованих об'ємних робочих витрат установки 1; 5; 10 м³/год (лінії 1, 2, 3 та 4, 5, 6 відповідно) при тривалості експерименту $\tau=100\text{с}$ і режимів генерування масової витрати вологи в діапазоні $Q_{\text{в}}$ ($0 \dots 1 \cdot 10^{-5}$) кг/с. При цьому робочі умови в установці прийняті $t=20^\circ\text{C}$, $P=103325\text{Па}$ (з врахуванням надлишкового тиску створюваним генератором витрати), а відносна вологість вхідного повітря приймалася 40% (лінії 1, 2, 3) та 60%(лінії 4, 5, 6).

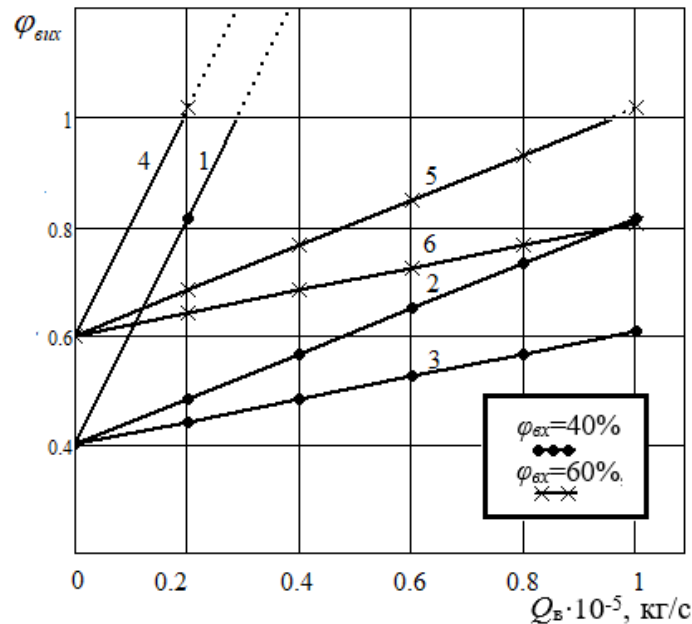


Рисунок 3.2 – Результати моделювання вологості вихідного потоку газу від робочих умов лабораторної установки

Результати моделювання підтверджують вплив вологості навколишнього середовища на діапазон генерованої вологи в установці. Так зростання вологості навколишнього середовища призводить до зменшення максимальної генерованої витрати вологи, при якій досягається максимальне насичення вихідного потоку водяною парою, тобто до умов, коли $\varphi_{вих}=1$. Тому при витраті $1 \text{ м}^3/\text{год}$ і вхідній вологості 40% насичення потоку відбувається при генеруванні вологи $0,29 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с}$, а при вологості 60% цей самий ефект досягається вже при $0,19 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с}$. Вплив робочих витрат на вологість вихідного потоку показує, що при більших витратах 5 і $10 \text{ м}^3/\text{год}$ за умови вибраної максимальної генерованої витрати вологи $1 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с}$ практично не досягається максимальне насичення вихідного потоку яке при меншій вхідній вологості 40% становить 81,8 і 60,9 % відповідно. Поряд з цим при більшій вхідній вологості 60% отримуємо 101,8%(насичення) і 80,9% при вказаних вище відповідних витратах. Це свідчить про необхідність правильного вибору режимів функціонування макету лабораторної установки при дослідженні витратомірів газу на вологих робочих середовищах.

Рівняння (3.12) за умови коли $\varphi_{вих}=1$ дає можливість визначити граничні умови досягнення максимального стану насичення (100% відносної вологості) з

врахуванням умов функціонування установки та відповідно до витрати вихідного потоку установки. Згідно з проведеними математичними перетвореннями формули (3.12) отримаємо:

$$Q_{\text{вmax}} = Q_0 \cdot \rho_{\text{впmax}} \cdot (1 - \varphi_{\text{вх}}) \quad (3.13)$$

Отримана залежність (3.13) дає можливість розраховувати максимально можливу інтенсивність генерації вологи для досягнення насиченого потоку вихідного газу в залежності від об'ємної витрати вхідного газу Q_0 та його вологості $\varphi_{\text{вх}}$. Наприклад, при відносній вологості вхідного потоку 40% і об'ємній витраті 5 м³/год максимальна генерація вологи в установці становитиме $1,44 \cdot 10^{-5}$ кг/с, а за цих же параметрів вхідного потоку і об'ємній витраті 10 м³/год генерація вологи не повинна перевищувати $2,88 \cdot 10^{-5}$ кг/с.

Для дослідження впливу вологи на роботу об'ємних витратомірів необхідно використовувати формулу, яка отримується шляхом ділення виразу (3.5) на вираз (3.10), що подається в наступному кінцевому формульному виразі:

$$Q_{V.\text{вих}} = \frac{V \cdot (\rho_{\text{сух вх}} + \rho_{\text{вп вх}}) + m_{\text{в}}}{\tau \cdot \rho_{\text{вих.г}}}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (3.14)$$

Розроблений макет лабораторної установки, викладена його функціональна схема з наведенням запропонованих методик обчислення та відповідними засобами вимірювальної техніки розкриває можливості фізичного моделювання впливу вологи на роботу витратомірів в діапазоні об'ємних витрат від 0,016 до 5 м³/год при генерації вологи ультразвуковим генератором у повітряному потоці в межах генерування вологи від $0,1 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{-4}$ кг/с.

У ході дослідження [95] розроблено модель макету лабораторної установки для дослідження впливу вологи на роботу витратовимірювальних засобів та викладено функціональну схему установки, яка може реалізовуватися на повітряному середовищі.

Розроблений алгоритм функціонування лабораторної установки з наведенням розробленої методології розрахунку вологості, масової і об'ємної витрати генерованого робочого середовища відповідно до вибраних параметрів роботи установки.

Здійснено математичне моделювання режимів роботи лабораторної установки і встановлені граничні режими його функціонування, які визначаються максимально можливим насиченням вихідного потоку водяною парою.

Експериментальні дослідження впливу вологи на роботу термоанемометричних перетворювачів будуть метою подальших наукових досліджень з використанням розробленого макету лабораторної установки.

3.2 Розроблення лабораторного стенду для дослідження впливу водяної пари на функціонування засобів термоанеметрії

Аналіз існуючих установок для градування та перевірки витратомірів і лічильників газу [92] виявив їх суттєвий недолік: неможливість роботи з робочими середовищами, що містять вологу. Це пов'язано з наявністю осушувачів у лінії подачі газу, що не відповідає реальним умовам експлуатації більшості промислових об'єктів.

Найбільш близькою за своєю концепцією є установка, описана в роботі [93]. Вона включає в себе випробувальну ділянку та витратомір критичного перепаду тиску. Однак, і ця установка має обмеження, пов'язане з відсутністю точних алгоритмів розрахунку для вологих газів, що не дозволяє забезпечити високу точність вимірювань.

Проте і дана установка характеризується недоліком, пов'язаним з неможливістю її функціонування на вологих робочих середовищах, оскільки на сьогодні практично відсутні необхідної точності алгоритми розрахунку функції критичної витрати вологого газу через сопло, що є необхідним для розрахунку його масової і об'ємної витрати через сопло. Ця обставина не дозволяє створювати установки достатньої точності для перевірки витратомірів і лічильників газу.

Існуючі установки для перевірки витратомірів газу мають ряд суттєвих обмежень, що знижують їх точність і універсальність.

Одним із таких обмежень є використання витратомірів критичного перепаду тиску як еталонних приладів. Конструкція таких витратомірів дозволяє вимірювати

лише одне, фіксоване значення об'ємної витрати газу, яке визначається геометричними параметрами сопла. Для перевірки витратомірів в широкому діапазоні витрат необхідно використовувати набори сопел різного діаметра, що ускладнює експлуатацію установки.

Крім того, існуючі установки не пристосовані для перевірки витратомірів на робочих середовищах з різним вмістом вологи. Відсутність засобів для регулювання вологості робочого середовища обмежує сферу застосування таких установок.

Ще одним недоліком є складність конструкції установок, пов'язана з використанням систем забезпечення критичного режиму потоку, таких як байпасні лінії з газоструминними інжекторами. Це ускладнює налаштування та обслуговування установок.

Для усунення зазначених недоліків пропонується розробити нову установку [104] для перевірки витратомірів газу, яка б дозволяла: проводити перевірку витратомірів в широкому діапазоні об'ємних витрат газу; працювати з робочими середовищами з різним вмістом вологи; забезпечувати високу точність вимірювань.

Основні принципи побудови нової установки: Еталонний витратомір – в якості еталонного витратоміра пропонується використовувати лічильник газу, обладнаний хронометром. Таке рішення дозволяє вимірювати об'ємну витрату газу з високою точністю в широкому діапазоні значень.

Вузол генерації вологи – для створення робочого середовища з різним вмістом вологи пропонується використовувати вузол генерації вологи, який буде встановлений на виході еталонного лічильника.

Для збору та обробки вимірювальної інформації пропонується використовувати блок збору даних, який буде збирати дані з еталонного лічильника, досліджуваного приладу та вузла генерації вологи.

Розроблена установка дозволить: підвищити точність і надійність перевірки витратомірів газу; розширити можливості перевірки витратомірів на робочих

середовищах з різним вмістом вологи; спростити процедуру проведення вимірювань.

Установку доповнено вузлом для генерації вологого потоку. Він складається з ультразвукового генератора, який розміщений у ємності з водою. Інтенсивність генерації водяної пари регулюється. Для забезпечення герметичності та точності вимірювань маси води, ємність обладнана еталонною вагою та гнучкими підвідними та відвідними трубопроводами.

В якості еталонного витратоміра використовується лічильник газу з хронометром. Це дозволяє вимірювати об'ємну витрату газу в широкому діапазоні значень без необхідності формування дискретних значень робочих витрат. Такий підхід забезпечує високу точність вимірювань і розширює функціональні можливості установки.

Регулюючи інтенсивність роботи ультразвукового генератора, можна створювати газове середовище з різним ступенем зволоження. Це дозволяє проводити перевірку витратомірів в умовах, максимально наближених до реальних умов експлуатації.

Для визначення кількості водяної пари в газовому потоці використовується еталонна вага. Зважування ємності з водою дозволяє точно визначити масу випарованої води.

Установку доповнено блоком збору даних про параметри робочого середовища, показання еталонного лічильника та досліджуваного приладу. Це дозволяє автоматизувати процес обробки даних та підвищити точність вимірювань.

Випробувальна ділянка розміщена після еталонного лічильника та вузла генерації вологи. Таке розташування дозволяє проводити вимірювання на еталонному лічильнику в стандартних умовах, а на досліджуваному приладі – в умовах підвищеної вологості, що відповідає реальним умовам експлуатації.

Запропонована конструкція установки має ряд переваг:

- висока точність вимірювань. Завдяки автоматизації процесу обробки даних та використанню еталонного лічильника забезпечується висока точність вимірювань;

- розширення функціональних можливостей. Можливість створення різних умов вологості дозволяє проводити випробування в широкому діапазоні;
- зручність експлуатації: Автоматизація процесу вимірювань зменшує вплив людського фактора.

Запропонована конструкція установки для перевірки витратомірів газу є ефективним інструментом для проведення точних вимірювань. Вона дозволяє проводити випробування в умовах, максимально наближених до реальних.

Перспективи розвитку полягають у наступному:

- розширення функціональних можливостей. Можна додати модулі для вимірювання температури та тиску газу, що дозволить проводити більш комплексні дослідження;
- автоматизація процесу управління. Впровадження системи автоматичного управління дозволить зменшити вплив людського фактора на результати вимірювань.

Суть корисної моделі пояснюється кресленням (рис. 3.3), на якому зображена установка для перевірки витратомірів і лічильників газу [96].

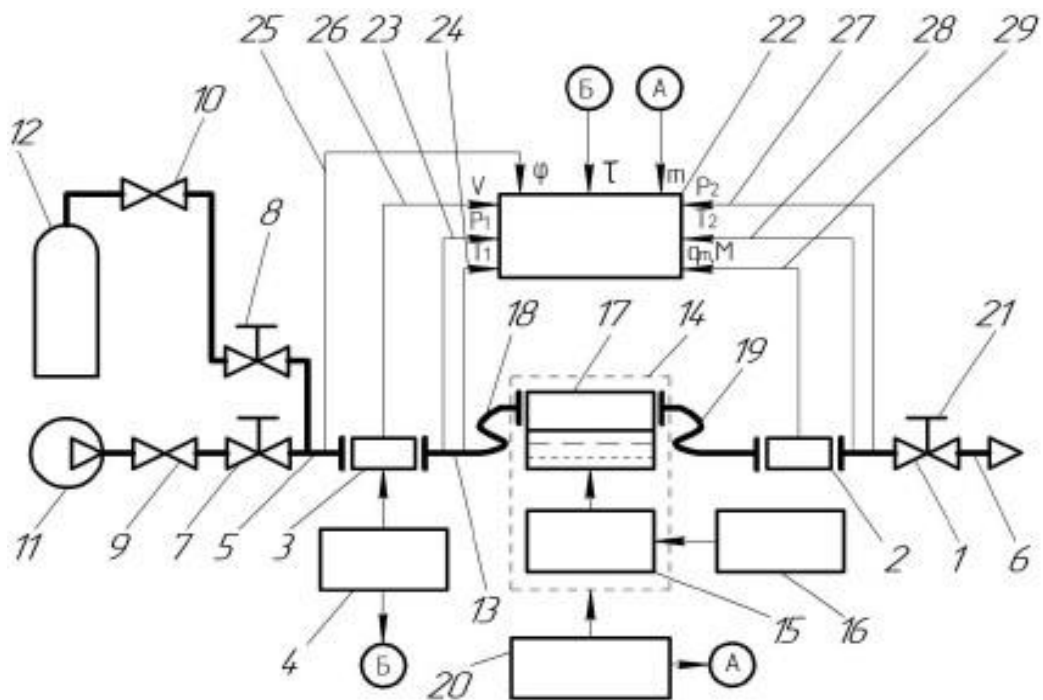


Рисунок 3.3 – Функціональна схема еталонної установки для перевірки витратомірів і лічильників газу.

Установка містить випробувальну ділянку 1, виконану з можливістю встановлення досліджуваного приладу 2, еталонний лічильник газу 3, хронометр 4, вхідний 5 і вихідний 6 трубопроводи. Вхідний трубопровід (5) під'єднаний через регулятори тиску 7 і 8 та відсічні клапани 9, 10 до джерела витрати повітря 11 або до ємності 12 зі стиснутим робочим середовищем. Вихідна лінія 13 еталонного лічильника (3) містить вузол генерування вологи 14, який складається з ультразвукового генератора 15 з регулятором 16 і ємності з водою 17, яка під'єднана гнучким трубопроводом 18 до вихідної лінії (13) еталонного лічильника (3) і гнучким трубопроводом 19 – до випробувальної ділянки (1). Вузол генерування вологи (14) розміщений на еталонній вазі 20. Для задавання величин відтворюваної витрати в процесі перевірки досліджуваних приладів (2) у вихідному трубопроводі (6) встановлений задавач витрати 21. Крім того, установка обладнана блоком збору вимірювальної інформації 22 щодо тиску P_1 , температури T_1 , вологості ϕ робочого середовища і інформативних сигналів про вимірюваний об'єм V еталонним лічильником (3), які надходять по лініях 23-26 відповідно. Також до блока (22) надходить інформація про масу m генерованої вологи (лінія А) і тривалість τ вимірювального експерименту (лінія Б). Від досліджуваного приладу (2) до блока (22) поряд з цим надходить інформація про тиск P_2 (лінія 27), температуру T_2 (лінія 28) і вимірюване значення витрати qm або маси M (лінія 29) робочого середовища.

Установка для перевірки витратомірів і лічильників газу працює таким чином: перед початком випробувань за допомогою задавача витрати 21 і одного із регуляторів тиску 7 (при роботі на повітрі) або 8 (при роботі з використанням ємності 12 зі стиснутим робочим середовищем) встановлюють режим функціонування перевіркової установки. Водночас також за допомогою регулятора 16 задають режим роботи ультразвукового генератора 15. Далі відкривають відсічний клапан 9 (при роботі на повітрі) або відсічний клапан 10 (при роботі з використанням ємності 12 зі стиснутим робочим середовищем). При цьому газ протікає через вхідний трубопровід 5, еталонний лічильник газу 3, вихідну лінію 13 еталонного лічильника 3, гнучкий трубопровід 18 до газової фази ємності з

водою 17. Далі зволожений потік газу надходить з ємності 17 через гнучкий трубопровід 19 до досліджуваного приладу 2, розміщеного у випробувальній ділянці 1, дроселюється у задавачі витрати 21 і подається до вихідного трубопроводу 6.

Наступною операцією є фіксація моменту початку пропускання контрольного об'єму газу, що реалізується за допомогою хронометра 4, під'єданого до блока збору вимірювальної інформації 22. За командою блока 22 "початок пропускання контрольного об'єму" починається збір вимірювальної інформації із еталонного лічильника 3 (об'єм V) дослідженого приладу 2 (масова витрата q_m або вимірювана маса газу M), еталонної ваги 20 (маса m генерованої вологи), а також про значення робочих параметрів установки: тисків P_1 , P_2 , температур T_1 , T_2 , вологість робочого середовища φ , тривалість вимірювального процесу τ .

Після завершення пропускання контрольного об'єму газу за допомогою хронометра 4 формується команда закінчення вимірювального процесу і припиняється збір вимірювальної інформації блоком 22. Далі здійснюють розрахунок відтворюваної масової витрати газу згідно з алгоритмом [94, 96]:

$$q_m = \frac{V}{\tau} \left(2,89 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_S \frac{P_1 - \varphi \cdot P_{W_{\max}}}{T_1 \cdot K_{W1}} + \varphi \cdot \rho_{W_{\max}} \right) + \frac{m}{\tau}, \quad (3.15)$$

де q_m – масова витрата генерованого вологого повітря, кг/с; V – об'єм повітря, виміряного еталонним лічильником за час τ , м³; φ , P , T – відносна вологість, абсолютний тиск та абсолютна температура повітря за робочих умов установки (φ – у відносних одиницях; P – Па; T – К); $P_{W_{\max}}$, $\rho_{W_{\max}}$ – парціальний тиск та густина водяної пари у насиченому стані за робочих умов установки (Па, кг/м³ відповідно); K_{W1} – коефіцієнт стисливості робочого середовища на вході установки (безрозмірна одиниця); ρ_S – густина робочого середовища за стандартних умов, кг/м³; m – маса генерованої вологи за час τ , кг [96].

$$K_{W1} = K_C + \frac{\varphi \cdot P_{W_{\max}}}{P} (1 - K_C), \quad (3.16)$$

де K_C – коефіцієнт стисливості сухого робочого середовища за робочих умов установки.

Відносну похибку досліджуваного витратоміра масової витрати газу δ_m розраховують за формулою :

$$\delta_m = \frac{(q - q_m)}{q_m} \cdot 100\% , \quad (3.17)$$

де q – витрата, яка виміряна досліджуваним масовим витратоміром.

При метрологічних дослідженнях витратомірів об'ємної витрати розрахунок відтворюваної об'ємної витрати газу здійснюють за формулою [96]:

$$q_0 = q_m \frac{K_{W2} \cdot R \cdot T_2}{P_2} , \quad (3.18)$$

де q_m – масова витрата згенерованого вологого повітря, яка розрахована за формулою (3.15); R – питома газова постійна вологого робочого середовища у досліджуваному витратомірі; P_2, T_2 – тиск і температура робочого середовища у досліджуваному витратомірі; K_{W2} – коефіцієнт стисливості згенерованого вологого робочого середовища.

$$K_{W2} = K_C + \frac{\varphi_2 \cdot P_{W \max}}{P_2} (1 - K_C) , \quad (3.19)$$

де φ_2 – відносна вологість згенерованого робочого середовища у досліджуваному витратомірі (у відносних одиницях).

Відносну похибку досліджуваного об'ємного витратоміра δ_o розраховують за формулою:

$$\delta_o = \frac{(q_{BO} - q_o)}{q_o} \cdot 100\% , \quad (3.20)$$

де q_{BO} - об'ємна витрата, яка виміряна досліджуваним об'ємним витратоміром.

При перевірці лічильників маси газу розраховують масу еталонно згенерованого робочого середовища M_E шляхом множення отриманого результату за формулою (3.15) на тривалість τ вимірюваного процесу і розраховують похибку лічильника масової витрати газу за формулою:

$$\delta_M = \frac{(M - M_E)}{M_E} \cdot 100\%, \quad (3.21)$$

де M – маса вологого газу, яка виміряна лічильником маси газу.

При перевірці лічильників газу (лічильники об'єму газу) розраховують еталонний об'єм згенерованого вологого робочого середовища V_{EO} шляхом множення результату, отриманого за формулою (3.18), на тривалість τ вимірюваного процесу і визначають похибку лічильника об'єму газу за формулою:

$$\delta_V = \frac{(V_L - V_{EO})}{V_{EO}} \cdot 100\%, \quad (3.22)$$

де V_L – об'єм вологого газу, який виміряний лічильником об'єму газу.

Далі для відтворення іншої витрати газу змінюють положення задавача витрати 21 і вимірювальний цикл з обчисленням повторюють. При цьому також для проведення досліджень при інших ступенях зволоженості робочого середовища змінюють режим роботи ультразвукового генератора 15 за допомогою регулятора 16.

Запропонована установка [96] завдяки своїй реалізації на різних робочих середовищах (повітря, природний газ) і функціонуванні на вологовмісних цих середовищах значно підвищує точність і достовірність визначення метрологічних характеристик витратомірів і лічильників за їх реальних умов експлуатації. Практичне застосування запропонованої установки дозволяє експериментально вивчати вплив вологості газоплинних робочих середовищ на метрологічні характеристики засобів витратовимірювальної техніки різних принципів дії, як приклад, тахометричних, термоанемометричних, ультразвукових, вихорових та інших.

3.3 Експериментальні дослідження впливу вологого потоку на роботу термоанемометрів при вимірюванні витрати та об'єму

Теоретичним обґрунтуванням для проведення експериментальних досліджень можуть бути результати моделювання впливу вологості газів на їх

теплофізичні характеристики, що описано авторами в [71]. Ці дослідження є необхідними, бо вихідний сигнал термоанемометрів залежить від теплопровідності і теплоємності робочого середовища, а також гідродинамічних характеристик його потоку. Разом з тим в цих дослідженнях не відображений безпосередній вплив вологи на результати вимірювання витрати газу.

Відомі також дослідження щодо впливу вологи на результати вимірювання об'єму і витрати природного газу [52]. При цьому метою дослідження ставилося визначення впливу двофазового (рідинної та газової фази) складу природного газу на перепад тиску при стандартному і спеціальному звужувальному пристрої. Дослідження стосувалися стандартних діафрагм та спеціальних звужувальних пристроїв з різними формами і видами отворів в них, наприклад, секторно-кільцевого типу і декількох наборів отворів еліпсоподібного виду. Використовувані алгоритми в публікації стосуються вимірювання двофазних потоків, в яких волога знаходиться вже в скрапленому стані, тобто в стані насичення. Дослідження не стосуються визначення впливу пароподібної частини вологи в потоці. Тому цей результат не може бути використаний згідно поставленої нами задачі дослідження.

Алгоритм роботи установки для дослідження впливу вологи на покази термоанемометрів описується рівнянням, виходячи із закону балансу масової витрати газу:

$$Q_{m2} = Q_{m1} + Q_{\phi}, \quad (3.23)$$

де Q_{m2} – масова витрата на виході установки, kg/s; Q_{m1} – масова витрата газу на вході установки, kg/s; Q_{ϕ} – масова витрата вологи (водяної пари), яка генерується, kg/s.

Математично формулу (3.23) можна подати використовуючи концепції наведені у [94,95]:

На підставі формули (3.2) і з врахуванням конкретних значень тиску і температури в установці запишемо зв'язок маси вологи повітря на вході $m_{\phi 1K}$ і виході $m_{\phi 2K}$ установки за період формування контрольного об'єму повітря (вимірювальний цикл):

$$m_{\varphi 2K} = m_{\varphi 1K} + m_{\varphi g} . \quad (3.24)$$

Значення маси $m_{\varphi 1K}$ розраховуємо за формулою:

$$m_{\varphi 1K} = \varphi_1 \cdot V_K \cdot \rho_{\varphi \max} , \quad (3.25)$$

де $\rho_{\varphi \max}$ – густина насиченої водяної пари за даними тиску і температури повітря, яка визначається з довідкових даних, наприклад [61, 64].

Далі використаємо формулу, аналогічну до (3.25), для запису маси вологи на виході установки:

$$m_{\varphi 2K} = \varphi_2 \cdot V_K \cdot \rho_{\varphi \max} , \quad (3.26)$$

де φ_2 – відносна вологість повітря на виході установки.

Спільний розв'язок (3.24), (3.25), (3.26) дає можливість записати вираз для визначення вологи повітря на виході установки:

$$\varphi_2 = \varphi_1 + \frac{m_{\varphi g}}{V_K \cdot \rho_{\varphi \max}} . \quad (3.27)$$

Для вирішення поставленої задачі досліджень розроблена лабораторна установка, яка реалізує концепцію фізичного моделювання впливу вологи на роботу засобів обліку газу. Вона містить такі основні вузли: джерело витрати, пристрій генерування вологи, досліджувальна секція з термоанемометричним сенсором та система збору і обробки вимірювальної інформації. Функціональна схема лабораторної установки наведена в пункті 3.1 (рис.3.1), в якій для проведення експериментів використовувалося робоче середовище повітря.

Для оцінки продуктивності та охолоджувальної здатності водяної пари, створеної ультразвуковим генератором туману, було проведено ряд випробувань в експериментальній випробувальній установці, спеціально адаптованій для основної мети дослідження. Випробувальна установка складається з двох ліній генерування витрати “сухої” та ”вологої”, до кожної з ліній входять: генератори витрати, газові лічильники, труби-шланги відповідних діаметрів(12мм), на вологій лінії знаходиться ультразвуковий генератор вологи. Обидві лінії сходяться у секції змішування для рівномірного розподілу водяного туману, згенерованого

“вологою” лінією установки та подальшій подачі потоку на досліджувальну ділянку трубопроводу з установленим термоанемометричним сенсором.

Ультразвуковий генератор туману складається з компактного пристрою для створення туману, оснащеного ультразвуковим перетворювачем, що занурений в резервуар із відповідним рівнем води, де відбувається процес розпилення води відповідно до встановленої інтенсивності генерування водяного туману. Ультразвуковий перетворювач складається з п'єзоелектричного кристала, з'єданого з керамічним диском діаметром 16 мм. При зануренні у воду перетворювач здатний трансформуватися високочастотні електронні сигнали, як правило, в діапазоні від 0,8 до 1,65 МГц, у високочастотні механічні коливання на диску. Коли вода рухається відно до рухів керамічного диска, вона не в змозі встигнути за його високочастотними коливаннями. В результаті цього вода відривається від керамічного диску і внаслідок негативних коливань створює перехідний вакуум, де вода кавітує та перетворюється на пару [89]. Потім, внаслідок позитивної фази коливання, водяна пара приводиться в рух високим тиском хвилі через поверхню води. У цьому адіабатичному процесі утворюється дрібний водяний туман із крапельками діаметром в масштабі кількох десятків мікрон, які легко затримуються в потоці повітря.

Контроль кількості розпиленої води, виробленої ультразвуковим генератором туману, встановлюється потенціометром, внаслідок контрольною зміни напруги, яка живиться ультразвуковий елемент, також інтенсивність виходу згенерованого водяного туману залежить від встановленої швидкості потоку, що поступає з генератора витрати у “вологію лінії”. Цей генератор створює необхідний позитивний тиск у резервуар для виведення з нього розпиленої води. Контроль швидкості здійснюється за допомогою регулювальної плати мікроконтролера, для обмеження номінальної швидкості генерування витрати (запрограмована на виконання цього налаштування шляхом безпосереднього керування потенціометром з подальшим відображення оновленої кількості обертів на хвилину на екрані комп'ютера).

Згенерована кількість витрати із “сухої” та ”вологої” ліній поступає у секцію змішування, де напірними трубками потік вирівнюється для змення турбулентності, щоб в подальшому поступити на чутливий термоанемометричний сенсор вимірювального комплексу. Після проходження досліджувальної зони потік поступає у розсіювальну зону, для контрольованого виводу в атмосферу.

Технічні характеристики та умови експлуатації генератора водяного туману наведено у додатку В. На рис. 3.4 схематично зображено компоненти, які складають експериментальну установку: генератори витрати (1, 3), лічильники (2, 4), ультразвуковий генератор туману (5), досліджувальну зону з термоанемометром (6) та розсіювальну зону (7). Наглядно зображено шлях повітряного потоку по двом лініям, через камеру розпилення, яка переносить і впорскує розпилений водяний туман, також зображено краплі води зволожувальній, змішувальній, досліджувальній та розсіювальних секціях установки.

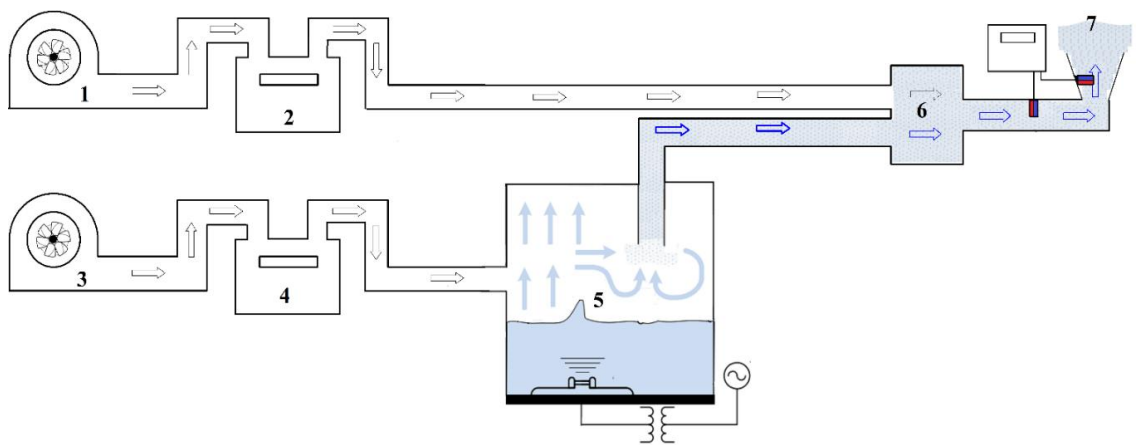


Рисунок 3.4 – Схематичний вигляд основних компонентів експериментальної установки для дослідження впливу вологи на термоанемометричний сенсор

Експериментальна установка (рис. 3.5), використовувалася для проведення випробувань впливу згенерованої вологи ультразвуковим генератором. Сопло вздовж стільникової перегородки (антитурбулентного екрану), пристосованого до входу (сама ліва частина тунелю), забезпечує рівномірні, стабільні профілі швидкості повітряного потоку. Дослідна ділянка аеродинамічної труби має

довжину 0,15 м з поперечним перерізом 0,0008 м². Швидкість повітряного потоку індукованої тяги забезпечується двома турбінними генераторами з потужністю 0,5 кВт, розташованим на вході “сухої” та ”вологої” ліній, і підтримується на різних рівнях за допомогою приводу зі змінною частотою. Дозволяє задавати різні швидкості повітряного потоку в тунелі в межах 0–3 м/с. Це призводить до максимальної доступної об’ємної витрати повітря 8,64 м³/год((3x0,0008)x3600).

Для визначення масової витрати води, що генерується у вигляді туману та віддається у потік, використовувався гравіметричний метод. Він складався з вимірювання ваги води, що знаходиться у резервуарі генератора туману за відомий інтервал часу, шляхом зважування резервуара до та після проведення експерименту.

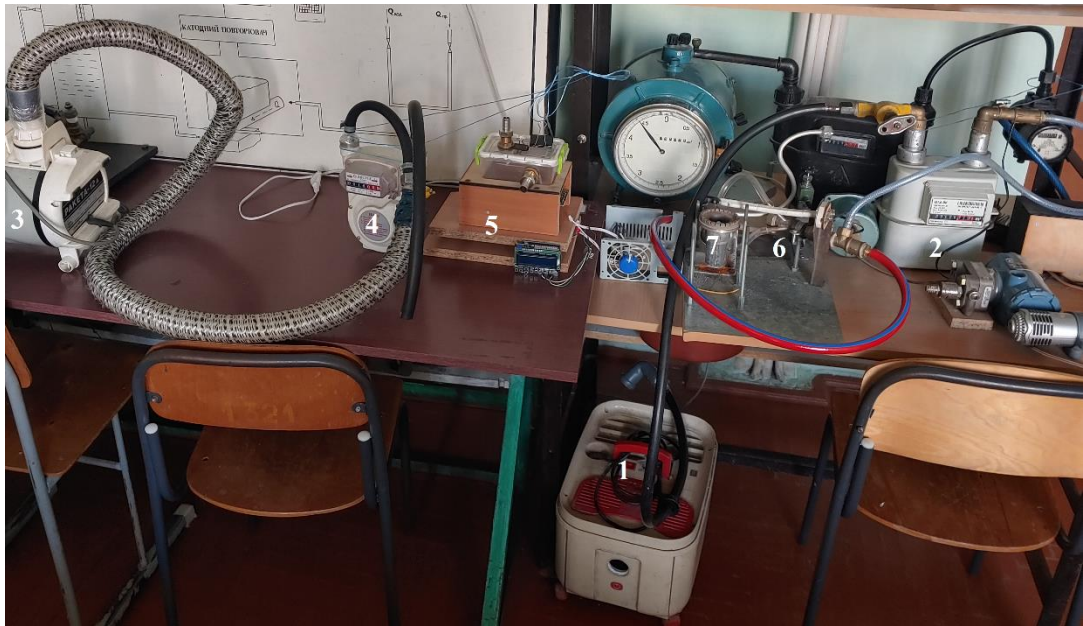


Рисунок 3.5 – Випробувальна установка для дослідження впливу вологи на термоанемометричний сенсор

Згодом було визначено розподіл крапель за розміром щодо сукупності крапель води, створених генератором туману, щоб визначити відповідну граничну умову для моделі генерування вологи. Задля визначення характеристик розподілу крапель був використано метод швидкісного фотографування, який полягав у безпосередньому фотографуванні крапель камерою з високою роздільною здатністю. Для заморожування руху крапель використовувався автоматичний

спалах в момент, коли вони викидалися з секції генерування. Фотографії були зроблені за допомогою розташування спалаху з протилежного боку від камери та використання дистанційного тригера, утримуючи водяний туман, що тече між двома пристроями. Фотографії, зроблені камерою, мають вихідну роздільну здатність 4032×3024 пікселів і були оброблені за допомогою програмного забезпечення для редагування графіки для підвищення контрастності та чіткості зображення. Подальшу техніку аналізу зображень використовували для вимірювання розміру краплі за допомогою програмного забезпечення ImageJ. Для оцінки діаметра краплі використовували двовимірну круглу площу, зареєстровану на фотографіях, і фільтр сферичності в діапазоні від 0,8 до 1, щоб мінімізувати похибку вимірювання. На рис. 3.6 наведено приклад високошвидкісної фотографії, де рух крапель фіксується для визначення їхнього діаметра та розподілу розмірів за допомогою цифрової обробки зображень.

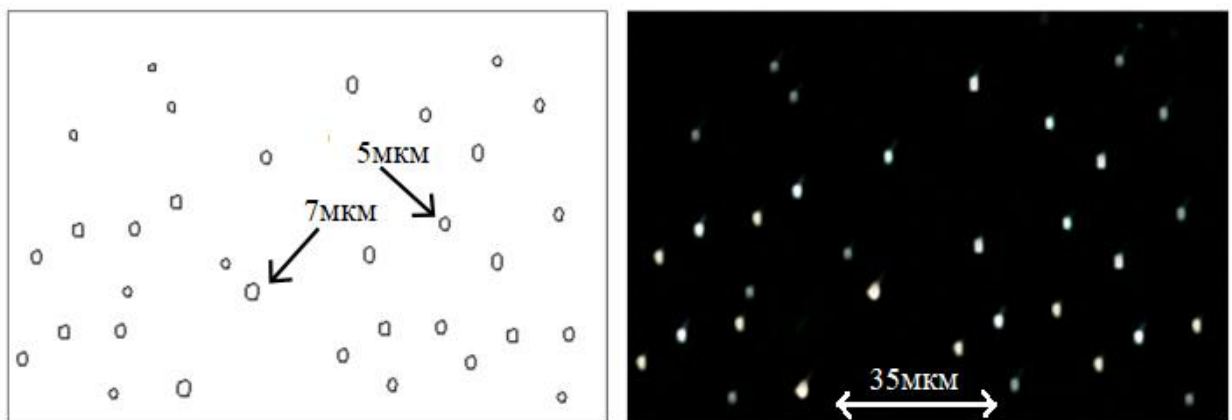
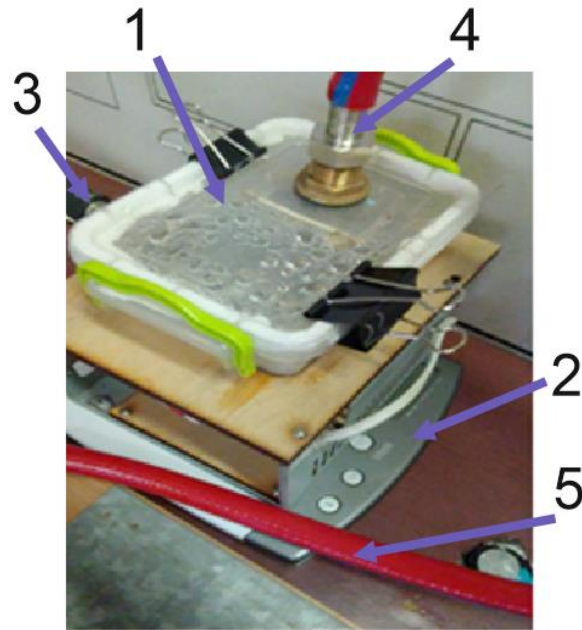


Рисунок 3.6 – Приклад високошвидкісної фотографії, що показує розподіл крапель за діаметром і середньою відстанню між ними

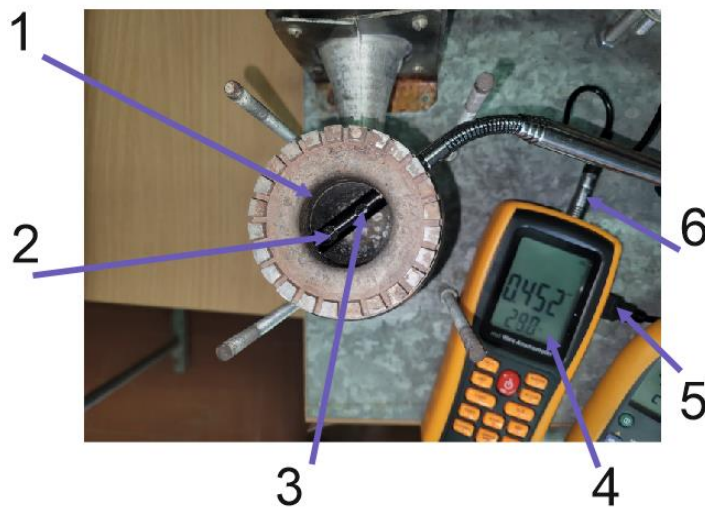
Дана цифрова обробка та реальне фото, приведені до обчислювальних вимог програми вказують, що згенерований туман дрібно дисперсний та зумовлює затримання крапель води у повітря. Тим самим збільшуючи поточну вологість зволоженого повітря, що поступає на досліджувальну секцію із термоанемометричним сенсором.

Конструктивне виконання окремих вузлів установки показано на рис. 3.7 – 3.9.



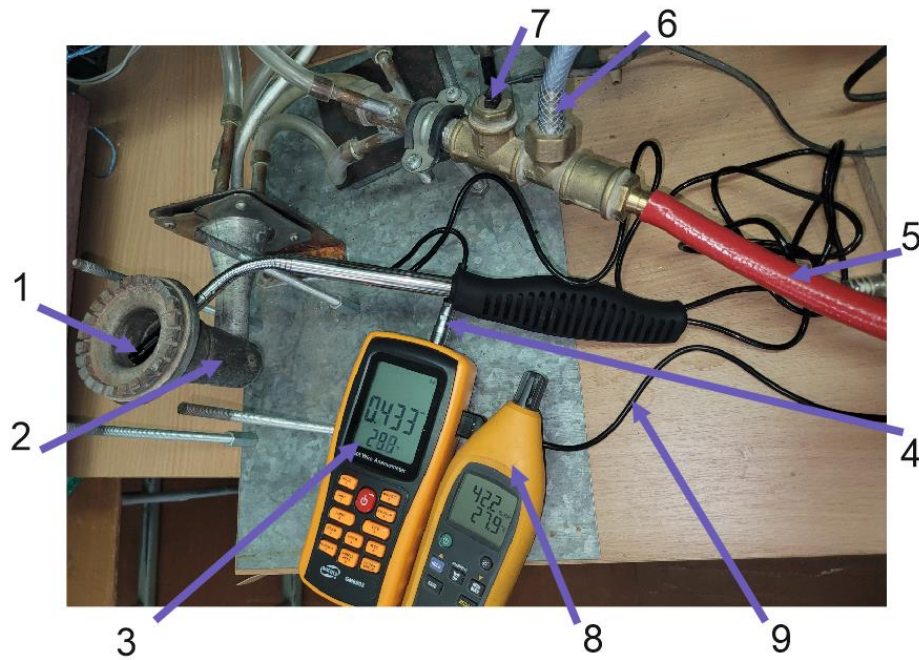
1 – ємність з водою і пристроєм генерування вологи; 2 – вага; 3 – вхідний патрубок сухого повітря; 4 – вихідний патрубок вологого повітря; 5 – лінія подачі вологого повітря до дослідної ділянки.

Рисунок 3.7 – Конструкція секції генерування вологи



1 – вихідний патрубок дослідної ділянки; 2 – термоанемометричний сенсор; 3 – сенсор температури термоанемометра; 4 – блок візуалізації термоанемометра; 5 – лінія зв'язку термоанемометра з персональним комп'ютером; 6 – лінія зв'язку сенсорів термоанемометра з блоком візуалізації

Рисунок 3.8 – Конструкція монтажу термоанемометра при дослідженнях



1 – сенсор термоанемометра; 2 - вихідний патрубок дослідної ділянки; 3 - блок візуалізації термоанемометра; 4 - лінія зв'язку сенсорів термоанемометра з блоком візуалізації; 5 - лінія подачі вологого повітря до дослідної ділянки; 6 – імпульсна лінія вимірювання тиску; 7 – лінія вимірювання температури; 8 – портативний вологомір навколишнього середовища; 9 - лінія зв'язку термоанемометра з персональним комп'ютером

Рисунок 3.9 - Конструкція дослідної ділянки установки з вимірювальними приладами

Дослідження проводилися з використанням термоанемометра моделі GM8903 фірми Venetech з діапазоном вимірювання швидкості потоку від 0 до 30,0 m/s з похибкою $\pm 3\%$ при температурі повітря (0 ... 45) °C і з можливістю підключення до персонального комп'ютера.

Для вимірювання вологості навколишнього повітря використовувався вологомір моделі Fluke 971 з діапазоном вимірювання (10 ... 90) % відносної вологості з похибкою $\pm 3\%$ при температурі повітря (5 ... 50) °C.

Експериментальні дослідження проводилися при витраті повітря в установці $4 \cdot 10^{-4}$ m³/s (1,44 m³/h), температурі 18 °C, надлишковому тиску 2 kPa, відносна вологість на вході установки 42 %. Для вимірювання витрати використовувався

лічильник газу моделі Premagas ВК типорозміру G1,6 з похибкою вимірювання об'єму $\pm 3\%$ в діапазоні від Q_{\min} до $0.2Q_{\max}$ і $\pm 2\%$ в діапазоні від $0.2Q_{\max}$ до Q_{\max} в комплекті з цифровим хронометром. Вузол генерування вологи забезпечував її подачу в потік з масовою витратою до $2,5 \cdot 10^{-3}$ g/s. Відлік генерованої вологи здійснювався цифровою вагою з дискретністю 0,01 g. (додаток Б).

Результати вимірювання витрати термоанемометром для чотирьох досліджуваних режимів показані на рис. 3.10

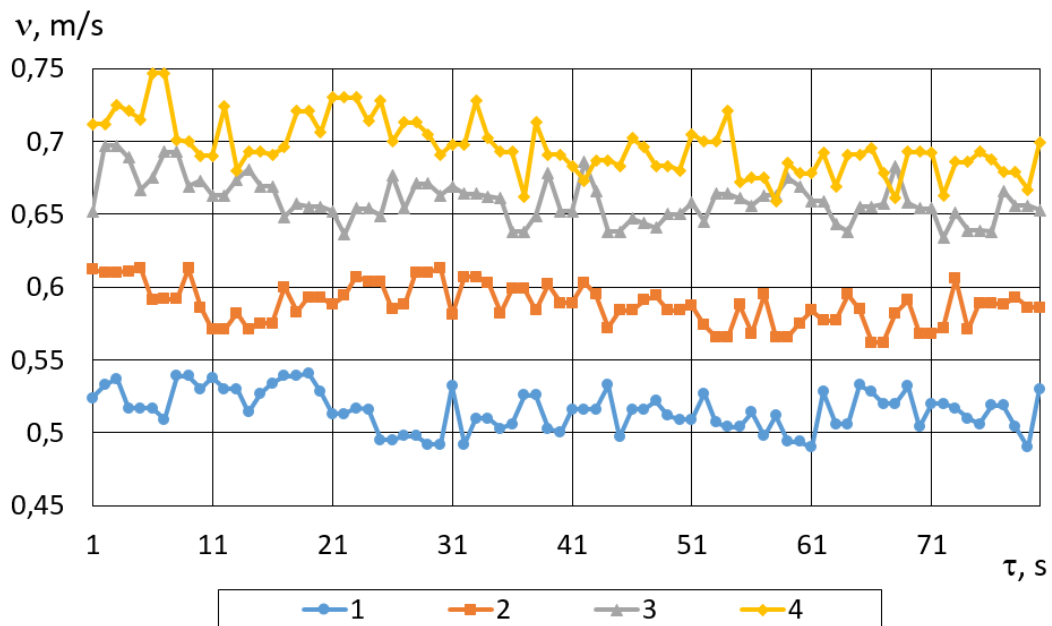


Рисунок 3.10 – Осцилограми швидкості потоку в термоанемометрі без генерування вологи (лінія 1) і при генеруванні вологи $1,11 \cdot 10^{-3}$ g/s (лінія 2), $1,66 \cdot 10^{-3}$ g/s (лінія 3), $2,22 \cdot 10^{-3}$ g/s (лінія 4)

Розрахунок витрати Q_{TA} , яку вимірює термоанемометр визначалась за формулою:

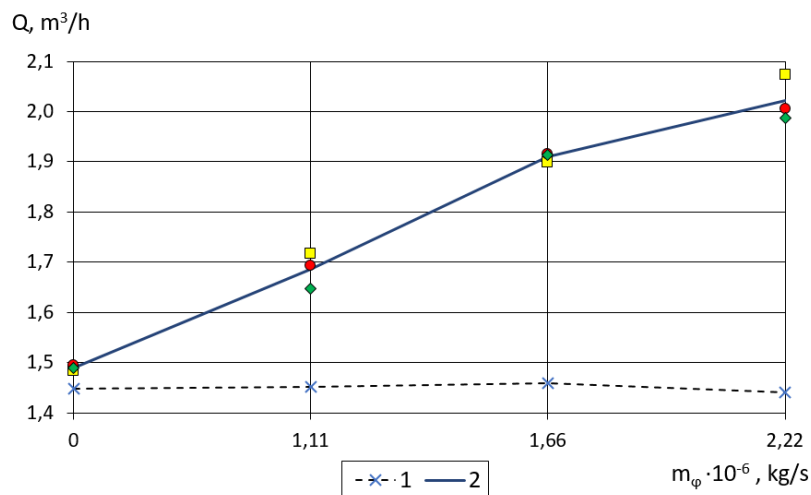
$$Q_{TA} = v \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \text{ m}^3/\text{s}, \quad (3.28)$$

де v - лінійна швидкість потоку повітря у вихідному патрубку дослідної ділянки, m/s; d - внутрішній діаметр вихідного патрубку дослідної ділянки, який становить 32 mm.

Враховуючи, що при експерименті вологість навколишнього повітря становила 42 %, то використання формули (3.27) при формуванні контрольного об'єму $V_K = 0,036 \text{ m}^3$ і густині насиченої водяної пари $\rho_{\text{фmax}} = 1,536 \cdot 10^{-2} \text{ kg/m}^3$ [6] дозволяє розрахувати відносну вологість повітря, яке проходить через термоанемометр. Ці значення відповідно будуть становити 62 % при генеруванні вологи $1,11 \cdot 10^{-3} \text{ g/s}$ (лінія 2, рис. 3.10), 72 % при генеруванні вологи $1,66 \cdot 10^{-3} \text{ g/s}$ (лінія 3, рис. 3. 10), 82 % при генеруванні вологи $2,2 \cdot 10^{-3} \text{ g/s}$ (лінія 4, рис. 3. 10).

Усереднення миттєвих витрат термоанемометра $Q_{\text{ТА}}$ за період пропуску контрольного об'єму дозволяє визначити середні значення об'ємних витрат вимірних термоанемометром, які будуть становити 1,48 м3/х (лінія 1, рис. 3.10), 1,69 м3/х (лінія 2, рис. 3.10), 1,90 м3/х (лінія 3, рис. 3. 10), 2,03 м3/х (лінія 4, рис. 3. 10).

Вплив вологи на вимірювання об'ємної витрати термоанемометром здійснюється шляхом порівняння результатів вимірювання витрати термоанемометром з результатами визначення витрати лічильником газу і хронометром. Це показано на рис. 3.11.



Риунок 3.11 - Результати вимірювання витрати термоанемометром (лінія 2) і з використанням лічильника газу (лінія 1)

На рис. 3.11 наведені по три результати вимірювання витрати термоанемометром, які вказані різними маркерами.

Збільшення вологи потоку повітря на роботу термоанемометра приводить до зростання результатів вимірювання ним об'ємної витрати на 17,4 % при генеруванні вологи $1,11 \cdot 10^{-3}$ g/s, на 31,9 % при генеруванні вологи $1,66 \cdot 10^{-3}$ g/s, на 40,9 % при генеруванні вологи $2,2 \cdot 10^{-3}$ g/s.

Розходження результатів вимірювання витрати при відсутності генерування вологи становить 2,7 %, що є в межах похибки термоанемометра і лічильника газу.

Розроблена схема установки для дослідження впливу вологи на покази термоанемометра і на ній проведені експериментальні дослідження функціонування термоанемометра на повітрі різної вологості.

Експериментально встановлено [97] нелінійний вплив зростання вологості потоку повітря на роботу термоанемометра на витраті $1,44$ m³/h, що приводить до збільшення вимірної об'ємної витрати до 40,9 % при генеруванні вологи $2,2 \cdot 10^{-3}$ g/s.

Виявлені флуктуації результатів вимірювання витрати термоанемометром величиною до (8 ... 10) %. Причина виникнення флуктуацій потребує подальших досліджень умов функціонування лабораторної установки.

Напрямки подальших досліджень будуть спрямовані на метрологічні дослідження впливу вологи на роботу термоанемометра на інших витратах. Потребує також дослідження впливу вологи на роботу термоанемометрів інших моделей.

РОЗДІЛ 4

МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ УДОСКОНАЛЕНОГО МЕТОДУ ТА ЗАСОБУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИРОДНОГО ГАЗУ

В даному розділі представлено результати метрологічного аналізу удосконаленого методу та засобу для вимірювання енергетичних характеристик природного газу. Враховуючи вплив вологості на теплофізичні властивості газу, виникає необхідність у розробці та метрологічному обґрунтуванні нових методів і засобів вимірювання.

Мета даного розділу полягає в проведенні метрологічного аналізу удосконаленого методу та засобу для вимірювання енергетичних характеристик природного газу. Особлива увага буде приділена оцінці невизначеності вимірювань масових витрат вологого повітря на еталонній установці та аналізу похибок вимірювання об'ємних витрат.

4.1 Метрологічні дослідження еталонної установки для відтворення масових витрат вологого повітря на базі теорії невизначеності

На сьогоднішній час точність та відтворюваність фізичних величин є актуальними у сфері обліку газоплинних середовищ. Достатньої уваги потребують метрологічні дослідження вимірювання витрати з врахуванням різних фізико-хімічних характеристик робочого середовища, які здійснюються за допомогою еталонних установок відтворення об'єму та витрати газових середовищ. Вони реалізують наукову і методологічну основу при визначенні метрологічних характеристик для таких засобів вимірювальної техніки як витратоміри та лічильники газу.

Більшість еталонних засобів вимірювання витрати газу, як свідчать дослідження [2, 98, 99], функціонують на сухому повітрі або сухому природному

газі. Такий підхід зумовлений низкою факторів. По-перше, нормативні документи [6-8] регламентують використання сухого повітря в еталонних установках для повірки лічильників газу. По-друге, наявність вологи в природному газі знижує його теплотворну здатність та сприяє утворенню гідратів, що негативно впливає на роботу газових мереж. Високі вимоги до сухості газу в еталонних системах пов'язані з необхідністю забезпечення стабільності метрологічних характеристик та уникнення похибок вимірювання, спричинених зміною складу газу. Наявність вологи в природному газі на стадії видобування пов'язане з походженням та режимами експлуатації газових родовищ, а на стадії доставки до кінцевого споживача залежить від рівня осушення на промислових комплексах та безпосередньо від стану газотранспортної системи та умов в яких вона функціонує.

Поряд з цим при видобутку газу, який практично завжди є вологим, для його обліку може застосовуватися нові технології вимірювання, наприклад, з використанням термоанемометричного методу [30]. Засоби вимірювання цього типу є відносно простими за конструкцією і характеризуються достатньою точністю і чутливістю вимірювання багатокомпонентних потоків та мають невелику інерційність. Крім того, з точки зору авторів, вони в перспективі можуть використовуватися як вологоміри газоплинних середовищ.

Теоретичні аспекти впливу вологості на роботу термоанемометричних перетворювачів викладено в [71], що визначає необхідність практичного підтвердження теоретичних досліджень. Тому актуальними є розроблення та метрологічні дослідження еталонних установок для відтворення масових витрат вологого повітря, що є метою висвітлення результатів дослідження даної публікації.

Розроблено принципова схема установки, яка передбачає генерування діапазону витрат повітря з різними ступенями вологості. До складу установки входить джерело витрати (повітродувка), що може забезпечувати різні витратні режими повітря за рахунок дроселювання потоку заслінкою, яка змонтована на його виході. Джерело витрати послідовно під'єднане до еталонного лічильника газу, який в комплекті з хронометром дозволяє визначати об'ємну витрату повітря

в установці. Вихід з еталонного лічильника послідовно підключений до ультразвукового генератора вологи, який насичує вологою повітря, яке проходить через газову фракцію ємності з водою. Зволожений потік повітря поступає на досліджуваний засіб вимірювальної техніки, наприклад, термоанемометр. В установці вимірюється тиск і температура робочого середовища на її вході і виході, а також відносна вологість навколишнього середовища, яке поступає на вхід установки. Масове значення вологи, яке додається в потік витрати повітря в установці, визначається за допомогою мікропроцесорної тензорезистивної ваги.

Алгоритм функціонування установки з врахуванням відомих фізичних закономірностей зміни густини і парціального тиску водяної пари газової суміші передбачає реалізацію такого запропонованого авторами алгоритму у пункті 3.2 [94, 96]:

$$q_m = \frac{V}{\tau} \left(2,89 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_s \frac{P - \varphi \cdot P_{W_{\max}}}{T \cdot K_W} + \varphi \cdot \rho_{W_{\max}} \right) + \frac{m}{\tau}, \quad (4.1)$$

де q_m – масова витрата генерованого вологого повітря, kg/s; V – об'єм повітря, виміряного еталонним лічильником за час τ , м³; φ , P , T – відносна вологість, абсолютний тиск та абсолютна температура повітря за робочих умов установки (після генератора витрати повітря) (φ – безрозмірна одиниця; P – Pa; T – K); $P_{W_{\max}}$, $\rho_{W_{\max}}$ – парціальний тиск та густина водяної пари у насиченому стані за робочих умов установки (Pa, kg/m³ відповідно); K_W – коефіцієнт стисливості вологого повітря (навколишнього середовища) на вході установки (безрозмірна одиниця); ρ_s – густина повітря за стандартних умов, kg/m³; m – маса генерованої вологи за час τ , kg.

Для розрахунку коефіцієнта стисливості вологого повітря K_W можна застосовувати метод розрахунку, який враховує вміст водяної пари в газі з врахуванням методики [94] і її конкретизації з врахуванням того, що коефіцієнт стисливості водяної пари при низьких робочих тисках $K_{WV}=1$ [101]:

$$K_W = K_D + \frac{\varphi \cdot P_{W_{\max}}}{100 \cdot P} (1 - K_D), \quad (4.2)$$

де K_D – коефіцієнт стисливості сухого повітря за робочих умов установки .

Відносну похибку досліджуваного витратоміра δ можна експериментально розрахувати за формулою:

$$\delta = \frac{(q - q_m)}{q_m} \cdot 100, \% \quad (4.3)$$

де q – витрата, яка виміряна досліджуваним витратоміром.

Для оцінки невизначеності коефіцієнта стисливості вологого повітря можна використати наступні вирази для оцінювання вагових коефіцієнтів впливу складових, що входять у формулу (4.2):

$$\frac{\partial K_W}{\partial K_D} = 1 - \frac{P_{W \max} \cdot \varphi}{100 \cdot P}, \quad (4.4)$$

$$\frac{\partial K_W}{\partial \varphi} = - \frac{P_{W \max} \cdot (K_D - 1)}{100 \cdot P}, \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial K_{WV}}{P_{W \max}} = - \frac{\varphi \cdot (K_D - 1)}{100 \cdot P}, \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial K_W}{\partial P} = \frac{P_{W \max} \cdot \varphi \cdot (K_D - 1)}{100 \cdot P^2}. \quad (4.7)$$

Сумарну невизначеність для оцінювання коефіцієнта стисливості вологого газу можна згідно з [92] записати наступним виразом, оскільки табличні дані і похибка манометра та вологоміра характеризуються невизначеностями типу В, а експериментальні дані (вимірювання робочого тиску та відносної вологості) будуть характеризуватися невизначеністю типу А:

$$u_C(K_W) = \sqrt{\left(\frac{\partial K_W}{\partial K_D} \cdot u_B(K_D)\right)^2 + \left(\frac{\partial K_W}{\partial P} \cdot u_A(P)\right)^2 + \left(\frac{\partial K_W}{\partial P} \cdot u_B(P)\right)^2 + \left(\frac{\partial K_W}{\partial \varphi} \cdot u_B(\varphi)\right)^2 + \left(\frac{\partial K_W}{\partial \varphi} \cdot u_A(\varphi)\right)^2 + \left(\frac{\partial K_W}{\partial P_{W \max}} \cdot u_B(P_{W \max})\right)^2}. \quad (4.8)$$

Так як метрологічна модель еталонної установки побудована на теорії невизначеності та містить стандартні невизначеності типу А і В, які в своїй комбінації і будуть формувати сумарну та розширену невизначеності установки, що методично викладено у [92]

Невизначеності типу А визначаються параметрами, які підлягають експериментальному вивченню під час метрологічних досліджень. Це невизначеності об'єму вимірюного повітря еталонним лічильником $u_A(V)$, тривалості відтворення контрольного об'єму $u_A(\tau)$, маси генерованої водяної пари за період відтворення об'єму $u_A(m)$, відносної вологості повітря навколишнього середовища $u_A(\varphi)$. Ці невизначеності обчислюють за відомою формулою виду [100]:

$$u_A(F) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (F_i - \bar{F})^2}{n(n-1)}}, \quad (4.9)$$

де буквенне позначення F_i стосується параметрів об'єму вимірюного повітря V_i , тривалості відтворення об'єму робочого середовища τ_i , маси генерованої водяної пари m_i , відносної вологості повітря φ_i при i -тих вимірюваннях відповідно; \bar{F} – середнє арифметичне значення перелічених вище параметрів.

Невизначеності типу А визначаються параметрами, які підлягають експериментальному вивченню під час метрологічних досліджень. Це об'єм вимірюного повітря еталонним лічильником V (4.10), тривалість відтворення контрольного об'єму τ (4.11), маса генерованої водяної пари за період відтворення об'єму m (4.12), відносна вологість повітря навколишнього середовища φ (4.13):

$$u_A(V) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2}{n(n-1)}}, \quad (4.10)$$

$$u_A(\tau) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tau_i - \bar{\tau})^2}{n(n-1)}}, \quad (4.11)$$

$$u_A(m) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2}{n(n-1)}}, \quad (4.12)$$

$$u_A(\varphi) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\varphi_i - \bar{\varphi})^2}{n(n-1)}}, \quad (4.13)$$

де $V_i, \tau_i, m_i, \varphi_i$ – об'єм вимірюного повітря, тривалість відтворення об'єму, маса генерованої водяної, пари, відносна вологість повітря при i -ому вимірюванні; $\bar{V}, \bar{\tau}$

, \bar{m} , $\bar{\varphi}$ – середнє арифметичне значення об'єму вимірюного повітря, тривалості відтворення об'єму, маси генерованої водяної пари та відносної вологості повітря.

Невизначеності типу В формуються стандартними невизначеностями використаних засобів вимірювальної техніки $u_B(V)$, $u_B(\tau)$, $u_B(m)$, $u_B(\varphi)$, $u_B(T)$, $u_B(P)$, а також метрологічними характеристиками довідникових даних, які стосуються визначення парціального тиску водяної пари $u_B(P_{W\max})$, її густини у стані насичення $u_B(\rho_{W\max})$, густини повітря за стандартних умов $u_B(\rho_S)$. З врахуванням прийнятого рівномірного закону розподілу вимірюваних і табличних значень вказані невизначеності можна розрахувати як:

$$u_B(E) = \frac{E}{\sqrt{3}}, \quad (4.14)$$

де буквенне позначення E стосується значень граничної основної допустимої похибки засобів вимірювання об'єму δ_V , часу δ_τ , маси δ_m , відносної вологості δ_φ , температури δ_T , тиску δ_P , граничної основної допустимої похибки парціального тиску водяної пари $\delta_{P_{W\max}}$, густини у стані насичення водяної пари $\delta_{\rho_{W\max}}$, густини повітря за стандартних умов δ_{ρ_S} .

$$u_B(K) = \frac{\delta_K}{\sqrt{3}}, \quad (4.15)$$

$$u_B(P_{W\max}) = \frac{\delta_{P_{W\max}}}{\sqrt{3}}, \quad (4.16)$$

$$u_B(\rho_{W\max}) = \frac{\delta_{\rho_{W\max}}}{\sqrt{3}}, \quad (4.17)$$

$$u_B(\rho_S) = \frac{\delta_{\rho_S}}{\sqrt{3}}, \quad (4.18)$$

За результатами проведених теоретичних досліджень розроблені алгоритми розрахунку конкретизованих вище стандартних невизначеностей:

Розширену невизначеність при функціонуванні установки в режимі відтворення витрати $U_p(q)$ обчислюють за формулою [102]:

$$U_P(q) = k_0 \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N U_{Bk}^2}{3} + \sum_{l=1}^M U_{Al}^2}, \quad (4.19)$$

де U_{Bk} – невизначеності типу В k -тих складових, які формують стандартну невизначеність установки; U_{Al} – невизначеності типу А, зумовлені відтворюваністю результатів експериментального визначення конструктивних і робочих l -тих параметрів установки; k_0 – коефіцієнт охоплення, який формує числове значення розширеної невизначеності для відповідної вибраної довірчої ймовірності; N – кількість k -тих складових невизначеності типу В; M – кількість l -тих складових невизначеності типу А.

Сумарну невизначеність при функціонуванні установки в режимі відтворення витрати з врахуванням основних положень теорії невизначеності у вимірюваннях $u_C(q_m)$ обчислюють за формулою:

$$u_C(q_m) = \sqrt{\left(\frac{\partial q_m}{\partial V} \cdot u_C(V)\right)^2 + \left(\frac{\partial q_m}{\partial \tau} \cdot u_C(\tau)\right)^2 + \left(\frac{\partial q_m}{\partial \rho_s} \cdot u_B(\rho_s)\right)^2 + \left(\frac{\partial q_m}{\partial P} \cdot u_B(P)\right)^2 + \left(\frac{\partial q_m}{\partial \varphi} \cdot u_C(\varphi)\right)^2 + \left(\frac{\partial q_m}{\partial P_{W \max}} \cdot u_B(P_{W \max})\right)^2 + \left(\frac{\partial q_m}{\partial T} \cdot u_B(T)\right)^2 + \left(\frac{\partial q_m}{\partial K_W} \cdot u_C(K_W)\right)^2 + \left(\frac{\partial q_m}{\partial \rho_{W \max}} \cdot u_B(\rho_{W \max})\right)^2 + \left(\frac{\partial q_m}{\partial m} \cdot u_C(m)\right)^2} \quad (4.20)$$

Сумарні невизначеності $u_C(V)$, $u_C(\tau)$, $u_C(\varphi)$, $u_C(K_W)$, $u_C(m)$ оцінювання параметрів V , τ , K_W , m розраховують за формулою виду:

$$u_C(D) = \sqrt{\frac{u_B^2(D)}{3} + u_A^2(D)}, \quad (4.21)$$

де D – умовне позначення кожного із чотирьох вказаних вище параметрів.

Для оцінювання сумарної невизначеності масової витрати вологого повітря q_m , яке пройшло через досліджуваний прилад подамо такі вирази для оцінки вагових коефіцієнтів впливу складових, що входять у формулу (4.1):

$$\frac{\partial q_m}{\partial V} = \frac{\varphi \cdot \rho_{W \max} + \frac{2,89 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_S \cdot (P - P_{W \max} \cdot \varphi)}{K_W \cdot T}}{\tau}, \quad (4.22)$$

$$\frac{\partial q_m}{\partial \tau} = -\frac{m}{\tau^2} - \frac{V \cdot \left[\varphi \cdot \rho_{W \max} + \frac{2,89 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_S \cdot (P - P_{W \max} \cdot \varphi)}{K_W \cdot T} \right]}{\tau^2}, \quad (4.23)$$

$$\frac{\partial q_m}{\partial \rho_S} = \frac{2,89 \cdot 10^{-3} \cdot V \cdot (P - P_{W \max} \cdot \varphi)}{K_W \cdot T \cdot \tau}, \quad (4.24)$$

$$\frac{\partial q_m}{\partial P} = \frac{2,89 \cdot 10^{-3} \cdot V \cdot \rho_S}{K_W \cdot T \cdot \tau}, \quad (4.25)$$

$$\frac{\partial q_m}{\partial \varphi} = \frac{V \cdot \left(\rho_{W \max} - \frac{2,89 \cdot 10^{-3} \cdot P_{W \max} \cdot \rho_S}{K_W \cdot T} \right)}{\tau}, \quad (4.26)$$

$$\frac{\partial q_m}{\partial P_{W \max}} = -\frac{2,89 \cdot 10^{-3} \cdot V \cdot \varphi \cdot \rho_S}{K_W \cdot T \cdot \tau}, \quad (4.27)$$

$$\frac{\partial q_m}{\partial T} = -\frac{2,89 \cdot 10^{-3} \cdot V \cdot \rho_S \cdot (P - P_{W \max} \cdot \varphi)}{K_W \cdot T^2 \cdot \tau}, \quad (4.28)$$

$$\frac{\partial q_m}{\partial K_W} = -\frac{2,89 \cdot 10^{-3} \cdot V \cdot \rho_S \cdot (P - P_{W \max} \cdot \varphi)}{K_W^2 \cdot T \cdot \tau}, \quad (4.29)$$

$$\frac{\partial q_m}{\partial \rho_{W \max}} = \frac{V \cdot \varphi}{\tau}, \quad (4.30)$$

$$\frac{\partial q_m}{\partial m} = \frac{1}{\tau}. \quad (4.31)$$

Розширену невизначеність установки обчислюють за формулою :

$$U = k_0 \cdot u_C(q_m), \quad (4.32)$$

де k_0 – коефіцієнт охоплення, що формує числове значення розширеної невизначеності для відповідного рівня довіри, який для 95 % при відсутності

кореляційних зв'язків між вимірювальними параметрами можна прийняти рівним двом.

Розрахунок бюджету невизначеності розробленої установки наведено в табл.1.

Таблиця 4.1 Бюджет невизначеності установки для відтворення масових витрат вологого повітря

Вимірювана величина x_i і її розмірність	Оціночне значення	Значення невизначеності типу А, $u_A(x_i)$	Похибка вимірювання, $\delta(x_i)$	Коефіцієнт чутливості $\partial q_m / \partial x_i$		Значення невизначеності типу В, $u_B(x_i)$	Значення сумарної невизначеності, $u_C(x_i)$
				Формула алгоритму розрахунку	Результат		
V, m^3	$5,5 \cdot 10^{-2} m^3$	$2,44 \cdot 10^{-5} m^3$	$\pm 0,2 \cdot 10^{-3} m^3$	(4.22)	$6,09 \cdot 10^{-3} kg/(s \cdot m^3)$	$1,16 \cdot 10^{-4} m^3$	$7,1 \cdot 10^{-5} m^3$
τ, s	200 s	$7,05 \cdot 10^{-2} s$	$\pm 0,1 s$	(4.23)	$-1,75 \cdot 10^{-6} kg/(s^2)$	$5,77 \cdot 10^{-2} s$	$7,79 \cdot 10^{-2} s$
$\rho_s, kg/m^3$	1,20 kg/m^3	—	$\pm 1 \cdot 10^{-5} kg/m^3$	(4.24)	$2,76 \cdot 10^{-4} m^3/s$	$5,77 \cdot 10^{-6} kg/m^3$	—
P, Pa	$1,03 \cdot 10^5 Pa$	39,01 Pa	$\pm 100 Pa$	(4.25)	$3,27 \cdot 10^{-9} kg/(s \cdot Pa)$	57,74 Pa	—
φ	0,5	$1,98 \cdot 10^{-4}$	$\pm 5 \cdot 10^{-3}$	(4.26)	$-2,88 \cdot 10^{-6} kg/s$	$2,89 \cdot 10^{-3}$	$1,68 \cdot 10^{-3}$
P_{Wmax}, Pa	2335,34 Pa	—	$\pm 0,98 Pa$	(4.27)	$-1,63 \cdot 10^{-9} kg/(s \cdot Pa)$	$5,66 \cdot 10^{-1} Pa$	—
T, K	293 K	—	$\pm 0,1 K$	(4.28)	$-1,14 \cdot 10^{-6} kg/(s \cdot K)$	$5,77 \cdot 10^{-2} K$	—
K_W	0,9996	—	—	(4.29)	$-3,33 \cdot 10^{-4} kg/s$	—	$5,77 \cdot 10^{-5}$
$\rho_{Wmax}, kg/m^3$	$17,29 \cdot 10^{-3} kg/m^3$	—	$\pm 1 \cdot 10^{-5} kg/m^3$	(4.30)	$1,38 \cdot 10^{-4} m^3/s$	$2,89 \cdot 10^{-6} kg/m^3$	—
m, kg	$3 \cdot 10^{-3} kg$	$9,94 \cdot 10^{-7} kg$	$\pm 1 \cdot 10^{-6} kg$	(4.31)	$5 \cdot 10^{-3} s^{-1}$	$5,77 \cdot 10^{-7} kg$	$1,05 \cdot 10^{-6} kg$

З врахуванням того, що сумарна невизначеність за (4.20) становить $u_C(q_m) = 4,96 \cdot 10^{-7} kg/s$, то розраховане значення абсолютної за (4.32) розширеної

невизначеності буде становити $U = 9,92 \cdot 10^{-7}$ kg/s. При цьому відносна розширена невизначеність (у відсотках) згідно вибраних оціночних значень, наведених в табл. 1, кількісно оцінюється як $U_{\Gamma} = \pm 0,28$ % за умови, що розраховане за (4.1) $q_m = 3.502 \cdot 10^{-4}$ kg/s [105].

За результатами проведених теоретичних досліджень розроблені алгоритми розрахунку стандартних невизначеностей вимірювання контрольного об'єму еталонної установки, часу його відтворення, маси генерованої вологи, відносної вологості робочого середовища та робочих параметрів установки, а також алгоритм розрахунку коефіцієнта стисливості вологого повітря, що необхідно для метрологічного оцінювання еталонної установки для відтворення масових витрат вологого повітря. Наведені вирази для обчислення сумарної і розширеної невизначеностей при функціонуванні досліджуваної установки.

Розроблена модель стосується масового вимірювання вологого газу і дозволяє оцінювати вплив робочих умов установки на покази засобів масової витратовимірювальної техніки різних принципів дії, наприклад, термоанемометричних, ультразвукових. Застосування чисельного моделювання характеризує, що розширена невизначеність установки при правильному виборі еталонних засобів та вимірювальних перетворювачів може знаходитися в межах $\pm(0,25-0,4)$ %, чим обґрунтовується можливість її застосування як робочих еталонів.

Розроблена метрологічна модель може бути застосована для оцінювання метрологічних характеристик еталонних установок з функціонуванням на різних видах газоплинних середовищ, в тому числі природного газу.

ВИСНОВКИ

На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень при вирішенні актуального науково-прикладного завдання у галузі вимірювання і контролю енергетичних та якісних параметрів природного газу, яке стосується удосконалення методу і технічних засобів для вимірювання енергетичних характеристик природного газу з використанням термоанемометрії :

1. Проведено аналіз методів, нормативних документів та засобів у сфері вимірювання і контролю енергетичних характеристик природного газу, за результатами якого здійснено вибір та обґрунтування напрямку розвитку методу вимірювання енергетичних характеристик природного газу з використанням термоанемометрії, який пропонує високу точність, швидкодію, широкий діапазон вимірювань та малу інерційність, а тому може безпосередньо вирішувати питання об'ємного та масового обліку газових середовищ.

2. Досліджено та розроблено математичну модель взаємозв'язку вологості природного газу та його теплофізичних характеристик, зокрема теплопровідності та теплоємності, що дає можливість реалізувати процес вимірювання енергетичних характеристик природного газу з використанням термоанемометричних сенсорів та врахуванням вологості досліджуваного газу.

3. Встановлено закономірності впливу компонентного складу та вологості природного газу на його теплофізичні характеристики. На базі встановлених закономірностей побудовано математичну модель та виведено апроксимаційні залежності для теплопровідності та теплоємності окремо взятого компонента в суміші при зміні вологості від 10 до 90%, в межах зміни 10% об'ємного вмісту базового складу газу та при фіксованих значеннях температури 20°C та тиску 0,1МПа .

4. Змодельовано функціонування термоанемометричних сенсорів за умов газоводневих сумішей, а саме вплив водню на теплофізичні характеристики газової суміші. Наведені алгоритми розрахунку теплофізичних характеристик природного газу показують можливість врахування водню в суміші з природним газом при

застосуванні методів термоанемометрії та вказують на зростання їх енергетичних характеристик.

5. Отримано математичну модель вимірювання масової і об'ємної витрати газу з врахуванням його вологості і коефіцієнта стисливості, що дає можливість створювати інформаційно-вимірювальні системи для вимірювання витрат і енергії вологих газів, в тому числі із використанням у їх складі термоанемометричних приладів та сенсорів. Розроблені концептуальні рішення цього фізичного моделювання впливу вологи на роботу витратовимірювальної техніки захищені патентом України.

6. Здійснено апробацію розробленого методу дослідження впливу вологого потоку на роботу термоанемометрів при вимірюванні витрати та об'єму, що підтвердило правильність теоретичних підходів і практичних рішень для створення випробувальної установки. В результаті встановлено, що термоанемометричні сенсори чутливі до вологих потоків, що в свою чергу розширює діапазон їх функціонування з погляду на якість та енергетичну цінність вологого потоку.

7. Здійснено метрологічний аналіз еталонної установки для відтворення масових витрат вологого повітря на базі теорії невизначеності. Застосування чисельного моделювання характеризує, що розширена невизначеність установки при правильному виборі еталонних засобів та вимірювальних перетворювачів може знаходитися в межах $\pm(0,25-0,4)$ %, чим обґрунтовується можливість її застосування як робочих еталонів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Прогноз економічного і соціального розвитку України на 2021-2023 роки: Постанова Кабінету Міністрів України від 29.07.2020 № 671. Офіційний вісник України. 2020. 113 с.
2. 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.
3. ДСТУ ISO 15112:2020. Природний газ. Визначення енергії. [Чинний від 01.09.2021]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2021. 68 с. (Національний стандарт).
4. Малісевич В. В. Контроль енергетичної цінності природного газу із застосуванням термоанемометричних перетворювачів : автореф. дис. ... канд. тех. наук. : 05.11.13. Івано-Франківськ, 2015. 20 с.
5. ДСТУ ISO 12213-1:2009. Природний газ. Обчислення коефіцієнта стисливості. Частина 1: Вступ і рекомендації. Київ, 2010. . [Чинний від 01.01.2011]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2011. 16 с. (Національний стандарт).
6. ДСТУ 9033:2020. Метрологія. Турбінні газові лічильники. Процедура повірки. Київ, 2020. . [Чинний від 01.11.2020]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2020. 61с. (Національний стандарт).
7. ДСТУ 9034:2020. Метрологія. Ротаційні газові лічильники. Процедура повірки. Київ, 2020. . [Чинний від 01.11.2020]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2020. 15 с. (Національний стандарт).
8. ДСТУ 9035:2020. Метрологія. Газові лічильники для побутових потреб та комерційного обліку. Процедура повірки. Київ, 2020. . [Чинний від 01.11.2020]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2020. 16 с. (Національний стандарт).

9. Прогноз економічного і соціального розвитку України на 2021-2023 роки: Постанова Кабінету Міністрів України від 29.07.2020 № 671. Офіційний вісник України. 2020. 113 с.

10. ДСТУ ISO 6976:2020 Природний газ. Обчислення теплоти згоряння, густини, відносної густини та числа Воббе на основі компонентного складу. [Чинний від 01.10.2021]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2021. 56 с. (Національний стандарт).

11. ISO 20765-2 Natural gas — Calculation of thermodynamic properties. Part 2: Single-phase properties (gas, liquid, and dense fluid) for extended ranges of application. 2015. 65 p.

12. Обсяги використання газу : веб-сайт. URL: <https://www.naftogaz.com/documents/disclosure-information> (дата звернення: 1.10.2020).

13. Що таке Енергетичні одиниці : веб-сайт. URL: <https://104.ua/ua/gas/id/scho-take-energetichni-odinici> (дата звернення: 1.10.2020).

14. Energy strategy : веб-сайт. URL: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-strategy_en (дата звернення 12.10.2020).

15. Каталог НД України: веб-сайт. URL: <https://csm.kiev.ua/nd/nd.php?b=1> (дата звернення 12.10.2020).

16. ДСТУ ISO 13686:2015: Природний газ. Показники якості. [Чинний від 01.09.2016]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2016. 42 с. (Національний стандарт).

17. ДСТУ ISO 14687:2021 Якість водневого палива. Технічні характеристики продукції Hydrogen fuel quality — Product specification [Чинний від 01.05.2021]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2021. 50 с. (Національний стандарт).

18. ДСТУ EN ISO 18453:2021 Природний газ. Кореляція між умістом вологи та точкою роси за водою [Чинний від 01.08.2022]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2022. 46 с. (Національний стандарт).

19. Kunz, O., Wagner, W. The GERG-2008 wide-range equation of state for natural gases and other mixtures. An expansion of GERG-2004. J. Chem. Eng. Data 57, 2012, 3032-3091.

20. ДСТУ ISO 6327:2004 Аналіз газів. Визначання точки роси природних газів. Конденсаційні гігрометри з охолоджуваною поверхнею. [01.07.2005]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2005. 10 с. (Національний стандарт).

21. Carbon Capture, Utilisation and Storage: веб-сайт. URL: <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage> (дата звернення 27.11.2020).

22. ISO/AWI 20765-3 Natural gas-Calculation of thermodynamic properties-Part 3: Two-phase properties (vapour-liquid equilibria) : веб-сайт. URL: <https://www.iso.org/standard/83617.html> (дата звернення 27.11.2020).

23. ISO/TR 29922:2017 Natural gas — Supporting information on the calculation of physical properties according to ISO 6976. 2017. 130 p.

24. 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.

25. Gas Chromatography: Principle, Parts, Steps, Procedure, Uses : веб-сайт. URL: <https://microbenotes.com/gas-chromatography/> (дата звернення 15.12.2020).

26. Федорченко С. В., Курта С. А.. Хроматографічні методи аналізу : навч. посіб. Івано-Франківськ: ПНУ, 2012. 146 с

27. Skoog, D.A., Holler, F.J. and Crouch, S.R. Principles of Instrumental Analysis. Sixth Edition, Brooks Cole, Belmont, 2007. 1039p

28. Calorimeter instrument : веб-сайт. URL: <https://www.britannica.com/technology/calorimeter> (дата звернення 15.12.2020).

29. IR Spectroscopy : веб-сайт. URL: <https://byjus.com/chemistry/infrared-spectroscopy/> (дата звернення 15.12.2020).

30. Середюк О.Є., Криницький О.С., Ткачук В.В. Сучасні тенденції розвитку термоанемометрії у сфері обліку природного газу. Український метрологічний журнал. 2020. № 3А. С. 51-55.

31. TSI thermal anemometry probes веб-сайт. URL: https://tsi.com/getmedia/2e3fafd5-8037-40a9-aa38-4fa05a1d3ef3/Hotwire_Catalog_2980465?ext=.pdf (дата звернення 17.12.2020).

32.. LOMAS C. G. Fundamentals of Hot Wire Anemometry. Cambridge University Press, 1986. 211 pp.

33. Rosemount™ 700XA Process Gas Chromatograph веб-сайт. URL: <https://www.emerson.com/documents/automation/product-data-sheet-700xa-process-gas-chromatograph-en-70652.pdf> (дата звернення 19.12.2020).

34. The CALVET line веб-сайт. URL: <https://setaramsolutions.com/app/uploads/sites/2/2023/03/EN-CALVET.pdf> (дата звернення 19.12.2020).

35. MAX-iR FTIR Gas Analyzer веб-сайт. URL: <https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/MSD/Specification-Sheets/max-ir-ftir-gas-analyzer-en-ps53597.pdf> (дата звернення 20.12.2020).

36. Honeywell HAF series веб-сайт. URL: <https://automation.honeywell.com/us/en/products/sensing-solutions/sensors/flow-sensors/haf-series-high-flow#resources> (дата звернення 20.12.2020).

37. Стеценко А. А., Недзельский С. Д., Павленко М. А. Побутові лічильники газу – ГОРН. *Приладобудування: стан і перспективи*: зб. тез доп. XVII міжнар. наук.-техн. конф., 15–16 травня 2018 р., Київ: НТУУ “КПІ” ПБФ, 2018. С. 207–208

38. Gas meter GORN веб-сайт. URL: <https://standart-pribor.com.ua/product/schyotchik-gaza-gorn> (дата звернення 21.12.2020).

39. Обух І. Я., Яцук Ю. В., Олесків Т. М. Інваріантний до температури довкілля термоанемометр для побудови газових лічильників. Східно-Європейський журнал передових технологій. 2014. № 70. С. 4–9.

40. 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. 131 –132.

41. Smart лічильник газу G1,6 RSE/1,2 LA веб-сайт. URL: <https://btk-center.com.ua/eshop/smart-schetchiki-gaza/smart-lichilnik-gazu-g1-6-rse-1-2-la-id35957.html> (дата звернення 25.12.2020).

42. British Petroleum statistical review of world energy 2024 веб-сайт. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/businesssites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2024.pdf> (дата звернення 07.03.2024)

43. Малісевич В.В., Середюк О.Є. Експериментальні дослідження термоанемометричного витратоміра при обліку природного газу за його енергетичною цінністю. Методи та прилади контролю якості. 2014. № 2 (33). С. 78–85

44. Рибіцький 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

45. Парціальний витратомір / О.Є. Середюк, В.В. Малісевич: пат. 99887 С2 Україна: МПК G01F 1/00 (2012.01). № а201114278; заявл. 02.12.11; опубл. 10.10.12, Бюл. № 19

46. Пристрій для вимірювання витрати та енергетичної цінності природного газу / М. П Кулик, О. Є. Середюк, Ю. З. Вашкурак, В. М. Мойсишин: пат. 117197 Україна: МПК (2006)G01N 25/20 (2006.01), G01F 1/46 (2006.01), G01F 22/00, G01K 17/08 (2006.01). № а 201704087; заявл. 24.04.2017; опубл. 25.06.2018, Бюл. № 12

47. Присяжнюк Л. О. Вдосконалення методів та засобів вимірювання енергетичних характеристик природного газу : дис...канд. тех. наук : 05.01.02 / ІФНТУНГ. Івано-Франківськ , 2021. 187 с.

48. Малісевич Н. М.. Вимірювання теплоти згоряння природного газу із застосуванням торцевих звужувальних пристроїв: дис...канд. тех. наук : 05.01.02 / ІФНТУНГ. Івано-Франківськ , 2020. 187 с.

49. Сорока Н.-А. Ю.Інформаційно-вимірювальне забезпечення робіт пов'язаних з декарбонізацією постачання природного газу: дис...канд. тех. наук : 05.01.02 / ІФНТУНГ. Івано-Франківськ , 2024. 196 с.

50. Koliienko A, Shkarovskiy A and Turchenko V. Interchangeability and standardization of the Parameters of combustible Gases when using Hydrogen Architecture and Engineering, 2022. Vol 7 (1) pp 33-45.

51. Gupalo O., Yeromin O., Kabakova L., Koliienko A., Kirsanov M. and Kulikov A. Prediction of fuel consumption and carbon dioxide emission when replacing gaseous fuels with renewable hydrogen or their mixture IOP Conference Series: Earth and Environmental Sci. 2024. Vol. 1348.

52. Tomaszewska-Wach, B.; Rzasa, M. A Correction Method for Wet Gas Flow Metering Using a Standard Orifice and Slotted Orifices. Sensors 2021, 21, 2291.

53. Лічильник газу / Лахер Штеффен, Ефф Ульріх, Браун Роберт.: пат. 110804 С2 Україна: МПК G01F 1/684, G01F 3/22, G01F 15/00 (2016.01). № а201305704; заявл. 12.08.2013; опубл. 25.02.2016, Бюл. № 4.

54. Андрійчук, І. В., Ткачук, В. В. Теоретико-прикладні засади економічної оцінки якісних характеристик природного газу. *Економічний простір*, 191, 2024. С. 264-267.

55 James B. Edson, Neil J. Williams. Encyclopedia of Ocean Sciences, edited by John H. Steele, Sarah A. Thorpe, and Karl K. Turekian, 3rd ed., vol. X, Academic Press, 2019, pp. 4306

56 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.

57. Золотовська О. В. Курс лекцій з теплотехніки: навч. посіб. О. В. Золотовська, А. М. Пугач, Г. В. Теслюк . Дніпро: ДДАЕУ, 2022. 274 с

58. Reid, Robert C., John M. Prausnitz, and Bruce E. Poling. The Properties of Gases and Liquids. 4th ed. New York: McGraw-Hill., 1987.. 753р..

59. ОНТП 51-1-85 Загальносоюзні норми технологічного проектування. Магістральні трубопроводи. Частина І. Газопроводи. 01.01.1986. 20с.

60. Хвостова О. В. Методика прогнозування процесів конденсації вологи та гідратуутворення в газопроводах. Технологічний аудит та резерви виробництва. 2014. № 1(3). С. 38-40.

61. Thermophysical Properties of Fluid Systems веб-сайт. URL: <https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid> (дата звернення 03.02.2021).

62. Ткачук В. В., Середюк О. Є. Дослідження впливу теплофізичних параметрів природного газу його термоанемометричних дослідженнях. Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості : зб. тез доп. всеукр. наук.-практ. конф. мол. уч. і студ., м. Івано-Франківськ, 8 жовт. 2020р. Івано-Франківськ, 2020. С. 220–221.

63. Середюк О. Є., Ткачук В. В., Саманів Л. В. Дослідження впливу вологості повітря на теплофізичні характеристики при функціонуванні термоанемометричних сенсорів. *Приладобудування та метрологія: сучасні проблеми, тенденції розвитку*: зб. тез IV всеукр. наук.-практ. конф., м. Луцьк, 29-30 жовт. 2020 р. Луцьк, 2020. С. 82–84.

64. CRC Handbook of Chemistry and Physics, 85th Edition. Front Cover. David R. Lide. CRC Press LLC: Boca Raton, FL. 2004. 2712 p

65 Середюк О. Є., Ткачук В. В. Моделювання впливу вологи природного газу при термоанемометричних вимірюваннях. *Прикладні науково-технічні дослідження*: зб. матер. V міжнар. наук.-практ. конф., м. Івано-Франківськ, 5–7 квіт. 2021 р. Івано-Франківськ, 2021. С. 222–224.

66. Прогноз економічного і соціального розвитку України на 2021-2023 роки: Постанова Кабінету Міністрів України від 29.07.2020 № 671. Офіційний вісник України. 2020. 113 с

67. 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

68. Serediuk O., Malisevych V. , Warsza Z. L. Termoanemometryczna metoda pomiaru wartości energetycznej gazu ziemnego. *Przemysł chemiczny*. 2017. V. 96. No. 11. P.2243–2246.

69. ДСТУ ГОСТ 8.585.2:2009 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)

70. Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. Fundamentals of Physics. Wiley, 2014. 10th ed. 1450 p.

71. Ткачук В. В., Середюк О. Є., Боднар Р. Т., Саманів Л. В. Моделювання впливу компонентного складу та вологості природного газу на його теплофізичні характеристики. *Перспективні технології та прилади*. 2021. № 18. С. 129–137.

72. How to convert relative humidity to absolute humidity веб-сайт. URL: <https://carnotcycle.wordpress.com/2012/08/04/how-to-convert-relative-humidity-to-absolute-humidity/> (дата звернення 13.04.2021).

73. Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions — The European Green Deal (COM(2019) 640 final, 11.12.2019)

74. A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe (2020). Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Brussels, 8.7. COM (2020) 301 final. P. 23

75. Stetsenko, A. A., Nedzelsky, S. D., Naumenko, V. A. The effect of hydrogen on the physical properties of natural gas and the metrological characteristics of its metering systems. *Metrology and Instruments*. 2019. № 6 (80). P. 45–50

76. Hassanpouryouzband, A., Joonaki, E., Edlmann, K. et al. Thermodynamic and transport properties of hydrogen containing streams. *Sci Data* 7, 222 (2020).

77. Карпаш М. О., Райтер П. М., Яворський А. В., Олійник А. П. та ін. Дослідження герметичності газорозподільних мереж у разі їх використання для постачання газоводневих сумішей. *Нафтогазова галузь України*. 2020. № 6 (47). С. 14–23

78. Сорока Б.С., П'яних К.Є., Згурський В.О., Горупа В.В., Кудрявцев В.С. Енергетичні та екологічні характеристики побутових газових приладів при використанні метано-водневої суміші, як паливного газ. *Нафтогазова галузь України*, 2020. № 6. С. 3–14.

79. Колієнко А. Г. Використання суміші природного газу і водню як палива в комунально-побутових, промислових, паливоспалювальних, теплогенеруючих установках. *Нетрадиційні технології*, 2021. №4 (52). С. 1–6

80. Perry, R.H., D.W. Green and J.O. Maloney. *Perry's chemical engineers' handbook*. 9th ed. McGraw-Hill, 2018. 2352 p .

81. F. Incropera and D. DeWitt, “Fundamentals of Heat and Mass Transfer,” 6th Edition, J. Wiley & Sons, New York, 2007. 1070 p.

82. Ткачук В. В., Середюк О. Є. Моделювання функціонування термоанемометричних перетворювачів за умов газоводневих сумішей. *Нафтогазова енергетика 2021: зб. матер. міжнар. конф., м. Івано-Франківськ, 21–24 вер. 2021 р. Івано-Франківськ, 2021. С. 209–211.*

83. H. H. Bruun, “Hot-Wire Anemometry-Principles and Signal Analysis,” Oxford University Press, New York, 1995. 507p

84. Herwig H. What Exactly is the Nusselt Number in Convective Heat Transfer Problems and are There Alternatives? *Entropy*. 2016; Vol 18(5), 198.p

85. Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, Frank P. Incropera. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 7th Edition. John Wiley & Sons, Incorporated, 21mar. 2011 p. 1048

86. Lienhard IV, John Henry; Lienhard V, John Henry. *A Heat Transfer Textbook* (4th ed.). Cambridge, MA: Phlogiston Press. 5th edition, 2017. 784 p.

87. Ткачук В. В., Середюк О. Є. Дослідження впливу швидкості руху та складу газового потоку на чутливість термоанемометричних перетворювачів. *Інформаційно-вимірвальні технології IBT-2022: зб. тез доп. міжнар. наук.-прак. конф., м. Львів, 9–10 лист. 2022 р. Львів, 2022. С. 127–128.*

88 Energy efficiency веб-сайт. URL: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency_en (дата звернення 25.10.2022).

89. Ткачук В. В., Середюк О. Є. Дослідження впливу теплофізичних характеристик газового середовища на чутливість термоанемометричного перетворювача. Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості: зб. тез доп. всеукр. наук.-практ. конф. мол. уч. і студ., м. Івано-Франківськ, 13 жовт. 2022 р. Івано-Франківськ, 2021. С. 131–132.

90. Ткачук В. В., Середюк О. Є., Саманів Л. В. Методологія дослідження теплофізичних характеристик газового середовища засобами термоанемометрії. Прогресивні напрямки розвитку автоматичних технологічних комплексів: зб. наук. пр. VII міжнар. наук.-тех. конф. з пробл. вищ. осв. і наук., м. Луцьк, 28–30 трав. 2022р. Луцьк, 2022. С. 151–152

91. Еталон передавання одиниці об'єму, маси та витрати природного газу / Середюк О. Є., Крук І. С., Рудько В. П., Чеховський С. А., Луцик Р. П., Прудніков Б. І.: пат. 25208 U Україна: МПК G01F 25/00 (2006). № u200704218; заявл. 16.04.2007; опубл. 25.07.2007, Бюл. № 11

92. Установа для градування та перевірки витратомірів і лічильників газу / Середюк О. Є., Костинюк В. В., Прудніков Б. І.: пат. 27565 U Україна: МПК G01F 25/00 (2006). № u200705894; заявл. 29.05.2007; опубл. 12.11.2007, Бюл. № 1.

93. Установа для перевірки витратомірів і лічильників газу / Середюк О. Є., Петришин І. С.: пат. 54316 C2 Україна: МПК G01F 25/00 (2006). № 2002076003; заявл. 19.07.2002; опубл. 16.01.2006, Бюл. № 1

94. Serediuk O.Y., Malisevych V.V., Serediuk D.O., Tkachuk V.V., Dzividzinska I.S. Metrological model of the reference installation for the reproduction of moist air flow based on the concept of uncertainty. Uncertainty in Measurement: Scientific, Normative, Applied and Methodical Aspects: XIX International Scientific and Technical Seminar, December 7–8 2022, Bulgaria, 2022. P. 38–40

95. Ткачук В. В., Середюк О. Є. Концепція фізичного моделювання впливу вологи на роботу термоанемометричних сенсорів. Методи та прилади контролю якості. 2023. № 1(50). С. 31–40

96. Установа для перевірки витратомірів і лічильників газу / О. Є. Середюк, В. В. Малісевич, Д. О. Середюк., В. В. Ткачук: пат. 153729 U Україна: МПК

(2023.01) G01F 25/00. № u 202301207; заявл. 23.03.2023; опубл. 16.08.2023, Бюл. № 33. 4 с.

97. Serediuk O., Malisevych V., Tkachuk V. Eksperymentalne badania wpływu wilgotności gazu ziemnego na złażanie czujników termooanemometrycznych. *Metrologia: studia i monografie*. Opole: Politechnika Opolska. 2023. Vol. 585. P. 221–228

98. Середюк О. Є., Криницький О. С., Ткачук В. В., Жонса М. Оцінювання невизначеності калібрування еталонних лічильників малих типорозмірів на природному газі. *Метрологія та вимірювальна техніка* : зб. тез. доп. XII міжнар. наук.-тех. конф., 6–8 жовт. 2020 р., Харків, 2020. С. 160.

99. Середюк О.Є., Малісевич В.В., Середюк Д.О., Ткачук В.В. Установка для перевірки витратомірів і лічильників газу. Інтелектуальний продукт вчених, винахідників і раціоналізаторів Прикарпаття: XIV випуск щорічного каталогу найвагоміших винаходів, корисних моделей, промислових зразків і раціоналізаторських пропозицій Галицьких кмітливців. м. Івано-Франківськ, 2023. С. 36-37.

100. Васілевський О. М., Кучерук В. Ю., Володарський Є. Т. Основи теорії невизначеності вимірювань : підручник, Вінниця:ВНТУ, 2015. 230 с.

101. 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.

102. Захаров І. П., Кукуш В. Д. Теорія невизначеності у вимірюваннях : навч. посіб. Харків : Консум, 2002. 256 с.

103. Ткачук В. В. Дослідження алгоритмів визначення теплопровідності природного газу. *Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості*: зб. тез доп. всеукр. наук.-практ. конф. мол. уч. і студ., м. Івано-Франківськ, 7 жовт. 2021 р. Івано-Франківськ, 2021. С. 131–132.

104. Ткачук В. В., Середюк О. Є. Лабораторний стенд для дослідження впливу водяної пари на функціонування засобів термоанемометрії. *Приладобудування: стан і перспективи*: зб. матер. XXI міжнар. наук.-тех. конф., м. Київ, 17–18 трав. 2022р. Київ, 2022. С. 233–234.

105. Середюк О. Є., Малісевич В. В., Ткачук В. В. Метрологічні дослідження еталонної установки для відтворення масових витрат вологого повітря. Український метрологічний журнал. 2023. № 1. С. 61–66.

Додаток А

Таблиця А1 – Розрахункові дані по теплоємності та теплопровідності природного газу в залежності від відносної вологості газу, розрахункові дані

Відн.вол., ф, %	10 °С		20 °С		30 °С		40 °С	
	1	2	1	2	1	2	1	2
10	31.37058	2.14707	32.90015	2.17551	34.41506	2.20368	35.90698	2.23143
20	31.35299	2.14676	32.86491	2.17487	34.34782	2.20246	35.78548	2.22921
30	31.3354	2.14645	32.82981	2.17424	34.28106	2.20125	35.66564	2.22703
40	31.3178	2.14614	32.79486	2.17361	34.21509	2.20005	35.54778	2.22487
50	31.30021	2.14583	32.76021	2.17298	34.14927	2.19885	35.43124	2.22275
60	31.28276	2.14552	32.72556	2.17235	34.08409	2.19767	35.31685	2.22066
70	31.26531	2.14521	32.69105	2.17173	34.01969	2.19649	35.20361	2.21859
80	31.24785	2.1449	32.6567	2.17111	33.95561	2.19533	35.09236	2.21656
90	31.23054	2.14459	32.6225	2.17049	33.89232	2.19418	34.98277	2.21456

Таблиця А2 – Розрахункові дані по теплоємності та теплопровідності повітря залежності від відносної вологості газу, розрахункові дані

Відн.вол., ф, %	10 °С		20 °С		30 °С		40 °С	
	1	2	1	2	1	2	1	2
10	24.77346	1.0067	25.5664	1.007	26.3444	1.0087	27.12497	1.0112
20	24.76775	1.0073	25.55557	1.009	26.33101	1.0117	27.0906	1.0153
30	24.7621	1.0080	25.54477	1.010	26.31126	1.0140	27.0566	1.0194
40	24.7564	1.0087	25.5340	1.011	26.2916	1.0164	27.0229	1.0235
50	24.7507	1.0093	25.5233	1.012	26.2721	1.0187	26.9895	1.0275
60	24.7450	1.0100	25.5126	1.014	26.2526	1.0210	26.9564	1.0315
70	24.7394	1.0107	25.5019	1.015	26.2333	1.0233	26.9236	1.0355
80	24.7337	1.01134	25.4913	1.016	26.2140	1.0256	26.8911	1.0394
90	24.7281	1.012	25.4806	1.0175	26.1949	1.0279	26.8588	1.0433

1 - λ , теплопровідність. мВт/м·К

2 - C_p , ізобарна теплоємність кДж/кг·К

$P = 0,1 \text{ МПа}$

Додаток Б

Таблиця Б1. Технічні характеристики зволожувальної установки:

Мембрана діаметром	16 мм
Споживана потужність	24-26 Вт
Вхідна напруга постійного струму	35 В
Резонансна частота п'єзоелемента	1650 ± 50 кГц
Максимальна кількість розпилення	0,325 л/год
Робоча температура води	0.01–55 °С
Робочий рівень води у резервуарі	30–40 мм

Таблиця Б2 – Молярний склад сухого повітря

Компон. сухого повітря	Молярна доля	Компон. сухого повітря	Молярна доля
Азот	0,780848	Метан	0,0000015
Кисень	0,209390	Криптон	0,0000011
Аргон	0,009332	Водень	0,0000005
Діоксид. вуглецю	0,0004	Оксиди азоту	0,0000003
Неон	0,0000182	Оксид вуглецю	0,0000002
Гелій	0,00000052	Ксеон	0,0000001

Таблиця Б3 – Умови проведення експериментальних досліджень.

Тиск, P	101,325кПа
Температура, t	20°С
Відносна вологість, φ	42%
Тривалість 1-го експерименту	90сек
Частота опитування датчика	1результат/сек

Експериментальні дані викладено в табл. 4. Об'єму витрату отримано з показів мембранних лічильників (вологої та сухої ліній відповідно), просумовано та відображено як $Q_{v.ліч}$. Дані по витраті термоанемометричним сенсором розраховано відповідно до швидкості, яку відобразив прилад у момент проведення експерименту помноженої на площу поперечного січення досліджуваної секції (трубопровода). Розраховано відносну похибку, яку вносить вологість в покази термоанемометричного сенсора відповідно мембранних лічильників. Експериментальні дані по швидкості(яку виміряв термоанемометричний сенсор) сформовані з опрацьованого масиву з розміром вибірки 80 та відповідними обчисленими середньоквадратичними відхиленнями та дисперсіями відповідно до

кожної сформованої вибірки щодо конкретного експерименту (їх всього було 22). Інтенсивність генерування вологості зволожувальною установкою відображена для кожного конкретного взятого експерименту.

Таблиця Б4 – Експериментальні дані по впливу вологи на ТА сенсор

№	Q_v ліч, $м^3/год$	Q_v т-а, $м^3/год$	δ , %	$V_{сер\ т-а}$, $м/с$	σ , СКВ	$\overline{\sigma^2}$, Дисп	Генерація вологості, %
1	1,44800	1,484172	2,50%	0,515338	0,012112	0,015321	0%
2	1,44000	1,495008	3,82%	0,5191	0,011988	0,015079	0%
3	1,49200	1,594512	6,87%	0,55365	0,011894	0,015689	25%
4	1,44000	1,627776	13,04%	0,5652	0,0114	0,014001	25%
5	1,49200	1,649376	10,55%	0,5727	0,011645	0,014071	25%
6	1,45200	1,70856	17,67%	0,59325	0,011919	0,015084	25%
7	1,46000	1,640124	12,34%	0,569488	0,012113	0,01582	25%
8	1,46800	1,621584	10,46%	0,56305	0,010954	0,013855	25%
9	1,45200	1,717308	18,27%	0,596288	0,012695	0,015429	25%
10	1,46800	1,693872	15,39%	0,58815	0,011958	0,01539	25%
11	1,42400	1,647648	15,71%	0,5721	0,009307	0,01214	25%
12	1,43600	1,721952	19,91%	0,5979	0,00916	0,011639	25%
13	1,44400	1,7658	22,29%	0,613125	0,010591	0,013208	25%
14	1,43200	1,791144	25,08%	0,621925	0,011659	0,015963	25%
15	1,44400	1,784664	23,59%	0,619675	0,009191	0,011589	50%
16	1,46000	1,899072	30,07%	0,6594	0,01184	0,015241	50%
17	1,45600	1,91592	31,59%	0,66525	0,012313	0,01464	50%
18	1,45200	1,91304	31,75%	0,66425	0,011706	0,015312	50%
19	1,44000	2,073132	43,97%	0,719838	0,011863	0,015421	100%
20	1,43600	2,005488	39,66%	0,69635	0,015036	0,01927	100%
21	1,44800	1,96092	35,42%	0,680875	0,010872	0,013614	100%
22	1,44800	1,9863	37%	0,689688	0,014956	0,017885	100%

Таблиця Б5 – Покази термоанемометра (м/с) при різних режимах генерації вологості

№	Генерація вологи, г /с			
	0%	$1,11 \cdot 10^{-3}$	$1,66 \cdot 10^{-3}$	$2,22 \cdot 10^{-3}$
1	0,524	0,612	0,652	0,712
2	0,533	0,61	0,697	0,712
3	0,537	0,61	0,697	0,725
4	0,517	0,611	0,689	0,721
5	0,517	0,613	0,667	0,715
6	0,517	0,591	0,675	0,747
7	0,509	0,592	0,693	0,747
8	0,539	0,592	0,693	0,701
9	0,539	0,613	0,669	0,7
10	0,53	0,586	0,673	0,69
11	0,538	0,571	0,663	0,69
12	0,53	0,571	0,663	0,724
13	0,53	0,582	0,674	0,68
14	0,514	0,571	0,681	0,693
15	0,527	0,575	0,669	0,693
16	0,534	0,575	0,669	0,691
17	0,539	0,6	0,648	0,696
18	0,539	0,583	0,657	0,721
19	0,541	0,593	0,655	0,721
20	0,528	0,593	0,655	0,706
21	0,513	0,588	0,652	0,73
22	0,513	0,594	0,636	0,73
23	0,517	0,607	0,654	0,73
24	0,516	0,604	0,654	0,714
25	0,495	0,604	0,649	0,728
26	0,495	0,585	0,677	0,7
27	0,498	0,588	0,654	0,713
28	0,498	0,61	0,671	0,713
29	0,492	0,61	0,671	0,705
30	0,492	0,613	0,663	0,691
31	0,532	0,581	0,669	0,698
32	0,492	0,607	0,664	0,698
33	0,51	0,607	0,664	0,728
34	0,51	0,603	0,662	0,702
35	0,503	0,582	0,661	0,693
36	0,506	0,599	0,638	0,693
37	0,526	0,599	0,638	0,662
38	0,526	0,584	0,649	0,713
39	0,503	0,602	0,678	0,691
40	0,5	0,589	0,652	0,691

Продовження Таблиці Б5				
№	0%	$1,11 \cdot 10^{-3}$	$1,66 \cdot 10^{-3}$	$2,22 \cdot 10^{-3}$
41	0,516	0,589	0,652	0,683
42	0,516	0,603	0,686	0,673
43	0,516	0,595	0,666	0,687
44	0,533	0,572	0,638	0,687
45	0,497	0,584	0,638	0,683
46	0,516	0,584	0,647	0,702
47	0,516	0,591	0,644	0,696
48	0,522	0,594	0,641	0,683
49	0,512	0,584	0,65	0,683
50	0,509	0,584	0,65	0,68
51	0,509	0,587	0,658	0,705
52	0,527	0,574	0,645	0,7
53	0,507	0,566	0,664	0,7
54	0,504	0,566	0,664	0,721
55	0,504	0,588	0,661	0,672
56	0,514	0,568	0,656	0,675
57	0,498	0,595	0,663	0,675
58	0,512	0,566	0,663	0,659
59	0,494	0,566	0,675	0,685
60	0,494	0,575	0,669	0,678
61	0,49	0,584	0,659	0,678
62	0,528	0,577	0,659	0,692
63	0,506	0,577	0,643	0,669
64	0,506	0,595	0,638	0,691
65	0,533	0,585	0,655	0,691
66	0,528	0,562	0,655	0,695
67	0,52	0,562	0,657	0,678
68	0,52	0,582	0,683	0,661
69	0,532	0,591	0,658	0,693
70	0,504	0,568	0,654	0,693
71	0,52	0,568	0,654	0,692
72	0,52	0,572	0,634	0,663
73	0,517	0,606	0,651	0,686
74	0,51	0,571	0,639	0,686
75	0,506	0,589	0,639	0,693
76	0,519	0,589	0,638	0,688
77	0,519	0,588	0,666	0,679
78	0,504	0,593	0,656	0,679
79	0,49	0,586	0,656	0,667
80	0,53	0,586	0,653	0,699