

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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

МАКСИМ'ЮК СЕРГІЙ ОРЕСТОВИЧ

УДК 681.2:620.9:662.75

ДИСЕРТАЦІЯ
УДОСКОНАЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ ЯКОСТІ І
ТРАНСПОРТУВАННЯ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ НА ЗАСАДАХ ЇХ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ
ЦІННОСТІ

Спеціальність 152 – «Метрологія та інформаційно-вимірвальна 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

_____ Максим'юк С.О.

Науковий керівник:
доктор технічних наук, професор
Рибіцький Ігор Володимирович

ІВАНО-ФРАНКІВСЬК – 2024

АНОТАЦІЯ

Максим'юк С.О. Удосконалення інформаційно-вимірювальних систем якості і транспортування енергоресурсів на засадах їх енергетичної цінності. – 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, м. Івано-Франківськ, 2024.

Об'єктом досліджень є процес визначення енергетичної цінності природного газу в розгалужених газових мережах низького тиску.

Предметом дослідження є методи оцінки енергетичної цінності газу під час транспортування в газорозподільній системі, на базі сучасних інформаційно-вимірювальних технологій, експрес-методу контролю якості газу, а також впливу домішок водню та біометану на функціональні параметри мережі.

У дисертаційній роботі вирішена науково-практична задача, пов'язана з удосконаленням інформаційно-вимірювальних систем для визначення якості енергоресурсів у газорозподільних мережах з двома джерелами газопостачання шляхом розроблення нових математичних моделей з врахуванням впливу закачаного біометану та водню в газопровід.

У **вступі** обґрунтовано актуальність задач дослідження, наведена наукова новизна та сформульоване практичне значення отриманих результатів.

У **першому розділі** дисертаційної роботи здійснено системний аналіз наукових підходів до забезпечення контролю якості та транспортування природного газу в умовах сучасних викликів. Проведено бібліографічний аналіз публікацій, що виявив ключові тенденції у вимірюванні енергетичної цінності газу, інтеграції біометану та впровадженні інноваційних технологій для моніторингу газових мереж. Обґрунтовано значущість переходу до

енергетичних одиниць обліку газу для підвищення прозорості комерційних розрахунків та інтеграції України в європейський енергетичний простір. Виявлено недоліки сучасних методів контролю якості газу, зокрема недостатню точність і регулярність вимірювань, що зумовлено технічним станом мереж та їх динамічними режимами роботи. Обґрунтовано актуальність дослідження взаємозалежності між якісними характеристиками газу та експлуатаційними параметрами мереж у контексті адаптації до нових енергоносіїв, таких як водень і біометан.

Другий розділ дисертаційної роботи присвячено дослідженню механізмів визначення енергетичної цінності природного газу у розгалужених газотранспортних системах України. Основна увага зосереджена на вдосконаленні інформаційно-вимірювального забезпечення шляхом розробки нових методів та моделей оцінки якісних параметрів енергоресурсу.

На початковому етапі виконано аналіз наявних проблем, пов'язаних з ідентифікацією якісних параметрів природного газу у газотранспортній системі. Виявлено відносну похибку на рівні 0,365% між даними, що надаються газотранспортними компаніями та фактично визначеними пересувною лабораторією, обумовленою недостатністю оперативних замірів та технічних засобів потоковим способом оцінки якості природного газу.

Особливу увагу приділено оцінці теплоти згорання природного газу в мережі, де спостерігається змішування енергоресурсів з різними фізико-хімічними характеристиками. У випадку мереж з одним джерелом постачання якісні параметри природного газу на вході відповідають параметрам на виході до споживача. Однак для систем із кількома входами виникає проблема визначення фактичної калорійності газу у точках кінцевих споживачів, оскільки значення якісних параметрів газу після змішування не відповідають жодному з початкових вхідних значень.

З цією метою у роботі розроблено методику оцінки вищої теплоти згорання природного газу для мереж із двома входами. Запропонована методика базується на застосуванні приладів експрес-контролю якості газу для вимірювання швидкості проходження ультразвуку та вмісту вуглекислого газу на кожному з входів у мережу. Створено математичну модель, що враховує відсоткові частки об'ємних витрат газів з двох входів та їх фізико-хімічні параметри. Модель реалізована у вигляді багатofакторного регресійного аналізу, результати якого підтвердили наявність значущих кореляційних зв'язків між досліджуваними факторами.

Побудовано кілька варіантів регресійних залежностей: лінійні, нелінійні та поліномні моделі з різною комбінацією факторів. Найкращу точність показала нелінійна модель зі звичайними та комбінованими параметрами, яка має скоригований коефіцієнт детермінації 0,815 та відносну похибку розрахунків на рівні 0,24%. Здійснено валідацію моделі на незалежному наборі даних, що підтвердило її високу прогностичну здатність.

Розроблено алгоритм функціонування інформаційно-вимірювальної системи контролю якості природного газу для розгалужених мереж. Алгоритм охоплює всі етапи: від збору даних з приладів (швидкість ультразвуку, частка об'ємної витрати, вміст CO_2 , температура) та їх попередньої фільтрації до обчислення усередненої теплотворної здатності, розрахунку енергетичної цінності й інтеграції з системами диспетчеризації. Для підвищення точності розрахунків та врахування складних нелінійних взаємозв'язків, у дослідженні запропоновано використання штучних нейронних мереж (ШНМ). Побудовано нейронну мережу з архітектурою «вхідний шар – прихований шар – вихідний шар», де прихований шар складається з 20 нейронів. Процес навчання здійснювався за алгоритмом Левенберга-Марквардта, що забезпечив мінімізацію середньоквадратичної похибки. Результати показали, що модель

ШНМ забезпечує точні прогнози якості природного газу після змішування на рівні, що перевищує можливості класичних регресійних моделей.

Здійснено корегування математичної моделі з урахуванням впливу домішок водню на теплоту згоряння газових сумішей. Модифікована модель забезпечує середню відносну похибку на рівні 0,31 %, що дозволяє застосовувати її для прогнозування характеристик змішаних газів з високою метрологічною точністю.

У **третьому розділі** проведено дослідження впливу якості природного газу на гідравлічні та експлуатаційні параметри газотранспортних мереж з урахуванням енергетичної цінності ресурсу. Виконано моделювання газових потоків у мережах за умови зниження теплотворної здатності газу на 4,5% з використанням програмного середовища Matlab-Simulink. Отримані результати показали, що зниження калорійності призводить до зростання обсягів споживання газу та одночасного зменшення його запасів у газосховищах.

Дослідження гідравлічних особливостей мереж низького тиску показало, що теплотворна здатність газу по-різному впливає на тиск в газовій мережі залежно від рівня розгалуженості мережі. У малорозгалужених мережах перепад тиску є мінімальним і практично не залежить від густини газу, що обумовлено стабільними умовами транспортування. Натомість у мережах з високим рівнем розгалуження підвищення густини газу, спричинене його більшою калорійністю, призводить до зростання гідравлічного опору та зниження тиску у кінцевих точках споживання.

Виявлено залежність між зміною теплотворної здатності природного газу по довжині трубопроводу та прогнозуванням утворення корозійних пошкоджень в ньому на основі експериментального дослідження. Вимірювання показали, що у зоні корозійних пошкоджень теплота згоряння газу знижується на 5%, що пов'язано з наявністю корозійних пошкоджень на стінках труб, які

впливають на енергетичну цінність природного газу через продукти корозії такі, як водень та зміну вмісту вулгекислого газу в газовій суміші.

У **четвертому розділі** досліджено енергетичну цінність біогазу та вплив його основних компонентів на експлуатаційні характеристики газових сумішей. Проведено аналіз характеристик біогазу з різних джерел, включаючи сільськогосподарські відходи, енергетичні культури, промислові стоки, тверді побутові відходи (ТПВ) та стічні води, що підтвердило залежність енергетичного потенціалу біогазу від типу сировини. В рамках цього аналізу досліджено компонентний склад твердих побутових відходів на сміттєзвалищі в с. Рибне, що біля Івано-Франківська. Розглянуто вимоги до якості біометану для його закачування у газові мережі відповідно до національних і європейських стандартів, які включають концентрацію метану $\geq 95\%$ та мінімізацію вмісту CO_2 та кисню. Проаналізовано сучасні технології очищення біогазу, такі як адсорбція з переміною тиску, мембранна та криогенна сепарація.

Здійснено адаптацію математичної моделі оцінки теплоти згоряння газових сумішей для умов інтеграції біометану в газопровід. Враховано вплив кисню на енергетичні характеристики газу та здійснено коригування моделі для підвищення точності прогнозування. Оновлена модель продемонструвала достовірність на рівні відносної похибки 0,25%. Розроблено штучну нейронну мережу, яка враховує наявність в трубопроводі суміші природного газу, водню та біометану, що забезпечило високу точність прогнозування теплотворної здатності газу на рівні $R \geq 0.996$ коефіцієнта кореляції для навчальної, валідаційної та тестової вибірок.

В рамках апробації результатів дослідження розроблено проекти двох національних стандартів. Перший для інтеграції біометану в газотранспортну систему України - проект ДСТУ EN 16723-1:2023. Другий - проект ДСТУ EN 12007-4:2019, який уніфікує вимоги до оновлення газових мереж до 16 бар з акцентом на надійність, безпеку та сучасні технології модернізації.

Ключові слова: природний газ, математична модель, похибка вимірювання, результат вимірювання, нейронні мережі, діагностичні ознаки, енергетичні параметри, декарбонізація, водень, газоводневі суміші, тверді побутові відходи, компонентний склад, біогаз, статистичні оцінювання, транспортування вуглеводнів.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Maksymiuk, S., Rybitskyi, I., Karpash, O., Tsykh, V., Doroshenko, Y. (2024). Method for Estimating the Calorific Value of Natural Gas for Branched Networks Using Express Quality Control Tools. In: Babak, V., Zaporozhets, A. (eds) Systems, Decision and Control in Energy VI. Studies in Systems, Decision and Control, vol 561. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-68372-5_16.

Особистий внесок здобувача (50%):

- розроблено метод визначення вищої теплоти згоряння природного газу у розгалужених газорозподільних мережах з кількома джерелами постачання на основі кореляційних залежностей між теплотворною здатністю газу та вимірюваними параметрами (швидкістю поширення ультразвуку і вмістом CO₂) з використанням приладів експрес-контролю якості газу. Методика дозволяє оцінити якість в розгалужених мережах для потреб комерційного обліку в динамічних умовах мережі (за параметром теплотворної здатності газу).

2. Височанський І. І., Чабан Н. І., Максим'юк С. О. Оптимізація газових мереж низького тиску з врахуванням енергетичних характеристик природного газу / Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. - 2017. - № 4. - С. 103-110.

Особистий внесок здобувача (30%):

- проведено комплексне моделювання газорозподільної мережі низького тиску у програмному середовищі SIMONE з урахуванням впливу змін

теплотворної здатності природного газу на гідравлічні параметри мережі. Досліджено залежність втрат тиску в газопроводі від довжини газопроводу при різних якісних характеристиках газу.

3. Максим'юк, С. О. Височанський І. І., Карпаш О. М. Аналіз викликів у системному підході управління динамічними процесами мереж газотранспортної системи / Нафтогазова енергетика. - 2018. - № 2. - С. 25-31. DOI 10.31471/1993-9868-2018-2(30)-25-31

Особистий внесок здобувача (35%):

- обґрунтовано необхідність використання методів експрес-контролю якості газу для оперативної оцінки показників енергетичної цінності в точках газотранспортної системи (ГТС) і газорозподільних мереж (ГРМ). Проведено порівняльний аналіз вимірних параметрів якості газу на різних рівнях системи транспортування, що дозволило ідентифікувати відмінності у показниках теплоти згоряння та запропонувати заходи щодо підвищення точності моніторингу якості енергоносія.

4. Максим'юк С.О. Карпаш О.М. Диверсифікація методів діагностики технічного стану газопроводів в умовах розвитку системи оцінки якості природного газу за принципами ЄС / Науково-технічний журнал «Методи та прилади контролю якості». 2020. №2 (45). С. 82-89.

DOI 10.31471/1993-9981-2020-2(45)-82-89

Особистий внесок здобувача (50%):

- виявлено та обґрунтовано зв'язок між технічним станом газопроводу (ступенем корозійних пошкоджень) та якісними характеристиками природного газу (теплотою згоряння і вмістом домішок). Розроблено науково обґрунтовані підходи до використання якісних параметрів газу як додаткових діагностичних індикаторів технічного стану газорозподільних мереж, що дозволяє підвищити точність і швидкість технічної діагностики.

5. Voronych, A., Yatsyshyn, T., Raiter, P., Zhovtulya, L., Maksymiuk, S. (2023). Research of Characteristics of Solid Waste as Energy Resource. In: Zaporozhets, A. (eds) Systems, Decision and Control in Energy IV. Studies in Systems, Decision and Control, vol 454. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22464-5_22.

Особистий внесок здобувача (20%):

- здійснено збір, сортування проб ТПВ та визначення їх масових часток за складовими фракціями для цілей дослідження калорійності твердих побутових відходів (ТПВ) як енергетичного ресурсу.

Тези наукових конференцій:

6. Максим'юк С. Залежність між якісними показниками природного газу та технічним станом газопроводу. "Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (випуск 56)" : Міжнар. наук. інтернет-конф., м. Тернопіль, 11 берез. 2021 р. Тернопіль, 2021. С. 75–77.

7. Максим'юк С. О. Виробничо-технічні витрати газових мереж з врахуванням вологісних характеристик природного газу. Сучасні виклики і актуальні проблеми науки, освіти та виробництва: міжгалузеві диспути : Матеріали VIII Міжнар. науково-практ. інтернет-конф., м. м. Київ, 11 верес. 2020 р. м. Київ, 2020. С. 251–254.

8. Maksymiuk S. O. Costs for maintenance of gas networks taking into account the humidity of natural gas. Actual trends of modern scientific research : Abstracts of III International Scientific and Practical Conference, Munich, 13–15 September 2020. Germany, 2020. P. 23–26..

9. Максим'юк С., Карпаш О. Аналіз шляхів оптимізації методики визначення якісних характеристик природного газу. Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання : 8-ма міжнар. н/т

конф., м. Івано-Франківськ, 14–16 листоп. 2017 р. Івано-Франківськ, 2017. С. 158–159.

10. Research of characteristics of solid waste as an energy resource / S. O. Maksymiuk et al. Book of Abstracts : 3rd International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters, Ukraine, Kyiv, 24–27 May 2022. Kyiv, 2022. P. 63.

11. Максим'юк С.О. Моделювання газових мереж в умовах функціонування ринку природного газу. Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості: всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених і студентів. 8 жовтня 2020 р.: Збірник тез доповідей. м. Івано-Франківськ: ВНЗ ІФНТУНГ. 2020. 43 с.

12. Максим'юк С.О. Енергетичні параметри природного газу, як додаткова діагностична ознака газорозподільчих мереж. Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання: VII науково-практична конференція студентів і молодих учених. 19-20 листопада 2019 р. ІТ, ІФНТУНГ. 2019.

13. Максим'юк С.О. Проблематика інформатизації процесів експлуатації газотранспортної системи України. Приладобудування та метрологія: сучасні проблеми, тенденції розвитку: III Всеукраїнська науково - практична конференція. 11- 12 жовтня 2018 р.: Збірник матеріалів. Луцьк: Інформаційно видавничий відділ Луцького НТУ. 2018. с. 39.

14. Максим'юк С.О. Енергетичні параметри природного газу, як додаткова діагностична ознака газорозподільчих мереж. Неруйнівний контроль та 1 технічна діагностика: НКТД-2019: 9-та Національна науково- технічній конференція. 19- 21 листопада 2019р. м. Київ. 54 с.

ABSTRACT

Maksymiuk S.O. Improvement of information and measuring systems of quality and transportation of energy resources on the basis of their energy value. – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 152 – metrology and information and measuring equipment. – Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2024.

The **object of research** is the process of determining the energy value of natural gas in branched low and medium pressure gas networks.

The **subject of research** is methods for assessing the energy value of gas during transportation in the gas distribution system, based on modern information and measuring technologies, an express method for gas quality control, as well as the influence of hydrogen and biomethane impurities on the functional parameters of the network.

The dissertation solves a scientific and practical problem related to the improvement of information and measuring systems for determining the quality of energy resources in gas distribution networks with two sources of gas supply by developing new mathematical models taking into account the impact of injected biomethane and hydrogen into the gas pipeline.

The **introduction** substantiates the relevance of the research tasks, presents the scientific novelty and formulates the practical significance of the results obtained.

The **first section** of the dissertation carries out a systematic analysis of scientific approaches to ensuring quality control and transportation of natural gas in the face of modern challenges. A bibliographical analysis of publications is carried out, which revealed key trends in measuring the energy value of gas, integrating biomethane and implementing innovative technologies for monitoring gas networks. The significance of the transition to energy units of gas accounting for increasing the transparency of commercial calculations and integrating Ukraine into the European energy space is

substantiated. The shortcomings of modern methods of gas quality control are identified, in particular, insufficient accuracy and regularity of measurements, which is due to the technical condition of networks and their dynamic operating modes. The relevance of studying the interdependence between gas quality characteristics and network operational parameters in the context of adaptation to new energy sources, such as hydrogen and biomethane, is substantiated.

The **second section** of the dissertation is devoted to the study of mechanisms for determining the energy value of natural gas in the extensive gas transportation systems of Ukraine. The main attention is focused on improving information and measurement support by developing new methods and models for assessing the quality parameters of the energy resource.

At the initial stage, an analysis of existing problems related to the identification of quality parameters of natural gas in the gas transportation system was performed. A relative error of 0.365% was found between the data provided by gas transportation companies and those actually determined by the mobile laboratory, due to the insufficiency of operational measurements and technical means for assessing the quality of natural gas by the flow method.

Special attention is paid to the assessment of the calorific value of natural gas in the network, where there is a mixing of energy resources with different physicochemical characteristics. In the case of networks with a single source of supply, the quality parameters of natural gas at the input correspond to the parameters at the output to the consumer. However, for systems with multiple inputs, there is a problem of determining the actual calorific value of gas at the points of end consumers, since the values of the quality parameters of gas after mixing do not correspond to any of the initial input values.

To this end, the paper has developed a methodology for estimating the higher calorific value of natural gas for networks with two inputs. The proposed methodology is based on the use of express gas quality control devices to measure the

speed of ultrasound transmission and the content of carbon dioxide at each of the network inputs. A mathematical model has been created that takes into account the percentages of volumetric gas flows from two inputs and their physicochemical parameters. The model is implemented in the form of multifactor regression analysis, the results of which confirmed the presence of significant correlations between the studied factors.

Several variants of regression dependencies have been constructed: linear, nonlinear and polynomial models with different combinations of factors. The best accuracy was shown by a nonlinear model with conventional and combined parameters, which has an adjusted coefficient of determination of 0.815 and a relative calculation error of 0.24%. The model was validated on an independent data set, which confirmed its high predictive ability.

An algorithm for the functioning of an information and measuring system for natural gas quality control for branched networks was developed. The algorithm covers all stages: from data collection from devices (ultrasound velocity, volume flow rate, CO₂ content, temperature) and their preliminary filtering to the calculation of the average calorific value, calculation of the energy value and integration with dispatching systems. To increase the accuracy of calculations and take into account complex nonlinear relationships, the study proposed the use of artificial neural networks (ANNs). A neural network with an “input layer – hidden layer – output layer” architecture was built, where the hidden layer consists of 20 neurons. The training process was carried out using the Levenberg-Marquardt algorithm, which ensured the minimization of the mean square error. The results showed that the ANN model provides accurate predictions of the quality of natural gas after mixing at a level exceeding the capabilities of classical regression models.

The mathematical model was adjusted to take into account the influence of hydrogen impurities on the heat of combustion of gas mixtures. The modified model

provides an average relative error of 0.31%, which allows it to be used to predict the characteristics of mixed gases with high metrological accuracy.

In the **third section**, a study was conducted on the impact of natural gas quality on the hydraulic and operational parameters of gas transmission networks, taking into account the energy value of the resource. Modeling of gas flows in networks was performed under the condition of a decrease in the calorific value of gas by 4.5% using the Matlab-Simulink software environment. The results obtained showed that a decrease in calorific value leads to an increase in gas consumption and a simultaneous decrease in its reserves in gas storage facilities.

A study of the hydraulic features of low-pressure networks showed that the calorific value of gas affects the pressure in the gas network differently depending on the level of network branching. In low-branched networks, the pressure drop is minimal and practically does not depend on the gas density, which is due to stable transportation conditions. In contrast, in networks with a high level of branching, an increase in gas density caused by its higher calorific value leads to an increase in hydraulic resistance and a decrease in pressure at the end points of consumption.

A relationship was found between the change in the calorific value of natural gas along the length of the pipeline and the prediction of the formation of corrosion damage in it based on an experimental study. Measurements showed that in the zone of corrosion damage, the calorific value of gas is reduced by 5%, which is associated with the presence of corrosion damage on the pipe walls, which affect the energy value of natural gas through corrosion products such as hydrogen and a change in the content of sulfur dioxide in the gas mixture.

In the **fourth section**, the energy value of biogas and the influence of its main components on the operational characteristics of gas mixtures were investigated. An analysis of the characteristics of biogas from various sources was carried out, including agricultural waste, energy crops, industrial effluents, solid household waste (SWW) and wastewater, which confirmed the dependence of the energy potential of

biogas on the type of raw material. As part of this analysis, the component composition of solid household waste at the landfill in the village of Rybne, near Ivano-Frankivsk. The requirements for the quality of biomethane for its injection into gas networks were considered in accordance with national and European standards, which include methane concentration $\geq 95\%$ and minimization of CO_2 and oxygen content. Modern biogas purification technologies, such as pressure swing adsorption, membrane and cryogenic separation, were analyzed.

The mathematical model for estimating the heat of combustion of gas mixtures was adapted for the conditions of biomethane integration into the gas pipeline. The effect of oxygen on the energy characteristics of gas was taken into account and the model was adjusted to increase the accuracy of prediction. The updated model demonstrated reliability at the level of relative error of 0.25%. An artificial neural network was developed that takes into account the presence of a mixture of natural gas, hydrogen and biomethane in the pipeline, which ensured high accuracy in predicting the calorific value of gas at the level of $R \geq 0.996$ of the correlation coefficient for the training, validation and test samples.

As part of the testing of the research results, drafts of two national standards have been developed. The first is for the integration of biomethane into the gas transportation system of Ukraine - draft DSTU EN 16723-1:2023. The second is draft DSTU EN 12007-4:2019, which unifies the requirements for the modernization of gas networks up to 16 bar with an emphasis on reliability, safety and modern modernization technologies.

Keywords: natural gas, mathematical model, measurement error, measurement result, neural networks, diagnostic features, energy parameters, decarbonization, hydrogen, gas-hydrogen mixtures, solid household waste, component composition, biogas, statistical evaluations, hydrocarbon transportation.

LIST OF PUBLICATIONS OF THE EXTRACTOR

Scientific works in which the main scientific results of the dissertation are published:

1. Maksymiuk, S., Rybitskyi, I., Karpash, O., Tsykh, V., Doroshenko, Y. (2024). Method for Estimating the Calorific Value of Natural Gas for Branched Networks Using Express Quality Control Tools. In: Babak, V., Zaporozhets, A. (eds) Systems, Decision and Control in Energy VI. Studies in Systems, Decision and Control, vol 561. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-68372-5_16.

Applicant's personal contribution (50%):

- a method for determining the higher calorific value of natural gas in branched gas distribution networks with several supply sources was developed based on correlations between the calorific value of gas and measured parameters (ultrasound propagation velocity and CO₂ content) using express control devices gas quality. The method allows to assess the quality in branched networks for the needs of commercial accounting in dynamic network conditions (by the parameter of the calorific value of gas).

2. Vysochansky I. I., Chaban N. I., Maksym'yuk S. O. Optimization of gas networks low pressure taking into account the energy characteristics of natural gas / Exploration and development of oil and gas fields. - 2017. - No. 4. - P. 103-110.

Applicant's personal contribution (30%):

- a comprehensive modeling of a low-pressure gas distribution network was carried out in the SIMONE software environment, taking into account the impact of changes in the calorific value of natural gas on the hydraulic parameters of the network. The dependence of pressure losses in the gas pipeline on the length of the gas pipeline with different gas quality characteristics was studied.

3. Maksym`yuk, S. O. Vysochanskyi I. I., Karpash O. M. Analysis of challenges in the system approach to managing dynamic processes of gas transportation system

networks / Oil and Gas Energy. - 2018. - No. 2. - P. 25-31. DOI 10.31471/1993-9868-2018-2(30)-25-31

Personal contribution of the applicant (35%):

- the need to use express gas quality control methods for the operational assessment of energy value indicators at points of the gas transportation system (GTS) and gas distribution systems is justified networks (GRM). A comparative analysis of measured gas quality parameters at different levels of the transportation system was carried out, which allowed identifying differences in the calorific value and proposing measures to improve the accuracy of monitoring the quality of the energy carrier.

4. Maksym'yuk S.O. Karpash O.M. Diversification of methods for diagnosing the technical condition of gas pipelines in the context of the development of a natural gas quality assessment system based on EU principles / Scientific and Technical Journal "Quality Control Methods and Devices". 2020. No. 2 (45). P. 82-89.

DOI 10.31471/1993-9981-2020-2(45)-82-89

Personal contribution of the applicant (50%):

- the relationship between the technical condition of the gas pipeline (degree of corrosion damage) and the qualitative characteristics of natural gas (heat of combustion and content of impurities). Scientifically substantiated approaches to the use of gas quality parameters as additional diagnostic indicators of the technical condition of gas distribution networks have been developed, which allows to increase the accuracy and speed of technical diagnostics.

5. Voronych, A., Yatsyshyn, T., Raiter, P., Zhovtulya, L., Maksymiuk, S. (2023). Research of Characteristics of Solid Waste as Energy Resource. In: Zaporozhets, A. (eds) Systems, Decision and Control in Energy IV. Studies in Systems, Decision and Control, vol 454. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22464-5_22.

Personal contribution of the applicant (20%):

- collection, sorting of MSW samples and determination of their mass fractions by component fractions were carried out for the purpose of studying the caloric content of solid household waste (TPV) as an energy resource.

Abstracts of scientific conferences:

6. Maksym'yuk S. Dependence between the qualitative indicators of natural gas and the technical condition of the gas pipeline. "Information society: technological, economic and technical aspects of formation (issue 56)": International scientific online conference, Ternopil, March 11, 2021 Ternopil, 2021. P. 75–77.

7. Maksym'yuk S. O. Production and technical costs of gas networks taking into account the moisture characteristics of natural gas. Modern challenges and current problems of science, education and production: interdisciplinary disputes: Materials of the VIII International scientific and practical online conference, Kyiv, September 11, 2020 Kyiv, 2020. P. 251–254.

8. Maksymiuk S. O. Costs for maintenance of gas networks taking into account the humidity of natural gas. Actual trends of modern scientific research : Abstracts of III International Scientific and Practical Conference, Munich, 13–15 September 2020. Germany, 2020. P. 23–26..

9. Maksymiuk S., Karpash O. Analysis of ways to optimize the methodology for determining the quality characteristics of natural gas. Modern devices, materials and technologies for non-destructive testing and technical diagnostics of machine-building and oil and gas industry equipment: 8th International N/T Conference, Ivano-Frankivsk, November 14–16, 2017 Ivano-Frankivsk, 2017. P. 158–159.

10. Research of characteristics of solid waste as an energy resource / S. O. Maksymiuk et al. Book of Abstracts : 3rd International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters, Ukraine, Kyiv, 24–27 May 2022. Kyiv, 2022. P. 63.

11. Maksym'yuk S.O. Modeling of gas networks in the conditions of the functioning of the natural gas market. Information technologies in education,

technology and industry: All-Ukrainian scientific and practical conference of young scientists and students. October 8, 2020: Collection of abstracts. Ivano-Frankivsk: IFNTUNG University. 2020. 43 p.

12. Maksym'yuk S.O. Energy parameters of natural gas as an additional diagnostic feature of gas distribution networks. Methods and means of non-destructive testing of industrial equipment: VII scientific and practical conference of students and young scientists. November 19-20, 2019 IIT, IFNTUNG. 2019.

13. Maksym'yuk S.O. Problems of informatization of processes of operation of the gas transportation system of Ukraine. Instrumentation and metrology: modern problems, development trends: III All-Ukrainian scientific and practical conference. October 11-12, 2018: Collection of materials. Lutsk: Information and publishing department of Lutsk NTU. 2018. p. 39.

14. Maksym'yuk S.O. Energy parameters of natural gas as an additional diagnostic sign of gas distribution networks. Non-destructive testing and 1 technical diagnostics: NKTD-2019: 9th National scientific and technical conference. November 19-21, 2019. Kyiv. 54 p.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	24
ВСТУП.....	25
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ ЯКОСТІ І ТРАНСПОРТУВАННЯ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ.....	33
1.1 Аналіз тенденцій розвитку наукових досліджень у галузі визначення якості енергоносіїв	333
1.1.1 Бібліографічний аналіз публікацій за напрямками дослідження.....	333
1.1.2 Аналіз мережевої візуалізації цитувань та виявлення трендових проблематик по кожному з напрямків дослідження	39
1.2 Огляд природного газу, як комерційного продукту: енергетична цінність та поняття якості	44
1.3 Огляд методів визначення якості природного газу	47
1.4 Огляд мереж транспортування природного газу.....	49
1.5 Виклики в сфері ІВС для оцінки якості енергоресурсів в газових мережах	53
1.6 Аналіз проблематики процесів домішування біогазу в газопостачальні мережі України	55
1.7 Вибір наукових напрямків досліджень	58
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ В РОЗГАЛУЖЕНИХ МЕРЕЖАХ	60
2.1. Дослідження повноти інформативних параметрів для оцінки якості в розгалужених газових мережах	60
2.2 Оцінка якості газу в мережі з одним входом	66
2.3 Розроблення методики проведення експерименту для оцінки якості газу в мережі з двома входами.....	66
2.4 Багатофакторний регресійний аналіз нелінійних залежностей між теплотворною здатністю газу та вхідними параметрами розгалуженої мережі	75
2.4.1 Перевірка математичної моделі на наявність мультиколінеарності між факторами регресії	80
2.4.2 Математичне моделювання доцільності застосування лінійної регресійної залежності в умовах мультиколінеарності факторів регресії	86

2.4.3 Математична модель нелінійних регресійних залежностей та оцінка значущості параметрів рівняння.....	88
2.4.3.1 Дослідження адекватності математичної моделі з використанням коефіцієнтів детермінації та кореляції.....	91
2.4.3.2 Застосування критерію Фішера для перевірки значущості математичної моделі	94
2.4.3.3 Застосування t-критерію Стюдента для перевірки значущості математичної моделі	96
2.4.3.4 Коригування математичної моделі нелінійних регресійних залежностей за результатами проведених дисперсійних аналізів оцінки її значущості.....	100
2.5 Методологія оцінки точності розроблених моделей визначення якості природного газу	107
2.6 Визначення якості природного газу з допомогою штучних нейронних мереж	113
2.7 Розроблення алгоритму функціонування інформаційно-вимірювальної системи контролю якості природного газу в розгалужених мережах	122
2.8 Коригування математичної моделі з врахуванням наявності в газовій мережі домішок водню	125
Висновки до розділу 2:	127
РОЗДІЛ 3 УДОСКОНАЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ ТРАНСПОРТУВАННЯ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ З УРАХУВАННЯМ ЇХ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЦІННОСТІ.....	129
3.1 Моделювання впливу якості природного газу на експлуатаційні параметри газових мереж	129
3.1.1 Дослідження зміни експлуатаційних параметрів газотранспортної мережі під впливом енергетичної цінності природного газу	129
3.1.2 Дослідження зміни експлуатаційних параметрів мереж низького тиску під впливом енергетичної цінності природного газу	132
3.2 Математична модель даних про якість природного газу, як діагностичного інформативного параметру газопроводу	136
3.2.1 Експериментальне дослідження зміни якості газу в газопроводі низького тиску	136

3.2.2 Розробка індикаторного параметру для оцінки технічного стану газопроводу низького тиску за зміною параметрів якості енергоносія	146
Висновки до розділу 3	150
РОЗДІЛ 4 МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЦІННОСТІ ГАЗОВИХ СУМІШЕЙ З ВМІСТОМ БІОМЕТАНУ	152
4.1. Визначення впливу компонентів біогазу на енергетичну цінність енергоресурсу	152
4.2 Дослідження характеристик біогазу з різних джерел	154
4.3 Коригування математичної моделі оцінки якості транспортованого газу в розгалужених мережах з врахуванням наявності закаченого біометану	160
4.3.1 Уточнення вимог до якості біогазу для закачування в газопровід	160
4.3.2 Адаптація моделі до змінених умов в газопроводі.....	163
4.3.3 Перевірка точності наведеної в формулі моделі без коригування але при впливі біогазу.....	165
4.3.4 Математичне моделювання наявності в газопроводі біометану та коригування моделі оцінки якості.....	167
4.4 Адаптація розробленої штучної нейронної мережі з врахуванням закачування водню і біометану в трубопроводі	170
4.5 Розроблення нормативних документів щодо закачування біометану в мережу природного газу та прокравання трубопроводів з тиском до 16 бар	174
4.5.1 Розроблення проекту нормативного забезпечення ДСТУ EN 16723-1:2023	174
4.5.2 Розроблення проекту нормативного забезпечення ДСТУ EN 12007-4.	177
Висновки до 4 розділу:	178
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	181
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	184
ДОДАТОК А.....	202
ДОДАТОК Б	207
ДОДАТОК В	217
ДОДАТОК Д.....	218
ДОДАТОК Е	222
ДОДАТОК Ж	224

ДОДАТОК З.....	225
ДОДАТОК К.....	251
ДОДАТОК Л.....	255
ДОДАТОК М.....	260
ДОДАТОК Н.....	262
ДОДАТОК Т.....	292

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

У роботі застосовано такі позначки та скорочення:

- ФХП – фізико-хімічні показники;
- ЄС – Європейський Союз;
- ІВС – інформаційно-вимірювальна система;
- ГТС – газотранспортна система
- ГРМ – газорозподільчі мережі
- ГРС – газорозподільча станція
- ГРП – газорозподільчий пункт
- НКРЕКП – Національна комісія з регулювання енергетики та комунальних послуг;
- ЗУ – Закон України;
- ПСГ – підземні сховища газу;
- ВТВ – виробничо-технічні витрати;
- ЕнС – Енергетичне Співтовариство;

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. За останнє десятиліття з членством України в Енергетичному співтоваристві набули розвитку процеси створення ринку природного газу на території нашої державі. Важливою передумовою для цього стало інтеграційне реформування українського законодавства - прийняття на національному рівні Закону України «Про ринок природного газу» та інших нормативних документів (ДСТУ ISO 15112:2009 «Природний газ. Визначення енергії», Постанови НКРЕ та КМ №2498 від 30.09.2015 р. «Про затвердження типового договору розподілу природного газу» та ін.). Таке законодавче поле створило підґрунтя для впровадження низки обов'язкових умов на ринку природного газу України. Всі вони стосуються, в основному, розгляду природного газу, як енергетичного товару із впровадженням інформатизації споживачів ринку даними про спожиту ними енергію та введенням спільних умов на цьому ринку. Тому обов'язковою умовою є перегляд сталих методів та способів метрологічної оцінки газу в процесі торгівлі між споживачами та операторами газо-транспортної системи з ціллю впровадження використання при таких розрахунках якості енергоресурсу.

Протяжність газопроводів, обсяг газосховищ та потужність газотранспортної мережі України робить її однією з найбільш розвинених на Євразійському континенті. Така мережа потребує безперервного контролю, основою якого є інформатизація параметрів як самого енергоресурсу, так і обладнання, що використовується для його транспортування. Враховуючи потребу в зміні підходів до торгівлі природним газом з врахуванням його якісних показників, виникає потреба у проведенні досліджень для розвитку інформатизації управління технологічними процесами транспортування і розподілу природного газу.

Наразі ринок природного газу працює не повноцінно. Забезпечення споживачів інфомацією про якісні параметри енергоносія виконується лише вказанням в щомісячній платіжці середньоприведеної по регіону розподілу оператора газо-розподільчої мережі калорійності природного газу та розміщенням на сайтах операторів паспортів з фізико-хімічними показниками енергоносія. Розрахунок за послуги з газопостачання проводяться на підставі даних про об'єм (обсяг) газу в куб. метрах, без врахування енергетичної цінності енергоресурсу.

Вивчення проблематики за цим напрямком у вітчизняній літературі не є достатнім та потребує доопрацювань. В той же час, досвід із закордонного наукового поля, особливо для мереж розподілу природного газу низького тиску, можливий для використання в умовах українського ринку газу лише на рівні стратегічних підходів та методів. Причина у різній нормативній, технологічній та інформаційній базі, що використовуються у вітчизняному та закордонному рівнях.

Отже, для українського ринку природного газу є актуальним вивчення шляхів удосконалення експлуатації газових мереж низького тиску в розрізі питання про створення нових методів інформатизації технічних процесів з ціллю врахування якісних параметрів енергоресурсу.

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

Дисертаційна робота виконувалась за особистою участю автора і відповідає науковому напряму кафедри інформаційно-вимірювальних технологій Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, а також в рамках:

- науково-дослідної теми «Розроблення методології та моделювання переходу розрахунків за природний газ за його енергетичними параметрами» (номер державної реєстрації 0117U007107, з 01.10.2017-2019 рік);

- міжнародного проекту «Відновлення енергії з використанням теплового перетворення в транскордонному регіоні EpyMSW» (№HUSKROUA/1702/6.1/0015);
- міжнародного проекту «Транскордонна мережа енергетично сталих університетів Cross-border Network of Energy Sustainable Universities (Net4Energy)» №HUSKROUA1702/6.1/0075.

Метою дослідження є вирішення актуальної науково-прикладної задачі в галузі інформаційно-вимірювальних систем, зокрема удосконалення способу оцінки якості природного газу та його сумішей з використанням експрес-методу в процесі транспортування розгалуженими мережами шляхом розроблення нових математичних залежностей, що описують вплив варіативності якісних характеристик газу на експлуатаційні параметри газорозподільних мереж з урахуванням сумішей природного газу з воднем і біометаном.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі необхідно вирішити такі **завдання**:

- виконати системний аналіз нормативно-технічного забезпечення процесів вимірювання теплотворної здатності природного газу та інших газів, що транспортуються газопроводами, з метою визначення ключових викликів і невідповідностей сучасним вимогам до точності вимірювань та чинним стандартам у контексті енергетичної цінності;
- дослідити розподіл зміни якісного показника природного газу в газорозподільній мережі та визначити метрологічні параметри сучасної інформаційно-вимірювальної системи контролю якості енергоносія в умовах динамічної мережі (за параметром теплотворної здатності газу);
- розробити регресійну математичну модель залежності теплотворної здатності природного газу на рівні споживачів для мереж із двома

джерелами газопостачання, від параметрів, отриманих за допомогою приладу експрес-контролю якості газу на кожному з вхідних потоків;

- розробити алгоритм функціонування інформаційно-вимірювальної системи контролю якості природного газу з врахуванням отриманих залежностей;
- дослідити вплив варіативності якісних характеристик природного газу на експлуатаційні параметри газотранспортної мережі низького тиску під час транспортування енергоносія;
- розробити уточнену математичну модель оцінки якісних характеристик енергоносія для розгалужених газорозподільних мереж із врахуванням впливу домішок водню та біометану у широкому діапазоні концентрацій та оцінити її точність.

Об'єктом досліджень є процес визначення енергетичної цінності природного газу в розгалужених газових мережах низького тиску.

Предметом дослідження є методи оцінки енергетичної цінності газу під час транспортування в газорозподільній системі, на базі сучасних інформаційно-вимірювальних технологій, експрес-методу контролю якості газу, а також впливу домішок водню та біометану на функціональні параметри мережі.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань і досягнення мети в дисертації використано методи статистичного аналізу даних, зокрема методи регресійного та дисперсійного аналізу, методи штучних нейронних мереж, методи оцінки точності виконання вимірювань.

Наукова новизна одержаних результатів дисертаційної роботи визначається такими положеннями:

1. Вперше розроблено математичну модель між вищою теплотою згоряння природного газу, що постачається споживачам у газорозподільних мережах із декількома джерелами газопостачання, та їх параметрами (швидкістю

поширення ультразвуку в газовій суміші, вмістом діоксиду вуглецю та об'ємною витратою газового потоку), що з використанням розробленої алгоритму функціонування інформаційно-вимірювальної системи дозволяє оцінити якісні характеристики природного газу в розгалужених мережах з двома джерелами постачання.

2. Удосконалено метод оцінки технічного стану газопроводів низького тиску, в якому на відміну від існуючих, застосовано новий інформативний параметр зміни теплотворної здатності газу, що дозволяє прогнозувати утворення корозійних пошкоджень трубопроводу низького тиску.

3. Отримав подальший розвиток метод визначення якісних характеристик газових сумішей в розгалужених мережах шляхом урахування вмісту об'ємів біометану та водню, що дозволило врахувати вимоги до декарбонізації газової сфери та покращити достовірність застосування математичної моделі.

Практичне значення одержаних результатів.

Практичне значення результатів дисертаційної роботи полягає у розробленні науково обґрунтованих методик та алгоритмів, що забезпечують підвищення ефективності оцінки якості енергоресурсів та експлуатаційних параметрів газотранспортних мереж із урахуванням енергетичної цінності природного газу:

- розроблено проект методики оцінки технічного стану газопроводу на основі зміни теплотворної здатності газу в процесі транспортування газопроводом низького тиску, як додаткову діагностичну ознаку газопроводів;

- розроблено інформаційно-вимірювальну систему оцінки якості природного газу в розгалужених мережах на основі штучних нейронних мереж, що методично допоможе інтегрувати експрес-методи вимірювання якості газу у процес оперативного моніторингу газорозподільних мереж;

- розроблено проєкт національного стандарту на основі ДСТУ EN 16723-1:2023, який регламентує вимоги до якості біометану та визначає критерії його придатності для закачування у газові мережі;

- розроблено проєкт національного стандарту на ДСТУ EN 12007-4, який регламентує спеціальні функційні вимоги до оновлення газових трубопроводів для максимального робочого тиску до 16 бар, забезпечуючи їхню безпечну та ефективну експлуатацію.

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати дисертаційної роботи одержані автором самостійно. Зокрема, в опублікованих у співавторстві роботах здобувачем:

- розроблено метод визначення вищої теплоти згоряння природного газу у розгалужених газорозподільних мережах з двома джерелами постачання на основі кореляційних залежностей між теплотворною здатністю газу та вимірюваними параметрами (швидкістю поширення ультразвуку і вмістом CO₂) з використанням приладів експрес-контролю якості газу.

- проведено комплексне моделювання газорозподільної мережі низького тиску у програмному середовищі SIMONE з урахуванням впливу змін теплотворної здатності природного газу на гідравлічні параметри мережі.

- обґрунтовано необхідність використання методів експрес-контролю якості газу для оперативної оцінки показників енергетичної цінності в точках газотранспортної системи (ГТС) і газорозподільних мереж (ГРМ). Проведено порівняльний аналіз вимірних параметрів якості газу на різних рівнях системи транспортування.

- виявлено та обґрунтовано зв'язок між технічним станом газопроводу (наявністю корозійних пошкоджень) та якісними характеристиками природного газу (теплотою згоряння і вмістом домішок). Розроблено науково обґрунтовані підходи до використання якісних параметрів газу як додаткових діагностичних

індикаторів технічного стану газорозподільних мереж, що дозволяє підвищити точність і достовірність технічної діагностики.

- здійснено збір, сортування проб твердих побутових відходів та визначення їх масових часток за складовими фракціями для цілей дослідження калорійності твердих побутових відходів, як енергетичного ресурсу.

Апробація роботи. Основні результати доповідалися та обговорювалися на ряді міжнародних і вітчизняних конференціях, зокрема:

- 7-й міжнародній науково-технічній конференції пам'яті професора Ігоря Кісіля «Сучасні прилади, методи та технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазового обладнання (Івано-Франківськ, 2017, 14-16 листопада);

- 3-й всеукраїнській науково-практичній конференції «Приладобудування та метрологія: сучасні проблеми, тенденції розвитку» (Луцьк, 2018, 11-12 жовтня);

- 9-й національній конференції «Неруйнівний контроль та технічна діагностика: НКТД-2019

- 3-й міжнародній науково-практичній конференції «Прикладні науково-технічні дослідження» (м. Київ, 2019, 3-5 квітня);

- 7-й науково-практичній конференції студентів і молодих учених «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання» (м. Івано-Франківськ, 2019, 19-20 листопада).

- 8-й міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Сучасні виклики і актуальні проблеми науки, освіти та виробництва: міжгалузеві диспути» (Київ, 2020, 11 вересня).

- 3rd International scientific and practical conference (Munich, Germany, 2020).

В повному обсязі результати досліджень доповідалися і обговорювалися на розширеному засіданні кафедри інформаційно-вимірювальних технологій Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Публікації результатів досліджень. За темою дисертаційної роботи опубліковано 14 друкованих праць, із них 3 – статті у фахових наукових виданнях, затверджених МОН України; 2 – закордонні публікації в Scopus; 9 - матеріалів науково-практичних конференцій.

Обсяг і структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Дисертація викладена на 294 сторінках. Окрім того робота проілюстрована 41 рисунками, включає 24 таблиць, список використаних джерел зі 135 найменувань і 11 додатків.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ ЯКОСТІ І ТРАНСПОРТУВАННЯ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ

1.1 Аналіз тенденцій розвитку наукових досліджень у галузі визначення якості енергоносіїв

1.1.1 Бібліографічний аналіз публікацій за напрямками дослідження

Для детального аналізу розвитку наукових підходів до проблематики, що висвітлюється в цій дисертаційній роботі, було здійснено бібліометричне дослідження публікацій. Ідентифіковано три ключові напрямки дослідження, які відповідають меті та завданням дисертації. З ціллю всебічного огляду на проблематику, для кожного з цих напрямків сформовано кластери ключових слів. Результати в таблиці 1.

Для кожного з напрямків було складено пошукові запити, які включають ключові слова, що дозволяє максимально охопити релевантні публікації. При побудові запитів використовувалися логічні оператори OR для уточнення пошуку. Оскільки більшість публікацій у провідних базах написані англійською мовою, формули запитів подані цією ж мовою, що забезпечить дослідженню більш широкий охоплення літератури. Формули запитів занесені в таблицю 1.1.

Таблиця 1.1 – Визначені напрямки дослідження та кластери ключових слів

Напрямок дослідження	Кластери ключових слів	Формули запитів
1. Оцінка якості природного газу	<ul style="list-style-type: none"> ○ якість природного газу ○ оцінка якості природного газу ○ енергетична цінність енергоресурсу ○ вимірювання якості газу ○ визначення теплотворної здатності ○ експрес-метод оцінки якості газу ○ швидкість ультразвуку в газі ○ моніторинг якості природного газу 	("natural gas quality" OR "assessment of natural gas quality" OR "energy value of energy resources" OR "gas quality measurement" OR "calorific value determination" OR "express method for gas quality evaluation" OR "ultrasound velocity in gas" OR "monitoring of natural gas quality")

Продовження таблиці 1.1

Напрямок дослідження	Кластери ключових слів	Формули запитів
2. Біометан в газових мережах	<ul style="list-style-type: none"> ○ Біометан ○ Домішки біогазу ○ закачування біометану в газові мережі ○ покращення та очищення біогазу ○ інтеграція біометану в мережі природного газу ○ стандарти якості біогазу ○ перетворення біогазу в біометан ○ сумісність газової мережі з біометаном ○ вплив біометану на роботу газової мережі 	("biomethane" OR "bogas impurities" OR "injection of biomethane into gas networks" OR "biogas upgrading and purification" OR "integration of biomethane into natural gas networks" OR "biogas quality standards" OR "conversion of biogas into biomethane" OR "gas network compatibility with biomethane" OR "impact of biomethane on gas network operation")
3. Інформаційно-вимірювальні системи моніторингу газових мереж	<ul style="list-style-type: none"> ○ інформаційно-вимірювальні системи в енергетиці ○ системи моніторингу технічного стану газопроводу ○ системи вимірювання енергетичних ресурсів ○ моніторинг газопроводу ○ моніторинг газових мереж ○ моніторинг і контроль енергетичних ресурсів ○ аналітика енергетичних даних 	("information-measurement systems in energy" OR "technical condition monitoring systems of gas pipelines" OR "energy resource measurement systems" OR "pipeline monitoring" OR "gas network monitoring" OR "monitoring and control of energy resources" OR "energy data analytics")

За результатами досліджень [1], база даних Scopus охоплює більш ширший діапазон журналів і цитувань порівняно з Web of Science, причому між публікаціями, що індексуються в цих базах, спостерігається 95% перекриття [2]. У зв'язку з цим для проведення бібліометричного аналізу було обрано використання даних із бази Scopus. Здійснено пошук за формулами запитів, вказаними в таблиці 1 та сформовано три бази даних про публікації в наукометричній базі даних Scopus за трьома напрямками дослідження. Загалом, для аналізу було розглянуто 1117 публікацій для першого кластеру ключових слів, 5200 публікацій - для другого та 4909 для третього кластерів.

Проведено аналіз динаміки кількості публікацій за обраними напрямками дослідження (рисунок 1.1). Як видно з рисунку, існує тенденція до зростання зацікавленості наукової спільноти дослідженням проблем для усіх трьох обраних напрямків. Для першого кластеру ключових слів, що характеризує якість природного газу різко зростає кількість публікацій почата між 2017 та 2014 роками. У кластерах №2 та №3 таким роком став 2011. Ці результати дають підставу вважати, що обрана для дисертаційної роботи сфера залишатиметься важливою та привертатиме увагу дослідників у найближчій перспективі.

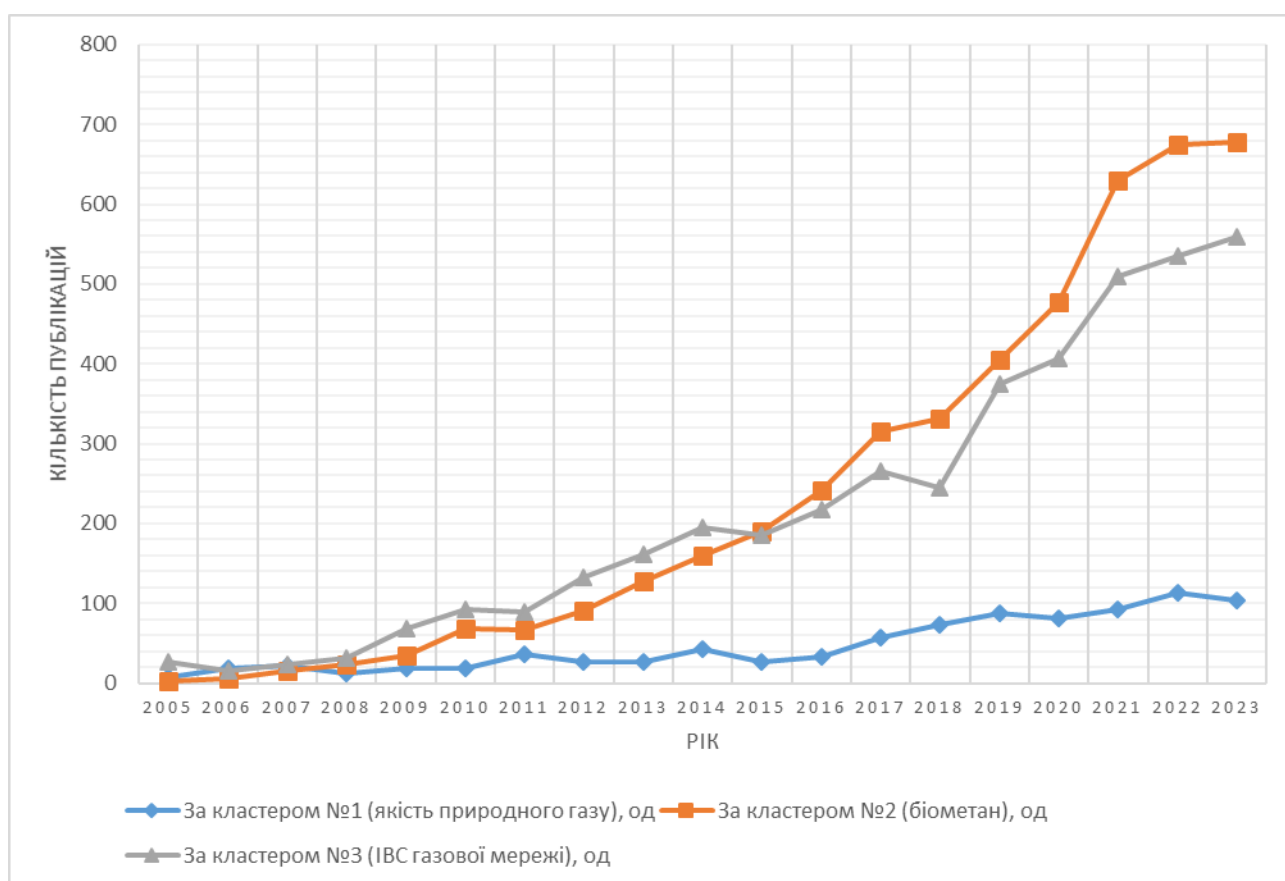


Рисунок 1.1 – Динаміка зміни кількості публікації у наукометричних виданнях бази Scopus за напрямками дослідження

Серед найбільш цитованих публікацій по першому напрямку дослідження, є стаття I. Staffell et al, опублікована у 2019 р. [3], яку цитували 2579 разів в

журналах, що індексуються наукометричною базою даних Scopus (табл. 1). Автори цієї статті провели всебічний аналіз ролі водневих технологій у декарбонізації глобальних енергетичних систем та відзначили значний прогрес у зниженні вартості та підвищенні продуктивності водневих технологій. Аналіз інших найбільш цитованих публікацій по кожному з напрямків дослідження поданий в таблиці А.1 додатку А.

Найбільший внесок у дослідження проблем оцінки якості природного газу здійснив Zhou, L., а провідною науковою установою у цій сфері є China National Petroleum Corporation. У другому напрямі досліджень лідером за кількістю наукових публікацій є Murphy, J.D., а ключовою установою – University College Cork. Третій напрям, що стосується декарбонізації газових сумішей, найбільш розроблений у працях Abid, M. та дослідників Wuhan University of Technology. Графіки лідерів серед авторів та наукових установ для першого напрямку дослідження представлені на рисунках 1.2 та 1.3, для інших напрямів – у додатку А на рисунках А.1–А.4.

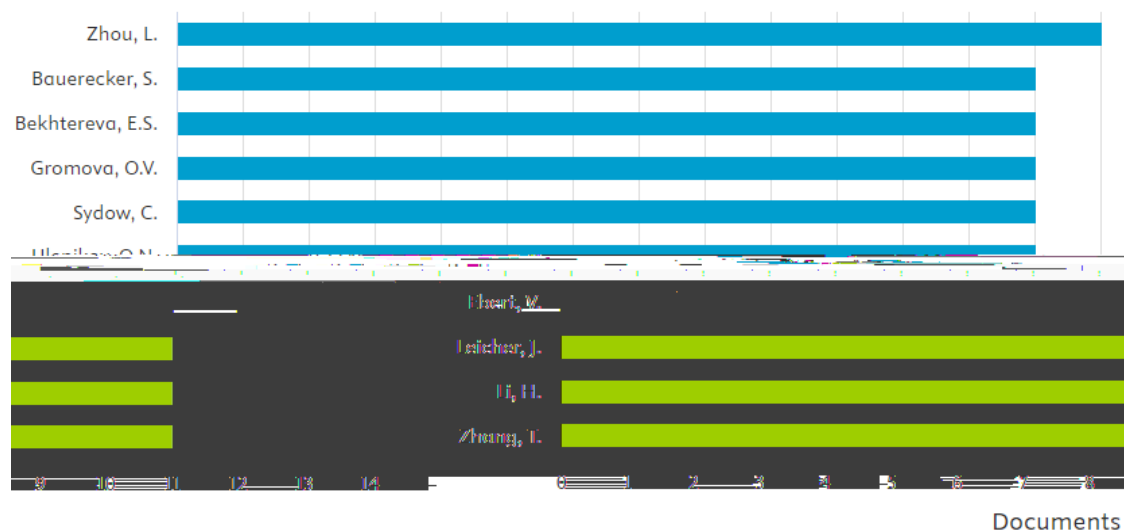


Рисунок 1.2 – Публікації за авторами в кластері №1

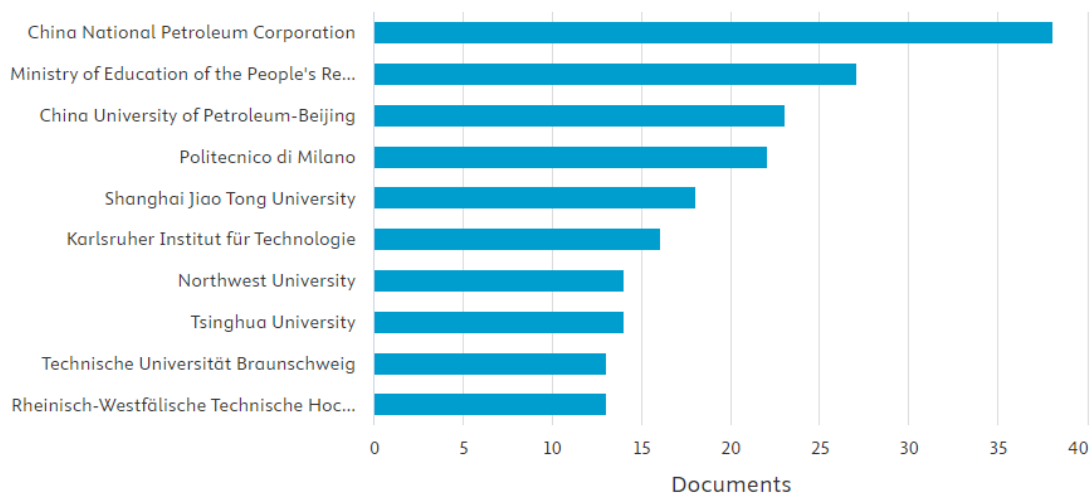


Рисунок 1.3 – Публікації за науковими установами в кластері №1

Наукові праці з проблем оцінки якості природного газу, інтеграції біометану в газові мережі та ІВС газових мереж здебільшого публікуються за галузями знань «Енергія» та «Інженерія». Серед інших поширених сфер слід відзначити «Навколишнє середовище» та «Комп'ютерні технології». Розподіл сфер публікацій за першим напрямом дослідження представлено на рисунку 1.4. Результати для інших напрямків наведено у додатку А на рисунках А.5 та А.7.

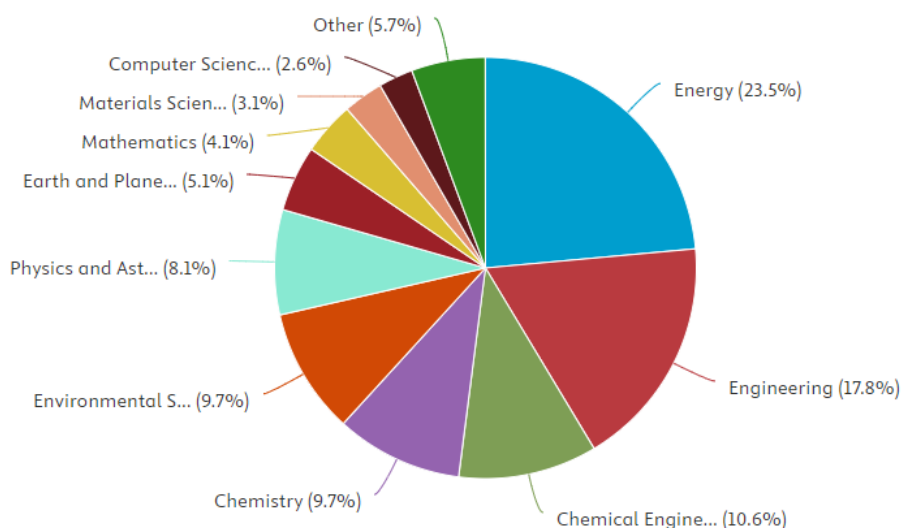


Рисунок 1.4 – Розподіл публікацій в першому напрямку дослідження за сферами

Бібліографічний аналіз показує, що найбільша кількість публікацій з досліджуваної проблематики належить вченим Китаю та США. Детальний огляд публікацій за першим напрямом дослідження у розрізі країн представлено на рисунку 1.5, графіки для інших напрямків – у додатку А на рисунках А.6 та А.8.

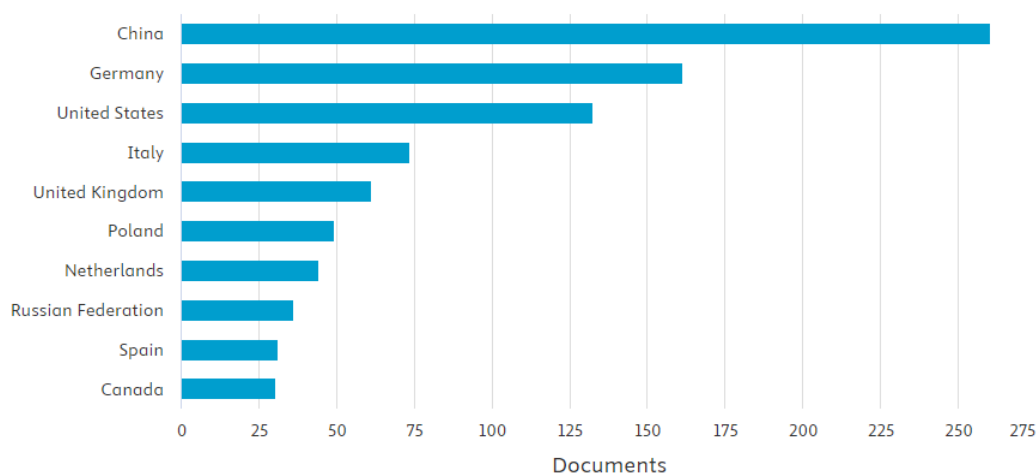


Рисунок 1.5 – Публікації за країнами в кластері №1

Отже, дослідження за обраними напрямками мають міждисциплінарний характер та охоплюють широку географію науковців, з помітною перевагою вчених і установ із Китаю, США, Німеччини, Великої Британії та Італії. Аналіз видавничої діяльності підтвердив зростання наукового інтересу протягом останніх 20 років до цих напрямків.

В науковому колі України питання методів переходу розрахунків за газ за його якісними параметрами висвітлено в працях Кузь М. В., Заміховський Л. М., Шульга В. А., Пономарева Ю. В., Швейкін, О. Л., Мотало А., Герасимов О. В., Капітанчук, К.І., Андрієшин М. П.. Ними [4] проведено загальний аналіз проблематики, розроблені програми щодо її вирішення, втім в більшості робіт відсутня конкретизація про самі методи. Основний акцент дослідників сконцентрований на розробленні саме методів визначення калорійності газу, їх метрологічному забезпеченні та практичному впровадженні. У роботі [5]

досліджено передумови і загальний стан переходу розрахунків. Визначено вплив фізико-хімічних показників компонентів природного газу на його теплотворну здатність [6]. В [7] систематизовано результати розрахунків за природний газ за якісними показниками під час закачування та відбирання газу на ПСГ. В роботі [8] оцінено нормативно-правові вимоги та технічна можливість впровадження в Україні обліку природного газу в одиницях енергії. Автори [9], ґрунтуючись на тому, що в Україні відсутні вітчизняні засоби обліку природного газу в енергетичних одиницях, запропонували використати концепцію віртуального пункту комерційного обліку електроенергії для обліку природного газу. В роботі [10], ними оцінено точність визначення теплоти згорання природного газу з допомогою математичної моделі прогнозування для певного календарного місяця року на основі даних про споживання за 2014-2019 роки.

В наукових роботах закордонних авторів Stanislaw Brzeczowski, Magdalena Glebocka, Maciej Szeniawski, Maciej Chaczykowska, Giulio Guandalini, Alessandro Franco, Linlin Ma [11 – 16] розроблені методики моделювання газотранспортних систем на базі програмного забезпечення, проте дані дослідження акцентуються на локальних мережах інших країн (в основному країн-споживачів). Такі підходи практично не застосовні до українських умов, де відбувається власний добуток, зберігання та споживання у значних обсягах, що змінює діапазон коливання параметрів якості природного газу в мережі розподілу.

1.1.2 Аналіз мережевої візуалізації цитувань та виявлення трендових проблематик по кожному з напрямків дослідження

Для подальшого дослідження бібліографічних даних було використано програмне забезпечення VOSviewer (версія 1.6.20), що дозволяє будувати та візуалізувати бібліометричні мережі [17, 18]. Карта бібліометричної мережі

наочно відображає зв'язки між ключовими словами публікацій за такими принципами [17, 19]:

- колір кола вказує на приналежність ключового слова до певного кластеру;
- діаметр кола відображає частоту використання терміну в наукових публікаціях за напрямком дослідження;
- відстань між словами на карті демонструє сила зв'язку між ключовими словами: чим вона менша, тим тісніший взаємозв'язок.

З допомогою цього інструменту проведено глибокий аналіз наукових трендів та визначено ключові проблематики у межах обраних напрямків досліджень. Результати аналізу наведені в додатку Б. Нижче подано підсумки аналізу за кожним напрямком:

1. У сфері оцінки якості природного газу виділено такі основні кластери, що відображають проблематики дослідження в цьому напрямку: транспортування, контролю якості та енергетичної цінності газу. Мережева візуалізація цитувань за напрямком "Оцінка якості природного газу" подана на рисунку 1.6. Також проведено аналіз в хронологічному розрізі (рисунок 1.7). Аналіз показує, що у період 2014–2016 років основна увага дослідників зосереджувалася на хроматографічних методах аналізу, які забезпечували детальне визначення складу газу, його фізико-хімічних характеристик, а також контроль домішок, таких як CO_2 та H_2S . З 2020 року спостерігається зростання інтересу до декарбонізації енергетичних систем, зокрема впровадження технологій водневого змішування та закачування у газові мережі. Важливим трендом також є розвиток інноваційних методів контролю якості, зокрема оптичних і ультразвукових технологій, що відповідають сучасним вимогам точності та ефективності.

2. Дослідження в напрямку біометану у газових мережах продемонстрували зростаючу роль біогазових технологій як елемента сталого розвитку. Основний акцент робиться на процесах анаеробного зброджування, модернізації біогазу та інтеграції біометану у наявні газові мережі. Аналіз цитувань за хронологією свідчить, що у період 2012–2015 років пріоритетними були питання мікробіологічного метаногенезу, управління біореакторами та фізико-хімічного очищення біогазу. Сучасні дослідження (2020–2022 роки) орієнтовані на економічну ефективність застосування біометану, його роль у декарбонізації та інтеграцію з відновлюваними джерелами енергії. Особлива увага приділяється технологіям хімічної абсорбції та тискової адсорбції для підвищення якості біометану до рівня, придатного для газових мереж. Візуалізація проведеного аналізу і детальне пояснення на ведено в додатку Б (рисунок Б.1 та Б.2).
3. Третій напрямок досліджень, пов'язаний із інформаційно-вимірювальними системами моніторингу газових мереж, характеризується розвитком сучасних технологій сенсорного контролю та обробки даних. Хронологічний аналіз показує, що у період 2012–2016 років ключовим завданням було виявлення витоків та структурний моніторинг стану газопроводів із використанням волоконно-оптичних сенсорів. З 2020 року дослідження зосереджуються на інтелектуальних системах, які інтегрують машинне навчання, безпроводні сенсорні мережі та методи глибокого аналізу даних. Технологічні інновації, такі як акустичний моніторинг та оптичні системи, дозволяють автоматизувати діагностику дефектів, підвищуючи надійність та ефективність систем моніторингу. Візуалізація проведеного аналізу і детальне пояснення на ведено в додатку Б (рисунок Б.3 та Б.4).

Загальний аналіз свідчить про спільні тенденції у трьох напрямках, ключовою з яких є декарбонізація енергетичних систем. Це проявляється через впровадження водневих технологій, розвиток біометану та модернізацію контролю газових мереж для зниження викидів CO₂. Інноваційні технології, зокрема сенсорні мережі, машинне навчання та оптичні методи вимірювання, відіграють визначальну роль у підвищенні ефективності газових систем. Взаємозв'язок між дослідженнями біометану та водневих технологій відображає глобальну тенденцію до інтеграції відновлюваних джерел енергії у газову інфраструктуру, тоді як сучасні інформаційно-вимірювальні системи забезпечують необхідний рівень контролю та безпеки при впровадженні нових енергоносіїв.

1.2 Огляд природного газу, як комерційного продукту: енергетична цінність та поняття якості

Природний газ - корисна копалина, що є сумішшю вуглеводнів та неуглеводневих компонентів, перебуває у газоподібному стані за стандартних умов (тиск 760 мм ртутного стовпчика і температура 20°C) і є товарною продукцією [20].

Газ використовується як паливо для індивідуального та централізованого опалення та приготування їжі, як пальне для електростанцій та машин. Також природний газ є сировиною у хімічній промисловості [21]. За останні 20 років, споживання первинної енергії в Україні, так і самого природного газу демонструє стабільну тенденцію до зниження (рисунок 1.8). Рівень споживання впав на 72,8%.

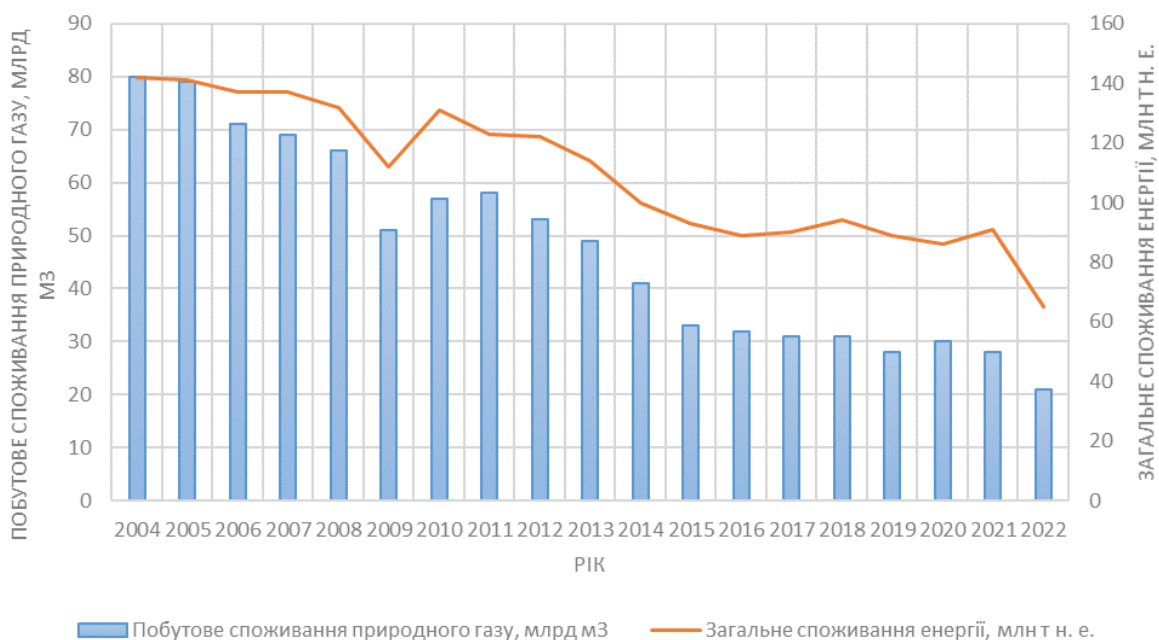


Рисунок 1.8 – Тенденція зміни рівнів споживання первинної енергії та природного газу в Україні [22]

Якість природного газу визначається сукупністю фізико-хімічних показників (ФХП), які повинні відповідати вимогам Кодексу ГРМ [23]. Вимоги кодексів до граничних значень ФХП для ГТС та ГРМ наведено у додатку В.. Основними показниками якості природного газу є його теплота згорання, вміст вуглецевмісних компонентів та домішків (таких як сірководень, волога, азот, діоксид вуглецю).

Якщо розглядати енергетичну цінність природного газу, теплота згорання або калорійність є одним з ключових параметрів якості. Вона є комплексною величиною, так як залежить від вмісту кожного з компонентів природного газу. Найбільший вплив на калорійність чинить метан (CH_4), який зазвичай становить від 85% до 98% складу природного газу. Інші вуглеводні (етан, пропан, бутан) та домішки можуть теж впливати на ФХП енергоносія.

В подальших дослідженнях цієї роботи, як основний параметр якості прийнято вищу теплоту згорання природного газу. Енергія, отримана з природного газу розраховується за формулою [24]:

$$E = V_c \cdot H_s, \quad (1.1)$$

де E - обсяг енергії газу, (МВт·год); V_c - об'єм газу, зведений до стандартних умов, (тис. м³); H_s - середньозважена вища теплота згорання газу, (кВт·год/м³).

Варто відзначити, що у країнах ЄС, розрахунки за природний газ здійснюються шляхом вимірювання об'єму (в м³), як і в Україні але з подальшим перетворенням до енергетичних одиниць на основі теплотворної здатності (зазвичай кВт*год) [25]. Проте ці країни так само, як і Україна раніше мали систему розрахунків за об'ємними показниками. До прикладу, Словаччина перейшла на енергетичні одиниці у 2008 році, Польща – у 2014 році. Зміни в обліку були ініційовані через уникнення непорозумінь - постачання на відкритому ринку здійснюється з різних джерел з різним хімічним складом, тому клієнт платить не за спожиті куби, а енергію [26].

Наразі існує відмінність в одиницях обліку між Україною та Європою, що ускладнює інтеграцію у європейські енергетичні системи [27]. Для вирішення цих питань необхідно провести адаптацію до європейських стандартів та реформувати регуляторні механізми, включно з митними зборами [28]. В додатку Д наведено аналіз національних та європейських нормативних документів, що стосуються врахування природного газу, як комерційного продукту. Основні два висновки з цього аналізу:

- прийняті в Україні законодавчі акти у газовому секторі відповідають сучасним вимогам європейської енергетичної політики;
- незважаючи на наявність гармонізованих стандартів, переходу на енергетичні одиниці оцінки споживання природного газу в Україні ще

не відбулося, що унеможливило повноцінну інтеграцію газового ринку України в ЄС (згідно норм [29]).

Україна наразі знаходиться на незавершеній стадії переходу розрахунків за природний газ з об'ємних до енергетичних одиниць. У січні 2017 року НКРЕКП внесла зміни [30] до кодексів ГТС та ГРМ щодо методики визначення енергії та зобов'язання операторів ГРП вказувати в платіжках кількість спожитої енергії. А з травня 2022 року облік газу мав б вже здійснюватися не у метрах кубічних, а в кіловат-годинах (згідно з [31], редакція від 02 листопада 2021 року). Однак через ускладнення умов збору проб, спричинене повномасштабним вторгненням, Верховна рада внесла зміни до ЗУ [32]. Тому перехід відбудеться з 1 травня, що настане за датою припинення або скасування воєнного стану в Україні. Проте для його втілення перед сферою існує кілька викликів, які будуть розглянуті в наступних підрозділах.

1.3 Огляд методів визначення якості природного газу

За вимірювання якості енергоносія та дотримання вимог щодо його ФХП відповідальний оператор ГРМ з моменту його надходження в мережі ГРМ до моменту його передачі в пункт призначення [23]. Вимірювання якості природного газу (його теплотворної здатності) є складним та дорогим процесом [33]. Методи визначення теплотворної здатності природного газу можна звести до трьох основних категорій (рисунок 1.9):

1. Калориметричні методи, які базуються на безпосередньому вимірюванні кількості тепла, що виділяється при згорянні певного об'єму газу [34]. Ці методи забезпечують високу точність визначення теплоти згорання, однак потребують складного обладнання та тривалого часу на проведення вимірювань. Вони підходять для лабораторних досліджень, але менш зручні для оперативного контролю якості газу в реальних

умовах експлуатації. Прикладом такого обладнання є калориметри бомбового типу, які широко використовуються в лабораторних умовах для точного визначення енергетичної цінності газу.

2. Розрахункові методи з використанням хроматографа [35]. Для визначення компонентного складу природного газу використовують газову хроматографію, що, в свою чергу, дає можливість розрахувати його калорійність та інші фізико-хімічні властивості. Цей метод характеризується високою точністю та швидкістю аналізу, однак вимагає складного та дорогого обладнання, а також кваліфікованого персоналу для проведення аналізу.
3. Кореляційні методи визначення ФХП природного газу. Вони базуються на використанні емпіричних залежностей між різними параметрами газу, такими як густина, швидкість звуку та калорійність. Є зручними для оперативного контролю якості газу, оскільки не потребують складного обладнання та можуть бути реалізовані безпосередньо на місці експлуатації. Однак їх точність може бути нижчою порівняно з прямими методами вимірювання, особливо при значних коливаннях складу газу.

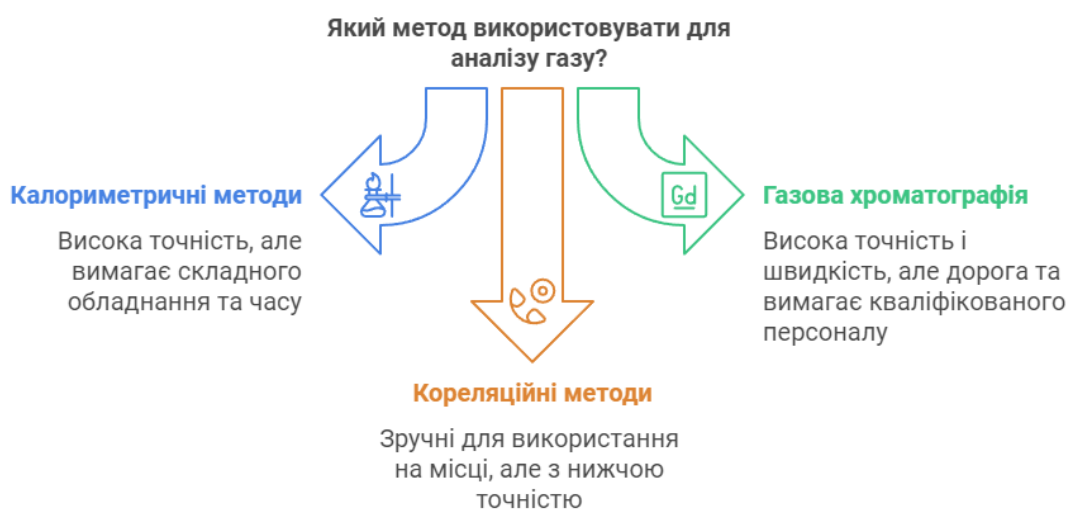


Рисунок 1.9 – Переваги та недоліки методів оцінки теплотворної здатності природного газу

Вологість природного газу є важливим параметром, оскільки надмірна кількість вологи може призводити до корозії обладнання та утворення гідратів. Для вимірювання вологості використовуються різні методи, зокрема електролітичні, ємнісні та оптичні сенсори. Вибір конкретного методу залежить від необхідної точності, швидкості реакції та умов експлуатації.

Для визначення концентрації домішок в природному газі застосовуються різні аналітичні методи, зокрема спектроскопія, електрохімічні сенсори та інші. Вибір конкретного методу залежить від необхідної точності вимірювань та умов експлуатації.

Таким чином, вибір конкретного методу та обладнання для контролю якості природного газу слід здійснювати з урахуванням специфіки завдань, вимог до точності та оперативності вимірювань, а також економічних та технічних можливостей підприємства.

1.4 Огляд мереж транспортування природного газу

Мережу газопостачання поділяють на три ланки: газовидобувні підприємства, газотранспортну систему (ГТС) та газорозподільну систему (ГРМ). Газові мережі є найбільш ефективним та єдиним видом транспортування природного газу в Україні. Протяжність газопроводів, обсяг газосховищ та потужність газової мережі України робить її однією з найбільших на Євразійському континенті.

Газовидобувні підприємства забезпечують видобуток природного газу, включно з виробництвом біогазу та газів з альтернативних джерел [24]. За даними [36], станом на 2015 рік в Україні функціонувало 3,9 тис. свердловин.

Газотранспортна система (ГТС) – комплекс інженерних споруд для транспортування природного газу від місць видобутку чи імпорту до споживачів або газосховищ [24]. Основні функції ГТС [37]: транспортування

газу на великі відстані з мінімальними втратами, регулювання параметрів (тиск, якість) газу, зберігання газу в підземних сховищах для балансування сезонних коливань споживання. До ГТС належать магістральні газопроводи з відводами та лупінгами, що транспортують газ від установок підготовки газу чи газосховищ до газорозподільних станцій зі зниженням тиску до 1,2 МПа. Система характеризується протяжністю 22,2 тис. км та великими діаметрами труб (700–1400 мм) [36, 38]. Для підтримання роботи ГТС функціонують компресорні станції, газорозподільні станції, установки підготовки газу та протикорозійного захисту.

Газорозподільна система (ГРМ) призначена для доставки природного газу від газорозподільних станцій до кінцевих споживачів із тиском не більше 1,2 МПа. ГРМ включає газопроводи, обладнання для зниження і стабілізації тиску (ГРП, ШРП), установки електрохімічного захисту та інші технологічні об'єкти [23]. Особливості газопроводів ГРМ наведено у таблиці 1.2 та на рисунку 1.10, побудованих на основі даних [36, 39].

Таблиця 1.2 – Особливості газопроводів ГРМ України [36, 39]

Тип газопроводу	Верхня межа робочого тиску, МПа	Загальна протяжність трубопроводів на території України, тис. км	Призначення газопроводів
Високого тиску I категорії	1.2	13.4	Ними газ рухається від ГРС до ГРП у регіони споживачів.
Високого тиску II категорії	0.6	34.5	Служать для подачі газу до промислових об'єктів та газорозподільних пунктів нижчого рівня.
Середнього тиску	0.3	110	Використовуються для розподілу енергоресурсу до виробничих та комунально-побутових підприємств, газорозподільних пунктів нижчого рівня та приватних будинків.
Низького тиску	0.005	98	Слугують для подачі енергоресурсу до багатоквартирних та приватних будинків, інших будівель інфраструктури.



Рисунок 1.10 – Графічне зображення параметрів типів газопроводів ГРМ [36, 39]

Що стосується технічного стану газопроводів, сучасні дослідження виявляють низький рівень адаптації ГТС України, що пов'язано із застарілою інфраструктурою та недостатньою модернізацією [40]. Значна частина обладнання газосховищ є морально та фізично зношеною, що зумовлює високі енергетичні витрати, які сягають 85–90% загальних експлуатаційних витрат [41].

Особливістю газотранспортної системи (ГТС) України є її високий рівень розгалуженості і динаміки. Вона охоплює близько 10 тис. фізичних точок входу та виходу, кількість яких постійно змінюється [42]. Така структура обумовлює складний режим роботи, який характеризується змінними параметрами мережі, зокрема систематичними коливаннями обсягів споживання (ранкові та вечірні піки), транзиту та точок входу газу, залежністю від фінансово-політичних умов

і неprojektних режимів роботи обладнання, включно з реверсним транспортуванням. За короткий термін часу система може перебудувати в нескінченній кількості станів.

До цих факторів додається динаміка параметрів якості газу, що транспортується. Транзитні об'єми та характеристики енергоносія постійно змінюються, як і структурні зв'язки між елементами системи, що залежить від робочих режимів. В умовах відкритого газового ринку очікується збільшення кількості постачальників природного газу, які відрізнятимуться за параметрами якості та об'ємами ресурсу, що посилює необхідність оперативного контролю.

Такі умови функціонування газотранспортних та газорозподільчих мереж вимагають прийняття швидких та ефективних рішень щодо режимів експлуатації об'єктів та системи загалом. До того ж, сучасні вимоги та кодекси ГРМ та ГТС [23, 24] диктують стислі терміни для прийняття інженерно-технічних рішень при підключенні нових споживачів. Виконання цих вимог забезпечується системою керування мережею (її особливості наведено у додатку Е).

В умовах динамічної роботи ГТС (за параметром теплотворної здатності газу) виникає необхідність інтеграції автоматизованих систем управління, сенсорних технологій та дистанційного моніторингу. Це дозволяє контролювати стан газопроводів та параметри енергоносія у реальному часі [43]. Особливу увагу слід приділити автоматизованим системам контролю якості природного газу, які можуть функціонувати у поєднанні із засобами вимірювальної техніки (ЗВТ), що працюють на кореляційних залежностях. Використання таких методів оцінки якості забезпечить вимоги щодо високої швидкості вимірювань.

Отже, враховуючи значну розгалуженість ГТС України, забезпечити однакову якість природного газу на всіх її ділянках одночасно неможливо. Динамічні зміни параметрів газу призводять до суттєвих відмінностей у його

якості від місця видобутку до точки виходу до споживача. У зв'язку з цим актуальним є аналіз викликів в інформаційно-вимірювальних системах (ІВС) для визначення якості газу.

1.5 Виклики в сфері ІВС для оцінки якості енергоресурсів в газових мережах

Наразі ринок природного газу в Україні функціонує неповноцінно через низку технічних та організаційних проблем. На рисунку 1.11 схематично наведені виклики ІВС газових мереж.

По-перше, споживачі не отримують достовірної інформації про енергетичну цінність газу, що постачається. Через високу розгалуженість мережі та недостатню приладову базу для оцінки якості газу у потоковому режимі, у щомісячних платіжках надається лише середньо приведене значення калорійності по маршруту транспортування енергоносія. Хоча оператори публікують результати вимірювань у вигляді паспортів з фізико-хімічними показниками на своїх веб-сайтах, доступ до такої інформації є складним для пересічного споживача, оскільки потребує розуміння маршруту розподілу. Крім того, вимірювання проводяться нерегулярно, що знижує актуальність даних. Не застосовуються також моделювання параметрів газу при його розподілі, що б вирішило проблему оцінки його якісних характеристик на рівні споживача.

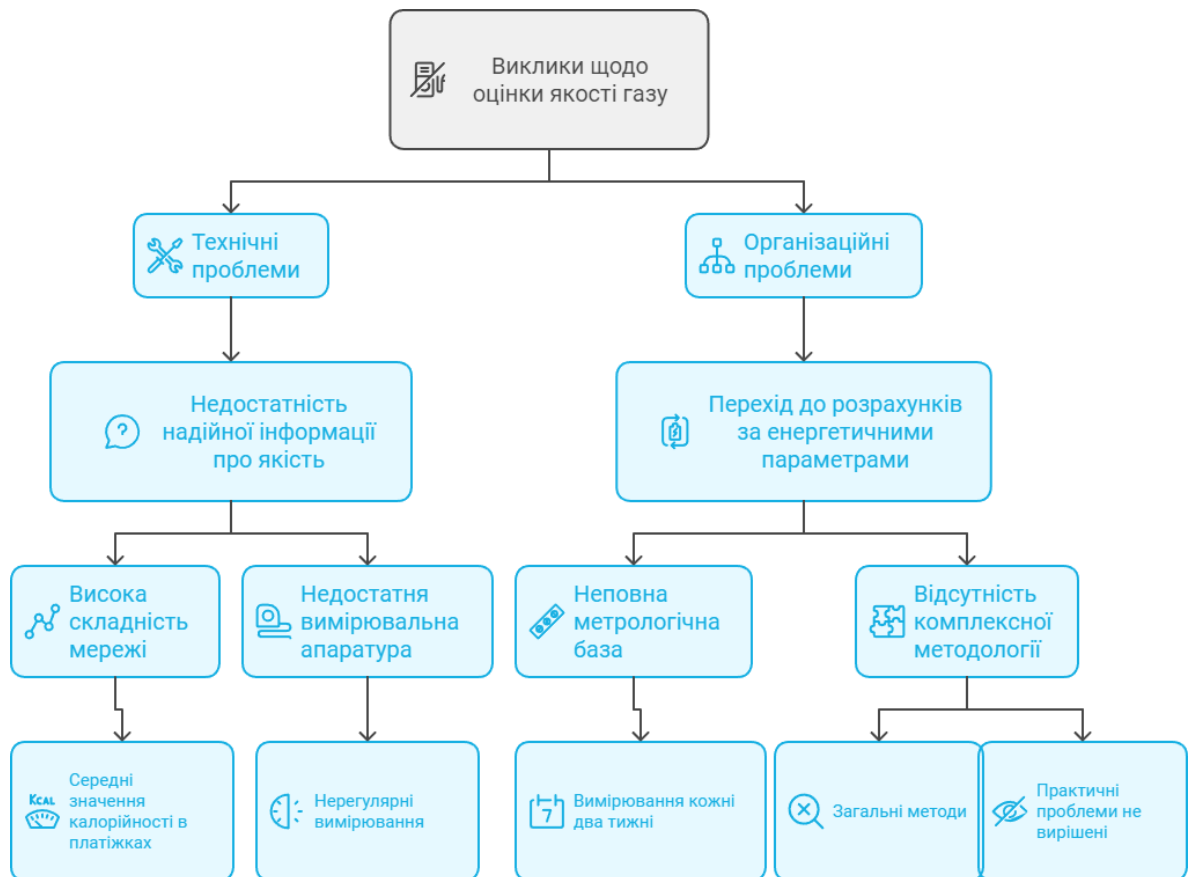


Рисунок 1.11 – Структурна схема аналізу викликів ІВС оцінки якості природного газу в мережах України

По-друге, перехід до розрахунків за газ за енергетичними параметрами гальмують дві ключові проблеми:

- Недостатня метрологічна база. Вимірювання якості газу проводиться в середньому раз на два тижні, що є неприйнятним у контексті динамічної зміни параметрів газу в українській мережі транспортування та розподілу. Наше дослідження [44] показало недоцільність використання таких даних для розрахунків, оскільки параметри газу за цей період можуть кардинально змінюватися.
- Відсутність методики оцінки енергоємності газу для усіх випадків структури мережі. Наявні методи [45] мають загально описовий характер (стандарт гармонізований у відповідності до міжнародного взірця) та не

відповідають на практичні питання, такі як розташування засобів виміральної техніки, їх тип та кількість в умовах української мережі. Неврегульованими залишаються питання вимірювання енергії газу у випадках його постачання з двох і більше джерел, де необхідно враховувати процеси змішування газів з різними характеристиками.

Відсутність детальної методики для переходу на розрахунки за калорійністю газу унеможливорює ефективне управління якістю енергоносія та створює значні бар'єри для розвитку ринку природного газу в Україні.

1.6 Аналіз проблематики процесів домішування біогазу в газопостачальній мережі України

Термін «Біогаз» використовується для газу, що складається головним чином з метану та вуглекислого газу, отриманого в результаті анаеробного розщеплення біомаси, тобто біологічного матеріалу з живих або нещодавно відмерлих організмів (рослини або матеріали рослинного походження) [46]. Анаеробне розщеплення — це сукупність послідовних біохімічних процесів, таких як гідроліз, ацидогенез, ацетогенез і метаногенез, які протікають в умовах суворої відсутності кисню [47 - 49]. У результаті цих реакцій утворюється газова суміш, основним компонентом якої є метан. Після виробництва, сирій біогаз можна очистити і тоді він називатиметься біометаном [46]. В такому чистому вигляді його можна стискати та впорскувати в газопровідні мережі або використовувати як транспортне паливо.

В умовах сучасного вимог до енергетичних ринків значна увага приділяється відновлюваним джерелам енергії. Тому Директива 2009/28/ЄС [50], акцентує для країн ЄС на впровадженні біопалива, як енергоресурсу з ціллю підвищення енергетичної безпеки ЄС та сприяння виконанню зобов'язань щодо скорочення викидів парникових газів, прийнятих ЄС у Кіото та Парижі.

Європейський союз взяв стратегію прискореної декарбонізації і в грудні 2019 року оголосив сценарій досягати нульових викидів парникових газів до 2050 року (рисунок 1) [51]. На рисунку 1.12 зображено візуальну модель сценарію, як видно, внесок біометану переважає для виробництва тепла в будинках і на транспорт. Потенціал виробництва біометану у 2050 році 1170 ТВт·год \approx 120 млрд м³ біометану. Значення водню віддається більше в промисловості і виробництві електроенергії.

До того ж, біогаз є одним із найпривабливіших відновлюваних ресурсів завдяки своїй здатності перетворювати відходи в енергію [52]. Головною перевагою біометану перед зеленим воднем є можливість його транспортування за допомогою наявної газової інфраструктури без модернізації [53]. На відміну від водню, біометан абсолютно готовий для закачування в газові мережі вже з 2024 року. Тому для підтримання сценарію до 2030 року, поки виробництво водню не почне набирати потужності, ЄС запроваджує [50] спільні правила для внутрішнього ринку природного газу, зокрема щодо правил приєднання до мережі, які включають вимоги до якості газу, запаху газу та тиску газу.

За оцінкою [54] у 2022 році світове енергопостачання досягло 622 ЕДж. ВДЕ, включно з біопаливом, продовжували стабільно зростати, забезпечивши 89 ЕДж, що майже на 30% більше, ніж за останнє десятиліття. Рівень біоенергетики залишилася стабільним — близько 9% від загального обсягу енергопостачання.

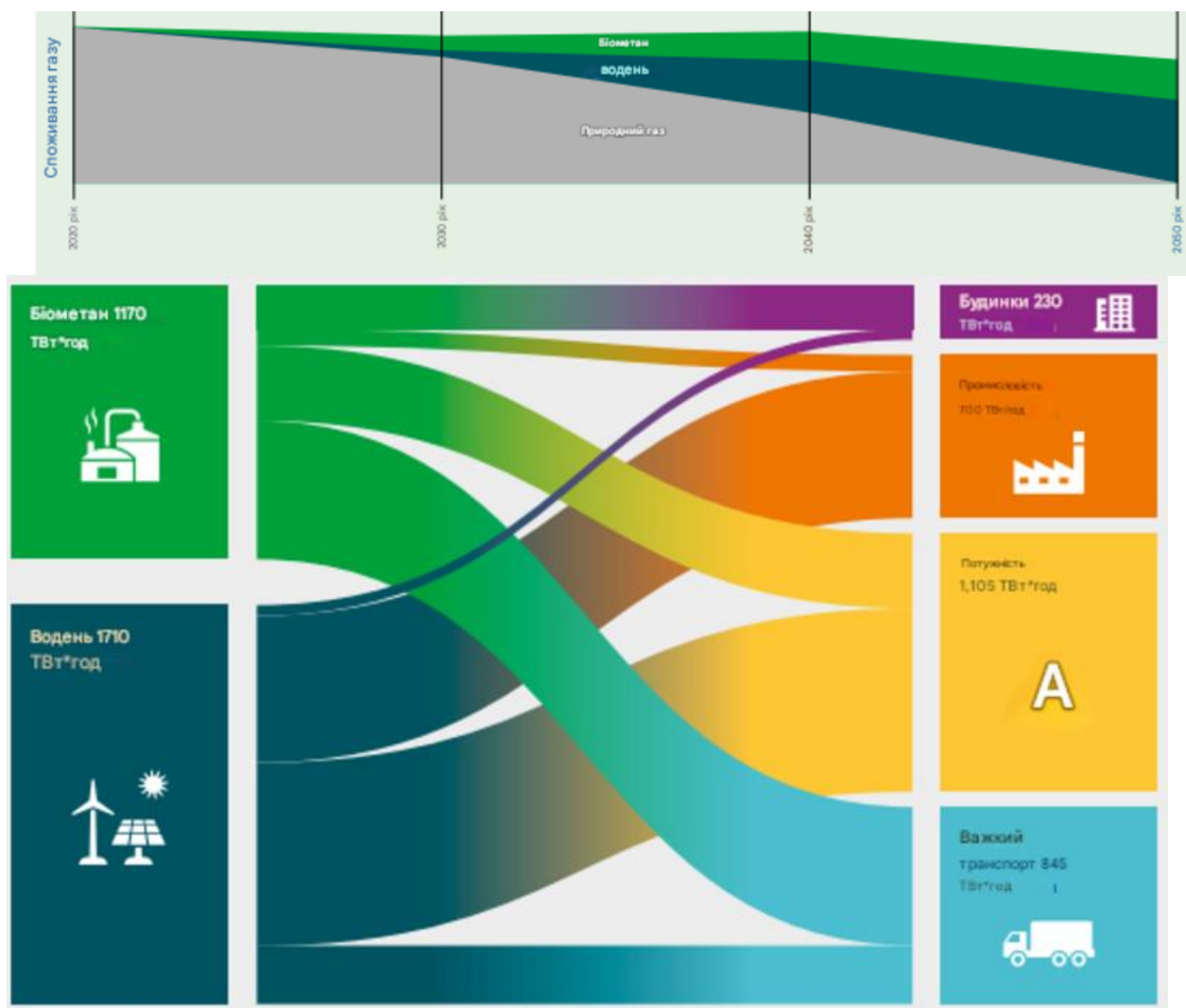


Рисунок 1.12 - Сценарій повного заміщення природного газу в ЄС до 2050 року [51]

Україна має найбільшу в Європі площу сільськогосподарських угідь і, відповідно, один із найкращих у світі потенціалів сільськогосподарської сировини для виробництва біометану [53]. Його потенціал за останніми оцінками [55], вже у 2030 році може досягти 1,6 млрд м³ /рік обсягу виробництва. Дорожня карта розвитку біоенергетики в Україні до 2050 року передбачає запровадження та збільшення виробництва біометану в Україні до 1,7 млрд м³/рік у 2035 р. і до 3 млрд м³ /рік у 2050 р. [56]. Як ми зазначали вище, українська ГТС є потужною і розвиненою системою газопроводів по усій

країні, та під'єднана магістральними газопроводами до чотирьох європейських хабів, що створює можливості для експорту енергоресурсів. Очікується, що у 2030 році біометан може частково (0,2 млрд м³ /рік) експортуватися з України до ЄС [53]. Тому, враховуючи сумісність біопалива з природним газом для транспортування в газопроводах, актуальність розвитку біоенергетики в нашій державі та закачування біометану в газопроводи буде рости. Це підтверджується тим, що в Україні почергово відкриваються біогазові заводи. У квітні 2023 року регіональна газова компанія на Чернігівщині підключила до своїх мереж перший в Україні завод з виробництва біометану, який вироблятиме близько 3 млн кубометрів газу для близько 1500 клієнтів

Враховуючи це, біометан, отриманий шляхом збагачення біогазу, виступає перспективним заміником природного газу завдяки своїй екологічності та відновлюваності. Тому існує потреба у комплексній оцінці інформаційно-вимірювальних систем не тільки для природного газу, а й з врахуванням наявності в мережах біометану. Однак для інтеграції біометану в існуючі газотранспортні системи необхідно забезпечити відповідність його якості вимогам газових мереж. Моделювання енергетичної оцінки газових сумішей з вмістом біометану є важливим етапом у вдосконаленні інформаційно-вимірювальних систем якості та транспортування енергоресурсів.

1.7 Вибір наукових напрямків досліджень

Враховуючи важливість переходу розрахунків за природний газ з об'ємних до енергетичних одиниць, необхідно вдосконалити інформаційно-вимірювальні системи для оцінки якості газу під час транспортування. Це забезпечить виконання національних та європейських норм, підвищить точність вимірювань, прозорість комерційних розрахунків та оптимізує управління якістю газу в умовах динамічних змін його параметрів. Впровадження автоматизованих систем контролю якості природного газу з використанням

експрес-методів оцінки теплотворної здатності в потоковому режимі сприятиме підвищенню ефективності роботи газотранспортної системи та її інтеграції в європейський енергетичний простір.

Метою роботи є удосконалення інформаційно-вимірювальних систем визначення якості енергоресурсів з використанням експрес-методів шляхом виведення нових залежностей між енергетичною цінністю та параметрами транспортування газу.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі необхідно вирішити такі завдання:

- дослідити розподіл зміни якісного показника природного газу в газорозподільній мережі та визначити метрологічні параметри сучасної інформаційно-вимірювальної системи контролю якості енергоносія в умовах динамічної мережі (за параметром теплотворної здатності газу);
- розробити регресійну математичну модель залежності теплотворної здатності природного газу на рівні кінцевих споживачів для мереж із двома джерелами газопостачання, від параметрів, отриманих за допомогою приладу експрес-контролю якості газу на кожному з вхідних потоків;
- розробити алгоритм функціонування інформаційно-вимірювальної системи контролю якості природного газу з врахуванням отриманих залежностей;
- дослідити вплив варіативності якісних характеристик природного газу на гідравлічні та експлуатаційні параметри газотранспортної мережі низького тиску під час транспортування енергоносія;
- розробити уточнену математичну модель оцінки якісних характеристик енергоносія для розгалужених газорозподільних мереж із врахуванням впливу домішок водню та біометану у широкому діапазоні концентрацій та оцінити її точність.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ В РОЗГАЛУЖЕНИХ МЕРЕЖАХ

2.1. Дослідження повноти інформативних параметрів для оцінки якості в розгалужених газових мережах

Основою для функціонування системи керування є актуальні параметри мережі та енергоресурсу в кожен момент її роботи. Проте, в ГТС України проявляється складність ідентифікації параметрів моделей режиму роботи системи та стану технологічних об'єктів, пов'язаний із значним рівнем невизначеності режимної інформації, яка, в основному, проявляється у відсутності замірів витрат, тисків і температур у багатьох вузлах газотранспортної системи.

Проведений аналіз видів невизначеностей, характерних для газотранспортної системи [57], показав: недостатню точність і неповноту оперативної інформації, яка породжується похибкою вимірювання, малопродуктивною системою передачі даних, асинхронністю вимірювання і надходження, недоступністю до частини інформації тощо. Крім цього, неточність моделей пов'язана із допущенням про однорідність певних підсистем за параметрами гідравлічного стану; спрощенням, яке пов'язане з неповним врахуванням рельєфу прокладання трубопроводів; введенням нечітких моделей типу термо-гідравлічних еквівалентів, неповним врахуванням суттєвої нелінійності та часткового використання паспортних характеристик тощо.

Ефективне управління ГТС вимагає моделювання потоків енергоносія, що потребує якомога більш точної інформації про потреби клієнтів. Однак попит користувачів може бути передбачений з обмеженою точністю. Невизначеності, що виникли в результаті помилок прогнозування попиту, повинні бути виправлені підвищенням надійності щоденного планування об'єму споживання ГТС [58].

Підтвердженням актуальності даної проблеми та нагальності потреби модернізації ГТС України телекомунікаційним обладнанням є План розвитку ГТС України на 2018-2027 роки [59]. Згідно з документом у 2018 рік виділено 127 млн. грн на реконструкцію та капітальний ремонт системи телемеханіки на 11-ти магістральних газопроводах. Це дозволило оперативно управляти та мати доступ до технологічної інформації, що надходить від різних розподілених джерел обладнання лінійних контрольних пунктів, а також дистанційно керувати запірною та регулювальною апаратурою на технологічних об'єктах лінійної частини газопроводів. Подібну ціль мають також плани газорозподільчих організацій.

Дослідження недостатності та розбіжності інформативних параметрів мережі газорозподілу проведено на прикладі визначення теплоти згоряння природного газу двома організаціями з різним рівнем розподілу енергоресурсу.

Керуючись українським законодавством, комерційним обліком називається процес визначення за допомогою вузла обліку природного газу обсягу споживання, на підставі якого проводяться взаєморозрахунки [60]. Проте, з початком функціонування на території України ринку природного газу в 2015 році [20] облік природного газу повинен виконуватися за його енергетичними показниками. Кількість енергії, що міститься в об'ємі природного газу, визначають з добутку даного об'єму на нижчу питому теплоту згоряння енергоресурсу [45]. До того ж, в умовах конкурентного ринку таку операцію необхідно проводити безперервно. Як наведено в [61], відома питома теплота згоряння природного газу, що протікає мережею розподілу, дасть можливість точніше визначити параметри системи на рівні кінцевих споживачів, що є додатковим параметром оптимізації процесу керування. Якщо з визначенням першого множника проблеми відсутні, то для визначення калорійності природного газу необхідно передбачити достовірний метод розрахунку.

Однією з важливих особливостей сучасної газотранспортної системи України є її високий рівень розгалуженості. Споживач отримує природний газ, якісні параметри якого не відповідають параметрам енергоресурсу, видобутого в найближчому родовищі. Після видобування природний газ, проходячи системою транспортування та крізь газосховища, змішується з іншими зразками як українського видобування, так і закордонного. Таким чином, щоб визначити якість газу в точці входу до споживача не достатньо виміряти його якість на етапі видобування.

З метою визначення можливості використання даних теплоти згорання природного газу, отриманих від газотранспортних компаній, в процесі розрахунків за природний газ, виконано дослідження зміни енергетичних характеристик газу в газотранспортній мережі.

В якості дослідницької задачі виконано порівняння значень нижчої теплоти згорання природного газу, виміряних двома компаніями газотранспортною та газорозподільною. Обидва значення отримані хроматографічним методом. Проте, газотранспортна компанія оприлюднює сертифікати якості природного газу лише раз в два тижні. Вони використовуються для визначення середньомісячної калорійності газу, поданої в платіжці споживачів. Дані газорозподільчої компанії мають лише перевіряючі значення і отримані пересувною лабораторією перевірки якості природного газу. Місцями збору зразків енергоресурсу для лабораторії є газорозподільчі станції мережі.

В ході дослідження здійснено 127 вимірювань якості природного газу у 37 точках мережі (ГРС та ГРП) впродовж чотирьох місяців. Модуль різниці даних, отриманих з двох джерел складає 3833 ккал/м^3 . При цьому, в 51,1 % точках виміру значення нижчої теплоти згорання природного газу від газотранспортної організації перевищує фактичне значення, отримане пересувною лабораторією. Найбільш яскраві відмінності між значеннями наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Найбільші відхилення між значеннями теплоти згорання природного газу, вимірними газотранспортною (дані сертифікату) та газорозподільчою компаніями (дані лабораторії)

Номер виміру	Дата відбору проби	Місце відбору проби	Нижча теплота згорання природного газу, ккал/м ³		
			Значення проби	Дані з сертифікату газотранспортної компанії в часовому проміжку відбору проби	Різниця між значеннями
1	15.01.2018	ГРС Утринів	8265	8345	80
3	15.01.2018	ГРС Стримба	8647	8496	-151
4	15.01.2018	ГРС Перерісль	8566	8496	-70
29	05.02.2018	ГРС Стримба	8544	8464	-80
48	19.02.2018	ГРС Стримба	8257	8539	282
67	12.03.2018	м.Івано-Франківськ,ГРП № 1	8243	8345	102
69	12.03.2018	м.Івано-Франківськ,ГРП № 12	8157	8258	101
109	13.04.2018	ГРС Ст.Лисець	8396	8541	145
115	18.04.2018	ГРС Косів	7944	8149	205
124	24.04.2018	ГРС Калуш-1	7617	7691	74

Одинакові дані значень сертифікату в різний час виміру якості газу лабораторією в одній точці вказує на перериви між вимірюваннями якості газу газотранспортною організацією (таблиця 2). Також простежуються однакові показники якості сертифікату від газорозподільчої компанії для різних ГРС, розміщених поблизу, для прикладу для групи ГРС Брошнів, Болехів, Долина, Рожнятів.

Розподіл похибок значень теплотворної здатності газу відповідає нормальному закону розподілу (рисунок 2.1). Середня абсолютна похибка вимірювання склала -3,56 ккал/м³. Середня відносна похибка 0,365 %. Стандартне відхилення розрахунків рівне 49,2 . Це значення є індикатором того, на скільки "розкиданими" відносно середнього є значення змінної в наборі

даних. В нормальному розподілі 68% значень знаходяться в межах стандартного відхилення. Міра відхилень значень випадкової величини від центру розподілу, тобто дисперсія похибок відповідає значенню 2424. Зведена таблиця результатів метрологічної оцінки похибки визначення якісних показників природного газу наведена в додатку Ж.

Таблиця 2.2 - Одинакові дані сертифікату якості природного газу при різних фактичних значення теплоти згорання

Номер виміру	Дата відбору проби	Місце відбору проби	Нижча теплота згорання природного газу, ккал/м ³		
			Значення проби	Дані з сертифікату газотранспортної компанії в часовому проміжку відбору проби	Різниця між значеннями
27	02.02.18	ГРС Угринів	8248	8233	-15
28	05.02.18	ГРС Угринів	8243	8233	-10
40	13.02.18	ГРС Долина	8219	8222	3
43	14.02.18	ГРС Долина	8217	8222	5

Відповідно до проекту нового наказу Кабінету Міністрів [62], що має замінити чинний наказ №618 [63], максимально допустима відносна похибка вимірювального модуля для визначення представницької теплоти згорання складає: для класу А $\pm 0,60$ %, класу В $\pm 1,25$ %, класу С $\pm 2,00$ %. Вимірювальні системи для комерційного обліку природного газу повинні відповідати класам точності А або В [62].

Середня відносна похибка у дослідженні склала 0,365 %, що на перший погляд відповідає високій точності. Проте за умов значних коливань якості газу у мережі, викликаних періодичністю вимірювань (раз на два тижні) та змішуванням газів із різними характеристиками, навіть ця похибка є суттєвою. Так як в процесі вимірювання буде враховуватися також похибки дискретності

відбору проб, вплив випадкових факторів під час транспортування газу та нестабільність параметрів енергоносія у розгалуженій мережі.

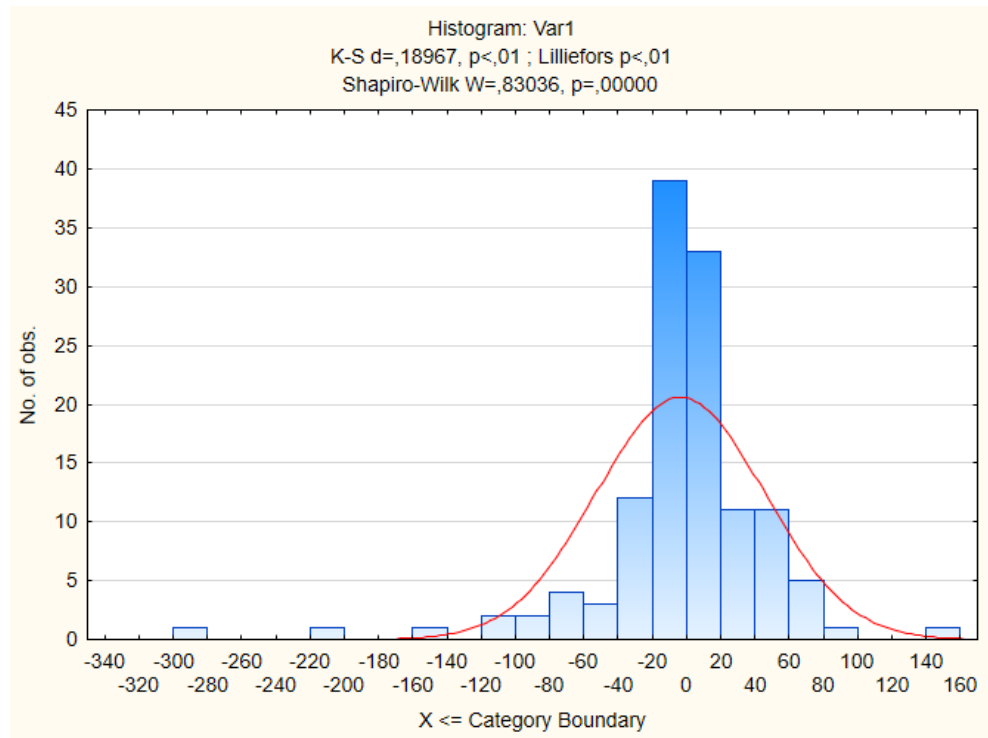


Рисунок 2.1 – Гістограма розподілу похибок визначення теплотворної здатності природного газу газотранспортною компанією в порівнянні з фактичними значеннями, виміряні пересувною лабораторією

Враховуючи це, необхідно впровадити методики визначення теплоти згоряння у потоковому режимі, що дозволять отримувати фактичні показники якості газу у реальному часі. Це не лише мінімізує похибки вимірювань, а й забезпечить точність комерційного обліку та відповідність національним і європейським нормам. Отже, розробка та інтеграція автоматизованих систем контролю, здатних функціонувати у реальному часі із високою точністю (клас А або В), є обов'язковою умовою для підвищення прозорості обліку та визначення енергетичної цінності природного газу у розгалуженій мережі

транспортування та розподілу. Результати проведеного дослідження, що наведені в цьому підрозділі опубліковані в науковій роботі [44].

2.2 Оцінка якості газу в мережі з одним входом

Для випадку мережі з одним джерелом постачання енергоресурсу енергетична калорійність в кінцевому споживачі рівна калорійності на вході в мережу. Врахувавши, що вимірювання якісних показників газу проводиться в точках ГРС [44]. Тобто показники якості природного газу для всіх споживачів такої мережі вимірюватиметься одним засобом на вході в мережу. В такому випадку, енергія природного газу буде рівна [20]:

$$E(t_n) = \int_0^{t_n} e(t) dt = \int_0^{t_n} H(t) \cdot q(t) dt, \quad (2.1)$$

де $H(t)$ – теплотворна здатність природного газу; $q(t)$ – об'єм природного газу, доставлений споживачеві; t_n – зміна часу протягом періоду використання енергоресурсу.

Таким чином, для мережі з одним входом, енергія для кожного споживача визначатиметься за параметрами теплоти згорання та об'єму газу, вимірними на цьому вході.

2.3 Розроблення методики проведення експерименту для оцінки якості газу в мережі з двома входами

Проте, виникають труднощі при розрахунках для мереж з більше ніж одним джерелом постачання газу. Коли газ різної якості подається в одну мережу з різних трубопроводів. В такому випадку, споживач отримає суміш газів, яка має відмінні від вхідних якісні показники. Вимірювати калорійність для кожного споживача є економічно не доцільним, тому виникає потреба у методі

оцінки калорійності для споживачів таких мереж, керуючись параметрами на кожному з входів.

На сьогодні, калорійність енергоресурсу в споживачів такого елементу мережі можливо оцінити, лише провівши вимірювання теплотворної здатності на кожному з входів в мережу засобами вимірювальної техніки, що відносяться до класу калориметрів. Цей спосіб дозволить за вимірними вхідними компонентними складами газів перерахувати компонентний склад газу після змішування і як наслідок – визначити його теплотворну здатність. Проте, виконання вимірювання на цьому метрологічному устаткуванні є дорогавартісним. А враховуючи той факт, що для створення інформаційно-вимірювальної системи, що дасть можливість споживачеві розраховуватися за природний газ за його енергетичними параметрами, потрібно встановити такі засоби вимірювальної техніки на кожній ГРС української мережі, через значну дороговизну обладнання використання для таких цілей калориметрів є неможливим. Також недоліком калориметрів є тривалий час виконання вимірювання теплотворної здатності газу (близько 2-х тижнів), що унеможливорює його використання для потокового режиму.

В роботах [64 - 66] для цих цілей пропонується використати засіб експрес-контролю якості газу, який використовує кореляційну залежність між теплотою згорання газу та швидкістю поширення ультразвуку в ньому і вмістом в ньому вуглекислого газу. Його перевагами є дешевизна, в порівнянні із приладами, що базуються на прямих вимірюваннях, можливість працювати в потоковому режимі вимірювання якісних параметрів газу (процес вимірювання займає 5 хв) [64] та високий клас точності. Проте виникає проблема – засіб експрес-контролю позбавлений можливості визначити компонентний склад газу. Отже, при наявних можливостях таких засобів, вимірювання ним вхідних для мережі з декількома входами параметрів якості газів не робить можливим визначення калорійності газу на рівні споживачів таких мереж.

Завданням подальшого дослідження цієї роботи полягає в розробці нового методу оцінки якості газу на рівні споживачів в розгалужених мережах з декількома входами з використанням засобів експрес-контролю при їх розміщенні на цих входах мережі. Для цього потрібно:

- оцінити кореляційну залежність між параметрами, що вимірюються засобами експрес-контролю якості газу на входах мережі та теплотворною здатністю газу на рівні споживачів (після змішування газу з різних входів);

- вивести формулу кореляції між теплотворною здатністю газу в споживачів розгалужених мереж та вимірюваними параметрами засобом на кожному з їх входів;

- провести порівняння розрахункових величин теплотворної здатності газу, отриманих на основі даних про компонентний склад та параметрів засобу експрес-контролю.

Для мережі з двома входами, схема розміщення вимірювальних приладів для оцінки якості газу новим методом наведена на рис. 2.2.

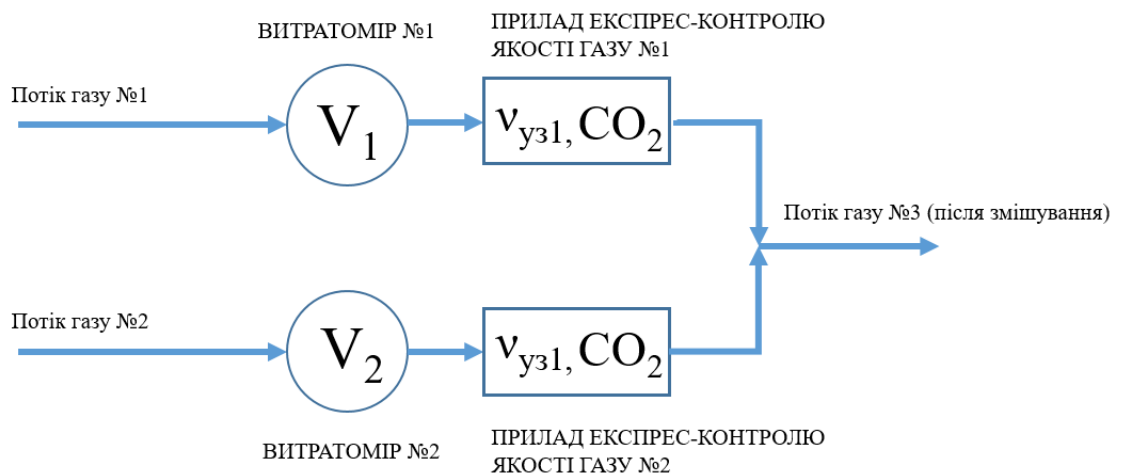


Рисунок 2.2 – Схема розміщення засобів вимірювання для оцінки калорійності новим методом для мережі з двома входами

В мережу (потік газу №3) з декількох входів надходять потоки енергоресурсів різної якості та з різною швидкістю. Ці параметри

визначаються послідовно встановленими на кожному з входів приладами експрес-контролю якості газу та витратомірами. Значення об'ємної витрати перекачаного газу в мережу з кожного входу отримується з даних витратомірів. Вміст вуглекислого газу та швидкість проходження ультразвуку в енергоресурсах з кожного входу визначається приладами експрес-контролю. Визначити калорійність газу після змішування (власне цей газ доставляється споживачам такої мережі) пропонується проведенням кореляційного аналізу. Вхідними параметрами кореляції є відсоткові частки об'ємної витрати природного газу, що перекачується через газопровід у відношенні до загального об'єму після змішування, швидкості ультразвуку та вмісти вуглекислого газу на двох входах. Функцією кореляції є значення вищої теплоти згорання природного газу №3 (після змішування) (формула 2.2).

$$H = f(V_1, V_2, \vartheta_1, \vartheta_2, CO_{2_1}, CO_{2_2}), \quad (2.2)$$

де H – вища теплота згорання природного газу після змішування (потік №3), ккал/м³; V_1, V_2 – відсоткові частки об'ємних витрат перекачаного газу з входів №1 та №2 відповідно по відношенню до загального об'єму газу, поданого споживачам (потік №3), м³; ϑ_1, ϑ_2 – швидкості проходження ультразвуку в газах, виміряні на входах №1 та №2 відповідно, м/с; CO_{2_1}, CO_{2_2} – вмісти вуглекислого газу в природних газах з входу №1 та №2 відповідно, %.

Для проведення кореляційного аналізу виникає необхідність у створенні бази з наборами даних по кожному з параметрів кореляції, визначених для двох входів в мережу та вищої теплоти згорання природного газу в точці потоку №3. З ціллю формування такої бази використано відкриті дані Нафтогаз з паспортів фізико-хімічних показників природного газу за 2019 рік [67]. Сформовано базу з семисот зразків природного газу з такими відомими:

- компонентним складом: відсоткові частки вмісту метану (C1), етану (C2), пропану (C3), ізо-бутану (i-C4), н-бутану (н-C4), нео-пентану

(нео-С5), ізо-пентану (і-С5), н-пентану (н-С5), гексану та вищих вуглеводнів (С6+), кисню (О2), азоту (N2), діоксиду вуглецю (СО2);

- фізико-хімічними показниками газу, обчислених на основі компонентного складу при тиску 101,325 кПа: абсолютна густина (кг/м³, при 20 °С), нижчих та вищих теплоти згорання палива (ккал/м³, МДж/м³ та кВт·год/м³), нижчих та вищих числа Воббе (ккал/м³, МДж/м³ та кВт·год/м³ при температурі вимірювання 20/25°С).

Мінімальне значення вищої теплоти згорання елемента з отриманої бази зразків природного газу складає 8629 ккал/м³. Максимальне – 9804 ккал/м³. Перші десять елементів створеної бази зразків подані в таблицях 2.3 та 2.4. Основа вибірки з 700 зразків подана в додатку 3.

Таблиця 2.3 – Компонентний склад перших десяти зразків природного газу створеної бази

Компонентний склад, % мол.											
метан, С1	етан, С2	пропан, С3	ізо-бутан, і-С4	н-бутан, н-С4	нео-пентан, нео-С5	ізо-пентан, і-С5	н-пентан, н-С5	гексани та вищі, С6+	кисень, О2	азот, N2	діоксид вуглецю, СО2
94.0002	3.1079	1.1106	0.1797	0.2361	0.0002	0.0566	0.0466	0.0990	0.0091	0.8896	0.2643
94.0188	3.1057	1.1158	0.1811	0.2385	0.0001	0.0576	0.0481	0.0897	0.0097	0.8687	0.2660
91.6511	4.3094	1.2689	0.1578	0.2416	0.0026	0.0562	0.0454	0.0663	0.0025	0.7649	1.4331
94.0007	3.1116	1.1133	0.1820	0.2364	0.0003	0.0572	0.0478	0.0953	0.0097	0.8815	0.2641
92.6305	4.1021	0.9678	0.1200	0.1959	0.0091	0.0588	0.0500	0.1563		1.3658	0.3437
93.9800	3.1284	1.1196	0.1814	0.2379	0.0006	0.0568	0.0477	0.0957	0.0095	0.8748	0.2677
92.5041	4.0579	1.0083	0.1306	0.2158	0.0099	0.0622	0.0529	0.1562		1.4308	0.3713
91.1613	4.7875	1.2603	0.1317	0.1977	0.0056	0.0540	0.0481	0.0645		1.7763	0.5130
93.1746	3.7876	1.0687	0.1399	0.1926	0.0024	0.0527	0.0424	0.1224	0.0063	1.1399	0.2705
93.9692	3.1177	1.1180	0.1822	0.2396	0.0004	0.0586	0.0491	0.1083	0.0085	0.8824	0.2660

Таблиця 2.4 – ФХП перших десяти зразків природного газу створеної бази

Фізико-хімічні показники газу обчислені на основі компонентного складу, 101,325 кПа													Коеф стисливості	Показник адіабати	Швидкість УЗ, м/с
Густина абсолютна, кг/м ³ , при 20 °С,	Температура вимірювання/згорання при 20/25 °С														
	Теплота згорання нижча			Теплота згорання вища			Число Воббе нище			Число Воббе вище					
	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³			
0.7197	8 357	34.99	9.72	⁹ 255	38.75	10.76	10 811	45.26	12.57	11 973	50.13	13.92	0.911	1.294	407.220
0.7195	8 357	34.99	9.72	⁹ 256	38.75	10.76	10 813	45.27	12.58	11 975	50.14	13.93	0.911	1.294	407.276
0.7404	8 357	34.99	9.72	⁹ 256	38.75	10.76	10 659	44.63	12.40	11 806	49.43	13.73	0.907	1.289	399.921
0.7197	8 358	34.99	9.72	⁹ 256	38.75	10.77	10 812	45.27	12.57	11 975	50.13	13.93	0.911	1.294	407.217
0.7274	8 360	35.00	9.72	⁹ 258	38.76	10.77	10 758	45.04	12.51	11 914	49.88	13.86	0.909	1.293	404.663
0.7199	8 360	35.00	9.72	⁹ 259	38.76	10.77	10 813	45.27	12.58	11 976	50.14	13.93	0.910	1.294	407.130

Для кожного зі зразка природного газу розрахована швидкість проходження ультразвуку. Розрахунок проведено за формулою (2.3) [68], виведеною з рівняння термодинаміки для швидкості звуку та індикатора адіабати [69]:

$$u = 18,591(T_k K / \rho_c)^{0,5}, \quad (2.3)$$

де k - показник адіабати; K - коефіцієнт стисливості; ρ_c - Щільність природного газу за стандартних умов (за умов: тиск $p = 0,101325$ МПа і температура $T = 293,15$ К).

В свою чергу, показник адіабати визначений за формулою Кобза [68]:

$$k = 1,556(1 + 0,074x_a) - 3,9 \cdot 10^{-4}T(1 - 0,68x_a) - 0,208\rho_c + (p/T)^{1,43} [384(1 - x_a)(p/T)^{0,8} + 26,4x_a], \quad (2.4)$$

де x_a - молярна частка азоту; ρ_c – густина природного газу за стандартних умов, кг/м³; p – тиск за стандартних умов ($p = 0,101325$ МПа), МПа; T – температура стандартних умов ($T = 293,15$ К), К.

При цьому, врахування коефіцієнту стиснення виконано на основі даних про компонентний склад [70]. Основне рівняння цього методу подано у вигляді:

$$z=1+A_0, \quad (2.5)$$

де A_0 - безрозмірний комплекс, що розрахований при заданих значеннях температури та молярних частках складових природного газу за табличними даними коефіцієнтів і показників ступенів, параметрів компонентів природного газу, функцій їх молярних часток та параметрів бінарної їх взаємодії.

Створена база даних на основі паспортів фізико-хімічних показників та розрахунків за формулами (2.3-2.5) дає можливість провести теоретичне моделювання змішування зразків природного газу. З цією ціллю, на основі бази зроблено ранжування двох наборів, кожен з яких містить по 3500 зразків природного газу з різними фізико-технічними характеристиками та параметрами мережі (відсотковими частками об'ємної витрати перекачаного газу). При моделюванні застосовується наступний принцип – зразки природних газів з характеристиками, зазначеними в першому наборі змішуються із зразками другого набору.

При цьому, для відтворення різного розподілу між зразками природного газу, два вхідні набори сформовано з врахуванням різних комбінацій змішування. Для формування наборів використані два принципи – забезпечення між наборами різного співставлення зразків з розподілом за вищою теплотою згорання та забезпечення між наборами різного співставлення розподілу об'ємних часток.

Для врахування впливу вищої теплоти згорання при змішуванні, створену базу з 700 зразків відсортовано за вищою теплотою згорання та проранжовано

по п'яти секторах (зразки з вищою теплотою згорання, що знаходяться в межах від 0 до 20% діапазону вищої теплоти згорання усієї бази, 20 - 40% діапазону, 40 - 60% діапазону, 60 - 80% діапазону та 80 - 100% діапазону). Для відтворення різного розподілу між зразками природного газу, що змішуються, набори формувалися з наступною логікою:

- перший кластер наборів (різниця між наборами в 4 сектори діапазону)
 - змішування двох діапазонів газів з бази - від 0 до 20% діапазону бази та від 80 - 100% діапазону;
- другий кластер набору (різниця між наборами в 3 сектори діапазону)
 - змішування двох діапазонів газів з бази - від 0 до 20% діапазону та від 60 - 80% діапазону;
- третій кластер набору (різниця між наборами в 2 сектори діапазону)
 - змішування двох діапазонів газів з бази - від 20 - 40% діапазону та від 60 - 80% діапазону;
- четвертий кластер набору (різниця між наборами в 1 сектор діапазону)
 - змішування двох діапазонів газів з бази - від 20 - 40% діапазону та від 40 - 60% діапазону;
- п'ятий кластер набору (наборами в одному діапазоні) – змішування двох діапазонів газів з бази - від 40 - 60% діапазону та від 60 - 40% діапазону.

Врахування впливу відсоткових часток об'ємних витрат при змішуванні кожного з наборів відбувалося наступним чином. Створені набори продубльовані для різних варіантів зміни часток. Враховано п'ять таких варіантів – для часток об'ємних витрат 0,9 та 0,1 двох наборів відповідно, для часток 0,8 та 0,2, для часток 0,7 та 0,3, для часток 0,6 та 0,4 і для випадку з однаковими 0,5 частками об'ємних витрат кожного з наборів.

Далі, на основі компонентних складів та параметрів перекачування (відсоткові частки об'ємних витрат) зразків природного газу двох наборів

виконано розрахунки компонентного складу вихідного газу, що отримується після змішування цих зразків. При цьому, молярна частка кожного з компонентів вихідного природного газу визначається за рівнянням Мінделєєва-Клапейрона:

$$C(k_n)_{\text{кінцев}} = \sum_{i=1}^t \langle C(k_n)_t \cdot \frac{V_t}{\sum V} \rangle, \quad (2.6)$$

де $C(k_n)_{\text{кінцев}}$ – молярна частка компоненту k_n природного газу після змішування, %; t – кількість вхідних розгалужень мережі; n – кількість компонентів в природному газі; $C(k_n)_t$ – молярна частка компоненту k_n природного газу на вході № t ; $V_t/(\sum V)$ – частка об'ємної витрати, співвідношення об'ємної витрати газу на вході № t до загальної об'ємної витрати енергоресурсу, що надійшов зі всіх входів.

Слід зауважити, що в рівнянні (2.6) зроблено припущення про незмінні параметри температури газу та тиску в мережі на рівнях до і після змішування. Така ситуація справедлива для мереж низького тиску.

Маючи компонентний склад газу після змішування, розраховано його фізико-хімічні параметри – вищої та нижчої теплоти згорання. Розрахунок виконується за [71], рівняння має наступний вигляд:

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i \cdot C_i, \quad (2.7)$$

де Q_i – теплота згорання газу (вища чи нища) i -го компоненту газу (табличні значення [71]), МДж/м (ккал/м); C_i – молярна частка компоненту в газі, %

2.4 Багатофакторний регресійний аналіз нелінійних залежностей між теплотворною здатністю газу та вхідними параметрами розгалуженої мережі

Одним із ключових завдань нашого дослідження є побудова залежності, що визначає взаємозв'язок між параметрами $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip}$, що характеризують потоки газу на входах розгалуженої мережі (потоки №1 та №2 на рисунку 1), і змінною y_i , яка описує якість газу після змішування (потік №3). Для цього необхідно визначити ступінь кореляції та тип функціональної залежності. У цьому контексті регресійний аналіз виступає методологічним інструментом для вирішення завдання.

Основною метою регресійного аналізу є пошук адекватної функції, яка найкращим чином відображає взаємозалежності між емпіричними даними [72, 73]. Залежна змінна y_i , що визначає якість газу після змішування, у регресії також відома як відгук або регресант. Незалежні змінні $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip}$ називають предикторами, пояснюючими, вхідними змінними чи факторами регресії.

Математична модель ґрунтується на основі відповідних генеральних сукупностях об'єктів чи процесів із n спостережень. У нашому дослідженні цією вибіркою є сформована база з двох наборів по 3500 зразків природного газу. Використовуючи ці дані, можна отримати статистичні оцінки необхідних параметрів, які наближено відображають реальні значення, але не є їх абсолютними показниками. У моделі ці оцінки позначаються як \hat{y} та $\hat{a}_0, \dots, \hat{a}_p$.

Багатофакторна лінійна регресійна модель в загальному теоретичному вигляді буде мати вигляд [72 - 74]:

$$\hat{y}_i = \hat{a}_0 + \hat{a}_1 x_{i1} + \hat{a}_2 x_{i2} + \dots + \hat{a}_p x_{ip}, \quad i = \overline{1, n} \quad (2.8)$$

де y_i - i -те спостереження залежної змінної; $\hat{a}_0, \dots, \hat{a}_p$ - оцінки параметрів рівняння регресії; $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip}$ - фактори регресії, n - кількість спостережень у вибірці.

Таким чином, застосування регресійного аналізу у цьому дослідженні дозволяє формалізувати взаємозв'язки між параметрами входів і виходу мережі, що є основою для створення моделі оцінки якості природного газу в розгалужених мережах. Залежною змінною регресії прийнято вищу теплоту згорання природного газу після змішування з двох входів (потік №3). Набір даних отримано розрахунковим шляхом на основі формул 2.6 та 2.7 для кожного зі зразків в базі. Незалежними змінними регресії обрано набори характеристик потоків природного газу на двох входах:

- відносні частки об'ємних витрат потоків природного газу (%). Вони характеризують частку загальної об'ємної витрати природного газу, що припадає на кожне джерело (вхід), виражену у відсотках. Наприклад, якщо перше джерело забезпечує 40% загальної об'ємної витрати газу, то друге відповідно — 60%, таким чином, сума часток для обох входів завжди становить 100%. Отримані дані в процесі формування бази, деталі наведені в розділі 2.3;
- швидкості проходження ультразвуку в природному газі на кожному з входів (м/с). Ці показники відображають швидкість поширення звукових хвиль у середовищі природного газу, що залежить від його складу. Набори даних отримані розрахунковим шляхом за формулами 2.3-2.5 для кожного зразка в базі;
- рівні вмісту діоксиду вуглецю в природному газі на кожному з входів (% мол). Вміст CO_2 є важливим, оскільки його домішки знижують енергетичну цінність газу. Цей показник допомагає оцінити, як хімічний склад газу на кожному вході впливає на його калорійність після змішування. Набори даних отримані з паспортів фізико-хімічних показників природного газу при формуванні бази.

Структура параметрів, використаних у регресійній моделі наведена на рисунку 2.3. Вона демонструє, що модель базується на одному наборі залежної змінної та шести незалежних змінних (факторах регресії).

Такий підхід передбачає аналіз одночасного впливу кількох факторів на залежну змінну, що унеможливлює використання парної моделі, оскільки він не здатний врахувати взаємодії та комбінований вплив множинних предикторів. З огляду на це, для адекватного моделювання процесу та отримання коректних оцінок залежної змінної, необхідно застосувати багатofакторний регресійний аналіз. Це забезпечить можливість оцінки сукупного впливу усіх незалежних змінних. Що вирішить поставлену задачу побудови моделі, яка достовірно описує вплив параметрів потоків природного газу на його якість після змішування.

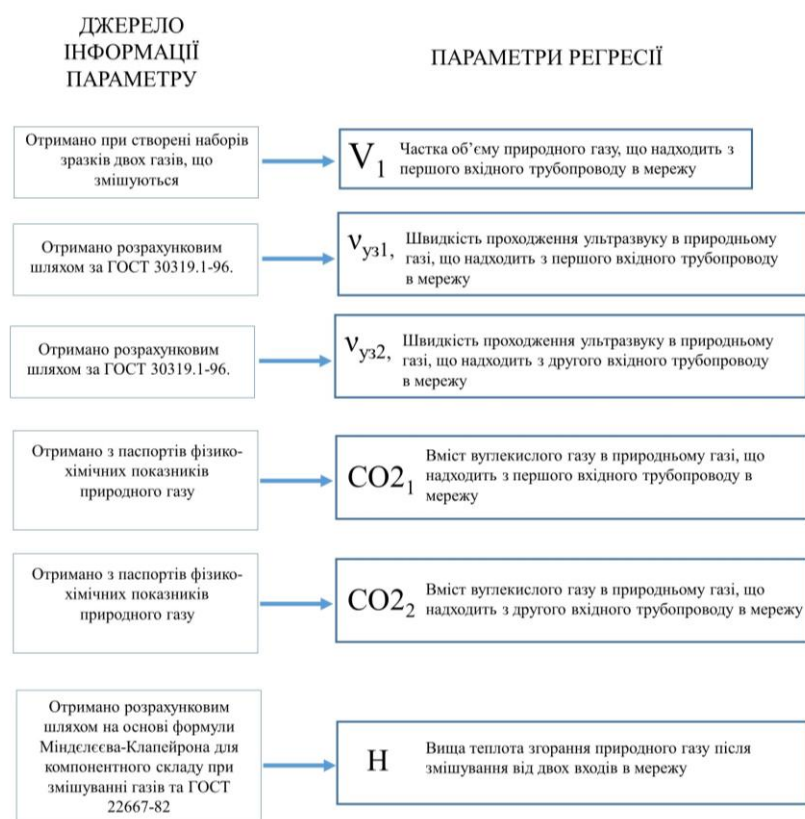


Рисунок 2.3 – Параметри, що в враховуються в регресії, вказані з джерелами даних у виконаному дослідженні

В таблиці 2.3 подано підсумкову статистику отриманої вибірки даних наборів залежної та незалежних змінних.

Таблиця 2.3 – Статистичний аналіз наборів з бази даних

Статистичні показники	Вміст діоксиду вуглецю, % мол.	Швидкість ультразвуку, м/с	Відносна частка об'ємної витрати потоку, %	Вміст діоксиду вуглецю, % мол.	Швидкість ультразвуку, м/с	Відносна частка об'ємної витрати потоку, %	Вища теплота згорання газу на виході після змішування, ккал/м ³
	На вході №1			На вході №2			
Середнє значення змінної	0,948	403,174	70,000	0,576	411,511	30,000	9143,460
Стандартна помилка	0,015	0,158	0,239	0,014	0,151	0,239	1,600
Медіана	0,527	403,902	70,000	0,251	413,499	30,000	9112,182
Стандартне відхилення	0,904	9,330	14,144	0,851	8,912	14,144	94,686
Дисперсія вибірки	0,817	87,049	200,057	0,725	79,417	200,057	8965,384
Перекося	1,299	-0,786	0,000	2,570	-0,882	0,000	2,446
Діапазон	4,171	52,287	40,000	4,813	40,937	40,000	760,177
Мінімум	0,079	363,065	50,000	0,013	384,669	10,000	8945,630
Максимум	4,250	415,352	90,000	4,826	425,607	50,000	9705,807
Вибірка	3500	3500	3500	3500	3500	3500	3500

У випадку багатofакторної регресії модель (3.1.1) зручно перевести у матричний вигляд. Для цього введемо позначення матриці значень пояснюючої змінної розміру $n \times t$, де n – кількість спостережень, а $t = p + 1$ – кількість параметрів моделі, що на один більша від кількості факторів. Матриця факторів матиме вигляд [72 - 74]:

$$X = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1p} \\ 1 & x_{21} & \dots & x_{2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{n1} & \dots & x_{np} \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

В матриці X введено додатковий стовпчик із одиниць, чим враховується наявність в моделі вільного члена \hat{a}_0 . Матриця-стовпчик регресанта містить позначення $(...)'$, що означає транспонування. Вона має вигляд:

$$\hat{Y} = (\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_n)' \quad (2.9)$$

Матриця-стовпчик параметрів моделі:

$$\hat{A} = (\hat{a}_0, \hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_p)' \quad (2.10)$$

Враховуючи матричне подання математичної моделі регресії, рівняння (2.8) запишеться так:

$$\hat{Y} = X \cdot \hat{A} \quad (2.11)$$

Уточнимо математичну модель такими деталями нашого дослідження:

- кількість спостережень n рівне 3500, керуючись величиною бази даних;
- кількість факторів моделі p рівна 6 - набір даних враховує по 3 параметри на кожному з двох входів (швидкість ультразвуку, вміст вуглекислого газу та частка об'ємної витрати природного газу);
- залежна змінна регресії \hat{Y} є матрицею-стовпчиком з трьох тисяч п'ятисот значень;
- матриця параметрів моделі \hat{A} є матрицею-стовпчиком з семи значень
- матриця факторів X має розмір 3500×7 .

В такому випадку рівняння (2.11) матиме вигляд:

$$\begin{pmatrix} \hat{y}_1 \\ \hat{y}_2 \\ \dots \\ \hat{y}_{3500} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{a}_0 \\ \hat{a}_1 \\ \hat{a}_2 \\ \dots \\ \hat{a}_6 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{16} \\ 1 & x_{21} & \dots & x_{26} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{35001} & \dots & x_{35006} \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

Використовуючи метод найменших квадратів, за допомогою оператора оцінювання можна показати, що параметри моделі знаходяться з матричного рівняння. Його подамо у вигляді рівняння, що представляє собою матричну форму запису розв'язку системи нормальних рівнянь для знаходження параметрів моделі [72 - 74]:

$$\hat{A} = (X'X)^{-1} \cdot X'Y, \quad (2.13)$$

де X' транспонована матриця X , $(X'X)^{-1}$ – матриця обернена до $X'X$.

При цьому, оцінки параметрів $\hat{a}_0, \hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_p$ знаходяться методом найменших квадратів: тобто $\hat{a}_0, \hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_p$ вибираються такими, щоб сума квадратів відхилень фактичних значень y_i від теоретичних \hat{y}_i була мінімальною:

$$S(\hat{a}_0, \hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_p) = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 = \sum_{i=1}^n (\hat{a}_0 + \hat{a}_1 x_i + \dots + \hat{a}_p x_i - y_i)^2 \rightarrow \min, \quad (2.14)$$

де n – обсяг вибірки.

2.4.1 Перевірка математичної моделі на наявність мультиколінеарності між факторами регресії

Мультиколінеарність визначається як наявність сильної лінійної залежності або значної кореляції між двома чи більше пояснюючими змінними в моделі. Ця проблема суттєво впливає на результати регресійного аналізу, оскільки за її умов використання методу найменших квадратів призводить до втрати точності оцінок параметрів моделі, зниження їхньої статистичної значущості та, відповідно, до зменшення практичної цінності отриманих результатів.

З огляду на це, в рамках проведеного дослідження було здійснено перевірку моделі на наявність мультиколінеарності серед факторів регресії. Особливу увагу приділено аналізу парних кореляційних залежностей між сімома параметрами, що включають як фактори регресії, так і залежну змінну.

У статистичному аналізі кореляційна залежність описує функціональний зв'язок між значеннями однієї змінної та умовним математичним сподіванням іншої змінної. Лінійний коефіцієнт кореляції виступає мірою тісноти та напрямку лінійного зв'язку між змінними. Його обчислення здійснюється за формулою [72 - 74]:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n \sigma_x \sigma_y} \quad (2.15)$$

де σ_x, σ_y – вибіркові середні квадратичні відхилення змінних x та y відповідно; \bar{x}, \bar{y} – вибіркові середні значення змінних x_i, y_i відповідно.

Значення коефіцієнта кореляції r належить до інтервалу $[-1; 1]$. Абсолютне значення коефіцієнта, що наближається до 1, вказує на сильний зв'язок між змінними. Додатне значення коефіцієнта свідчить про прямий зв'язок, коли зростання однієї змінної супроводжується зростанням іншої. Негативне значення вказує на обернений зв'язок, за якого збільшення однієї змінної призводить до зменшення іншої. При $r = \pm 1$ зв'язок є функціональним. Якщо $r = 0$, то лінійний зв'язок між змінними відсутній.

Для оцінки парних кореляцій між змінними моделі було використано надбудову Data Analysis у програмному забезпеченні MS Excel. Обчислені коефіцієнти кореляції між параметрами моделі представлені у таблиці 2.4. Отримані значення дозволяють ідентифікувати можливу мультиколінеарність і виявити потребу у застосуванні методів її усунення, таких як виключення змінних, модифікація моделі або використання регресійних методів, стійких до мультиколінеарності.

Таблиця 2.4 – Лінійні коефіцієнти кореляції між параметрами регресійної моделі

	Вища теплота згорання газу на виході після змішування, ккал/м ³	Відносна частка об'ємної витрати потоку вхід №2, %	Вміст діоксиду вуглецю вхід №1, % мол.	Швидкість ультразвуку вхід №1, м/с	Відносна частка об'ємної витрати потоку вхід №1, %	Вміст діоксиду вуглецю вхід №2, % мол.	Швидкість ультразвуку вхід №2, м/с
Вища теплота згорання газу на виході після змішування, ккал/м ³	1,0000	-	-	-	-	-	-
Відносна частка об'ємної витрати потоку вхід №2, %	-0,3170	1,0000	-	-	-	-	-
Вміст діоксиду вуглецю вхід №1, % мол.	0,1487	0,0000	1,0000	-	-	-	-
Швидкість ультразвуку вхід №1, м/с	-0,5504	0,0000	-0,8142	1,0000	-	-	-
Відносна частка об'ємної витрати потоку вхід №1, %	0,3170	-1,0000	0,0000	0,0000	1,0000	-	-
Вміст діоксиду вуглецю вхід №2, % мол.	0,1006	0,0000	0,0096	-0,0673	0,0000	1,0000	
Швидкість ультразвуку вхід №2, м/с	0,0418	0,0000	0,0131	-0,0572	0,0000	-0,8334	1,0000

Проведений кореляційний аналіз між параметрами регресійної моделі виявив декілька суттєвих закономірностей:

1. Наявність функціональної залежності між відносними частками об'ємної витрати потоків на входах №1 та №2. Коефіцієнт кореляції між відносною часткою об'ємної витрати потоку на вході №1 та відносною часткою на вході №2 дорівнює -1. Це свідчить про повну негативну лінійну залежність між цими змінними. Така залежність є логічною, оскільки сума відносних часток об'ємної витрати двох потоків повинна дорівнювати 100%. Тобто, якщо частка об'ємної витрати на вході №1

зменшується, то частка на вході №2 пропорційно збільшується, і навпаки.

2. Вплив вмісту діоксиду вуглецю на швидкість ультразвуку. На вході №1 спостерігається сильна негативна кореляція між вмістом діоксиду вуглецю та швидкістю ультразвуку (коефіцієнт кореляції $-0,8142$). Згідно зі шкалою Чеддока, це вказує на високий ступінь зв'язку між цими змінними. Аналогічна закономірність спостерігається на вході №2, де коефіцієнт кореляції становить $-0,8334$. Це підтверджує, що зі збільшенням концентрації CO_2 у газі швидкість ультразвуку зменшується. Фізичне обґрунтування цього явища полягає в тому, що підвищений вміст CO_2 призводить до збільшення середньої молярної маси газової суміші, оскільки молярна маса CO_2 (44 г/моль) значно перевищує молярну масу метану (16 г/моль), основного компонента природного газу. Це призводить до підвищення густини та зміни акустичних властивостей середовища, що, в свою чергу, знижує швидкість розповсюдження ультразвукових хвиль.
3. Зв'язок між вищою теплотою згорання газу та швидкістю ультразвуку на вході №1. Коефіцієнт кореляції між вищою теплотою згорання газу на виході та швидкістю ультразвуку на вході №1 дорівнює $-0,5504$. Помірний негативний лінійний зв'язок свідчить про те, що зміни у швидкості ультразвуку суттєво впливають на варіацію вищої теплоти згорання.
4. Відсутність кореляції між деякими змінними. Деякі коефіцієнти кореляції дорівнюють нулю або близькі до нього (наприклад, між відносною часткою об'ємної витрати потоку на вході №2 та іншими змінними). Це може свідчити про незалежність цих факторів у даній моделі.

Для більш детального аналізу взаємозв'язків між факторами регресійної моделі та залежною змінною, доцільно розглянути графічні залежності функції

регресії від кожного з параметрів, що входять до моделі (рисунок 2.4). Такий підхід дозволяє не лише підтвердити результати кореляційного аналізу, але й виявити додаткові закономірності у взаємодії змінних, що можуть залишатися непомітними при суто числовій оцінці. Графіки також дають змогу оцінити характер впливу змінних, зокрема лінійний або нелінійний, що є важливим для подальшого вдосконалення моделі.

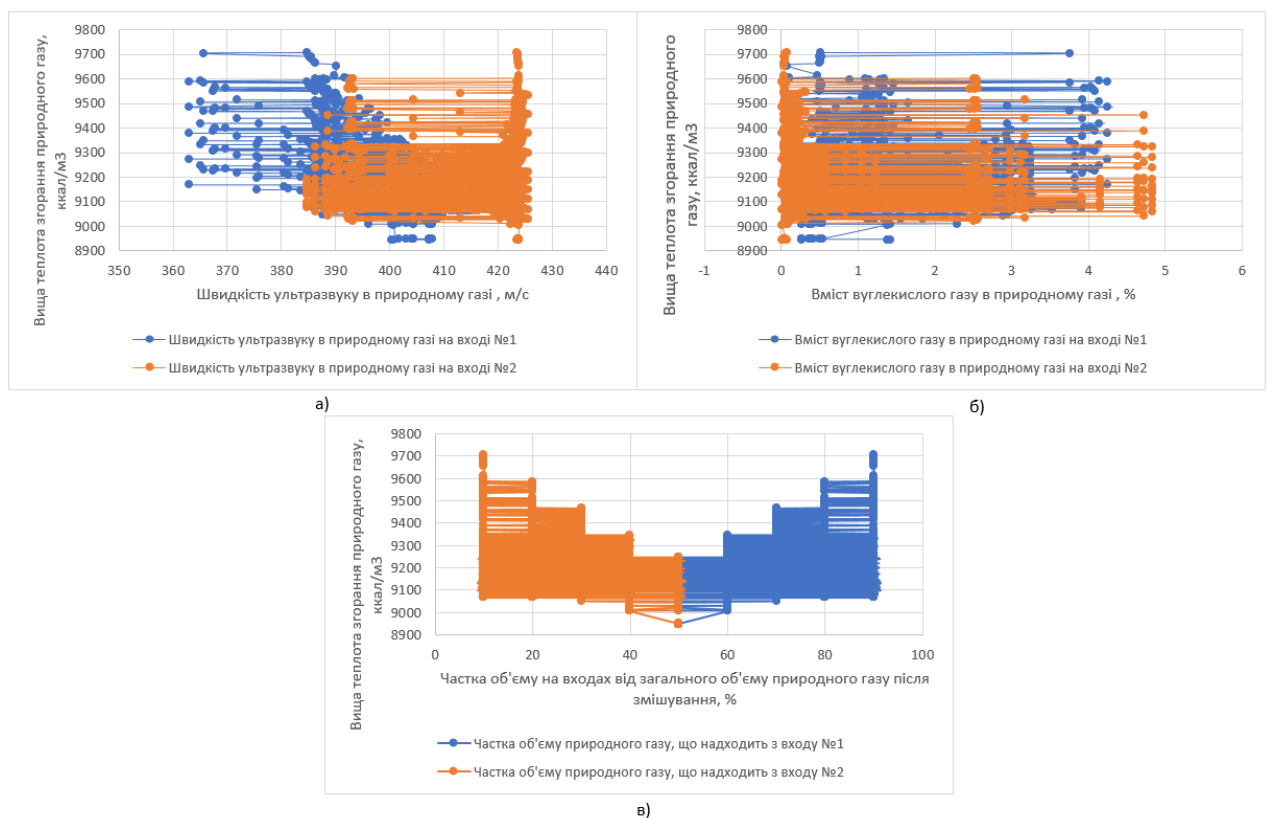


Рисунок 2.4 – Графіки залежностей: а) Вищої теплоти згорання природного газу після змішування (потік №3) від швидкостей проходження ультразвуку в зразках природного газу з двох входів (потоки №1 та №2); б) Вищої теплоти згорання природного газу після змішування (потік №3) від вмісту вуглекислого газу в зразках природного газу з двох входів (потоки №1 та №2); в) Вищої теплоти згорання природного газу після змішування (потік №3) від відсоткових часток об'ємної витрати природного газу, що надходять з двох входів (потоки №1 та №2);

На графіках 3а та 3б спостерігається часткова схожість у характері зміни функцій, що є графічним підтвердженням зв'язку між швидкістю проходження ультразвуку та вмістом вуглекислого газу у природному газі на обох входах. Як було зазначено раніше, високий ступінь кореляції між цими змінними обумовлений фізичними властивостями газової суміші, що впливає на акустичні характеристики середовища. Ця залежність підтверджує результати кореляційного аналізу та вказує на необхідність врахування впливу мультиколінеарності при побудові регресійної моделі.

Також, графік 3в демонструє залежність вищої теплоти згорання від відсоткових часток об'ємних витрат природного газу з двох входів. Спостерігається симетричний характер зміни цих функцій, що вказує на повну негативну лінійну залежність між цими змінними. Фізичний зміст цієї залежності поданий в тексті дисертації вище.

Отже, проведений кореляційний аналіз засвідчив наявність мультиколінеарності між деякими факторами регресійної моделі, що зумовлює необхідність внесення відповідних змін до структури моделі для підвищення її достовірності та прогностичної здатності.

1. Аналіз виявив функціональну залежність між відносними частками об'ємних витрат потоків природного газу на двох входах, що є логічним наслідком їх конструктивної взаємозалежності. Оскільки така залежність не додає нової інформації, одна з цих змінних повинна бути виключена з моделі, що забезпечить уникнення надмірної мультиколінеарності без втрати змістовності;
2. Наявність високого ступеня зв'язку між швидкістю ультразвуку та вмістом діоксиду вуглецю на обох входах мережі вимагає розробки методів зменшення мультиколінеарності. Доцільним рішенням у цьому випадку є використання нелінійної моделі регресії, яка передбачає

створення синтетичних змінних або комбінацій на основі швидкості ультразвуку та вмісту діоксиду вуглецю. Такий підхід дозволить забезпечити більш адекватне врахування їх впливу на залежну змінну без втрати ключової інформації.

3. Включення швидкості ультразвуку як предиктора у модель обґрунтоване як теоретично, так і статистично, навіть за умови помірного рівня зв'язку із залежною змінною. Цей фактор відіграє важливу роль у визначенні фізико-хімічних характеристик газу та може суттєво покращити прогностичну здатність моделі. Тому його врахування у моделі є виправданим і необхідним для адекватного відображення досліджуваних процесів.

Таким чином, внесення запропонованих змін до регресійної моделі дозволить усунути недоліки, зумовлені мультиколінеарністю, та підвищити точність, стійкість і ефективність моделювання. Це забезпечить глибше розуміння взаємозв'язків між параметрами досліджуваної системи та покращить її практичну застосовність.

2.4.2 Математичне моделювання доцільності застосування лінійної регресійної залежності в умовах мультиколінеарності факторів регресії

У попередньому підрозділі було встановлено наявність мультиколінеарності між окремими факторами регресійної моделі, що свідчить про необхідність її вдосконалення для забезпечення адекватності та точності результатів. Водночас, для підтвердження зроблених висновків щодо недоцільності використання лінійного підходу та для оцінки впливу мультиколінеарності на результати моделювання, прийнято рішення про побудову лінійної регресійної моделі на основі наявних параметрів. Це дозволить емпірично перевірити

ступінь обґрунтованості висновків про необхідність переходу до нелінійного методу.

Лінійна регресійна модель побудована на основі шести факторів, що включають фізико-хімічні та об'ємні характеристики потоків природного газу на двох входах: швидкості проходження ультразвуку, вмісту діоксиду вуглецю та відносні частки перекачуваних об'ємних витрат газу. Значимість F-тесту для отриманої моделі виявилася меншою за рівень 0,05, що свідчить про можливість використання цього набору незалежних змінних у рамках лінійної регресії. Проте глибший статистичний аналіз параметрів моделі, зокрема перевірка нульової гіпотези для коефіцієнтів регресії, показав, що р-значення для трьох факторів, які стосуються одного з входів мережі, перевищують пороговий рівень статистичної значущості 0,05. Це вказує на те, що вплив цих факторів не є достатньо підтвердженим, що підриває загальну надійність та валідність моделі.

В такому випадку, лінійна регресійна залежність зі звичайними параметрами з врахуванням константи буде включати тільки фактори, що стосуються одного входу. Виведена лінійна залежність матиме наступний вигляд:

$$Q_{\text{вищ}} = 142938 - 93,029 \cdot CO2_1 - 12,924 \cdot v_1 + 2,122 \cdot V_1, \quad (2.16)$$

де $Q_{\text{вищ}}$ - вища теплота згорання природного газу на рівні потоку №3 (на виході), ккал/м³; $CO2_1$ - рівень вмісту діоксиду вуглецю в природному газі на вході №1, % мол.; v_1 - швидкість проходження ультразвуку в природному газі на вході №1, м/с; V_1 - відносні частки об'ємної витрати потоку природного газу з входу №1, %.

Слід також зазначити, що теплота згорання природного газу після змішування є інтегральним показником, який залежить від характеристик обох, а не одного потоків газу. Використання лінійної регресії в цьому випадку буде обмежене, оскільки не врахує можливих нелінійних взаємодій між факторами.

На основі отриманих даних зроблено висновок, що застосування лінійної регресії за формулою 2.16 для даного набору факторів не є доцільним. Наявність мультиколінеарності та відсутність підтвердження статистичної значущості частини параметрів свідчать про необхідність переходу до нелінійної моделі регресії, яка дозволить врахувати складні взаємодії між змінними, мінімізувати вплив мультиколінеарності та забезпечити адекватність моделювання процесу змішування природного газу.

2.4.3 Математична модель нелінійних регресійних залежностей та оцінка значущості параметрів рівняння

Отже, для оцінки форми залежності вищої теплоти згорання природного газу в мережі з двома джерелами енергоресурсу від параметрів на обох входах слід провести багатofакторний регресійний аналіз для отримання нелінійного рівняння. Враховуючи дослідження, виконане в розділі 2.4.1 в рівняння регресії (2.12) слід внести такі зміни:

1. Виключити один з двох факторів частки об'ємної витрати постачання природного газу від вхідних потоків №1 та №2 мережі через наявність функціональної кореляції між ними;
2. Разом зі звичайними факторами регресії, які розглядалися до цього (швидкість ультразвуку, вміст діоксиду вуглецю, частка об'ємної витрати від потоку в мережу) доповнити модель комбінованими факторами (добутками звичайних незалежних змінних). Це дасть

можливість зменшити вплив мультиколінеарності між предикторами та отримати нелінійну залежність.

Враховуючи ці зміни, фактори, що братимуться до уваги при побудові регресії для нелінійної залежності подані в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Фактори регресійного нелінійного аналізу

Тип фактору регресії	Позначка фактору	Назва фактору	Розміреність
П'ять звичайних факторів, що розглядалися для лінійної залежності	V_1	Відносна частка об'ємної витрати природного газу з потоку №1	% об.
	v_1	Швидкість проходження ультразвуку в природному газі, визначена для потоку №1	м/с
	v_2	Швидкість проходження ультразвуку в природному газі, визначена для потоку №2	м/с
	CO_{21}	Рівень вмісту діоксиду вуглецю в природному газі, визначена для потоку №1	% мол
	CO_{22}	Рівень вмісту діоксиду вуглецю в природному газі, визначена для потоку №2	% мол
Чотирнадцять комбінованих факторів	$CO_{21} * v_1$	Добуток вмісту CO_2 для потоку №1 на швидкість ультразвуку для потоку №1	(% мол. * м)/с
	$CO_{21} * V_1$	Добуток вмісту CO_2 для потоку №1 на частку об'ємної витрати для потоку №1	% мол. * % об.
	$CO_{21} * CO_{22}$	Добуток вмісту CO_2 для потоку №1 на вміст CO_2 для потоку №2	% мол. ²
	$CO_{21} * v_2$	Добуток вмісту CO_2 для потоку №1 на швидкість ультразвуку для потоку №2	(% мол. * м)/с
	$CO_{21} * V_2$	Добуток вмісту CO_2 для потоку №1 на частку об'ємної витрати для потоку №2	% мол. * % об.
	$v_1 * V_1$	Добуток швидкості ультразвуку для потоку №1 на частку об'ємної витрати для потоку №1	(% мол. * м)/с
	$v_1 * CO_{22}$	Добуток швидкості ультразвуку для потоку №1 на вміст CO_2 для потоку №2	(% мол. * м)/с

Продовження таблиці 2.5

$v_1 * v_2$	Добуток швидкості ультразвуку для потоку №1 на швидкість ультразвуку для потоку №2	$(\text{м/с})^2$
$v_1 * V_2$	Добуток швидкості ультразвуку для потоку №1 на частку об'ємної витрати для потоку №2	$(\% \text{ об. * м})/\text{с}$
$V_1 * CO_{22}$	Добуток частки об'ємної витрати для потоку №1 на вміст CO_2 для потоку №2	$\% \text{ мол. * \% об.}$
$V_1 * v_2$	Добуток частки об'ємної витрати для потоку №1 на швидкість ультразвуку для потоку №2	$(\% \text{ об. * м})/\text{с}$
$CO_{22} * v_2$	Добуток вмісту CO_2 для потоку №2 на швидкість ультразвуку для потоку №2	$(\% \text{ мол. * м})/\text{с}$
$CO_{22} * V_2$	Добуток вмісту CO_2 для потоку №2 на частку об'ємної витрати для потоку №2	$\% \text{ мол. * \% об.}$
$v_2 * V_2$	Добуток швидкості ультразвуку для потоку №2 на частку об'ємної витрати для потоку №2	$(\% \text{ об. * м})/\text{с}$

Враховуючи зміну кількості факторів, матричне подання математичної моделі регресії (2.12) для нелінійної залежності змінить вигляд:

$$\begin{pmatrix} \hat{y}_1 \\ \hat{y}_2 \\ \dots \\ \hat{y}_{3500} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{a}_0 \\ \hat{a}_1 \\ \hat{a}_2 \\ \dots \\ \hat{a}_{19} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & x_{1-1} & \dots & x_{1-19} \\ 1 & x_{2-1} & \dots & x_{2-19} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{3500-1} & \dots & x_{3500-19} \end{pmatrix} \quad (2.17)$$

Для побудови багатофакторного регресійного аналізу та виведення нелінійного рівняння залежності між вхідними та вихідними параметрами розгалуженої мережі використано надбудову Data Analysis у програмному забезпеченні MS Excel. Послідовність розрахунку наведено нижче на прикладі нелінійної моделі з комбінованими параметрами без врахування константи.

Регресійний аналіз включає визначення матриці-стовпчика параметрів нелінійної моделі \hat{A} (формула 2.17). Скористаємося для цього (2.13). За результатом розрахунків сформовано матрицю параметрів регресії для цієї залежності:

$$\hat{A}' = (-1,344 \quad 5,371 \quad -13,027 \quad -0,353 \quad 7,014 \quad 0,158 \quad -1,553 \quad -0,082 \quad 0,392 \quad 3,208 \quad 0,403 \quad 0,969 \quad 1,041 \quad 0,168). \quad (2.18)$$

Отже, виведена шляхом регресійного аналізу нелінійна модель оцінки теплотворної здатності природного газу на виході з розгалуженої мережі з комбінованими параметрами без врахування константи має вигляд:

$$\begin{aligned} Q_{\text{вих}} = & CO2_1 \cdot (-1,344 \cdot v_1 + 5,371 \cdot V_1 - 13,027 \cdot CO2_2 - 0,353 \cdot v_2 + 7,014 \cdot V_2) + \\ & + v_1 \cdot (0,158 \cdot V_1 - 1,553 \cdot CO2_2 - 0,082 \cdot v_2 + 0,392 \cdot V_2) + V_1 \cdot (3,208 \cdot CO2_2 + 0,403 \cdot v_2) + \\ & + CO2_2 \cdot (0,969 \cdot v_2 + 1,041 \cdot V_2) + 0,168 \cdot v_2 \cdot V_2 \end{aligned} \quad (2.19)$$

2.4.3.1 Дослідження адекватності математичної моделі з використанням коефіцієнтів детермінації та кореляції

Однією з найбільш ефективних оцінок адекватності створеної регресійної моделі є коефіцієнт детермінації R^2 . Він є мірою якості моделі і її прогностичної сили. Даний коефіцієнт показує, яка частина дисперсії пояснювальної змінної пояснюється регресією. Наприклад, якщо $R^2=0,90$, то це означає, що на 90% зміна Y обумовлена зміною X , тобто пояснюється моделлю, а на 10% іншими причинами.

Коефіцієнт детермінації знаходиться за формулою [72 - 74]:

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} = \frac{SSR}{SST} = \frac{\hat{A}'XY - n\bar{y}^2}{Y'Y - n\bar{y}^2} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (2.20)$$

де SST - загальна варіація, тобто сума квадратів відхилень залежної змінної від середнього значення; SSR – сума квадратів відхилень зумовлена регресією; SSE – залишкова сума квадратів, яка характеризує вплив на пояснювальну змінну всіх неврахованих чинників; y_i - фактичне значення залежної змінної; \bar{y} - середнє значення залежної змінної.

Коефіцієнт детермінації змінюється в межах $0 < R^2 < 1$. Чим ближче R^2 до одиниці, тим краще регресія описує залежність між пояснювальними і залежною змінною. Порахований для нашого випадку коефіцієнт детермінації наведений в таблиці 5. Коефіцієнт детермінації показує, що на 99,9978% значення вищої теплоти згорання палива в місці потоку №3 визначається прийнятими факторами (наведеними в таблиці 2.5) і на 0,0022% визначається іншими факторами.

Також визначено скоректований (або нормований) коефіцієнт детермінації \hat{R}^2 , який враховує число ступенів свободи. Коефіцієнт детермінації R^2 , обчислений без врахування числа ступенів свободи буде збільшуватися при введені в модель нових пояснювальних змінних, хоча це і не завжди буде означати покращення моделі. Скоректований коефіцієнт детермінації \hat{R}^2 не має такого недоліку. Він може навіть зменшуватися при введені в модель нових пояснювальних змінних, якщо вони не дають суттєвого покращення якості моделі. Враховуючи, що створення наших моделей має різні k . Зауважимо, що збільшення коефіцієнта детермінації не завжди означає покращення якості моделі. Велике значення коефіцієнта детермінації може бути наслідком того, що досліджувані показники мають часовий тренд.

Число ступенів свободи (DF – Degree of Freedom) є числом незалежних змінних, які необхідні для визначення характеристики. В загальному випадку рівне:

$$DF_{SSE} = n - m \quad (2.21)$$

де n – обсяг вибірки; m – число параметрів моделі.

Отже, скоректований коефіцієнт детермінації \hat{R}^2 обчислюється за формулою 2.22. Результати розрахунку наведені в таблиці 2.6.

$$\hat{R}^2 = 1 - \frac{SSE/(n - m)}{SST/(n - 1)} = 1 - \frac{n - 1}{n - m} (1 - R^2) \quad (2.22)$$

Розрахунок включає також визначення коефіцієнта багатофакторної кореляції, що дорівнює квадратному кореню із коефіцієнту детермінації, тобто $R = \sqrt{R^2}$. Коефіцієнт багатофакторної кореляції $R = 0,999989$ показує, що зв'язок між змінними залежною та незалежними змінними моделі достатньо тісний. Результати розрахунку занесені в таблицю 2.6.

Стандартна похибка, тобто виправлене середнє квадратичне відхилення залишків визначається за формулою [72 - 74]:

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{\sum u_i^2}{n - m}} \quad (2.23)$$

Таблиця 2.6 – Результати розрахунку регресійної статистики на прикладі нелінійної моделі з комбінованими параметрами без врахування константи

Багатофакторний коефіцієнт кореляції R	0,999989
Коефіцієнт детермінації R- квадрат	0,999978
Нормований R -квадрат	0,999691
Стандартна похибка	43,35109
Кількість спостережень	3500

2.4.3.2 Застосування критерію Фішера для перевірки значущості математичної моделі

Перевірка значущості рівняння регресії означає встановлення відповідності між математичною моделлю і експериментальними даними [72 - 74]. Така необхідність виникає у зв'язку з тим, що рівняння регресії було побудовано на основі вибірових (тобто випадкових) даних, а отже і параметри його є випадковими величинами. Найперше, значущість рівняння регресії перевірено на основі дисперсійного аналізу з використанням F - критерію Фішера (Фішера – Снедекера). Його результати розрахунків подані в таблиці 2.7.

В першій колонці таблиці df подана кількість ступенів свободи для суми квадратів відхилень, відповідно для залишкової $df = n - m = 3500 - 14 = 3486$.

В другій колонці SS таблиці 2.7 наведені суми квадратів відхилень, відповідно

- регресійну $S_R = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$
- залишкову $S_u = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$
- загальну $S = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$

Також при перевірці адекватності моделі розраховано середній квадрат, що означає відповідні середні суми квадратів відхилень з врахуванням числа ступенів свободи. Середній квадрат похибок (MSE) рівний [72 - 74]:

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - m} \quad (2.24)$$

Середній квадрат похибок MSE представляє собою незміщену оцінку дисперсії залишків. Дисперсії залишків характеризує ту частину загальної

дисперсії, що спричинена неврахованими факторами, помилками формування вибіркової сукупності, похибками вимірювання.

Середній квадрат пояснюючий регресію (MSR) визначається як [72 - 74]:

$$MSR = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{m - 1} = SSR \quad (2.25)$$

Середній квадрат MSR представляє собою незміщену оцінку дисперсії залежної змінної спричинену пояснюючою змінною X .

Для нашої моделі MSE рівний 1879,317, а MSR складає 20902488658,524. Результати наведені в третій колонці MS таблиці 2.7.

F -критерій Фішера служить для перевірки нульової гіпотези $H_0: \hat{a}_1 = 0$, що нахил прямої дорівнює нулю ($\hat{a}_1 = 0$). Якщо дана гіпотеза підтверджується то дані краще апроксимувати з допомогою середньої величини ($\hat{y}_i = \bar{y}$), а не використовувати для цього рівняння регресії.

Для перевірки обчислено фактичне значення F -критерію за формулою [72 - 74]:

$$F = \frac{MSR}{MSE} = \frac{R^2 / (m - 1)}{(1 - R^2) / (n - m)}, \quad (2.26)$$

де m – число параметрів рівняння регресії, n – обсяг вибірки.

Рівняння регресії вважається значущим прийнятому рівні значущості $\alpha = 0,05$, якщо

$$F > F_{\alpha, k_1, k_2}, \quad (2.27)$$

де F_{α, k_1, k_2} – табличне значення F -критерію Фішера - Снедекора, визначене на рівні значущості при ступенях свободи чисельника та ступенях свободи знаменника.

J•\g_f agZqmsgZlab\Z}lvky cfh\•jg•klv ^himkrlb]b ih
 jh^m Ih[Ih \•^dbgmlb ijZ\bevdm_bvihadZqmshkl• ^
 fh^_e• ijbcgylh j•_gv ^h\•jb JklzjgZhm_bvdhgZq_g
 djbl_j•x•rNjZdeZ^Z} LZ[ebqg_ agZq_ggy djb
 klmi_gyo k\h[h^b qbk_evgsdZ IZ
 klmi_gyo k\h[h^b ZagZifh\gggBd agZq_ggx

HI`_ gmZrhfm \biZ^dm P_ hagZqZ} sh hljbfZg
 j_]j_k•€ } kIZIbklbmsgh dgZqh hljbfZgm fh^_ev
 \bdhjbklh\m\ZIbkl]yghay\ij ydsh hp•gdb iZjZf_lj•\ IZc
 kIZIbklbqgmsghfb i]yl•c dhehgp• lqZ\ebp•gZ ^agZqbf•
 ydZ ihdZam} sh ydsh gZ_^_gbc ihdZagbd f_gr
 j_]j_k•cgv_ev \•^ih\•^Z} ^•ckghkl•

LZ[ebpy±J_amevlZIb ^bki_jk•cgh]h_jZgZne-gZnZ
 ijbdeZ^• g_e•g•cgh€ fh^_e• a dhf[•gh\Zgbfb\Zggyf
 dhgkIZglb

	df	SS	MS	F	AgZqbf•k
J_]j_k•y	14	292634841219,339	20902488659	11122387	0
AZebrhd	3486	6551298,062	1879,316713		
AZ]Zehf	3500	292641392517,400			

2.4.33 AZklhkm\Zgpyl_W•x Klvx^_glZ ^ey i_j_\•jdb a
 fZI_fZIbqgh€efh^

< hdj_fbo \biZ^dZo [Z]ZIhnZdlhjgh€ j_]j_khe€ f
 j•\gyggy j_]j_k•€ \ p•ehfm } kIZIbklbqgdjhlajgZfqmZ
 iZjZf_ljb ch]h g_ } kIZIbklbqgh agZqmsbfb^g•klhfm
 hdj_fh i_j_\•jbbklbqZgm agZqms•klv\gZjggylj•\ j•

Перевірка значущості параметрів рівняння регресії здійснюється за допомогою t -критерію Стьюдента. Для оцінки значущості параметрів регресійної моделі і обчислення довірчих інтервалів обчислюється дисперсійно-коваріаційна матриця параметрів моделі [72 - 74]

$$\text{cov}(\hat{A}) = \sigma_u^2 (X'X)^{-1}, \quad (2.28)$$

де σ_u^2 – незміщена оцінка дисперсії залишків, яка в свою чергу розраховується наступним чином:

$$\sigma_u^2 = \frac{Y'Y - A'X'Y}{n - m} = \frac{u'u}{n - m} = \frac{\sum_{i=1}^n u_i^2}{n - m} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - m}. \quad (2.29)$$

Якщо позначити елементи матриці

$$(X'X)^{-1} = (c_{ij}), \quad i = \overline{0, p}, \quad j = \overline{0, p}, \quad (2.30)$$

тоді дисперсійно-коваріаційна матриця параметрів моделі матиме вигляд [72 - 74]:

$$\text{cov}(\hat{A}) = \sigma_u^2 \begin{pmatrix} c_{00} & c_{01} & \dots & c_{0p} \\ c_{10} & c_{11} & \dots & c_{1p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{p0} & c_{p1} & \dots & c_{pp} \end{pmatrix}. \quad (2.31)$$

Значення t -критерію Стьюдента обчислюється для кожного параметра \hat{a}_j за формулою:

$$t_j = \frac{|\hat{a}_j|}{\sqrt{\sigma_u^2 c_{jj}}}, \quad j = \overline{0, p}. \quad (2.32)$$

де σ_u^2 – дисперсія залишків (2.29), C_{jj} – діагональний елемент дисперсійно-коваріаційної матриці (2.30).

Знаменник цього відношення $\sqrt{\sigma_u^2 c_{jj}}$ називається стандартною похибкою оцінки параметра a_j моделі. Далі, обчислене значення t -критерію порівнюється з табличним при вибраному рівні значущості α і $n-m$ ступенях свободи. Якщо $t > t_{\text{кр}}(\alpha, n-m)$, то відповідна оцінка параметра економетричної моделі є статистично значущою.

Пораховані стандартні похибки для кожного параметру наведені в таблиці 2.8. Також в таблиці наведені такі дані:

- в першій колонці «Коефіцієнти» наведено значення оцінок параметрів рівняння регресії (зверху – вниз) $\hat{a}_0, \hat{a}_1, \hat{a}_2 \dots$;
- в другій колонці «Стандартна похибка», наведено середньоквадратичні відхилення параметрів моделі, тобто стандартні похибки параметрів, вказані в знаменнику формули (2.32)
- в третій колонці « t -критерій» наводяться стандартизовані параметри рівняння регресії, які знаходяться за формулою (2.32);
- в четвертій колонці « P - значення» знаходяться значення функції, які показують, чи достовірні оцінки параметрів a_0, a_1, a_2 . Якщо $P < 0,05$, то оцінки параметрів достовірні;
- останні дві колонки «нижні 95%, верхні 95%» показують нижні та верхні границі 95% рівня довіри для кожного параметра регресії і визначають довірчі інтервали параметрів. Якщо число нуль не попадає в жодний довірчий інтервал, то з 95% впевненістю можна стверджувати, що отримана модель прийнятна.

На основі t - критерію і стандартної похибки будуються довірчі інтервали для параметрів a_j

$$a_j = \hat{a}_j \pm t_{\text{кр}}(\alpha, n - m) \sqrt{\sigma_u^2 c_{jj}} \quad (2.33)$$

Таблиця 2.8 – Результати дисперсійного аналізу t-критерію Стьюдента на прикладі нелінійної моделі з комбінованими параметрами без врахування

КОНСТАНТИ

Параметри	Коефіцієнти	Стандартна похибка	t-критерій	P-значення	Нижнє 95%	Верхнє 95%	Нижнє 95,0%	Верхнє 95,0%
Перехоплення	0	-	-	-	-	-	-	-
CO2_1*Шв_1	-1,344	0,078	-17,121	3,69322E-63	-1,498	-1,190	-1,498	-1,190
CO2_1*V_1	5,371	0,835	6,429	1,45902E-10	3,733	7,008	3,733	7,008
CO2_1*CO2_2	-13,027	2,236	-5,827	6,15604E-09	-17,410	-8,644	-17,410	-8,644
CO2_1*Шв_2	-0,353	0,162	-2,175	0,029726579	-0,671	-0,035	-0,671	-0,035
CO2_1*V_2	7,014	0,837	8,381	7,50723E-17	5,373	8,654	5,373	8,654
Шв_1*V_1	0,158	0,003	52,132	0	0,152	0,164	0,152	0,164
Шв_1*CO2_2	-1,553	0,149	-10,455	3,27269E-25	-1,844	-1,261	-1,844	-1,261
Шв_1*Шв_2	-0,082	0,001	-103,712	0	-0,084	-0,081	-0,084	-0,081
Шв_1*V_2	0,392	0,005	78,525	0	0,382	0,402	0,382	0,402
V_1*CO2_2	3,208	0,803	3,993	6,66263E-05	1,633	4,783	1,633	4,783
V_1*Шв_2	0,403	0,003	158,304	0	0,398	0,408	0,398	0,408
CO2_2*Шв_2	0,969	0,171	5,680	1,45478E-08	0,634	1,303	0,634	1,303
CO2_2*V_2	1,041	0,805	1,293	0,196189779	-0,538	2,619	-0,538	2,619
Шв_2*V_2	0,168	0,005	36,006	1,1659E-241	0,159	0,177	0,159	0,177

Табличне значення критерію t-критерію Стьюдента при ступені свободи $n - m = 3500 - 14 = 3486$ та рівні значущості 0,05 відповідає значенню 1,96. Отже, порівнюючи табличне значення критерію з розрахунковими по кожному параметру з таблиці 2.8 впливає, що усі параметри моделі окрім $CO_{22} * V_2$ є статистично значущими. Для параметру $CO_{22} * V_2$ модуль розрахункового значення t-критерію Стьюдента є меншим за табличне критичне значення критерію, отже він вважається статистично незначущим. Також для цього критерію значення функції не відповідає критерію $P < 0,05$. В такому випадку варто відкинути цей один параметр з регресії та повторно провести розрахунки

розділу 2.4.3 для нелінійної моделі з комбінованими параметрами без врахування константи з тринадцятьма факторами, замість чотирнадцятьох.

2.4.3.4 Коригування математичної моделі нелінійних регресійних залежностей за результатами проведених дисперсійних аналізів оцінки її значущості

Використавши формулу (2.33), проведено уточнення матриці параметрів регресії, поданої в (2.18) з врахуванням наявності тільки 13 факторів регресії. За результатом розрахунків сформовано матрицю параметрів регресії для цієї залежності:

$$\hat{A}' = (-1,344 \quad 5,371 \quad -13,027 \quad -0,353 \quad 7,014 \quad 0,158 \quad -1,553 \quad -0,082 \quad 0,392 \quad 3,208 \quad 0,403 \quad 0,969 \quad 1,041 \quad 0,168). \quad (2.34)$$

Також проведено розрахунки коефіцієнтів детермінації і кореляції для нової моделі.

Таблиця 2.9 – Результати розрахунку регресійної статистики на прикладі скорегованої нелінійної моделі з комбінованими параметрами без врахування константи

Багатофакторний коефіцієнт кореляції R	0,999988801
Коефіцієнт детермінації R- квадрат	0,999977602
Нормований R -квадрат	0,999690746
Стандартна похибка	43,3552584
Кількість спостережень	3500

Згідно методики 2.4.3.2 проведено Дисперсійний аналіз з використанням критерію Фішера. Результати наведені в таблиці 9. Результати подані в таблиці 2.9. Табличне значення критерію Фішера при $k_1 = m - 1 = 13 - 1 = 12$ ступенях свободи чисельника та $k_2 = n - m = 3500 - 13 = 3487$ ступенях свободи знаменника

відповідає значенню 1,723. Враховуючи, що для скоригованої моделі $F > F_{кр}$, отримане рівняння регресії є статистично значущим.

Таблиця 2.10 – Результати дисперсійного аналізу критерію Фішера на прикладі скоригованої нелінійної моделі з комбінованими параметрами без врахування константи

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимість F</i>
Регресія	13	292634838078,711	22510372160	11975650,62	0
Залишок	3487	6554438,688	1879,678431		
Загалом	3500	292641392517,4			

Для скоригованої моделі повторно проведений дисперсійний аналіз з використанням t-критерію Стюдента. Результати подані в таблиці 2.11. Табличне значення критерію t-критерію Стюдента для скоригованої моделі при ступені свободи $n - m = 3500 - 13 = 3487$ та рівні значущості 0,05 відповідає значенню 1,961. Порівнюючи табличне значення критерію з розрахунковими по кожному параметру з таблиці 2.11 впливає, що усі параметри моделі є значущими.

Таблиця 2.11 – Результати дисперсійного аналізу t-критерію Стюдента на прикладі скоригованої нелінійної моделі з комбінованими параметрами без врахування константи

<i>Параметри</i>	<i>Коефіцієнти</i>	<i>Стандартна похибка</i>	<i>t-критерій</i>	<i>P-значення</i>	<i>Нижнє 95%</i>	<i>Верхнє 95%</i>	<i>Нижнє 95,0%</i>	<i>Верхнє 95,0%</i>
Перехоплення	0	-	-	-	-	-	-	-
CO2_1*Шв_1	-1,343	0,078	-17,108	4,51964E-63	-1,497	-1,189	-1,497	-1,189
CO2_1*V_1	5,431	0,834	6,511	8,54357E-11	3,796	7,066	3,796	7,066
CO2_1*CO2_2	-12,107	2,119	-5,712	1,2093E-08	-16,262	-7,951	-16,262	-7,951
CO2_1*Шв_2	-0,370	0,162	-2,289	0,022142923	-0,688	-0,053	-0,688	-0,053
CO2_1*V_2	7,077	0,835	8,471	3,5435E-17	5,439	8,715	5,439	8,715
Шв_1*V_1	0,158	0,003	52,242	0	0,152	0,164	0,152	0,164
Шв_1*CO2_2	-1,440	0,120	-11,984	1,86209E-32	-1,675	-1,204	-1,675	-1,204

Продовження таблиці 2.11

Шв_1*Шв_2	-0,082	0,001	-104,947	0	-0,084	-0,081	-0,084	-0,081
Шв_1*V_2	0,392	0,005	78,514	0	0,382	0,402	0,382	0,402
V_1*CO2_2	2,174	0,078	27,796	9,0026E-154	2,021	2,328	2,021	2,328
V_1*Шв_2	0,404	0,002	165,623	0	0,399	0,409	0,399	0,409
CO2_2*Шв_2	1,116	0,127	8,793	2,237E-18	0,867	1,365	0,867	1,365
Шв_2*V_2	0,169	0,005	36,310	3,7676E-245	0,160	0,178	0,160	0,178

За результатами проведено дослідження побудовані графіки залишків для кожного з параметрів регресії скорегованої моделі. На рисунку 2.5 наведений приклад такого графіку для комбінованого параметру $CO_{21} * v_1$.

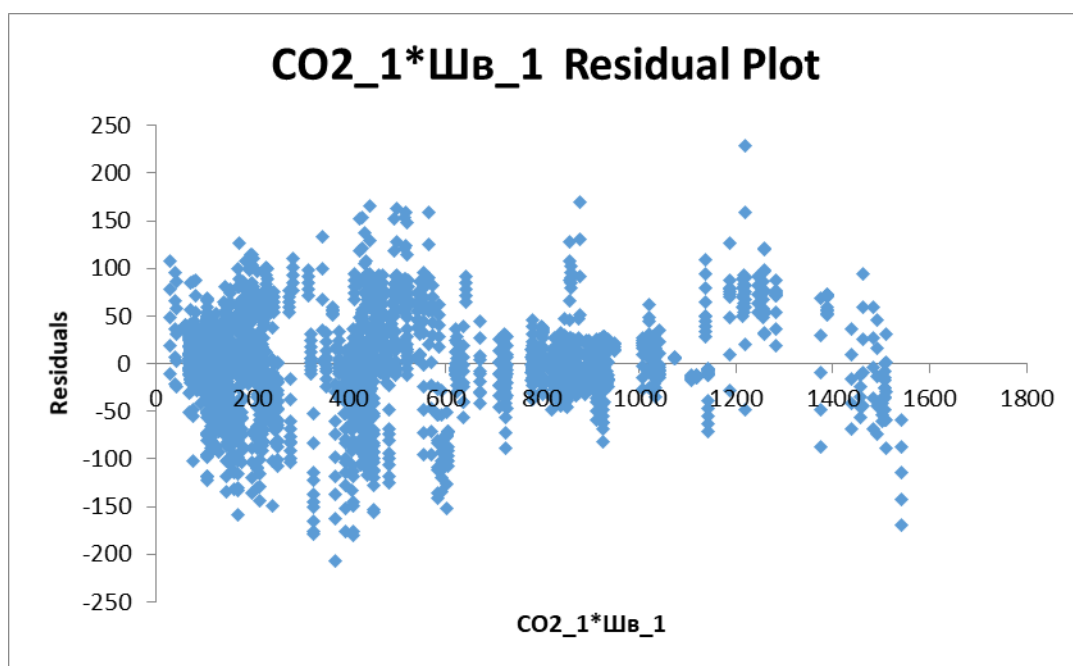


Рисунок 2.5 - Графік залишків для параметру $CO_{21} * v_1$. регресії скорегованої нелінійної моделі з комбінованими параметрами без врахування константи

Також для цього параметру побудовані графіки передбачень значення вищої теплоти згорання палива за кожним з факторів регресії. На рисунку 2.6 наведений приклад графіку для комбінованого параметру $CO_{21} * v_1$.

На основі проведеного регресійного аналізу для скорегованої нелінійної моделі з комбінованими параметрами без врахування константи побудований графік нормальної ймовірності. Поданий на рисунку 2.6.

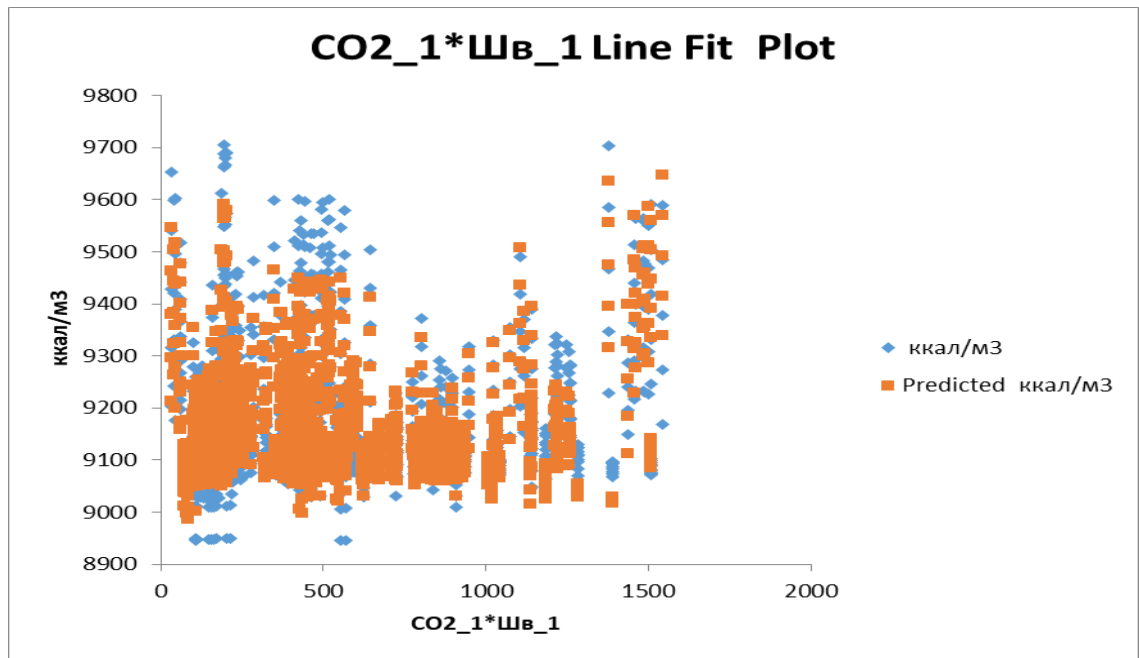


Рисунок 2.6 - Графік передбачень залежної змінної за параметром $CO_{21} \cdot v_1$ регресії скорегованої нелінійної моделі з комбінованими параметрами без врахування константи

Використавши формулу (2.2), проведено уточнення матриці параметрів регресії, поданої в (2.19) з врахуванням наявності тільки 13 факторів регресії. За результатом розрахунків сформовано рівняння нелінійної моделі оцінки теплотворної здатності природного газу на виході з розгалуженої мережі з комбінованими параметрами без врахування константи має вигляд:

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{вих}} = & CO_{21} \cdot (-1,343 \cdot v_1 + 5,431 \cdot V_1 - 12,107 \cdot CO_{22} - 0,37 \cdot v_2 + 7,077 \cdot V_2) + \\
 & + v_1 \cdot (0,158 \cdot V_1 - 1,44 \cdot CO_{22} - 0,082 \cdot v_2 + 0,392 \cdot V_2) + V_1 \cdot (2,174 \cdot CO_{22} + 0,404 \cdot v_2) + \\
 & + 1,116 \cdot CO_{22} \cdot v_2 + 0,169 \cdot v_2 \cdot V_2
 \end{aligned} \quad (2.35)$$

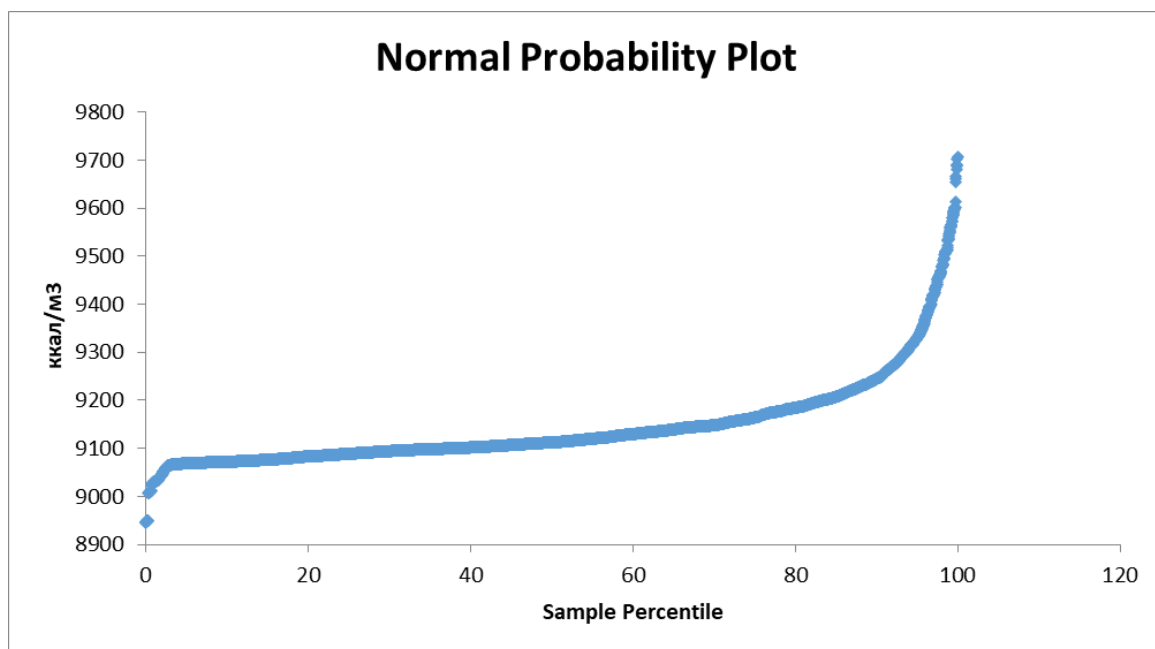


Рисунок 2.7 – Графік нормальної ймовірності для скорегованої нелінійної моделі з комбінованими параметрами без врахування константи

Враховуючи, що вища теплота згорання в мережі не має вираженої форми залежності від вхідних параметрів (аналіз графіків на рисунку 2.4), для кращої точності проведення регресійного аналізу є важливим диверсифікація можливих моделей залежності. Тому в межах дослідження розглянуто та прораховано декілька варіантів нелінійних функціональних залежностей.

На основі отриманих коефіцієнтів регресії з проведеного аналізу, виведені рівняння (формули 2.36 – 2.45) для визначення вищої теплоти згорання природного газу на рівні споживачів в мережі з двома входами при оцінці якісних параметрів природного газу на цих входах приладами експрес-контролю якості газу.

При цьому, аналіз проведено для двох варіантів змінних, що фігурують в регресії. У першому, змінними обрано безпосередні характеристики природного газу та його потоку на обох входах в мережу. У другому ж варіанті

параметрами регресійного аналізу обрано комплексні показники - комбінації (добутки) характеристик по кожному з входів. Також виконання регресійного аналізу здійснено як з так і без врахування константи.

Регресійні рівняння залежності вищої теплоти згорання природного газу у споживачів мереж з двома входами від параметрів на цих входах:

- Лінійна модель зі звичайними параметрами без врахування константи:

$$Q_{\text{вищ}} = 38,296 \cdot CO2_1 + 3,071 \cdot v_1 + 2,39 \cdot V_1 + 174,786 \cdot CO2_2 + 18,469 \cdot v_2 \quad (2.36)$$

- Нелінійна модель з комбінованими параметрами з врахуванням константи:

$$Q_{\text{вищ}} = -68998,563 - CO2_1 \cdot (1,2 \cdot v_1 - 18,074 \cdot V_1 + 45,778 \cdot CO2_2 + 3,516 \cdot v_2 - 19,717 \cdot V_2) + \\ + v_1 \cdot (1,846 \cdot V_1 - 5,693 \cdot CO2_2 - 0,485 \cdot v_2 + 2,08 \cdot V_2) + V_1 \cdot (20,076 \cdot CO2_2 + 2,049 \cdot v_2) + \\ + CO2_2 \cdot (0,986 \cdot v_2 + 17,908 \cdot V_2) + 1,814 \cdot v_2 \cdot V_2 \quad (2.37)$$

- Нелінійна модель зі звичайним та комбінованими параметрами з врахуванням константи

$$Q_{\text{вищ}} = -76341,993 - CO2_1 \cdot (1,2 \cdot v_1 - 17,784 \cdot V_1 + 45,778 \cdot CO2_2 + 3,516 \cdot v_2 - 20,392 \cdot V_2) + \\ + v_1 \cdot (1,811 \cdot V_1 - 5,693 \cdot CO2_2 - 0,485 \cdot v_2 + 2,162 \cdot V_2) + V_1 \cdot (19,696 \cdot CO2_2 + 2,008 \cdot v_2) + \\ + CO2_2 \cdot (0,986 \cdot v_2 + 18,795 \cdot V_2) + 1,909 \cdot v_2 \cdot V_2 + 104,906 \cdot V_1 \quad (2.38)$$

- Нелінійна модель зі звичайним та комбінованими параметрами без врахування константи:

$$Q_{\text{вищ}} = CO2_1 \cdot (-1,38 \cdot v_1 + 3,705 \cdot V_1 - 9,098 \cdot CO2_2 + 6,423 \cdot V_2) + \\ + v_1 \cdot (-0,123 \cdot V_1 - 0,948 \cdot CO2_2 - 0,025 \cdot v_2 + 0,244 \cdot V_2) + 0,107 \cdot V_1 \cdot v_2 + \\ + 0,992 \cdot CO2_2 \cdot v_2 + 0,078 \cdot v_2 \cdot V_2 + 140,214 \cdot V_1 \quad (2.39)$$

- Нелінійна степенева модель зі звичайними параметрами з врахуванням константи:

$$Q_{\text{вищ}} = 212609,591 \cdot CO2_1^{-0,01} \cdot v_1^{-0,585} \cdot V_1^{0,016} \cdot CO2_2^{0,001} \cdot v_2^{0,049} \quad (2.40)$$

- Нелінійна степенева модель зі звичайним параметрами без врахування константи:

$$Q_{виц} = CO2_1^{0,003} \cdot v_1^{0,083} \cdot V_1^{0,017} \cdot CO2_2^{0,027} \cdot v_2^{1,426} \quad (2.41)$$

- Нелінійна степенева модель з комбінованими параметрами з врахуванням константи:

$$Q_{виц} = 217191,219 \cdot (CO2_1 \cdot CO2_2)^{-0,004} \cdot (CO2_1 \cdot V_2)^{-0,006} \cdot (v_1 \cdot V_1)^{-0,311} \cdot (v_1 \cdot v_2)^{-0,274} \cdot (V_1 \cdot v_2)^{0,323} \cdot (CO2_2 \cdot V_2)^{0,005} \quad (2.42)$$

- Нелінійна степенева модель з комбінованими параметрами без врахування константи:

$$Q_{виц} = (CO2_1 \cdot CO2_2)^{0,012} \cdot (CO2_1 \cdot V_2)^{-0,009} \cdot (v_1 \cdot V_1)^{-0,651} \cdot (v_1 \cdot v_2)^{0,729} \cdot (V_1 \cdot v_2)^{0,686} \cdot (CO2_2 \cdot V_2)^{0,015} \quad (2.43)$$

- Нелінійна поліномна модель без врахування константи:

$$Q_{виц} = -118,432 \cdot CO2_1 + 138,821 \cdot v_1 + 2,122 \cdot V_1 + 34,784 \cdot CO2_2 + 6,501 \cdot CO2_1^2 - 0,489 \cdot v_1^2 - 17,437 \cdot CO2_2^2 + 0,0005 \cdot v_1^3 + 1,981 \cdot CO2_2^3 \quad (2.44)$$

- Нелінійна показникова модель без врахування константи:

$$Q_{виц} = 0,189^{CO2_1} \cdot 0,022^{v_1} \cdot 0,0008^{V_1} \quad (2.45)$$

де $CO2_1$, $CO2_2$ – компонентний вміст вуглекислого газу в природному газі на двох входах в мережу, %; v_1 , v_2 – швидкість проходження ультразвуку в природному газі на двох входах в мережу, м/с; V_1 , V_2 – відсоткові частки об'ємної витрати на двох входах в мережу, взяті від загальної витрати газу після змішування, %.

Для кожного з наведених моделей проведений розрахунок багатофакторної регресії за послідовністю, наведеною в 2.3 розділі.

2.5 Методологія оцінки точності розроблених моделей визначення якості природного газу

У кожній з наведених в формулах (2.35-2.45) функцій всі фактори, що беруть участь в регресії відповідають умовам значимості, а самі моделі відтворюють суттєвий зв'язок між вищою теплотою згорання та незалежними змінними. Це свідчить про можливість їх використання на практиці. Зауважимо, що розглядалися такі умов значимості:

- фактичні значення t-критерію Стюдента всіх змінних у наведених моделях є більшими за табличні значення цього критерію при рівні значущості 0,95 та відповідних числах ступенів свободи;
- нижча та вища межі коефіцієнта регресії для кожного параметру в усіх перелічених моделях мають однакові знаки (є або більшими або меншими від нуля);
- фактичні значення критерію Фішера для кожної з моделей є вищим за теоретичне цього критерію, отриманого з таблиць F-розподілу Фішера.

По кожній з розглянутих моделей виконано розрахунки додаткових параметрів, що характеризують їх значущість і точність та на основі яких можна зробити вибір найкращого варіанту рівняння. Зведені характеристики для проведення такого аналізу наведені в таблиці 2.12. Оцінка відносної похибки виведених формул проводилася на основі іншої вибірки даних (1790 зразків природного газу із відомими фізико-технічними характеристиками та параметрами мережі).

Наведені в таблиці коефіцієнти множинної кореляції показують, що всі моделі мають сильний зв'язок (за школою Чеддока) між вищою теплотою згорання та параметрами на входах в мережу. Отже, всі регресійні моделі можуть бути змістовно інтерпретованими.

Таблиця 2.12 – Оцінка якості моделей залежності вищої теплоти згорання в мережі з двома входами від параметрів на цих входах

Назва моделі	Коефіцієнт множинної кореляції	Коефіцієнт детермінації	Скоригований коефіцієнт детермінації	Фактичне значення критерію Фішера	Табличне значення критерію Фішера	Відносна похибка розрахунків
Лінійна модель зі звичайними параметрами з врахуванням константи	0,818	0,669	0,669	2359,4	2,6	1,98
Лінійна модель зі звичайними параметрами без врахування константи	0,999	0,999	0,999	4204343,5	2,2	4,31
Нелінійна модель з комбінованими параметрами з врахуванням константи	0,896	0,802	0,801	1010,4	1,7	1,5
Нелінійна модель з комбінованими параметрами без врахування константи	0,999	0,999	0,999	11975650,6	1,7	4,77
Нелінійна модель зі звичайним та комбінованими параметрами з врахуванням константи	0,903	0,816	0,815	1027	1,7	0,24
Нелінійна модель зі звичайним та комбінованими параметрами без врахування константи	0,999	0,999	0,999	13374252,7	1,8	2,38
Нелінійна степенева модель зі звичайним параметрами з врахуванням константи	0,822	0,675	0,675	1453,9	2,2	2,43
Нелінійна степенева модель зі звичайним параметрами без врахування константи	0,999	0,999	0,999	226676387	2,2	4,87
Нелінійна степенева модель з комбінованими параметрами з врахуванням константи	0,822	0,676	0,675	1214,9	2,1	2,76
Нелінійна степенева модель з комбінованими параметрами без врахування константи	0,999	0,999	0,999	189914172,8	2,1	5,04

Продовження таблиці 2.12

Нелінійна поліномна модель без врахування константи	0,999	0,999	0,999	12548772,8	1,9	8,53
Нелінійна показникова модель без врахування константи	0,999	0,999	0,999	5978653,2	2,6	89,4

Враховуючи, що у виведених регресійних моделях кількість предикторів не однакова, оцінка їх якості за коефіцієнтом детермінації не є прийнятним. В такому випадку найоптимальніше провести порівняння якості отриманих рівнянь за скоригованим коефіцієнтом детермінації, так як він враховує вплив кількості параметрів регресії. Чим вищий коефіцієнт – тим більша частина варіації залежної змінної пояснюється виведеною моделлю. Тому найкращу якість, керуючись скоригованим коефіцієнтом детермінації, має нелінійна модель зі звичайним та комбінованими параметрами з врахуванням константи

Відносна похибка порахованої за виведеними формулами калорійності природного газу у порівнянні з аналогічним значенням, отриманим за калориметричним аналізом знаходить в межах від 0,24 % до 89,4 %. Варто відмітити, що цей параметр є найефективнішим для цілі вибору найкращої моделі, так як показує безпосередню точність розрахунків. Як видно з таблиці 2.12, результат оцінки найкращої моделі як за параметром відносної похибки розрахунків, так і за скоригованим коефіцієнтом детермінації співпадає. Отже, найкращою моделлю залежності вищої теплоти згорання газу після змішування в мережі від параметрів на її входах (значення швидкостей ультразвуку в газах з двох входів, вмісту в них вуглекислого газу та відсоткові частки об'ємної витрати одного з них по відношенню до загальної витрати газу, що поступає в мережу) є нелінійна модель зі звичайним та комбінованими параметрами з врахуванням константи (формула 2.38).

В цілях візуалізації точності отриманої залежності проведено порівняння теплотворної здатності газу після змішування, визначеної на основі розрахунку

за компонентними складами газів та за формулою 2.38. Графік порівняння наведений на рисунку 2.8. Сіра площина відповідає п'ятивідсотковому діапазону похибки вимірювання відносно величини теплотворної здатності, порашованої за компонентним складом. Як видно з рисунку, графік теплотворної здатності, порашованої за виведеною формулою не виходить за межі похибки.

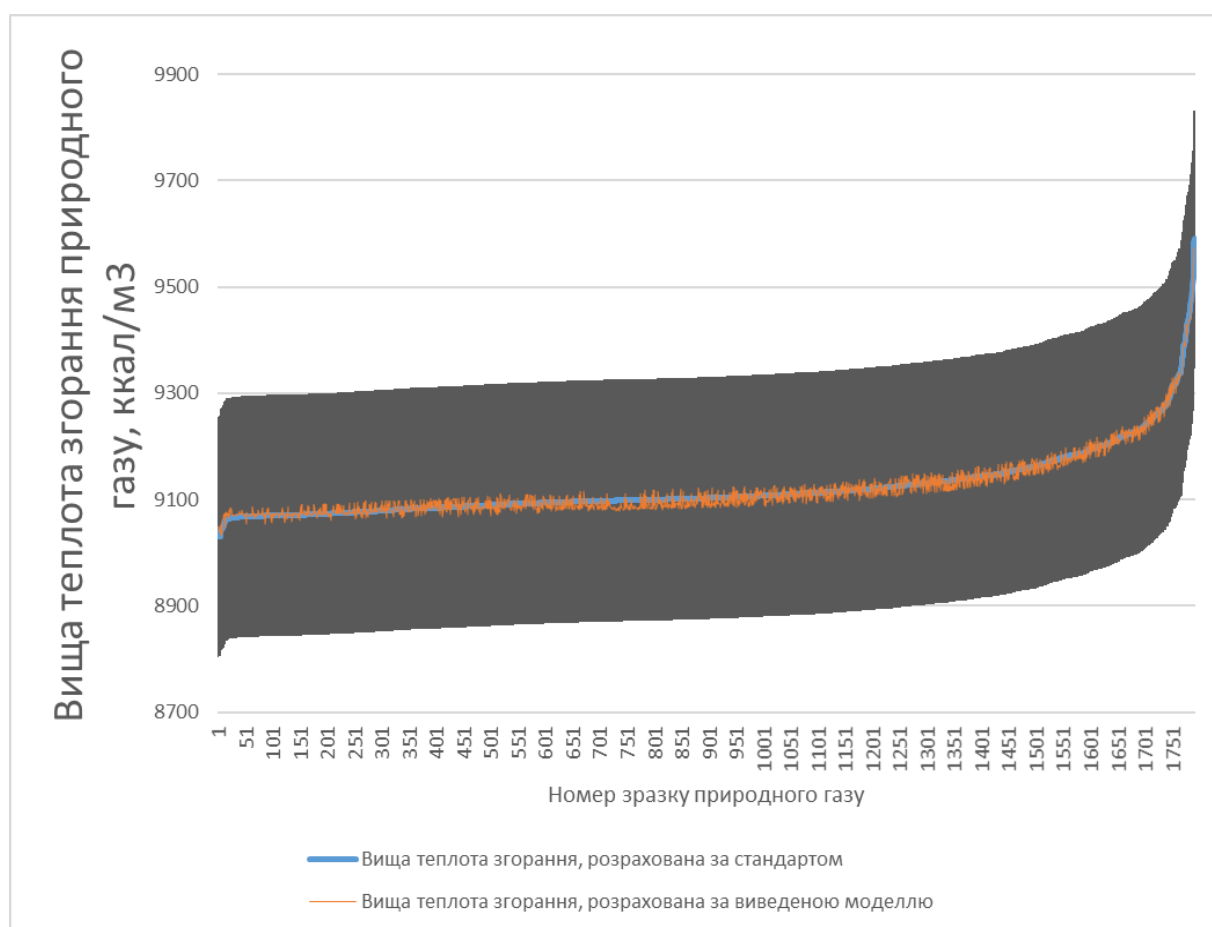


Рисунок 2.8 – Графік порівняння розрахункової вищої теплоти згорання газу після змішування від двох входів за отриманою залежністю та за перерахунком через компонентні складі вхідних газів

Припущення, що були виконані під час проведеного дослідження:

- в мережі відбувається повне змішування газів з різних джерел;
- природні гази за своїми параметрами відповідають ідеальному газу;
- для мереж низького тиску знехтувано можливою зміною рівнів тиску в трубопроводі до та після змішування.

Формула 2.38 дійсна для випадку, коли об'ємні частки витрати природного газу приведені до стандартних умов ($P_{st}=101,325 \text{ кПа}, T_{st}=273,15 \text{ К}$). За умови однакових робочої температури і тиску на двох вхідних вітках в мережу, частку об'ємної витрати не потрібно б було приводити до стандартних умов (значення під час розрахунку частки б скорочувалися). Враховуючи, що входи в мережу можуть розміщуватися на відстані до 20 км, та те, що вимірювання об'ємної витрати природного газу здійснюється за робочих умов, додамо до математичної моделі коефіцієнт приведення до стандартних умов (з рівняння стану ідеального газу):

$$K_{np} = \frac{P_{роб}}{P_{ст}} \cdot \frac{T_{ст}}{T_{роб}} \cdot \frac{Z_{ст}}{Z_{роб}}, \quad (2.46)$$

де $P_{роб}, P_{ст}$ – тиск у робочих і стандартних умовах відповідно, кПа; $T_{роб}, T_{ст}$ – температура у робочих і стандартних умовах, К; $Z_{роб}, Z_{ст}$ – коефіцієнт стисливості у робочих і стандартних умовах відповідно, кПа;

Переведення об'єму газу з робочих умов до стандартних буде мати вигляд :

$$V_{ст} = V_{роб} \cdot K_{np} = V_{роб} \cdot \frac{P_{роб}}{P_{ст}} \cdot \frac{T_{ст}}{T_{роб}} \cdot \frac{Z_{ст}}{Z_{роб}}, \quad (2.47)$$

де $V_{роб}$ – об'ємна витрата у робочих умовах, м³/год; $V_{ст}$ – об'ємна витрата у стандартних умовах, м³/год.

Частки об'ємних витрат будуть знаходитися за формулами:

$$V_1 = \frac{V_{роб1} \cdot K_{нр1}}{V_{роб1} \cdot K_{нр1} + V_{роб2} \cdot K_{нр2}} = \frac{V_{роб1} \cdot \frac{P_{роб1}}{P_{см}} \cdot \frac{T_{см}}{T_{роб1}} \cdot \frac{Z_{см1}}{Z_{роб}}}{V_{роб1} \cdot \frac{P_{роб1}}{P_{см}} \cdot \frac{T_{см}}{T_{роб1}} \cdot \frac{Z_{см1}}{Z_{роб}} + V_{роб2} \cdot \frac{P_{роб2}}{P_{см}} \cdot \frac{T_{см}}{T_{роб2}} \cdot \frac{Z_{см2}}{Z_{роб}}}, \quad (2.48)$$

$$V_2 = \frac{V_{роб2} \cdot K_{нр2}}{V_{роб1} \cdot K_{нр1} + V_{роб2} \cdot K_{нр2}} = \frac{V_{роб2} \cdot \frac{P_{роб2}}{P_{см}} \cdot \frac{T_{см}}{T_{роб2}} \cdot \frac{Z_{см2}}{Z_{роб}}}{V_{роб1} \cdot \frac{P_{роб1}}{P_{см}} \cdot \frac{T_{см}}{T_{роб1}} \cdot \frac{Z_{см1}}{Z_{роб}} + V_{роб2} \cdot \frac{P_{роб2}}{P_{см}} \cdot \frac{T_{см}}{T_{роб2}} \cdot \frac{Z_{см2}}{Z_{роб}}}. \quad (2.49)$$

Використання формул (2.48, 2.49) в розробленій залежності 2.38 дасть можливість врахувати привести вимірювання об'ємної витрати природного газу у робочих умовах до стандартних (за якими розроблялася математична модель). Таким чином, формула 2.38 для мереж низького тиску при врахуванні впливу на природний газ температури матиме наступний вигляд:

$$Q_{шиц} = -76341,993 - CO_2 \cdot \left(1,2 \cdot v_1 - 17,784 \cdot \frac{V_{роб1} \cdot K_{нр1}}{V_{роб1} \cdot K_{нр1} + V_{роб2} \cdot K_{нр2}} + 45,778 \cdot CO_2 + 3,516 \cdot v_2 - 20,392 \cdot \frac{V_{роб2} \cdot K_{нр2}}{V_{роб1} \cdot K_{нр1} + V_{роб2} \cdot K_{нр2}} \right) + \quad (2.50)$$

$$+ v_1 \cdot \left(1,811 \cdot \frac{V_{роб1} \cdot K_{нр1}}{V_{роб1} \cdot K_{нр1} + V_{роб2} \cdot K_{нр2}} - 5,693 \cdot CO_2 - 0,485 \cdot v_2 + 2,162 \cdot \frac{V_{роб2} \cdot K_{нр2}}{V_{роб1} \cdot K_{нр1} + V_{роб2} \cdot K_{нр2}} \right) + \frac{V_{роб1} \cdot K_{нр1}}{V_{роб1} \cdot K_{нр1} + V_{роб2} \cdot K_{нр2}} \cdot (19,696 \cdot CO_2 + 2,008 \cdot v_2) +$$

$$+ CO_2 \cdot \left(0,986 \cdot v_2 + 18,795 \cdot \frac{V_{роб2} \cdot K_{нр2}}{V_{роб1} \cdot K_{нр1} + V_{роб2} \cdot K_{нр2}} \right) + 1,909 \cdot v_2 \cdot \frac{V_{роб2} \cdot K_{нр2}}{V_{роб1} \cdot K_{нр1} + V_{роб2} \cdot K_{нр2}} + 104,906 \cdot \frac{V_{роб1} \cdot K_{нр1}}{V_{роб1} \cdot K_{нр1} + V_{роб2} \cdot K_{нр2}}$$

де $V_{роб1}$, $V_{роб2}$ – об'ємна витрата газу у робочих умовах на вході №1 та №2 відповідно, м³/год; $K_{нр1}$, $K_{нр2}$ – коефіцієнти приведення об'ємної витрати до стандартних умов на вході №1 та №2 відповідно (розраховується за формулою (2.46)).

Згідно [75] для визначення енергії значення максимально допустимих похибок вимірювань систем, ВОГ та вузлів визначення ФХП складає:

- Для класу точності А +/- 1%
- Для класу точності В +/- 2%
- Для класу точності С +/- 3%

Враховуючи це, розрахунки за виведеною формулою відповідають класу точності А.

При цьому, варто відзначити, що у дослідженні були враховані обмеження, пов'язані з припущеннями про ідеальні умови та повне змішування газів у мережі. На це слід звертати увагу при практичному застосуванні методики. Результати проведеного дослідження, що наведені в цьому розділі опубліковані в науковій роботі [76].

Розроблена методика може бути використана для ефективних комерційних розрахунків за природний газ на основі його енергетичних параметрів. А саме у випадках розгалужених мереж зі змішуванням газу з двох входів. При можливості використання приладів експрес-контролю якості природного газу на кожному із входів та розрахунку параметрів газу після змішування за виведеною формулою. Це сприятиме покращенню роботи ринку природного газу та впровадженню точніших стандартів розрахунків.

2.6 Визначення якості природного газу з допомогою штучних нейронних мереж

Отримана регресійна модель демонструє високий коефіцієнт детермінації, що свідчить про її значущість для опису залежності теплотворної здатності природного газу від параметрів на входах в мережу. Водночас її використання має певні обмеження, обумовлені специфікою методу та характеристиками вхідних даних. Зважаючи на це, доцільним є застосування сучасних методів машинного навчання, зокрема штучних нейронних мереж (ШНМ), які дозволяють вирішувати подібні задачі з урахуванням складних взаємозв'язків між змінними. Такий підхід обґрунтовується наступними аргументами.

1. Недоліки регресійної моделі у випадку складних нелінійних залежностей. У рамках побудови регресійної моделі було прийнято припущення про нелінійність взаємозв'язків між параметрами. Проте класичний регресійний аналіз, навіть із урахуванням нелінійних

предикторів, має обмежену здатність відображати складні взаємодії між факторами. Це особливо актуально для фізичних процесів у газотранспортних системах, які характеризуються значною нелінійністю та залежністю від множини взаємопов'язаних змінних. ШНМ дозволяють виявляти та адекватно моделювати такі взаємозв'язки, враховуючи складну структуру даних.

2. Обмеження інструментальних засобів для регресійного аналізу. Побудова регресійної моделі виконувалася за допомогою стандартного програмного забезпечення, яке вимагає лінеаризації залежностей. Цей підхід є технічно коректним, проте не враховує можливих нелінійних трансформацій у даних. ШНМ, на відміну від класичних інструментів, працюють безпосередньо з нелійними взаємозв'язками, що знімає необхідність попередньої трансформації змінних і зберігає точність моделювання.

3. Наявність мультиколінеарності між факторами регресії. У процесі побудови моделі було виявлено сильну залежність між окремими факторами, що ускладнює інтерпретацію результатів і знижує прогностичну здатність моделі. Для усунення мультиколінеарності застосовувалися перетворення, зокрема множення предикторів, проте такий підхід не гарантує повного вирішення проблеми. ШНМ, завдяки своїй архітектурі, здатні автоматично знижувати вплив мультиколінеарності та адаптивно враховувати взаємозв'язки між змінними.

4. Результати огляду літератури, представлені у першому розділі дисертації, підтверджують зростаючу популярність використання алгоритмів глибинного навчання та ШНМ у задачах моделювання складних енергетичних процесів. Наукові роботи демонструють, що такі підходи забезпечують високу точність прогнозування навіть у складних

умовах, зокрема за наявності великого обсягу вхідних даних і значної нелінійності взаємодій між параметрами.

5. У регресійній моделі враховувалися основні характеристики природного газу, доступні для вимірювання або розрахунку. Водночас фізичні процеси, що визначають теплотворну здатність, можуть залежати від параметрів, які не були явно враховані у моделі. ШНМ завдяки своїй здатності до самоорганізації та навчання на великих обсягах даних здатні виявляти приховані закономірності, що підвищує точність і достовірність отриманих результатів.

6. Гнучкість у використанні додаткових даних. ШНМ дозволяють легко інтегрувати нові джерела даних без необхідності зміни базової структури моделі. Це забезпечує можливість подальшого вдосконалення прогнозів теплотворної здатності у разі доступу до додаткових параметрів, які раніше не були враховані в регресії.

У процесі навчання нейронної мережі одним із важливих аспектів є забезпечення її здатності узагальнювати отримані дані. Проблема виникає, коли модель починає не стільки знаходити закономірності, скільки запам'ятовувати навчальний набір, що призводить до зниження точності роботи на нових, невідомих даних. Щоб уникнути цього явища, прийнято розділяти доступний набір даних на декілька частин, кожна з яких виконує специфічну функцію.

Розподіл здійснюється наступним чином (рисунок 2.9):

- Навчальний набір (training set) — становить 70% загального обсягу даних (2450 зразків) і використовується для навчання нейронної мережі. Саме на цьому наборі мережа формує свої ваги, базуючись на виявлених закономірностях у даних.
- Валідаційний набір (validation set) — охоплює 15% даних (525 зразків) і служить для оцінки проміжної продуктивності моделі під час

навчання. Він допомагає виявити, чи мережа не перенавчається, а також дає змогу налаштувати її параметри.

- Тестовий набір (testing set) — включає 15% даних (525 зразків) і використовується виключно для підсумкової оцінки ефективності нейронної мережі після завершення навчання. Це дозволяє оцінити здатність моделі узагальнювати знання на нових даних, які не використовувалися під час навчання чи валідації.

Randomly divide up the 3500 samples:		
Training:	70%	2450 samples
Validation:	<input type="text" value="15%"/>	525 samples
Testing:	<input type="text" value="15%"/>	525 samples

Рисунок 2.9 – Співвідношення розділених частин бази даних

Оптимальний вибір кількості нейронів у прихованому шарі є важливим етапом проектування нейронної мережі, оскільки від цього залежить її здатність до навчання та узагальнення. Загальноприйняте емпіричне правило рекомендує використовувати кількість нейронів, яка не перевищує суму кількості нейронів у вхідному і, відповідно, у вихідному прошарках. У нашому випадку кількість нейронів у вхідному шарі дорівнює 19, а у вихідному шарі – 1. Тож оптимальним є вибір прихованого шару, що складається з 20 нейронів. Це забезпечить баланс між достатньою потужністю мережі та уникненням перенавчання. Архітектура отриманої мережі, яка включає вхідний, прихований і вихідний шари, наведена на рисунку 2.10.

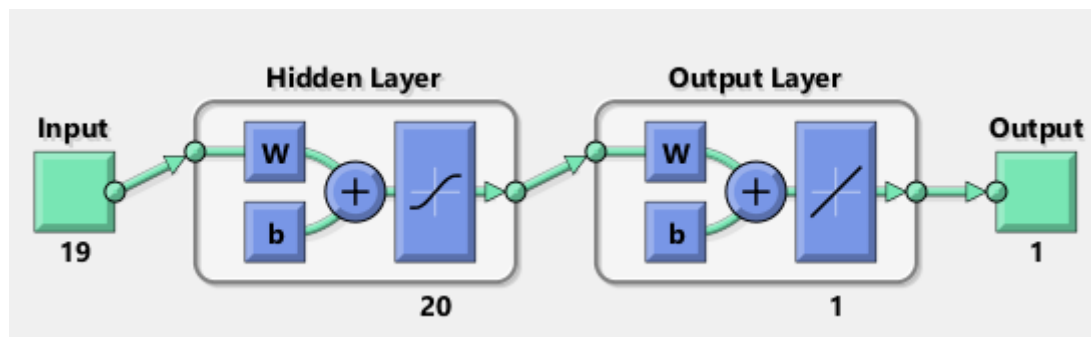


Рисунок 2.10 – Архітектура нейронної мережі із вхідним, прихованим і вихідним шарами

Процес навчання нейронної мережі виконувався за алгоритмом Левенберга-Марквардта. На рисунку 2.11 представлені ключові метрики і графіки, які відображають динаміку навчання. Кількість ітерацій навчання склало 118 епох. Після кожної епохи мережа коригувала свої ваги на основі мінімізації середньоквадратичної похибки (Mean Squared Error, MSE). Параметри навчання показують, що навчання було автоматично зупинене через досягнення умов припинення - збільшенням похибки на валідаційному наборі даних. На фінальній ітерації значення градієнта становило 1282.4933, що свідчить про зменшення темпу навчання порівняно з початковими ітераціями. Це є ознакою поступового наближення до мінімуму функції похибки. Значення параметру μ , яке відповідає за масштабування в алгоритмі Левенберга-Марквардта, змінилося до 0.1 на останній епосі. Це вказує на те, що метод поступово адаптувався до особливостей задачі, забезпечуючи баланс між градієнтним спуском і квадратичною оптимізацією. В процесі навчання було виконано 6 перевірок валідації, що є стандартним показником для моніторингу узагальнюючої здатності мережі.

Графік градієнта на рисунку 2.11 відображає поступове зменшення градієнта функції похибки, що є ознакою стабільного процесу оптимізації. Графік параметра μ показує адаптацію алгоритму в процесі навчання.

Зменшення μ вказує на збільшення впевненості у визначеному напрямку мінімізації похибки. Графік перевірки валідації демонструє динаміку узагальнюючої здатності мережі. Збільшення похибки після певної кількості ітерацій свідчить про завершення фази навчання.

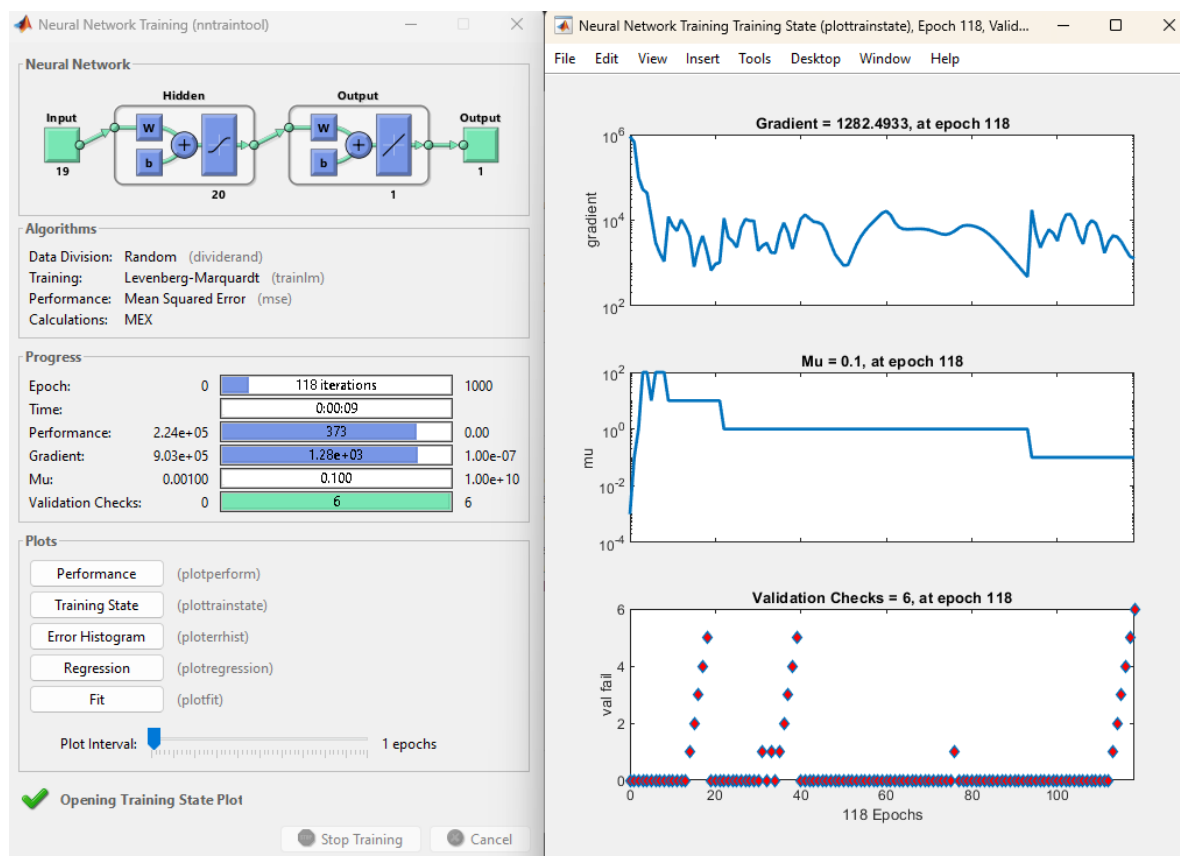


Рисунок 2.11 – Процес навчання нейронної мережі: динаміка градієнта, параметра μ та перевірки валідації

Графік продуктивності нейронної мережі відображає динаміку змін середньоквадратичної похибки (Mean Squared Error, MSE) для навчального, валідаційного та тестового наборів даних. Цей графік дозволяє оцінити ефективність навчання моделі, її здатність до узагальнення та стабільність у процесі оптимізації.

На початкових етапах навчання спостерігається стрімке зниження MSE для навчального (синя крива) та валідаційного (зелена крива) наборів даних. Це

свідчить про активну фазу корекції ваг нейронної мережі, що дозволяє швидко зменшувати похибку. У середній фазі навчання криві стабілізуються, демонструючи повільніше зниження похибки. Це є природним результатом наближення моделі до оптимального стану, де більшість параметрів вже скориговані.

Оптимальна продуктивність на валідаційному наборі була досягнута на 112-й епосі із середньоквадратичною похибкою 688.1636, що вказує на найкращу узагальнюючу здатність моделі в цій точці. Подальше навчання після цієї епохи не покращило результати на валідаційному наборі, а навпаки, почало демонструвати тенденцію до перенавчання. Саме це і стало критерієм для автоматичного припинення навчання на 118-й епосі.

Червона крива, що відповідає тестовому набору даних, показує рівень похибки, який є близьким до похибки на валідаційному наборі. Це свідчить про те, що модель успішно узагальнює знання на даних, які вона не бачила під час навчання, що є ключовим показником її практичної придатності.

Логарифмічна шкала для осі похибки дозволяє більш чітко відстежувати динаміку навчання, особливо на початкових етапах, коли відбувається найбільше зниження похибки. Сталий рівень похибки на фінальних епохах свідчить про досягнення модельної стабільності. Отримані матриці коефіцієнтів взаємозалежності між нейронами ШНМ, подані в додатку К. Інші x-стики побудованої ШНМ наведені на рисунках 2.12-14

Таким чином, результати навчання нейронної мережі демонструють її здатність ефективно навчатися, узагальнювати дані та зберігати стабільність у роботі. Досягнутий рівень похибки на тестовому наборі вказує на адекватність моделі для вирішення задачі оцінки теплотворної здатності природного газу, а автоматичне припинення навчання на основі зростання валідаційної похибки дозволяє уникнути перенавчання. Це забезпечує високу надійність отриманої моделі для подальшого практичного застосування.

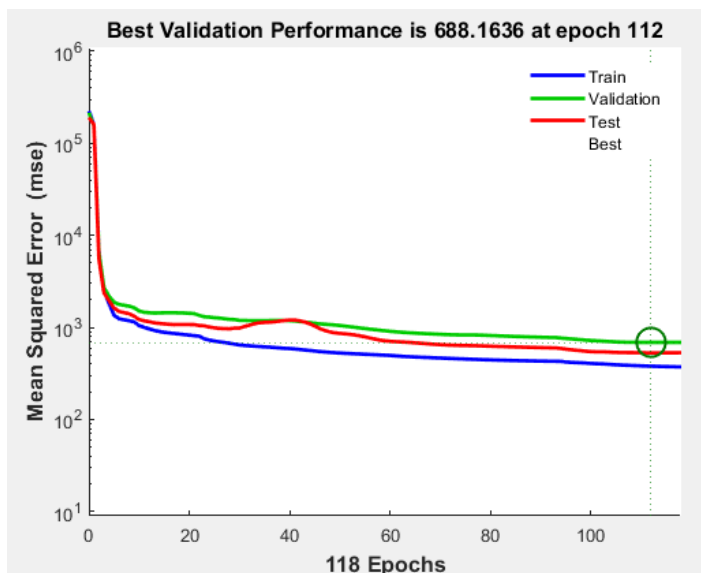


Рисунок 2.12 - Графік валідації розробленої моделі нейромережі

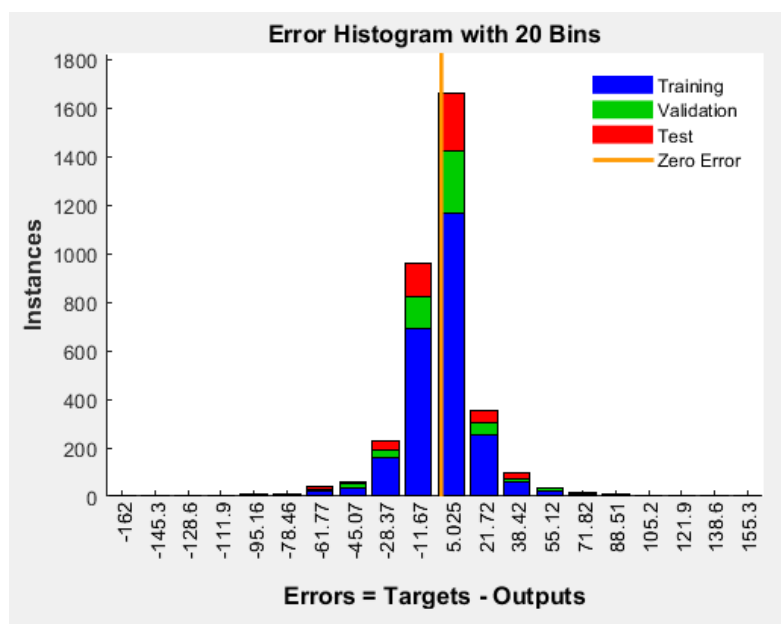


Рисунок 2.13 – Гістограма похибок розробленої, провалідованої і тестованої моделей

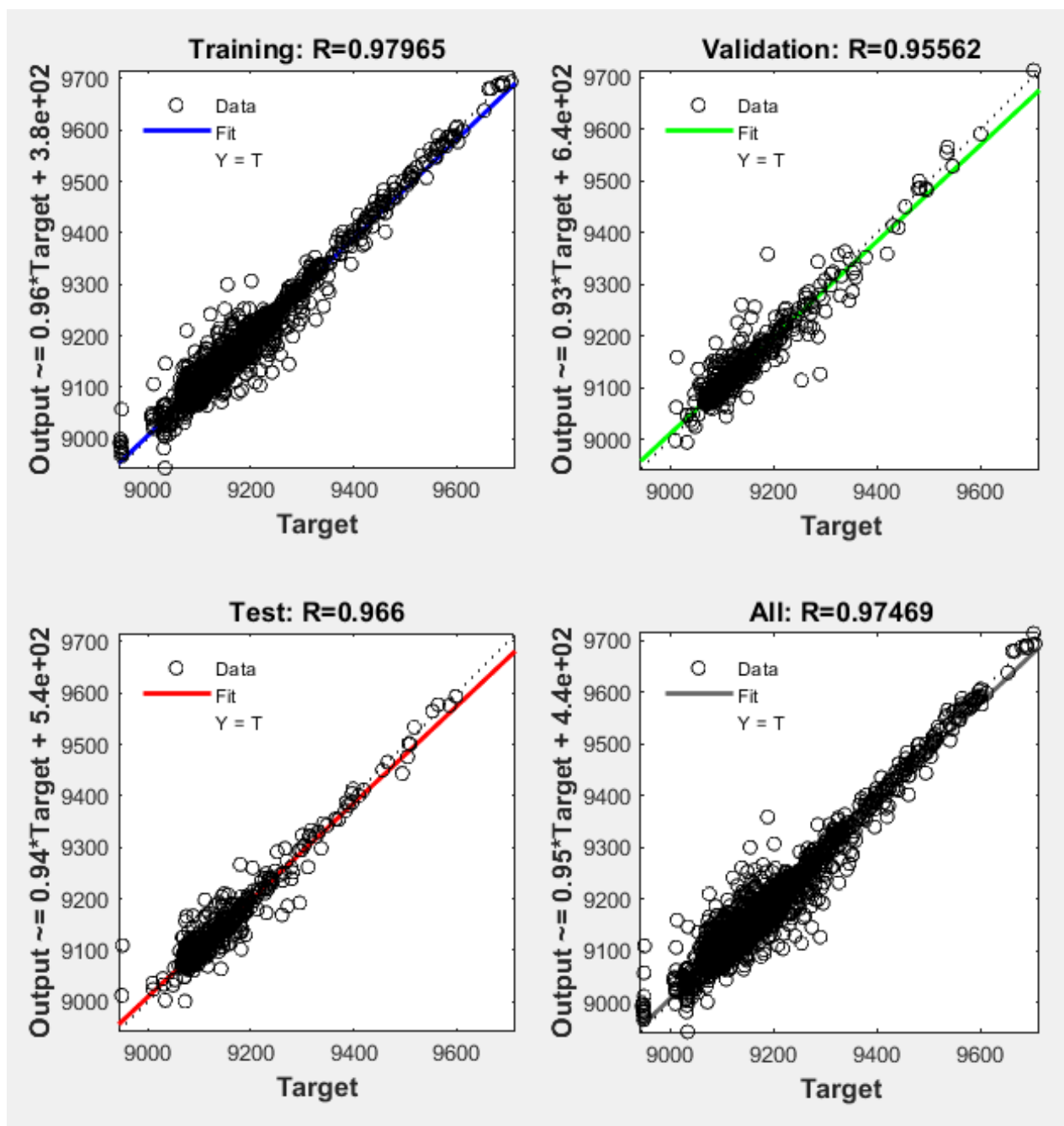


Рисунок 2.14 – Графіки залишків та коефіцієнти кореляції тренованої, валідованої моделей та моделі тестування

2.7 Розроблення алгоритму функціонування інформаційно-вимірювальної системи контролю якості природного газу в розгалужених мережах

У цьому підрозділі представлено алгоритмічну послідовність дій, яка дозволяє забезпечити безперервний контроль, обробку, зберігання та використання інформації про якість природного газу в умовах розгалужених мереж. Алгоритм призначений для інженерів та операторів газорозподільних мереж (ГРМ), які впроваджуватимуть цю систему у практичну експлуатацію. Він передбачає чітку регламентацію кожного етапу: від отримання початкових даних з вимірювальних приладів, їх попередньої перевірки, фільтрації та обчислення інтегральних показників, до формування бази даних для комерційного обліку й подальших енергетичних розрахунків.

Вхідні дані системи наведені на рисунку 2.15. Всі прилади підєднані до системи збору даних про якість газорозподільної мережі та розташовані безпосередньо на кожному з вхідних трубопроводів в розгалужену мережу.

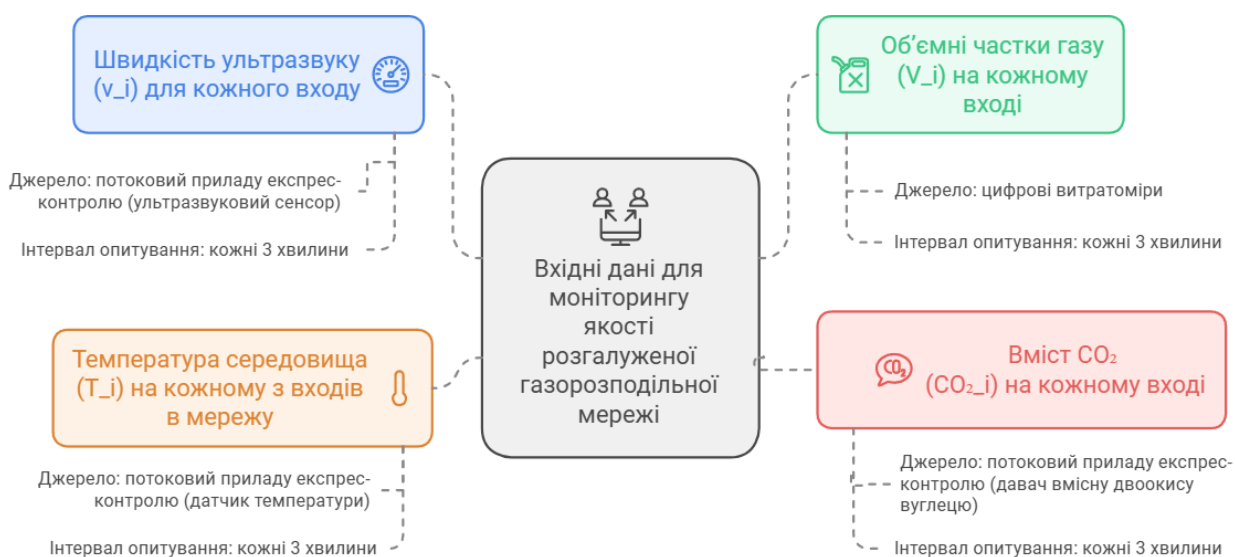


Рисунок 2.15 – Вхідні дані для алгоритму оцінки якості газу в розгалужених мережах

Розроблений алгоритм функціонування інформаційно-вимірювальної системи контролю якості природного газу в розгалужених мережах наведено в додатку Л. Частина структурної схеми наведена на рисунку 2.16. Основні етапи алгоритму охоплюють:

1. Збір вхідних параметрів:

Регулярне отримання даних про швидкість ультразвуку, об'ємні витрати, вміст CO₂ та температуру з вимірювальних приладів у визначені часові інтервали.

2. Попередня обробка та фільтрація даних:

Контроль діапазонів параметрів, виявлення аномальних змін та автоматична фільтрація недостовірних значень з використанням статистичних методів. Відфільтровані та валідувані дані передаються на наступні етапи.

3. Розрахунок усередненої теплотворної здатності газу:

Використання розробленої математичної моделі для визначення теплоти згорання на основі валідуваних даних із кожного входу в мережу.

4. Розрахунок енергетичної цінності та комерційне використання даних:

Формування єдиної бази даних, де поєднуються часові ряди споживання газу та значення теплоти згорання. На цій основі виконується обчислення енергетичної цінності газу для кожного споживача, що використовується у платіжних документах.

5. Інтеграція з системами диспетчеризації та управління:

Передача та відображення результатів оцінки якості газу в реальному часі, а також взаємодія із системами SCADA для оперативного контролю та оптимізації мережі.

6. Архівування та аналіз даних:

Збереження інформації за тривалий період для подальшої аналітики, прогнозування, а також резервне копіювання даних.

7. Перевірка метрологічної достовірності:

Періодичний метрологічний контроль та за потреби корекція калібрувальних коефіцієнтів та допустимих меж, що гарантує точність та надійність системи.

Таким чином, наведений алгоритм забезпечує комплексний підхід до вимірювання, обробки, аналізу та використання якісних параметрів природного газу, що циркулює у розгалуженій газорозподільній мережі. Етап 1: Збір вхідних параметрів

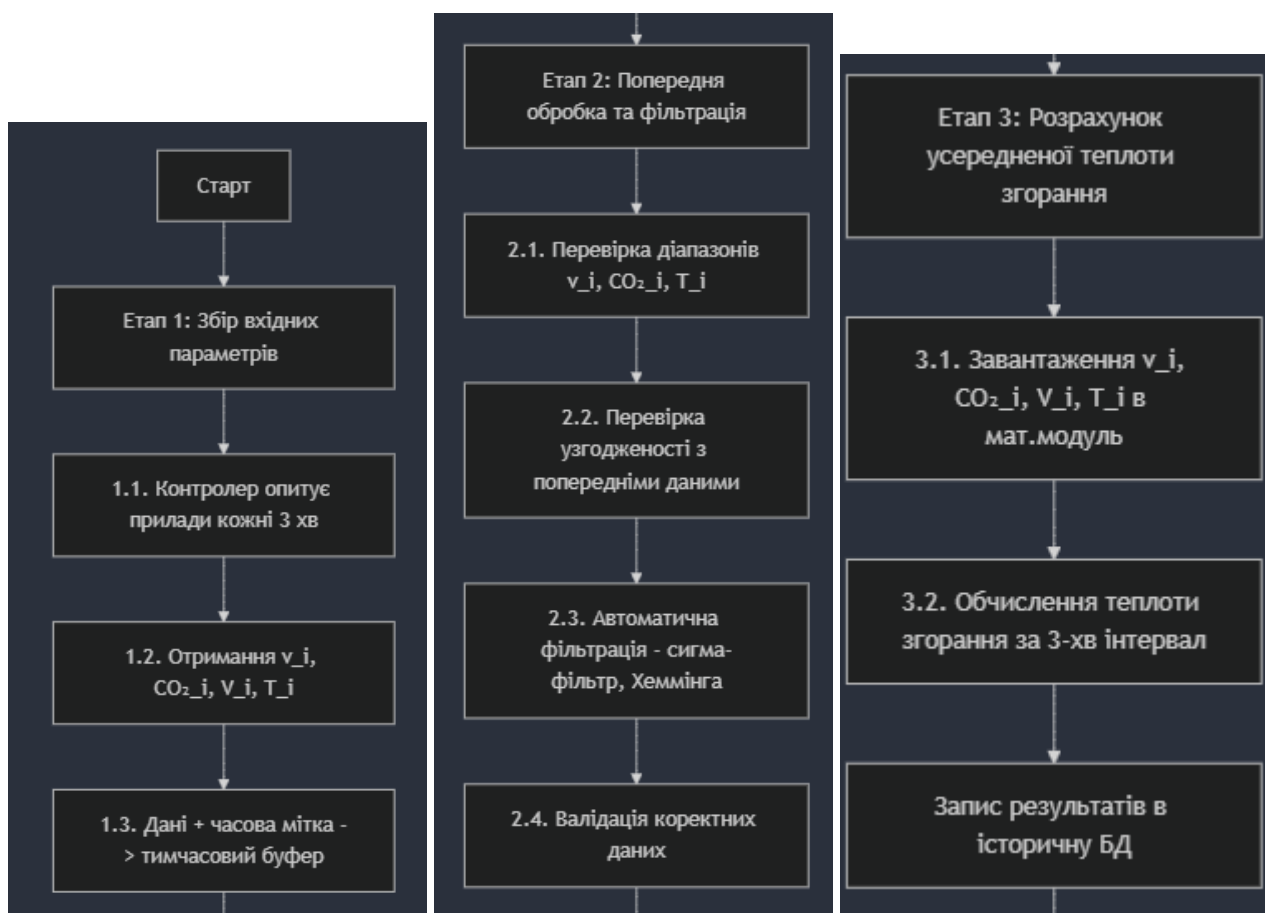


Рисунок 2.16 – Частина структурної схеми розробленого алгоритму, що включає 3 перші етапи

2.8 Корегування математичної моделі з врахуванням наявності в газовій мережі домішків водню

На основі актуальних досліджень щодо впровадження водневих технологій у газотранспортні системи виконано корегування математичної моделі оцінки теплоти згорання газових сумішей у розгалужених мережах. Метою коригування є забезпечення високої точності розрахунків у випадках наявності домішків водню у газопроводі. Для цього було сформовано модельну базу даних, що відображає зміну компонентного складу газу при концентраціях водню 0.5%, 5%, 10%, 15%, 20%. При цьому перераховано коефіцієнт стисливості з врахуванням наявності в мережі водню за формулою [77]. У процесі моделювання встановлено, що збільшення частки водню у складі газу суттєво впливає на загальну теплоту згорання, знижуючи її значення пропорційне до концентрації H_2 .

На першому етапі виконано перевірку розробленої раніше математичної моделі на новому наборі даних. Результати показали значне зниження точності прогнозування теплоти згорання для сумішей з воднем. Зокрема, середня відносна похибка від неврахування в моделі параметрів закачаного в трубопровід водню склала 418 %, що робить модель непридатною для практичного використання в умовах збагаченого воднем газу.

Для підвищення точності моделі проведено її коригування шляхом регресійного аналізу, використаного для нового набору даних. Модифікована модель побудована на основі нелінійного рівняння, яке включає комбіновані параметри, що враховують взаємодію концентрації водню з основними компонентами природного газу. При цьому було визначено нові коефіцієнти регресії, що забезпечили оптимізацію прогнозування теплоти згорання для всього діапазону концентрацій H_2 .

Після коригування моделі виконано повторний розрахунок точності для всіх зразків газових сумішей. Результати показали, що середня відносна похибка знизилась до 0.31 %, що є прийнятним значенням для інженерних розрахунків та метрологічних вимірювань у газотранспортних системах. Зокрема, для концентрації водню у межах 10–20% максимальна похибка не перевищувала 0,34 %, що підтверджує універсальність моделі.

Перевірка адекватності модифікованої моделі здійснена на основі статистичних критеріїв. Значення багатофакторного коефіцієнта детермінації $R^2 = 0,9896$ свідчать про високий ступінь відповідності моделі до емпіричних даних. Дисперсійний аналіз за критерієм Фішера показав, що розрахункове значення $F = 110566$ значно перевищує табличне значення для заданого рівня значущості, підтверджуючи статистичну значущість моделі. Додатковий аналіз за t -критерієм Стюдента підтвердив значущість усіх параметрів моделі, оскільки розрахункові значення коефіцієнтів перевищують табличні межі.

Таким чином, скоригована математична модель забезпечує високу точність розрахунку теплоти згоряння у газових мережах з домішками водню у широкому діапазоні концентрацій. Це дозволяє застосовувати модель для прогнозування характеристик газу в умовах часткової інтеграції водню до газотранспортної інфраструктури та є важливим етапом для забезпечення метрологічної точності при обліку енергії у змішаних газових потоках.

Найкращою уточненою моделлю виявилось рівняння нелінійної моделі зі звичайним та комбінованими параметрами з врахуванням константи:

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{вип}} = & -8673,442 - CO_{2,1} \cdot (2,362 \cdot v_1 - 74,33 \cdot V_1 + 44,2 \cdot CO_{2,2} + 0,13 \cdot v_2 - 35,9 \cdot V_2) + \\
 & + v_1 \cdot (1,99 \cdot V_1 + 4,34 \cdot CO_{2,2} + 1,345 \cdot v_2 - 3,334 \cdot V_2) + V_1 \cdot (29,3 \cdot CO_{2,2} + 1,98 \cdot v_2) + \\
 & + CO_{2,2} \cdot (0,555 \cdot v_2 + 18,39 \cdot V_2) + 1,87 \cdot v_2 \cdot V_2 + 50,43 \cdot V_1
 \end{aligned} \quad (2.51)$$

Висновки до розділу 2:

1. Доведено розбіжність між значеннями якості природного газу, опублікованими газотранспортною організацією, та фактично вимірними показниками. Результати досліджень показали, що у 51,1% точок вимірювань нижча теплота згоряння, визначена газотранспортною компанією, перевищує фактичні значення, отримані лабораторним методом. Розбіжність складає до 3833 ккал/м³, що свідчить про необхідність удосконалення системи моніторингу якості газу в режимі реального часу. Середня відносна похибка розбіжності складає 0,36%.
2. Проведено оцінку кореляційної залежності між параметрами, що вимірюються засобами експрес-контролю якості газу на входах мережі та теплотворною здатністю газу на рівні споживачів (після змішування газу з різних входів). Вона показала часткову мультиколінеарність між деякими параметрами, що вимірюються – вмістом CO₂ в природному газі та швидкістю проходження в ньому ультразвуку вимірних для енергоресурсу з одного входу (коефіцієнт кореляції більше $|-0,8|$, що за школою Чеддока свідчить про високу силу зв'язку) та відсотковими частками об'ємних витрат природного газу, що надходять в мережу з різних трубопроводів. Також з врахування статистичного аналізу значущості параметрів регресії, досліджено, що використання лінійної регресії не є адекватним. Нелінійним регресійним аналізом отримано ряд залежностей для оцінки теплотворної здатності газу після змішування. Проведено порівняльний аналіз отриманих можелей за такими параметрами: коефіцієнт множинної кореляції, коефіцієнт детермінації, скоригований коефіцієнт детермінації, фактичне значення критерію Фішера, табличне значення критерію Фішера та відносна похибка розрахунків. Останній параметр є значущим у виборі найкращої моделі,

оскільки він безпосередньо відображає точність розрахунків. Для отриманих можелей, відносна похибка розрахунку калорійності природного газу коливається в широкому діапазоні від 0,24% до 89,4%.

3. Виведено найкращу математичну модель, що оцінює якість природного газу після змішування від двох джерел за вхідними параметрами, отриманими приладом експрес-контролю якості газу. Нею є нелінійна модель зі звичайним та комбінованими параметрами з врахуванням константи, яка має відносну похибку розрахунків 0,24%. Дослідження показало, що використання цієї моделі в процесі розрахунку теплотворної здатності природного газу в мережі з двома входами дозволяє отримувати дані, які відповідають класу точності А. Це вказує на потенційну придатність методики для комерційних розрахунків.
4. Виявлено потенціал використання штучних нейронних мереж (ШНМ) для моделювання складних нелінійних залежностей між параметрами потоків газу. ШНМ дозволяють автоматично усувати мультиколінеарність. Коефіцієнт кореляції створеної нейронної мережі складає 0,97.
5. Проведено корегування математичної моделі з врахуванням наявності в газовій мережі домішків водню при концентраціях 0.5%, 5%, 10%, 15%, 20%, що дало можливість отримати модель, відносна похибка якої не перевищує 0,34%.

РОЗДІЛ 3

УДОСКОНАЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ ТРАНСПОРТУВАННЯ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ З УРАХУВАННЯМ ЇХ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЦІННОСТІ

3.1 Моделювання впливу якості природного газу на експлуатаційні параметри газових мереж

У попередньому розділі нами досліджено, як частки об'ємних витрат природного газу, що подаються в мережу з декількох джерел, та його фізико-хімічні параметри впливають на якість енергоресурсу під час змішування. Для подальшого дослідження запропоновано змінити акцент на аналіз зворотного зв'язку — вивчення впливу якості газу на експлуатаційні параметри мережі. Зокрема, визначення впливу енергетичної цінності газу на тиск, витрати та втрати в мережі. Такий контекст дослідження посприє розробленню науково-технічної бази для адаптації гідравлічного розрахунку газових мереж з урахуванням енергетичної цінності. Особливо під час розподілу газу в динамічних умовах, при адаптації до змін складу газу з різних джерел та інтеграції в газову мережу водню та біометану.

3.1.1 Дослідження зміни експлуатаційних параметрів газотранспортної мережі під впливом енергетичної цінності природного газу

Згідно Паспортів фізико-хімічних показників природного газу по областях [67], за 2019 рік максимальне зафіксоване середнє значення калорійності природного газу на території України склало 8386 ккал, мінімальне – 8015 ккал. Різниця між середньозваженими показниками калорійності природного газу за річний період складає 371 ккал, це 4,5 % від середньозваженого показника по Україні. Проведено моделювання роботи газової мережі на основі моделі [78] в середовищі графічного інтерфейсу Matlab – Simulink, що включає джерела газу, газові сховища, трубопроводи та споживачів (рисунок 3.1).

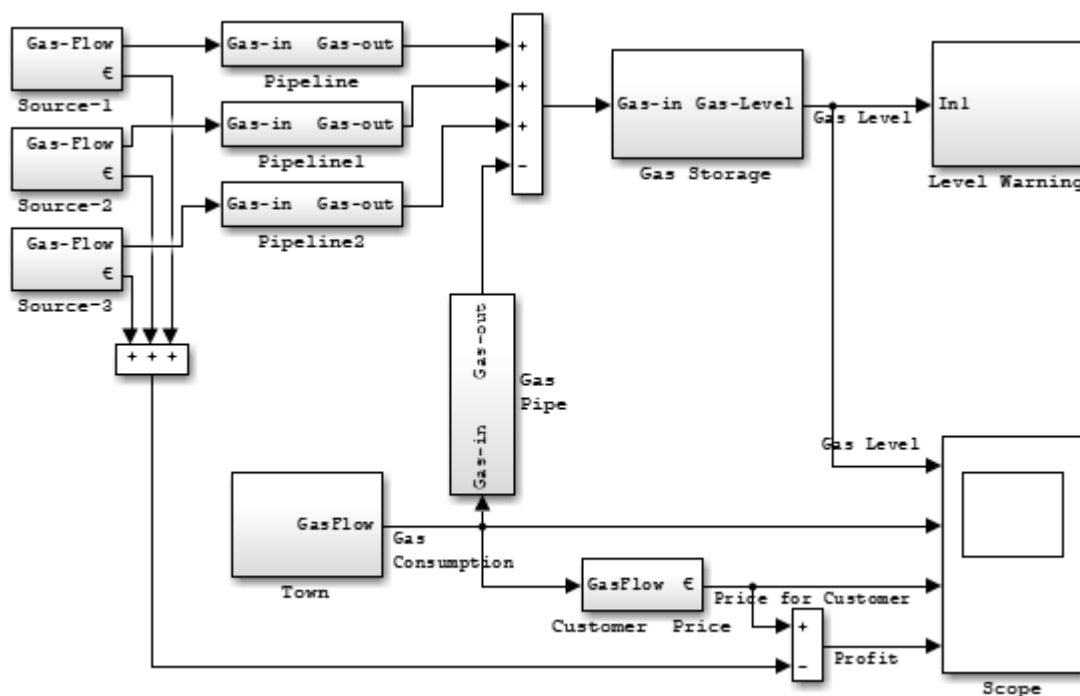
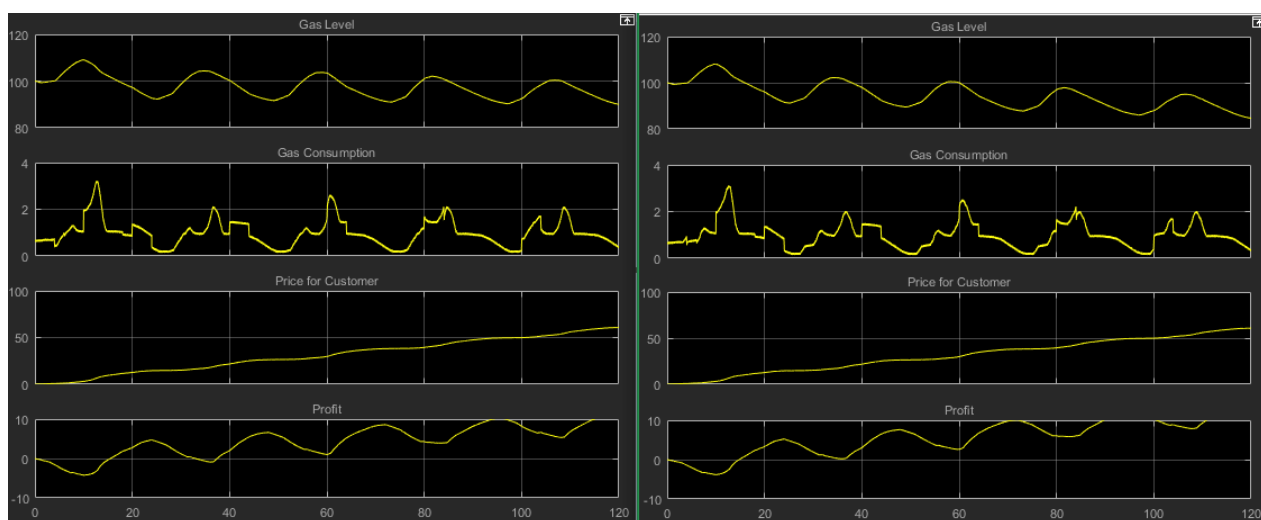


Рисунок 3.1 – Використана модель мережі газопостачання в середовищі графічного інтерфейсу Matlab – Simulink

Модель прораховано для випадку мережі зі звичайними параметрами та випадку, коли якісні показники природного газу (теплотворна здатність газу) знижені на 4,5 %. Отримані результати включають рівень газу у сховищах, споживання клієнта, модель ціноутворення для клієнта та прибуток для оператора мережі (рисунок 3.2).

Порівнюючи графіки навантаження спостерігається їх ідентичність у двох випадках, так відсутня кореляція між навантаженням споживачів та калорійністю газу. Така ж ситуація спостерігається і для випадку графіку вартості послуг. Це пояснюється тим, що наразі в Україні введено ринок природного газу, проте вартість послуги з постачання природного газу на цьому ринку не залежить від якості продукту. Це викликає підвищення рівня споживання населенням природного газу у випадку зниження якості

енергоресурсу. Така ситуація пояснює зміни залежності у двох інших графіках рисунку 2. Підвищення попиту на природний газ для випадку (б) знижує рівень запасів газу в газосховищах (рисунок 2). Також погіршення якості впливає на ріст прибутку газопостачальних організацій по причині росту об'єму енергоресурсу, що реалізується. Проте, слід зазначити, що використана модель не враховує додаткових витрат оператора мережі газопостачання спричинених погіршенням стану обладнання через вплив газу нижчої якості (до прикладу підвищенням ймовірності корозії трубопроводів через вищий вміст вологи в газу).



а) Результати моделювання мережі зі звичайними якісними показниками природного газу

б) Результати моделювання мережі для випадку зниження якісних показників природного газу на 5 %

Рисунок 3.2 – Графічні результати моделювання мережі постачання природного газу для двох випадків якісних показників природного газу

3.1.2 Дослідження зміни експлуатаційних параметрів мереж низького тиску під впливом енергетичної цінності природного газу

Якщо говорити про мережу низького тиску, вони характеризуються відносно стабільними умовами транспортування газу через незначні втрати тиску вздовж траси та мінімальні зміни густини газу. Враховуючи це, при гідравлічних розрахунках густину газу зазвичай приймають сталою, що відповідає середньому значенню для умов транспортування. Стандартизовані методики розрахунку, зокрема ДБН В.2.5-20-2001, базуються на низці припущень, які спрощують моделювання, але не враховують реальні фізико-хімічні властивості газу. Зокрема, газ приймається за нормальних умов (температура 0 °С і тиск 0,10132 МПа), а коефіцієнт стисливості для мереж низького тиску вважається рівним одиниці.

Однак у сучасних умовах, коли природний газ надходить із різних джерел, його якість може суттєво відрізнятися через варіативність компонентного складу, що безпосередньо впливає на його теплотворну здатність. Існуючі методики гідравлічного розрахунку не враховують зміни теплотворної здатності газу, що може призводити до зниження точності прогнозування робочих параметрів, зокрема тиску у мережах низького тиску. Занижена точність таких розрахунків обмежує можливості оптимального проектування газових мереж та може створювати умови для перевищення допустимих робочих навантажень, зменшення надійності системи газопостачання або перевищення енерговитратності.

Враховуючи сучасні вимоги до швидкості прийняття інженерно-технічних рішень при розширенні мереж або підключенні нових споживачів, актуальним є аналіз впливу теплотворної здатності газу на експлуатаційні параметри, зокрема робочий тиск у газових мережах низького тиску. Для цього необхідно провести уточнений гідравлічний розрахунок з урахуванням змін теплотворної

здатності газу як вхідного параметра. Такий підхід дозволить оцінити, наскільки відмінності у якості газу впливають на функціонування мереж та забезпечити підвищення точності інженерних розрахунків у газотранспортних системах низького тиску.

Аналіз питомої теплоти згорання природного газу в Івано-Франківській області проводився на основі середньомісячних значень для кожної газорозподільної станції (ГРС) за 2017 рік. Дані отримано із сертифікатів якості природного газу, оприлюднених на сайті Регіональної газової компанії «Івано-Франківськгаз» (www.if.104.ua). Найвище значення теплоти згорання було зареєстровано на ГРС Битків у травні 2017 року і склало 42,7 МДж/м³, а найнижче – на ГРС Росільна у січні 2017 року і становить 39,8 МДж/м³.

Для дослідження використовувалась змодельована мережа з високим рівнем розгалуження, що містить численні гілки та вузли. Як мережу з низьким рівнем розгалуження було обрано існуючу газопостачальну мережу низького тиску від ГРС Битків в Івано-Франківській області. Однолінійна мережа у ході дослідження не використовувалася.

Компонентний склад та характеристики зразків газів, що застосовувалися під час моделювання, наведено у таблиці 3.1.

Результат моделювання низькорозгалуженої мережі з низькокалорійним газом на базі програмного забезпечення SIMONE 6.1 відображено на рисунку 3.3. Моделювання високорозгалуженої мережі подано на рисунку 3.4. Моделювання для двох типів мереж з висококалорійним газом подані в додатку М. Тиск на ГРС (вхідній точці мережі) рівний 2,8 кПа. За умов, в яких моделюється мережа, тиск в кінцевого споживача складає 2,53 кПа.

В таблиці 3.2 наведені результати залежності тиску мережі від виду природного газу та рівня розгалуженості газорозподільної мережі, з якої видно, що при низькому рівні перепад тиску майже не залежить від виду газу. Інша ситуація має місце при високому рівні розгалуження.

Таблиця 3.1 – Компонентний склад і характеристики низькокалорійного та висококалорійного зразків газів, які бралися до уваги під час моделювання

Позначення	Одиниці вимірювання	Опис	Значення для низькокалорійного газу	Значення для висококалорійного газу
R	кг/м ³	густина	0,7175	0,7775
CV	МДж/м ³	вищ. теплота згорання газу	39,8309	42,6936
TC	К	критична температура	190,555	200,9933
PC	бар	критичний тиск	45,988	46,164
ACF	%	ACF	0,0115	0,0188
СРОА	%	СРОА	32,558	31,844
СРОВ	%	СРОВ	-0,0141	-0,0056
СРОС	%	СРОС	0,0001	0,0001
XC1	%	Метан	100	91,5
XC2	%	Етан	0	7,5
XC3	%	Пропан	0	1

Проаналізувавши отримані результати слід зазначити, що з підвищенням питомої теплоти згорання газу, тиски в кінцевих споживачів газової мережі зменшуються. При чому, в більш розгалуженій мережі даний процес проявляється яскравіше. Така залежність пояснюється тим, що при підвищенні калорійності газу, підвищується вміст у складі газу сполук з більшою карбоновмісткістю, які мають вищу густину. Підвищення рівня густини газу є причиною підвищення гідравлічного опору проходження енергоносія по мережі, що спричиняє падіння тиску в її кінцевих споживачах. Отже, приймаючи до уваги результати дослідження, при розрахунку газорозподільчої мережі з врахуванням низькокалорійного газу слід обирати менші діаметри трубопроводів, враховуючи, що тиск на кінцевих споживачах вищий, а для висококалорійного газу – більші діаметри трубопроводів, оскільки тиск біля

споживачів нижчий. Результати проведеного дослідження, що наведені в цьому підрозділі опубліковані в науковій роботі [61].

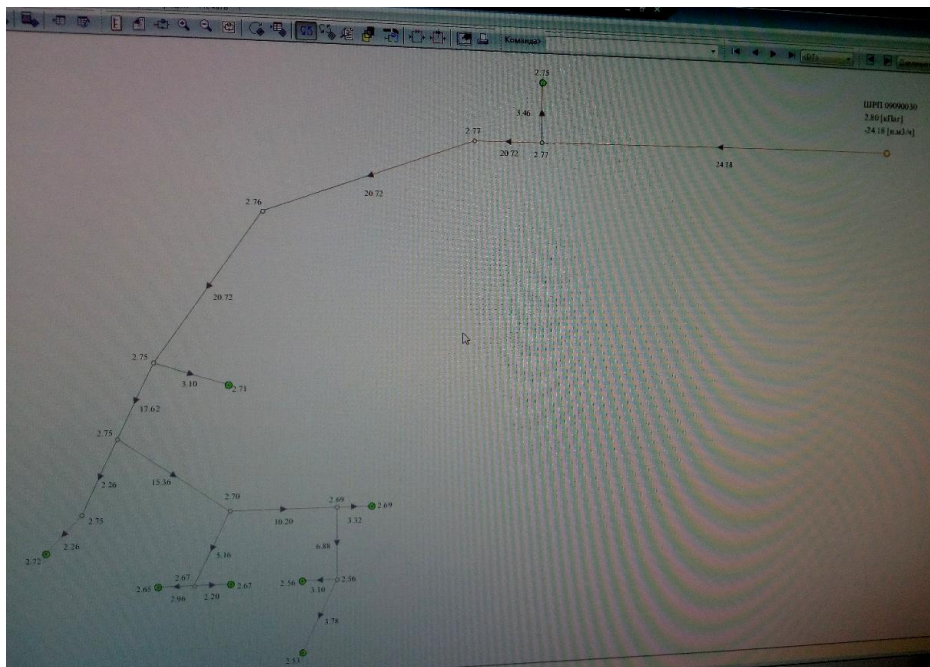


Рисунок 3.3 – Параметри мережі з низьким рівнем розгалуження при моделюванні з використанням низькокалорійного газу

Таблиця 3.2 - Результати дослідження залежності параметрів мережі газорозподілу від калорійності газу

Рівень розгалуження газорозподільної мережі	Вид природного газу	Тиск мережі, кПа	
		На вході	В кінцевого споживача
Низький	Низькокалорійний	2,8	2,53
	Висококалорійний	2,8	2,52
Високий	Низькокалорійний	3,0	2,05
	Висококалорійний	4,2	1,99

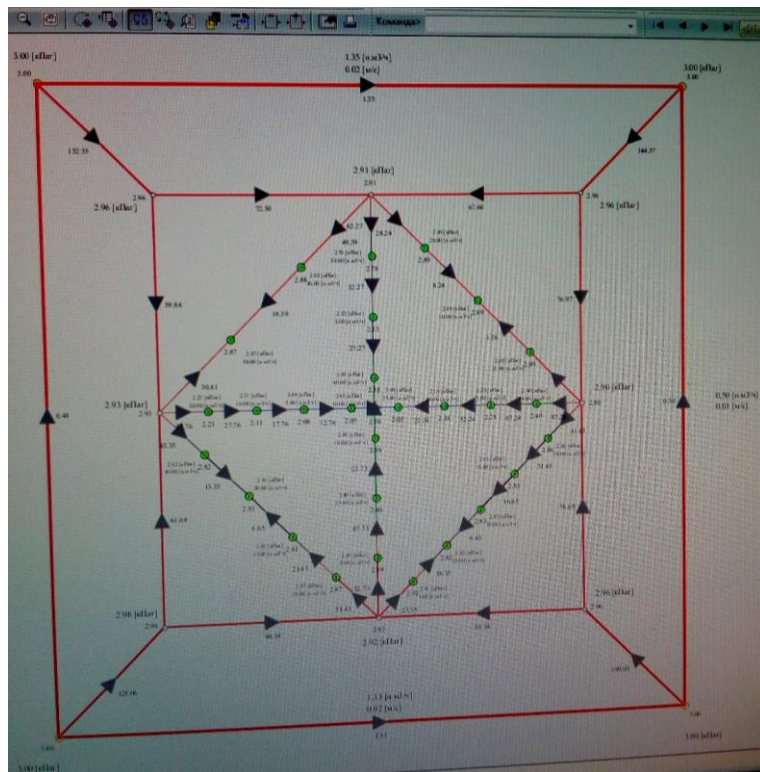


Рисунок 3.4 – Параметри мережі з високим рівнем розгалуження при моделюванні з використанням низькокалорійного газу

3.2 Математична модель даних про якість природного газу, як діагностичного інформативного параметру газопроводу

3.2.1 Експериментальне дослідження зміни якості газу в газопроводі низького тиску

В розділі 2 цієї роботи ми дослідили оцінку вищої теплоти згорання газу в не розгалужених мережах та вивели математичну модель її залежності в мережах, куди енергоресурс потрапляє з двох входів. Реалізація цих напрацювань для переходу розрахунків за природний газ з об'ємних до енергетичних одиниць потребуватиме створення мережі засобів оцінки якості газу в потоковому режимі. Місцями розміщення таких засобів стануть точки розгалуження мережі – ГРП та ГРС, звідки природний газу надходить безпосередньо до споживачів. Система таких засобів дасть можливість

отримати масив нових інформаційних параметрів роботи мережі, а саме – набори значень вищої теплоти згорання природного газу в потоковому режимі для реперних точок передачі енергоресурсу, де розміщені прилади експрес-контролю якості газу.

Тож в цьому розділі роботи нами поставлене завдання дослідити можливість використання цього набору якісних показників газу з метою додаткової діагностичної ознаки технічного стану газопроводів. Запропоновано використовувати цей набір якісних показників газу з метою додаткової діагностичної ознаки технічного стану газопроводів.

Діагностика вирішує питання визначення фактичного стану газопроводу та обладнання, що слугує для забезпечення його роботи, що в подальшому супроводжується ремонтом виявлених дефектів з ціллю забезпечення належного функціонування мережі мінімум на 5 років [79, 80]. Затримка діагностики з наступним виконанням ремонтних робіт підвищує ймовірність появи відмов та виникнення непередбачуваних аварійних ситуацій [81].

Технічний стан розподільчих газопроводів і споруд на них є основним показником, який характеризує безпечну і надійну їх експлуатацію, тому особливо важливим є визначення технічного стану розподільчих газопроводів, строк амортизації яких закінчився, і які включені в план капітального ремонту, а також тих, на яких були витоки газу, розриви зварних з'єднань, наскрізні корозійні пошкодження, а також тих, які експлуатуються з тривалою перервою роботи електрозахисних установок [82].

Технічний стан всіх газопроводів, що проходять землею (не включаючи підводні) слід оцінювати за такими основними характеристиками [82]:

- Сталеві газопроводи: герметичність газопроводів; стан металу труб і якість зварних з'єднань; стан захисного ізоляційного покриття; технічний стан надземних газопроводів; стан будівельних конструкцій (підпори, кріплення, компенсатори й т.ін.); стан пофарбування та стан

термоізоляції газопроводів зрідженого газу; корозійний стан; стан електрохімічного захисту.

- Поліетиленові газопроводи: стан ізолювального покриття сталевих вставок і з'єднань поліетиленових труб зі сталевими; герметичність газопроводів; механічні пошкодження труб і їх стикових з'єднань (проколи, зім'яття та ін.); розриви зварних стиків труб; тріщини (поперечні і повздовжні) в трубах; нещільність в роз'ємних з'єднаннях поліетиленових труб зі сталевими.

- При оцінці підземних газопроводів слід урахувати: геологічне розташування газопроводів (стан ґрунту, в якому знаходиться газопровід, глибина залягання), а також розташування газопроводів відносно інших інженерних мереж та споруд.

Одними з характеристик технічного стану, які впливають на якість природного газу є корозійні дефекти. Згідно [83], специфіка продуктів, що транспортуються газопроводом, дає можливість визначати наявність внутрішньої корозії труби. Відмітимо, що йдеться перш за все про внутрішню корозію трубопроводу, так як вона найбільшим чином впливає на якість енергоресурсу, що по ньому протікає. Зовнішні корозійні дефекти також впливатимуть на калорійність газу в трубопроводі. Такий вплив спричинить розвиток в матеріалі труби корозійно-втомного дефекту за умови виникнення тріщини, глибиною співрозмірною з товщиною трубопроводу.

Тобто спостерігається взаємозалежність між технічним станом газопроводу та якістю природного газу, що протікає по ньому. На рисунку 3.5 наведено розроблена схема зв'язку якісних характеристик природного газу з параметрами технічного стану газопроводу.

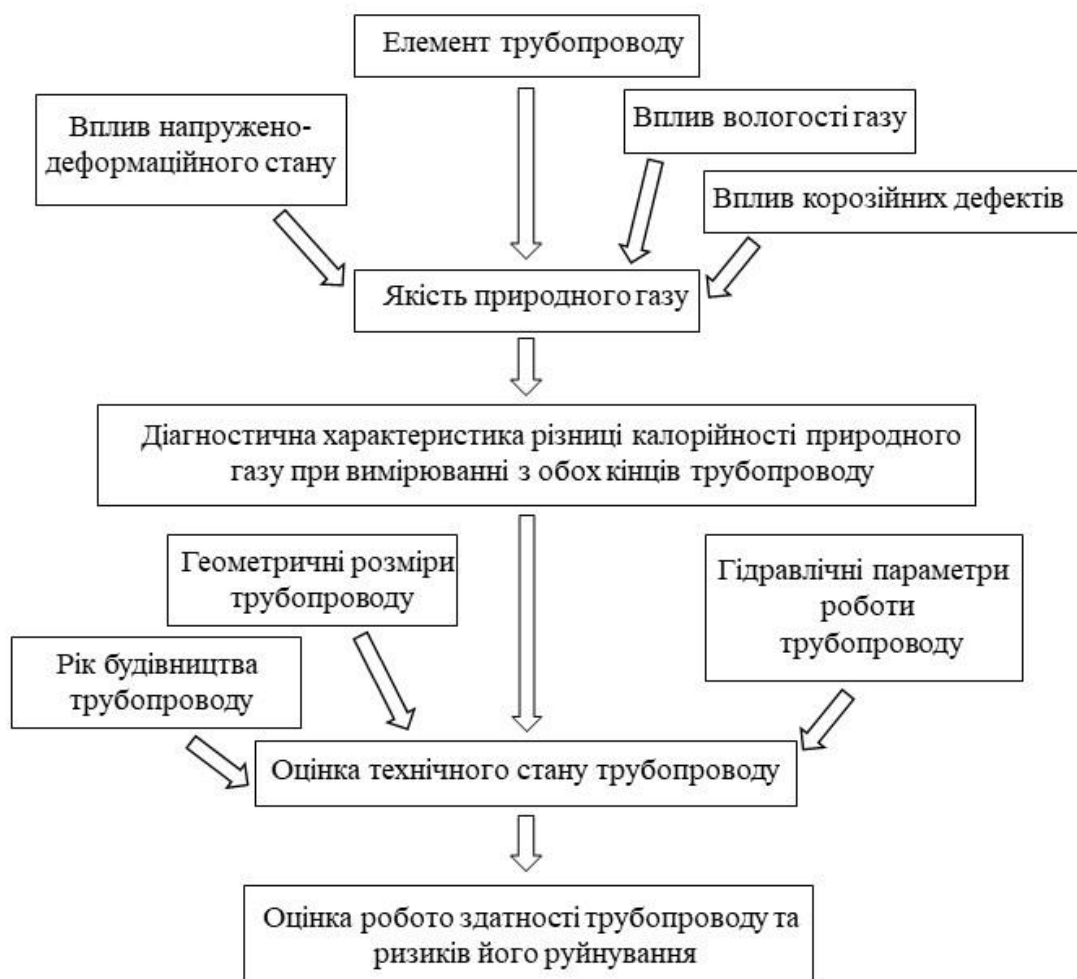


Рисунок 3.5 – Схема залежності якісних показників природного газу та технічного стану газопроводу

Проведено експериментальне дослідження, що доказує такий вплив. На газопроводі «Тустань – Ділієво» в Івано-Франківській області було здійснено промислові дослідження з визначенням зміни тиску та вимірювання теплоти згоряння в контрольних точках з використанням хроматографа стандартним методом. Загальна довжина вказаної ділянки складає 8320 м, діаметр газопроводу – 159 мм. На газопроводі на надземних переходах між ГРП №090300975 та ГРП №09030076 було встановлено три типових манометри. Схема проведення дослідження наведена на рисунку 3.6. Для кожної точки

заміру виміряні два показники – тиск в газопроводі та відібрано пробу для оцінки теплотворної здатності природного газу. Результати дослідження наведені в таблиці 3.3. На рисунку 3.7 наведений спосіб вимірювання на одній з точок мережі. В додатку Н наведені фото з дослідження інших ділянок мережі.

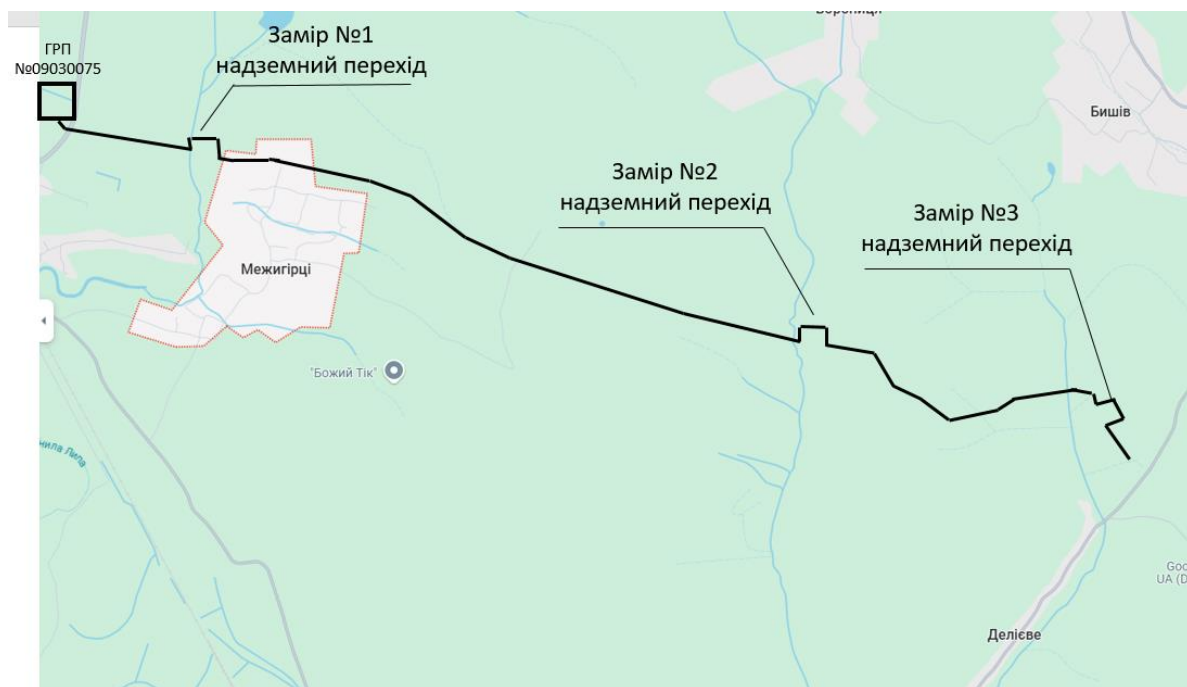


Рисунок 3.6 – Схема проведення дослідження на газопроводі



Рисунок 3.7 – Спосіб вимірювання параметрів мережі на точці замірів №3

Аналіз одержаних результатів показав, що тиск природного газу в газопроводі практично незмінний, а значення теплоти згорання, особливо в ділянці між замірами №2 і №3 значно (на 5%) відрізняються в сторону зниження енергетичних характеристик природного газу. При цьому зниження теплоти згорання газу на ділянці між точками заміру №1 та №2 знаходяться в межах похибки приладу (0,001%). Графічно результати дослідження подані на рисунку 3.8. Подальше дослідження ділянки газопроводу між манометрами №2 і №3, в тому числі шурфування, показали наявність корозійних пошкоджень в ньому, що і є причиною зниження теплоти згорання природного газу.

Таблиця 3.3 – Результати експериментальних досліджень

Номер точки заміру	Відстань трубопроводу, км	Пояснення розміщення трубопроводу	Тип газопроводу	Кількість замірів	Час заміру	Значення результату заміру тиску манометром (кількість поділок), од	Значення вищої теплоти згорання природного газу, ккал/м ³
№ 1	1.041	Трубопровід між ГРП №09030075 до точки заміру №1	Стальний D=159 мм	I замір	8:10	61	8915
					8:15		
				II замір	11:40	62	
					11:47		
				III замір	16:45	61	
					16:49		
№ 2	4.463	Трубопровід між точкою заміру №1 та №2	Стальний D=159 мм	I замір	7:04	61	8905
					7:11		
				II замір	13:04	62	
					13:09		
				III замір	15:57	61	
					16:02		
№ 3	2.695	Трубопровід між точкою заміру №2 та №3	Стальний D=159 мм	I замір	7:20	61	8460
					7:25		
				II замір	13:31	62	
					13:36		
				III замір	15:40	61	
					15:44		

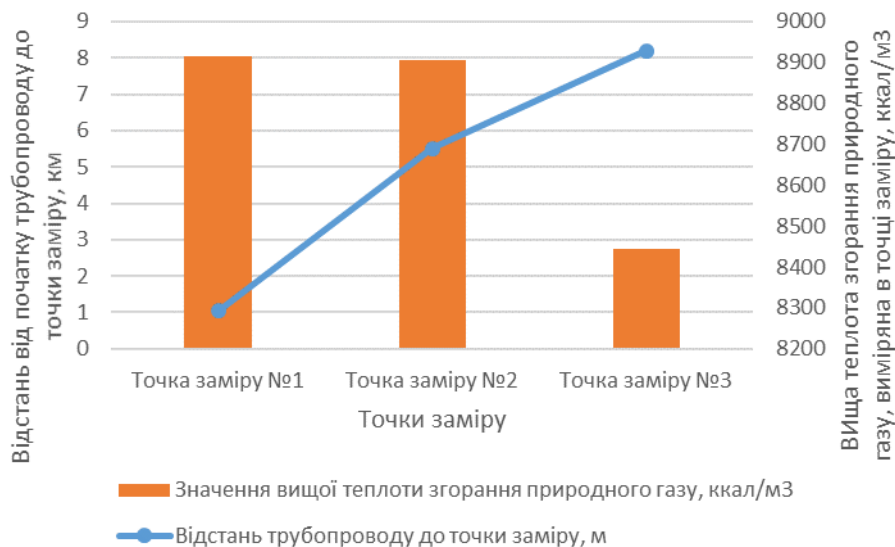


Рисунок 3.8 – Результати замірів вищої теплоти згорання природного газу в газопроводі низького тиску

Розглянемо фізичні механізми впливу корозії трубопроводів на теплотворну здатність природного газу. Вплив корозії на зміну теплотворної здатності природного газу обумовлений домішуванням у газопровід корозійних продуктів, що утворюються внаслідок хімічної та електрохімічної взаємодії металу трубопроводу зі середовищем його експлуатації [110]. Основні корозійні процеси пов'язані з наявністю кислих газів, таких як CO_2 та H_2S , які створюють агресивне середовище для вуглецевої сталі, що є основним матеріалом газопроводів (Abotaleb et al., 2022; Aisha et al., 2021).

Корозія, спричинена двоокисом вуглецю (CO_2)

Двоокис вуглецю завдяки своїй високій розчинності у воді утворює слабку вугільну кислоту, яка дисоціює на бікарбонатні аніони. Цей процес призводить до так званої «солодкої корозії» вуглецевої сталі, що є електрохімічною

реакцією анодного розчинення заліза та катодного виділення водню. Загальна реакція корозії описується так:



Утворення продуктів корозії, таких як FeCO_3 або Fe_3O_4 , може спричинити формування накипу, який, залежно від умов експлуатації (температура, тиск, рН), може бути захисним або незахисним [111].

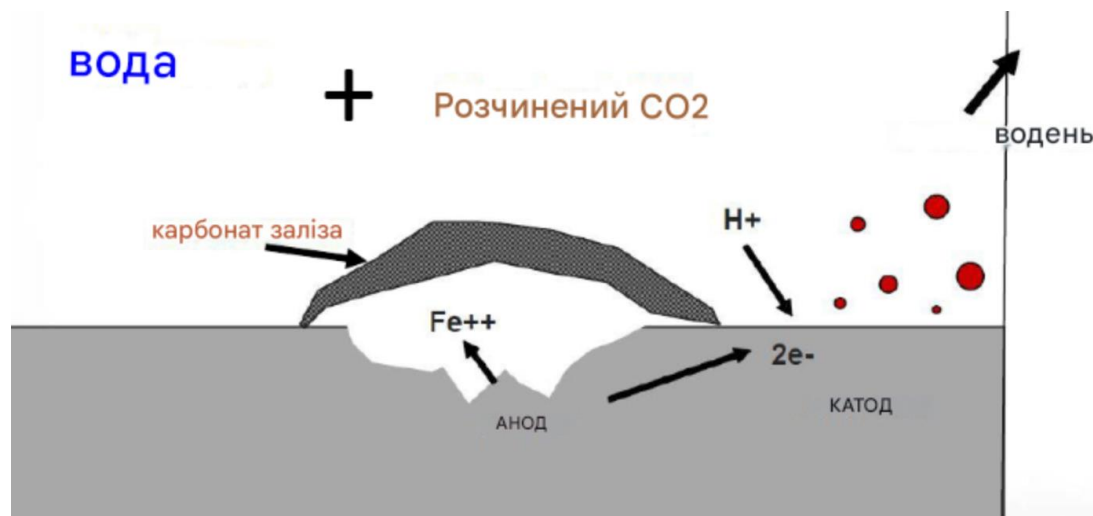
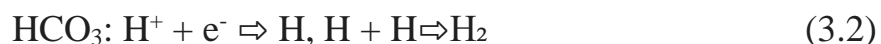


Рисунок 3.9 – Процес електрохімічної корозії металу труби [112]

Дослідження механізму і продуктів корозії CO_2 наведені в ряді наукових публікацій [113, 114; 115; 116; 117; 118; 119; 120, 121]. Реакції корозійних процесів подані в формулах (3.1 – 3.9) загалом показують, що CO_2 може бути розчинений у воді, де утворюється слабка кислота, яка може дисоціювати на бікарбонатні аніони.

Реакція корозії [122]:



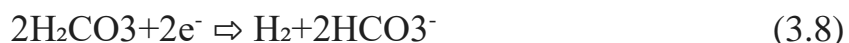
Реакція [123] для RDS (крок визначення швидкості):



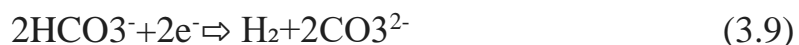
Реакція [124] для середовища $\text{pH} > 7$:



Реакція [125, 126] для середовища $\text{pH} < 4$:



Реакція [126] для середовища $\text{pH} > 5$:



Таким чином, механізм корозії CO_2 призводить до утворення продуктів, що можуть змінювати хімічний склад газового середовища та погіршувати його теплотворну здатність.

Корозія, спричинена сірководнем (H_2S)

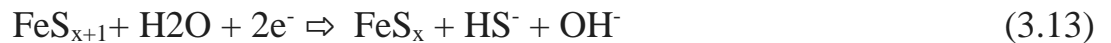
Сірководень дисоціює у водній фазі, утворюючи H^+ і HS^- , які значно прискорюють анодне розчинення заліза і призводять до катодного виділення водню. Загальна реакція корозії виглядає так [121, 127; 128].



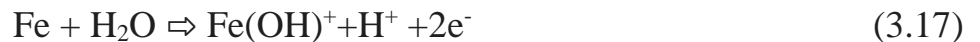
Утворені продукти корозії, зокрема різні модифікації сульфїду заліза (FeS , Fe_{1+x}S , FeS_2), залежать від параметрів середовища: температури, концентрації H_2S та рівня pH [129]. За температур нижче 90°C основним корозійним продуктом є макінавіт (Fe_{1+x}S), який часто спостерігається у газотранспортних системах [130–134]. Корозійні процеси включають наступні катодні реакції [135]:

Катодні реакції:





Реакції анодного розчинення заліза:



А сульфід заліза може утворюватися в результаті наступних реакцій:



Корозійні продукти, що утворюються в результаті взаємодії сірководню (H_2S) з металом трубопроводу, призводять до утворення сульфідів заліза (FeS), які можуть випадати у вигляді відкладень на внутрішніх стінках трубопроводу. Характер цих відкладень залежить від умов експлуатації, зокрема температури, тиску та рН середовища: у певних випадках вони можуть утворювати захисний шар, який сповільнює подальший корозійний процес, а в інших – бути нестабільними та руйнуватися, посилюючи деградацію трубопроводу.

Подальший розвиток корозії, спричинений наявністю CO_2 і H_2S , супроводжується утворенням водню у газоподібному стані, що домішується до природного газу та призводить до зниження його теплотворної здатності. Додатково, через хімічну взаємодію CO_2 з водою утворюється слабка вугільна кислота, що спричиняє анодне розчинення заліза, а подальше зменшення концентрації CO_2 у газовій фазі впливає на його мольну частку. Враховуючи [64–66], мольна частка CO_2 є важливим параметром у математичній моделі методу експрес-контролю якості газу, оскільки її зниження прямо впливає на

теплотворну здатність газової суміші. Таким чином, накопичення корозійних продуктів і зміна хімічного складу газу, спричинені корозійними процесами, погіршують якість транспортування газу і його енергетичні характеристики.

Окрім газів, що утворюються під час корозійних процесів, потенціальний вплив на зниження рівня теплотворної здатності газу в газопроводі низького тиску може становити волога, що потрапила в газопровід через корозійні отвори, за умов наявності ефекту інжекції. Проте цей процес ще не досліджений, тому в подальших наукових працях автором буде змодельовано і перевірено вплив цього процесу.

3.2.2 Розробка індикаторного параметру для оцінки технічного стану газопроводу низького тиску за зміною параметрів якості енергоносія

Наведені в попередньому підрозділі експериментальні дослідження підтвердили існування кореляційного зв'язку між технічним станом газопроводу та зміною енергетичних характеристик природного газу, що по ньому транспортується. Зокрема, встановлено, що за умови постачання ресурсу з одного джерела, суттєве зниження вищої теплоти згорання природного газу на певній ділянці може слугувати індикатором погіршення технічного стану газопроводу. Виявлена залежність зумовлює можливість розроблення методології оцінювання стану розподільчих мереж низького тиску шляхом моніторингу якісних параметрів газу, що може доповнити усталені діагностичні підходи.

Запропонований підхід передбачає використання інформаційно-вимірювальної системи визначення якості природного газу на окремих ділянках газопроводу низького тиску, довжина яких не перевищує 2,7 км. Доцільність обмеження довжини пояснюється тим, що саме на інтервалі до 2,7 км

зафіксовано інформаційно значущий вплив технічного стану трубопроводу на енергетичну цінність газу, виражену у величині вищої теплоти згорання.

З метою побудови математичної моделі залежності між технічним станом газопроводу та енергетичними характеристиками природного газу, було здійснено поетапну процедуру обчислення зниження якісних показників. За результатами базових промислових вимірювань (див. табл. 1 у попередньому підрозділі) виявлено, що на ділянці трубопроводу довжиною 2,695 км спостерігається зниження вищої теплоти згорання природного газу на 5% відносно її початкового значення. Задля поглибленого аналізу та формалізації процесу було прийнято розглядати зміну теплоти згорання як лінійну функцію довжини трубопроводу. Такий підхід дозволив моделювати спад якісних параметрів на основі арифметичної прогресії.

Сутність моделі полягає у поділі досліджуваного відрізка завдовжки 2,695 км на 100 рівних частин. Прийнято, що на кожному з цих відрізків спостерігається рівномірне покрокове зниження відсоткового показника теплоти згорання. Відсотковий рівень теплоти на початковому відрізку позначено як a_1 , а на n -му відрізку як a_n . Оскільки на початку розглянутої ділянки теплота згорання має еталонне значення, його прийнято за 100%. Для кінцевої точки досліджуваної ділянки визначено зниження до 95%. Таким чином, застосування формули арифметичної прогресії дозволяє знайти величину постійного різницевого кроку d , що відповідає зменшенню відсоткового показника теплоти згорання на кожному послідовному відрізку довжини:

$$a_n = a_1 + (n - 1) \cdot d, \quad (3.1)$$

де a_n – значення відсотка вищої теплоти згорання газу на n -му відрізку, рівне 100 %; n – порядковий номер відрізка; d – різницевий крок, %. Враховуючи, що при $n = 100$ отримаємо значення $a_n = 95\%$, маємо:

$$95 = 100 + (100 - 1) \cdot d .$$

Звідси:

$$d = \frac{95 - 100}{99} = -0,05051\% .$$

Відповідно, рівномірний спад величини вищої теплоти згорання по довжині газопроводу дозволяє з високою точністю наблизити емпіричні дані до лінійної залежності. Розраховані значення відсоткової зміни теплоти згорання газу для кожного зі 100 відрізків трубопроводу та їх відповідна просторово-протяжна прив'язка (відстань від початку трубопроводу до кінця відрізка) наведені в додатку Д. Аналіз цієї таблиці демонструє чітку лінійну тенденцію зменшення теплоти згорання по мірі зростання відстані вздовж трубопроводу.

Наступним кроком стало отримання аналітичної залежності, яка описує критичне значення зниження теплоти згорання природного газу в залежності від довжини трубопроводу. Шляхом апроксимації отриманої вибірки методом найменших квадратів встановлено, що для розглянутого діапазону довжин (до 2,7 км) зміна теплоти згорання добре описується лінійною моделлю:

$$dH_{\text{крит}} = 100,05 + 1,8742 \cdot l \quad (3.2)$$

де $dH_{\text{крит}}$ – критичний відсоток зниження теплоти згорання природного газу, при якому слід здійснити додатковий технічний аудит стану газопроводу, %; l – довжина газопроводу, км ($0 \leq l \leq 2,7 \text{ км}$).

В межах даної моделі при збільшенні довжини l від 0 до 2,7 км відсоток зниження теплоти змінюється з 100% до значень, що відповідають виявленому 5-відсотковому зменшенню. За умови фіксації на практиці зниження теплоти більшого, ніж визначене розрахунковим критичним значенням, є підстави припускати наявність технічних пошкоджень (наприклад, корозії) в матеріалі трубопроводу.

Таким чином, запропонований метод оцінки технічного стану газопроводу низького тиску за зміною параметрів якості енергоносія передбачає послідовний алгоритм дій:

1. Для обраних ділянок газопроводу, довжина яких не перевищує 2,7 км, визначаються значення вищої теплоти згорання природного газу на початку та в кінці відрізка за допомогою потокових вимірювальних засобів.
2. На підставі отриманих вимірів обчислюється фактичний відсоток зниження теплоти за формулою:

$$dH = \frac{H_{\text{поч}} - H_{\text{кін}}}{H_{\text{поч}}} \cdot 100\% , \quad (3.3)$$

де $H_{\text{поч}}$ – значення теплоти згорання на початковій точці газопроводу, ккал/м³; $H_{\text{кін}}$ – аналогічне значення на кінцевій точці, ккал/м³.

3. Визначення критичного значення $dH_{\text{крит}}$ за формулою 3.2.
4. Здійснити порівняння dH з $dH_{\text{крит}}$. Це дозволяє зробити попередній висновок щодо технічного стану трубопроводу:
 - якщо зафіксоване зниження теплоти не перевищує критичного, технічний стан вважається задовільним;

- якщо ж відсоток зниження є вищим за критичний, це свідчить про необхідність проведення додаткових заходів технічного діагностування, таких як шурфування, внутрішньо трубна діагностика чи інші регламентні роботи, спрямовані на виявлення корозійних пошкоджень або структурних дефектів у матеріалі труби.

Отже, сформована методологія, яка базується на визначенні критичного значення зміни вищої теплоти згорання природного газу у газорозподільних мережах низького тиску до 2,7 км, є науковим підґрунтям для подальшого розвитку методів оцінки технічного стану газопроводу за параметрами інформаційно-вимірювальних систем оцінки якості природного газу. Даний метод можна поширити на інші відстані газопроводу при відповідних дослідженнях.

Впровадження методу забезпечить більш оперативне оцінювання технічного стану газових мереж, сприятиме підвищенню безпеки та надійності їхньої експлуатації, а також створить передумови для більш економічно ефективного управління процесами технічного обслуговування та ремонту. Результати проведеного дослідження, що наведені в цьому підрозділі опубліковані в науковій роботі [84].

Висновки до розділу 3

1. Проведені дослідження показали, що зниження теплотворної здатності природного газу на 4,5% призводить до суттєвих змін в експлуатаційних параметрах газотранспортних мереж. Зокрема, підвищення обсягу споживання газу через його знижену калорійність не впливає на вартість послуг, проте забезпечує додатковий прибуток операторам мережі внаслідок збільшення обсягів реалізованого ресурсу. При цьому відбувається зменшення запасів газу у сховищах, що створює ризик для стабільності газопостачання. Слід

зауважити, що модель не враховує додаткових експлуатаційних витрат, які виникають через вплив низькоякісного газу на стан обладнання, зокрема корозію трубопроводів.

2. У ході дослідження гідравлічних особливостей газових мереж низького тиску було встановлено, що теплотворна здатність газу по-різному впливає на параметри транспортування залежно від рівня розгалуженості мережі. У випадку мереж з низьким рівнем розгалуженості перепади тиску практично не залежать від якості газу, що пояснюється стабільними умовами транспортування і незначними змінами густини. Проте в мережах із високим рівнем розгалуженості підвищення густини газу через його вищу калорійність спричиняє значне падіння тиску у кінцевих точках мережі. Це зумовлено зростанням гідравлічного опору трубопроводів, що підтверджено результатами моделювання.

3. У ході експериментального дослідження для мережі низького тиску до 2,7 км було виявлено залежність прогнозування утворення корозійних пошкоджень в трубопроводі від зміни теплотворної здатності природного газу по довжині цього трубопроводу. Проведене експериментальне дослідження на ділянці газопроводу «Тустань – Ділієво» показало зниження теплоти згоряння газу на 5% у зоні корозійних пошкоджень. Фізичне пояснення цього процесу полягає у хімічній та електрохімічній взаємодії металу трубопроводу з агресивним середовищем, зокрема вуглекислим газом і сірководнем, внаслідок чого утворюються продукти корозії, такі як водень та інші сполуки, що домішуються до газового середовища та змінюють його хімічний склад, знижуючи теплотворну здатність природного газу. Виявлена кореляція дозволяє використовувати зміну теплоти згоряння як додаткову діагностичну ознаку технічного стану газопроводу. Запропоновано метод оцінки технічного стану газопроводу низького тиску, довжиною до 2.7 км за зміною якісного параметру газу, як додаткову діагностичну ознаку.

РОЗДІЛ 4

МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЦІННОСТІ ГАЗОВИХ СУМІШЕЙ З ВМІСТОМ БІОМЕТАНУ

4.1. Визначення впливу компонентів біогазу на енергетичну цінність енергоресурсу

Біогаз зазвичай складається з 45–75% метану (CH_4), решту становить CO_2 у межах 20–55%, а також невеликі кількості інших газів: азоту до 2% (N_2), кисню до 2% (O_2), водню до 4 % (H_2), 0,005-2% сірководню (H_2S), 5-10% води, та інших домішок [85 - 88].

Для того щоб біогаз міг горіти, вміст метану в ньому повинен перевищувати 45%, [85, 86]. Основна цінність біогазу визначається саме вмістом метану, адже він забезпечує високий рівень тепловиділення при згорянні (приблизно 35-40 МДж/м³ [89]) . Суміш 60% метану і 40% вуглекислого газу здатна підтримувати постійне полум'я з калорійністю приблизно 5340 ккал/м³ при 15 °С. , порівняно з 9000 ккал/м³ для чистого CH_4 [90]. Збільшення концентрації метану призводить до лінійного зростання теплотворної здатності та зниження густини газової суміші.

Процес очищення біогазу, що включає видалення CO_2 , H_2S та інших домішок, може підвищити його теплотворну здатність до рівня, близького до природного газу, що робить біометан конкурентоспроможним джерелом енергії [91]. Зокрема, CO_2 має високу теплоємність та спричиняє зниження температури полум'я, що негативно впливає на ефективність згорання.

Процес очищення також здійснюють через вплив домішок біогазу на навколишнє середовище, обладнання та споживчі характеристики біометану їх видаляють в процесі очищення газу. Спостерігають такий вплив домішок [92]:

- Вода (H_2O): Може спричиняти корозійні процеси, утворюючи кислотні сполуки. У разі замерзання або конденсації за низьких

температур вода здатна пошкоджувати обладнання, що підвищує ризик його відмови.

- Сірководень (H_2S): Надзвичайно токсичний газ, який при спалюванні утворює ще більш шкідливі речовини. H_2S викликає корозію металевих поверхонь, детонацію в двигунах внутрішнього згорання та отруєння каталізаторів та адсорбентів, які використовуються на наступних етапах обробки газу.

- Силоксани: При згоранні перетворюються на оксид кремнію та мікрокристалічний кварц, які осідають на елементах двигунів, таких як клапани чи свічки запалювання. Це спричиняє абразивний знос та значно скорочує термін служби обладнання.

- Аміак (NH_3): Токсичний газ, що утворює шкідливі сполуки під час згорання, провокуючи корозію обладнання.

- Кисень (O_2): За певних концентрацій може спричинити неконтрольоване займання, що становить ризик для безпечної експлуатації систем.

- Леткі органічні сполуки (ЛОС): Ці канцерогенні й токсичні речовини здатні утворювати діоксини та фурани, які викликають корозійне пошкодження двигунів внутрішнього згорання, а також руйнують гумові та пластикові компоненти.

Енергетичний вміст сирого біогазу коливається від 5 до 7 кВт/год/нм³ біогазу залежно від складу. В середньому 6 кВт/год/нм³ (тобто припускається, що 60% його вмісту метан). Для чистого біометану вміст енергії становить приблизно 10 кВт*год/м³ (рисунок 4.1) [93, 94].

Ефективність біогазових установок значною мірою залежить від вибору сировини, технологій, обладнання та оптимального управління технологічними процесами. Особливо важливим є розуміння того, як властивості сировини

впливають на кінцеві продукти та економічну доцільність проекту. Тому дослідимо особливості біогазу з різних джерел.

Таблиця 4.1 – Енерговміст біогазу та біометану [93, 94].

Вид енергоресурсу	Одиниці	кВт/год	МДж
Біогаз (середній)	1 м ³	6	21,6
Біометан	1 м ³	9,97	35,9
Біометан	1 кг	13,9	50

4.2 Дослідження характеристик біогазу з різних джерел

Біометан можна виробляти як біологічними, так і термохімічними процесами [50]:

- Біологічні процеси засновані на модернізації біогазу, який утворюється в результаті анаеробного зброджування потоків міських відходів, технологічних залишків, потоків сільськогосподарських відходів і енергетичних культур, таких як різні види трав, а також звалищного газу шляхом видалення вуглекислого газу та інших забруднюючих речовин з біогазу.

- У термохімічних процесах біометан виробляється шляхом каталітичної обробки синтез-газу після процесів газифікації біомаси.

Дослідимо детальніше фізико-хімічні властивості біогазу, синтезованого з різних видів сировини.

Сільськогосподарські відходи, зокрема гній та послід, є традиційним та найбільш розповсюдженим джерелом для біогазових установок. Вони характеризуються відносно низьким біогазовим потенціалом—20–50 м³ біогазу на тонну сировини—але забезпечують стабільність процесу завдяки збалансованому вмісту макро- та мікроелементів. Висока вологість цих відходів

(до 90%) потребує особливого підходу до управління гідравлічним часом утримання та органічним навантаженням у реакторі. Важливо враховувати можливу наявність інгібіторів, таких як залишки антибіотиків, що можуть негативно впливати на метаногенну активність мікроорганізмів.

Енергетичні культури, такі як кукурудзяний силос, сорго та міскантус, мають високий біогазовий потенціал—до 200 м³ на тонну сухої речовини—завдяки високому вмісту вуглеводів, особливо крохмалю та цукрів. Це сприяє швидкому розвитку ацидогенних та метаногенних бактерій, підвищуючи швидкість та ефективність процесу анаеробного бродіння. Проте використання енергетичних культур може викликати питання конкуренції за сільськогосподарські землі та впливу на продовольчу безпеку, що потребує додаткового економічного та екологічного обґрунтування.

Промислові відходи, зокрема барда та пивна дробина, є перспективними субстратами для біогазового виробництва завдяки високому вмісту розчинних органічних речовин. Барда, як побічний продукт спиртового виробництва, містить етанол, вищі спирти та органічні кислоти, що забезпечує високий біогазовий потенціал—100–150 м³ на тонну. Однак висока кислотність та можливе накопичення інгібіторів вимагають ретельного контролю параметрів процесу та, можливо, попередньої обробки сировини для нейтралізації негативних ефектів.

Органічна фракція твердих побутових відходів (ОФ ТПВ) представляє собою складну суміш органічних матеріалів, включаючи харчові відходи, папір, картон та зелені відходи. В результаті мікробного розкладання вологої органічної речовини за відсутності кисню, сміттєзвалища можуть мати потенціал у виробництві біогазу.

Біогазовий потенціал ОФ ТПВ може досягати 100 м³ на тонну після проведення попереднього сортування та підготовки. Біогаз можна виробляти з більшості біомаси та відходів, незалежно від їх складу та в широкому діапазоні

вмісту вологи (хоча матеріал із дуже високим вмістом вологи менше 5% сухої речовини зменшує вихід біогазу) з обмеженою підготовкою сировини. Проте його виробництво залежить від морфологічного складу ТПВ, так як наявність небажаних домішок, таких як пластик, метали та скло, може ускладнювати процес та вимагати впровадження складних технологічних рішень для їх видалення. Деревна біомаса теж не підходить для анаеробного виробництва біогазу через високий вміст лігніну [94].

Відсотковий склад складових ТПВ є мінливим як у часі, так і в географічному відношенні. Тому в рамках нашого експериментального дослідження [95], нами визначено морфологічний склад ТПВ на сміттєвому полігоні в с. Рибне та розраховано енергетичний потенціал від спалювання ТПВ на цьому полігоні.

З полігону відібрано 5 проб по 10 кг кожна. Далі, проведено сортування за морфологічним складом твердих побутових відходів. На рисунку 4.2 наведено відсоток твердих відходів, придатних для утилізації енергії та виробництва біогазу, у загальній масі відходів. Відсоток твердих побутових відходів, придатних для енергоутилізації, від загальної маси твердих побутових відходів, що надходять на полігони, і склав 67,61%. Ці компоненти ТПВ включають: папір (картон), відходи гуми та шкіри, пластик, деревину, біовідходи та несортовані залишки, придатні для спалювання. Близько 32,4% ТПВ є непридатними для виробництва енергії – це несортовані (негорючі) відходи, скло, метал.

Згідно [96 - 98], середнє значення утворення ТПВ в Івано-Франківській обл. становить 207829,1 т/рік. Враховуючи отримані нами результати морфологічного складу, орієнтовна величина ТПВ, що придатні для енергетичного утилізації шляхом спалювання та виробництва біогазу в Івано-Франківській області становить 140513,2 т/рік. рік.

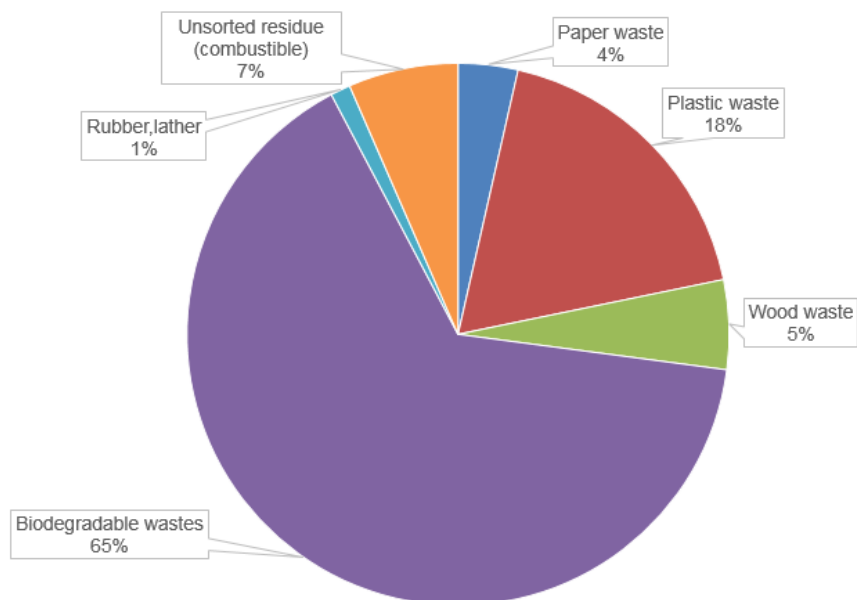


Рисунок 4.1 – Досліджений морфологічний склад ТПВ полігону в с. Рибне

Далі проведено експериментальне визначення тепла, що виділяється при спалюванні ТПВ, придатного для утилізації енергії за допомогою калориметра ІКА СІ. Отримані значення теплотворної здатності наведені в таблиці 4.2.

Потенціал відновлення енергії території чи регіону визначається як добуток кількості ТПВ, вироблених у зазначеному регіоні протягом року, на величину нижчої теплотворної здатності вказаних ТПВ. Значення найменшої теплотворної здатності дослідних зразків ТПВ отримують з використанням експериментально визначених значень їх теплотворної здатності (вищої теплотворної здатності) за формулою перерахунку [99, 100]:

$$q_{p,net,m} = (q_{v,gr,d} - 206 \cdot W_{H,d}) \cdot (1 - 0,01 \cdot M_T), \quad (4.1)$$

де, $q_{p,net,m}$ нижня теплотворна здатність, Дж/г; $q_{v,gr,d}$ теплотворна здатність (вища теплотворна здатність), Дж/г; $W_{H,d}$ - вміст водню в ТПВ, %; M_T - вологість ТПВ, %.

Волога, яка потрапляє в топку, не горить і не дає тепла. Але, в процесі при високотемпературному спалюванні твердих відходів в топці виділяється водень, який необхідно додавати до основного компонента водню, який вже присутній у компонентах ТПВ, як один із хімічних елементів, хімічні реакції під час горіння яких призводять до утворення термо-енергії. Тому необхідно провести розрахунки загальної кількості водню (у відсотках), який є в ТПВ, теплотворна здатність яких досліджується. З цією метою на основі даних про вміст «горючих» хімічних елементів — вуглецю, водню, кисню, сірки — у різних компонентах ТПВ, проведено розрахунки кількості цих хімічних елементів у грамах ТПВ. Однак ці розрахунки включають масу водню, що міститься в так званій «сухій» частині

Для визначення маси водню, що виділяється з води при спалюванні ТПВ певної вологості, застосовано формулу [101]:

$$m_H = m_{H,DM} + \frac{2}{18} \cdot (m_{WM,MSW} - m_{DM,MSW}), \quad (4.2)$$

де m_H – маса елемента водню в ТПВ, г; $m_{H,DM}$ – маса водню, що міститься в так званій «сухій» частині ТПВ, г; $m_{WM,MSW}$ – маса вологих ТПВ, г; $m_{DM,MSW}$ – маса сухих ТПВ, г.

Значення вологості для кожного компонента ТПВ та розрахункові значення вологості для ТПВ для кожної з дослідних проб визначаються експериментально під час фізико-хімічного аналізу ТПВ.

У таблиці 4.2 наведено результати розрахунку значень вмісту водню в кожній із проб ТПВ.

За формулою (4.1) були розраховані значення нижньої теплотворної здатності дослідних зразків ТПВ, наведені в табл. 4.2. Ці значення дозволили розрахувати середнє значення нижньої теплоти згорання ТПВ, отримане за

результатами дослідження дослідження теплотворної здатності п'яти проб ТПВ в Івано-Франківській області.

Таблиця 4.2 - Теплотворна здатність і нижча теплотворна здатність

Sample no.	Calorific value, qV,gr,d, [J/g]	Total moisture, MT [%]	Hydrogen content of the sampel, WH,d, [%]	Net Calorific Value (NCV), qp,net,m, [J/g] or [kJ/kg]
Sample 1 Ua	24333	55.24	21.45	7640.1
Sample 2 Ua	24772	54.65	21.13	8000.5
Sample 3 Ua	26195	48.98	18.41	10302.2
Sample 4 Ua	25942	54.35	20.97	8617.9
Sample 5 Ua	24624	55.20	21.43	7782.3
Average				8468.6

Потенціал відновлення енергії території чи району Івано-Франківської області визначався як добуток кількості твердих побутових відходів, утворених у вказаному регіоні протягом 2018 року, на середнє значення нижньої теплотворної здатності зазначених ТПВ, зазначених у таблиці 4.3. Результати розрахунків потенціалу відновлення енергії для Івано-Франківської області наведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 - Потенціал відновлення енергії ТПВ на рік та Енергетичний потенціал електроенергії та теплової енергії на рік в Івано-Франківській області

Mass of waste per year suitable for energy recovery by incineration	Mass of waste per year suitable for energy recovery by incineration - Without Ash	Energy recovery potential of MSW per year		Energy potential of electricity and thermal energy per year
kg	kg	[MJ/year]	[kWh/year]	80%, [kWh/year]
140513200	134976980	1143062.8	317 518	254014.4

Стічні води та осади очисних споруд також є значущим джерелом для біогазового виробництва. Осади первинного та вторинного очищення містять високу концентрацію органічних речовин, придатних для анаеробного бродіння. Використання високоефективних реакторів типу UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) дозволяє ефективно переробляти стічні води з низькою концентрацією сухих речовин. Однак потенційна наявність токсичних речовин та важких металів вимагає постійного моніторингу та контролю процесу для запобігання інгібуванню метаногенних бактерій.

Нетрадиційні джерела, такі як мікро- та макроводорості, а також сапропелі, є перспективними завдяки високому вмісту ліпідів та білків, а також швидкому росту. Водорості можуть вирощуватися на непридатних для сільського господарства землях або у водоймах, використовуючи поживні речовини з відходів, що знижує конкуренцію з продовольчими культурами. Проте технологічні виклики, пов'язані з культивуванням, збором та переробкою водоростей, а також високі капітальні витрати, наразі обмежують їх широке впровадження.

4.3 Коригування математичної моделі оцінки якості транспортованого газу в розгалужених мережах з врахуванням наявності закаченого біометану

4.3.1 Уточнення вимог до якості біогазу для закачування в газопровід

На Європейській карті біометану [102] позначено 1548 біометанових установок Європи, в тому числі і на території України. Понад 80% зареєстрованих біометанових установок підключено до газової мережі, причому майже половина з них (49%) підключена до розподільної мережі, а 14% — до транспортної мережі.

Біометан майже еквівалентний природному газу, тому його можна використовувати для транспортного сектору та для прямого закачування в

газові мережі [52]. Як згадувалося в розділі 1, сирий біогаз можна модернізувати до біометану шляхом відділення CO_2 та інших домішок.

Склад біогазу строго залежить від сировини, з якої він виробляється. Проте для інтеграції виробленого біометану на території України в газотранспортні мережі необхідно забезпечити відповідність його параметрів вимогам, визначеним у нормативних документах, зокрема в Кодексі газотранспортної системи та Кодексі газорозподільних мереж. Типовий склад біогазу, отриманий з різних джерел та вимоги до біометану в порівнянні з природним газом в підсумковій таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 - Вимоги до складу біогазу та біометану, отримані з різних джерел [103-106, 24, 23, 92].

Компоненти	Типовий склад				Вимоги до складу газу			
	Відходи сіл./госп.	Звалища	Промислові відходи	Стічні води	Стандарт «Біогаз» ЕАВ (ЕС)	Кодекс ГТС (Україна) [24*]	Кодекс ГРМ (Україна) [25*]	ТУ приєднання до ГРМ виробників біометану [19*]
CH_4 , % об.	50-80	35-80	50-70	60-70	50-75	> 90	> 90	> 95
CO_2 , % об.	19-50	15-50	30-50	19-40	24-45	< 2	< 2	< 2,5
H_2O , % об.	≤ 6	1-5	1-5	1-5	1-2	-	-	-
N_2 , % об.	0-1	0-3	0-3	0-1	1-5	< 5	< 5	< 5
O_2 , % об.	0-1	0-1	0-5	< 0,5	сліди	< 0,2	< 1	< 1
H_2 , % об.	0-2	0-5	0-3	0	0-3	-	-	< 0,5
H_2S	2160 – 10000 ppm	0,1 % об.	0,8 % об.	0-4000 ppm	0,1-0,5	< 6 мг/м ³	< 6 мг/м ³	< 5 мг/м ³
NH_3	50-144 ppm	5 % об.	-	100	-	-	-	< 10 мг/м ³
CO , % об.	0-1	0-1	0-1	-	0-0,3	-	-	-
Заг. СІ, мг/м ³	-	5	-	100	-	-	-	< 1,5 мг/м ³ (F, CI)
Силоксани, %	сліди	сліди	сліди	-	-	-	-	< 1

Якщо склад сирого біогазу оновлюється до рівня вище ~95%, його можна безпосередньо впорскувати в газову мережу. Отже, перед подачею необхідно:

- знизити вміст CO_2 до $\leq 2\%$
- підвищити концентрацію метану до $\geq 95\%$.
- крім того, перевірити виконання вимог, вказаних в таблиці 4.3

по інших домішках

Це виконується через такі основні технології збагачення біогазу [92]:

1. Адсорбція з переміною тиску (PSA). Базується на адсорбції CO_2 на твердих адсорбентах під високим тиском (4–10 атм) та десорбції при зниженні тиску. Переваги: відсутність потреби в тепловій енергії, компактність. Недоліки: високе споживання електроенергії, складність регенерації адсорбентів.

2. Водний скруббер. Використовує високу розчинність CO_2 у воді. Біогаз пропускається через воду під тиском, де CO_2 розчиняється. Переваги: простота, відсутність хімічних реагентів. Недоліки: високе споживання води, необхідність регенерації насиченої води.

3. Фізична абсорбція органічними розчинниками. Застосовуються органічні розчинники (наприклад, Selexol), що мають високу розчинність CO_2 . Процес подібний до водного скруббера, але з меншим споживанням розчинника. Переваги: ефективність, можливість роботи при нижчих тисках. Недоліки: вартість розчинників, необхідність їх регенерації з використанням тепла.

4. Хімічна абсорбція (аміновий скруббер). CO_2 хімічно зв'язується з розчином амінів. Регенерація відбувається при нагріванні до 120–150°C. Переваги: високий ступінь очистки, можливість досягнення високої чистоти біометану. Недоліки: високе споживання теплової енергії, корозійність обладнання.

5. Мембранна сепарація. Базується на різниці швидкостей проникнення газів через мембрану. CO_2 та інші небажані гази проходять через мембрану швидше за метан. Переваги: компактність, модульність, відсутність хімічних реагентів. Недоліки: вартість мембран, можливе їх старіння.

6. Кріогенна сепарація. Охолодження біогазу до температур, при яких CO_2 конденсується або твердіє, а метан залишається в газовій фазі. Переваги: можливість отримання зрідженого біометану (Bio-LNG) та CO_2 . Недоліки: високе енергоспоживання, складність обладнання.

Кінцевий продукт для газових мереж біометан, зазвичай містить 95-99% метану та 1-5% двоокису вуглецю і значно низький рівень H_2S [107].

Природний газ може бути замінений кінцевим отриманим біометаном і стати прямою альтернативою, коли $\text{CH}_4 > 96\%$, що є таким же відсотком, як природний газ [108]. Однак цей стандарт рівня метану відрізняється від однієї країни до іншої в Європейському Союзі, оскільки технічно це обов'язкова вимога для деяких країн. Для ілюстрації, якщо вміст метану в біогазі перевищує 85%, його можна закачувати в мережу природного газу в Нідерландах, тоді як у Швейцарії та Швеції цей відсоток має досягати 96% і 97% відповідно [108]. Його можна стиснути для використання як стиснений відновлюваний природний газ (СПГ) або скрапити для використання як зріджений відновлюваний природний газ (СПГ) [109].

4.3.2 Адаптація моделі до змінених умов в газопроводі

Зважаючи на описану вище актуальність впровадження біометану в газотранспортні та газорозподільні мережі України, а також на цілі ЄС щодо декарбонізації енергетичного сектору, виникає необхідність адаптації розробленої у розділі 2 математичної моделі оцінки якості природного газу з врахуванням особливостей біометану. Біометан, як екологічно чистий заміник природного газу, володіє низкою фізико-хімічних характеристик, які вимагають коригування початкових припущень та параметрів моделі.

Математична модель, представлена у розділі 2, ґрунтувалася на припущенні стабільного компонентного складу природного газу, основними складовими якого є метан, азот і вуглекислий газ. Для інтеграції біометану в цю модель враховано, що після процесу збагачення біогазу його склад є максимально наближеним до природного газу за основними компонентами. Однак, однією з характерних особливостей біометану є підвищений вміст кисню, що виникає через технологічні аспекти його виробництва. Зокрема, залишкове повітря може потрапляти у біогаз під час анаеробного зброджування органічних

відходів, а частина кисню залишається навіть після етапів очищення, через техніко-економічні обмеження процесу.

У 2022 році НКРЕКП внесла зміни до Кодексів газотранспортної та газорозподільної систем, які спрямовані на стимулювання розвитку ринку біометану. Зокрема, було збільшено допустимі норми молярної частки кисню: до 0,2% для газотранспортної системи і до 1,0% для газорозподільних мереж. Такі нормативи враховують специфіку біометану, його фізико-хімічні властивості та створюють технічні передумови для інтеграції цього ресурсу в існуючі мережі. Це рішення є технічно обґрунтованим, оскільки концентрації кисню, навіть у нових межах, не викликають корозійних чи інших небезпечних процесів у трубопроводах. Зміна нормативів забезпечує баланс між технічною безпекою, економічною доцільністю та екологічними цілями.

Зміна припущень математичної моделі передбачає врахування молярної частки кисню як окремої змінної. Підвищення вмісту кисню впливає на енергетичну цінність газової суміші, оскільки збільшення частки інертного компонента супроводжується зменшенням об'ємної частки горючих компонентів, таких як етан і пропан. Це, у свою чергу, знижує нижчу теплоту згоряння газу, що може впливати на ефективність його використання в різних галузях. Внесені до моделі зміни враховують ці аспекти та забезпечують точне прогнозування змін енергетичних характеристик газової суміші залежно від складу.

Оновлена модель дозволяє:

- точно оцінювати енергетичні властивості газу з урахуванням частки біометану;
- прогнозувати вплив зміни компонентного складу на параметри транспортування через газові мережі;
- аналізувати довгостроковий вплив інтеграції біометану на ефективність роботи газової інфраструктури.

Водночас технологічні аспекти інтеграції біометану потребують глибшого дослідження, зокрема щодо впливу залишкових домішок на довговічність елементів системи. Особливо це стосується таких складових, як ущільнювальні матеріали та корозійна стійкість металів, що контактують із газовою сумішшю. Результати моделювання показують, що підвищення частки кисню не має значного впливу на гідравлічні параметри, такі як швидкість потоку чи втрати тиску в системі. Це підтверджує технічну сумісність біометану з існуючими інфраструктурними об'єктами за умов дотримання нормативів.

Таким чином, запропоноване коригування математичної моделі відповідає сучасним вимогам до якості газових сумішей в умовах інтеграції біометану. Воно забезпечує можливість адаптації моделі до змін регуляторних норм та складу газу, що важливо для розвитку газотранспортної системи України з врахуванням європейських стандартів.

4.3.3 Перевірка точності наведеної в формулі моделі без коригування але при впливі біогазу

На першому етапі аналізу проведено перевірку точності математичної моделі, розробленої у розділі 2, без врахування змін, викликаних присутністю біометану в газовій мережі. Основною метою було визначення впливу нових умов (зокрема, підвищення частки кисню та зниження об'ємного вмісту етану) на точність розрахунків, виконаних за допомогою базової моделі.

Методологія перевірки включала формування нового набору даних, що моделює суміші природного газу з домішками біометану. Згідно з методикою, описаною у підрозділі 2.3, створено базу даних із 3500 зразків, де частки об'ємної витрати основних компонентів газу скориговані відповідно до змін, викликаних присутністю біометану. Зокрема, враховано підвищення молярної частки кисню (до 1,0%, враховуючи що модель розроблена для мереж низького

та середнього тисків, а це рівень ГРМ) та відповідне зниження частки етану й інших компонентів згідно з описаними раніше закономірностями.

Для кожного зразка проведено розрахунок:

- швидкості поширення ультразвуку за допомогою математичної моделі (формула 2.3) для визначення динамічних властивостей газової суміші;
- вищої теплоти згорання палива для мережі з двома входами, використовуючи методологію, закладену у формулі (2.38).

Для оцінки точності моделі визначено відхилення між розрахунковими значеннями (отриманими за математичною моделлю) і еталонними значеннями, розрахованими згідно зі стандартом. Відхилення обчислювалося за формулою:

$$\delta = \left(\frac{H_{\text{розрах}} - H_{\text{еталон}}}{H_{\text{розрах}}} \right) \cdot 100\% , \quad (4.3)$$

де $H_{\text{розрах}}$ - значення вищої теплоти згорання енергоресурсу, пораховане за розробленою математичною моделлю в розділі 2 (формула 2.38); $H_{\text{еталон}}$ - значення вищої теплоти згорання енергоресурсу, пораховане за стандартом (за компонентним складом газу).

Максимальне зафіксоване відхилення склало 28,5 ккал/м³, що свідчить про суттєвий вплив присутності біометану на точність розрахунків, особливо для зразків із підвищеною часткою кисню. Середнє відхилення для 3500 зразків розраховано шляхом ділення суми всіх відхилень на загальну кількість зразків і відповідає 17,8 ккал/м³.

Для визначення загальної точності моделі оцінено відносну похибку, яка розраховувалася як відношення суми відхилень усіх зразків до діапазону значень вищої теплоти згорання (різниці між максимальним і мінімальним значеннями еталонної теплоти). Результати аналізу показали, що:

- середня відносна похибка від неврахування в моделі параметрів закачаного в трупопровід біометану становить 86,6 %;

- максимальне відхилення виявлено для зразків із найвищим вмістом кисню, що підтверджує чутливість моделі до змін фізико-хімічного складу газу.

Такий рівень похибки демонструє, що базова модель, розроблена для природного газу, є недостатньо чутливою до змін компонентного складу газової суміші, зокрема до підвищення частки кисню та зменшення концентрації вуглеводневих компонентів. Це вказує на необхідність подальшого вдосконалення моделі, яке включатиме врахування впливу фізико-хімічних параметрів, специфічних для біометану. Високий рівень похибки також підкреслює важливість проведення додаткових досліджень для підвищення точності прогнозування енергетичних характеристик газових сумішей із домішками біометану.

4.3.4 Математичне моделювання наявності в газопроводі біометану та коригування моделі оцінки якості

Враховуючи результати попередніх підрозділів, проведено уточнення математичної моделі оцінки теплоти згоряння енергоресурсів із домішками біометану. Це уточнення базувалося на регресійному аналізі, виконаному для нового набору даних, який відображає суміші газів із різними концентраціями біометану. Результати аналізу дозволили вдосконалити модель шляхом застосування нелінійного рівняння з комбінованими параметрами та врахуванням константи.

Найкращою уточненою моделлю виявилось рівняння нелінійної моделі зі звичайним та комбінованими параметрами з врахуванням константи:

$$\begin{aligned}
Q_{\text{вищ}} = & -97876,976 - CO_{2_1} \cdot (1,232 \cdot v_1 - 24,718 \cdot V_1 + 52,312 \cdot CO_{2_2} + 4,412 \cdot v_2 - 25,278 \cdot V_2) + \\
& + v_1 \cdot (2,253 \cdot V_1 - 5,687 \cdot CO_{2_2} - 0,514 \cdot v_2 + 2,321 \cdot V_2) + V_1 \cdot (22,362 \cdot CO_{2_2} + 2,338 \cdot v_2) + \quad (4.4) \\
& + CO_{2_2} \cdot (0,799 \cdot v_2 + 22,698 \cdot V_2) + 2,367 \cdot v_2 \cdot V_2 + 43,593 \cdot V_1
\end{aligned}$$

На основі нового рівняння повторно розраховано відносну точність визначення теплоти згоряння для енергоресурсів із домішками біометану. Результати показали, що середня відносна похибка знизилася до 0,25%. Це свідчить про суттєве підвищення точності у порівнянні з базовою моделлю, розглянутою раніше.

Для перевірки адекватності скоригованої моделі проведено аналіз статистичних показників. Зокрема, використано:

- коефіцієнти кореляції та детермінації;
- критерій Фішера для оцінки загальної значущості моделі;
- t-критерій Стюдента для перевірки значущості окремих параметрів.

Отримані результати представлено у таблицях 4.5–4.7.

Значення багатofакторного коефіцієнта кореляції $R=0,8269$ і коефіцієнта детермінації $R^2=0,6838$ свідчать про високий ступінь відповідності моделі до емпіричних даних. Нормований коефіцієнт $R^2=0,6824$ підтверджує стабільність моделі за врахуванням обмежень розрахункової вибірки.

Результати дисперсійного аналізу критерію Фішера (див. таблицю 4.6) показали, що значення $F=502,25$ перевищує табличне значення, що свідчить про статистичну значущість регресійної моделі. Аналіз за t-критерієм Стюдента (таблиця 4.7) показав, що всі параметри моделі є значущими, оскільки розрахункові значення t перевищують табличне значення 1,96 для заданого рівня значущості.

Скоригована модель демонструє значне покращення у точності розрахунків вищої теплоти згоряння палива в умовах інтеграції біометану. Рівняння враховує комбіновані впливи основних параметрів, зокрема взаємодію

між вмістом CO₂_2, швидкістю поширення ультразвуку та іншими змінними. Це дозволяє забезпечити не лише високу точність, але й універсальність моделі для різних типів газових сумішей. Крім того, покращені статистичні показники свідчать про надійність моделі.

Таблиця 4.5 – Результати розрахунку регресійної статистики на прикладі скорегованої нелінійної моделі з комбінованими параметрами без врахування константи

Багатофакторний коефіцієнт кореляції R	0,826912
Коефіцієнт детермінації R- квадрат	0,683783
Нормований R -квадрат	0,682422
Стандартна похибка	55,15866
Кількість спостережень	3500

Таблиця 4.6 – Результати дисперсійного аналізу критерію Фішера на прикладі скорегованої нелінійної моделі з комбінованими параметрами без врахування константи

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимість F</i>
Регресія	15	22921268	1528085	502,25	0
Залишок	3484	10599994	3042,478		
Загалом	3499	33521262			

Таблиця 4.7 – Результати дисперсійного аналізу t-критерію Стюдента на прикладі скорегованої нелінійної моделі з комбінованими параметрами без врахування константи

<i>Параметри</i>	<i>Коефіцієнти</i>	<i>Стандартна похибка</i>	<i>t-критерій</i>	<i>P-значення</i>	<i>Нижнє 95%</i>	<i>Верхнє 95%</i>	<i>Нижнє 95,0%</i>	<i>Верхнє 95,0%</i>
Перехоплення	-97877	6872,976	-14,2408	9,01E-45	-111352	-84401,5	-111352	-84401,5
CO ₂ _1*Шв_1	-1,23157	0,091444	-13,4681	2,42E-40	-1,41086	-1,05229	-1,41086	-1,05229
CO ₂ _1*V_1	24,71886	1,654083	14,94415	5,43E-49	21,47579	27,96193	21,47579	27,96193
CO ₂ _1*CO ₂ _2	-52,3128	4,288664	-12,1979	1,53E-33	-60,7213	-43,9042	-60,7213	-43,9042

CO2_1*Шв_2	-4,41236	0,339551	-12,9947	9,75E-38	-5,0781	-3,74662	-5,0781	-3,74662
CO2_1*V_2	25,27858	1,660202	15,22621	9,83E-51	22,02352	28,53365	22,02352	28,53365
Шв_1*V_1	2,253845	0,151156	14,91073	8,7E-49	1,957482	2,550208	1,957482	2,550208

Продовження таблиці 4.7

Шв_1*CO2_2	-5,68744	0,404524	-14,0596	1,03E-43	-6,48057	-4,89431	-6,48057	-4,89431
Шв_1*Шв_2	-0,51432	0,032535	-15,8079	2,05E-54	-0,57811	-0,45053	-0,57811	-0,45053
Шв_1*V_2	2,320891	0,151615	15,30775	3,05E-51	2,023627	2,618155	2,023627	2,618155
V_1*CO2_2	22,36228	1,95616	11,43173	9,77E-30	18,52695	26,19762	18,52695	26,19762
V_1*Шв_2	2,338796	0,14776	15,82838	1,51E-54	2,049092	2,6285	2,049092	2,6285
CO2_2*Шв_2	0,799337	0,19824	4,032169	5,64E-05	0,410659	1,188015	0,410659	1,188015
Шв_2*V_2	22,69844	1,951506	11,63124	1,05E-30	18,87223	26,52465	18,87223	26,52465

4.4 Адаптація розробленої штучної нейронної мережі з врахуванням закачування водню і біометану в трубопроводі

Враховуючи особливості розробленої у підрозділі 2.6 штучної нейронної мережі (ШНМ), її гнучкість та здатність до навчання на основі нових даних, доцільним є адаптація моделі для аналізу теплотворної здатності природного газу у випадках закачування водню та біометану в газотранспортну мережу. Сучасні дослідження свідчать про швидкий розвиток технологій з домішування альтернативних газів до природного газу, що ускладнює побудову традиційних регресійних моделей через відсутність прямих кореляцій та нелінійність взаємозв'язків параметрів. У таких умовах використання ШНМ є обґрунтованим завдяки її можливості адаптивно моделювати складні залежності та навчатися на нових обсягах даних.

Процес навчання ШНМ виконувався з урахуванням попередньої архітектури моделі та вимог до узагальнюючої здатності. Структурна схема оновленої мережі була збережена, проте обсяг даних для навчання значно розширено, що забезпечує підвищення точності прогнозування. Розширення функціональності ШНМ здійснено шляхом доповнення початкового набору

даних, що містить 3500 значень (використаних у підрозділі 2.6), новими вимірами:

- 3500 значень для біометану,
- 17500 значень для водню.

Суттєве збільшення обсягу даних забезпечує високу точність моделювання, однак вимагає використання саме нейромережових алгоритмів через їхню здатність до обробки великих масивів інформації та виявлення прихованих закономірностей.

Адаптована нейронна мережа побудована на основі існуючої архітектури, що включає вхідний, прихований та вихідний шари. При цьому враховано:

- Особливості теплотворної здатності природного газу зі змішаним вмістом водню та біометану, що призводять до зміни акустичних, фізико-хімічних та енергетичних характеристик газу.
- Вплив часток об'ємних витрат потоків газу (з урахуванням концентрацій водню та біометану) на нелінійний розподіл теплотворної здатності.
- Адаптацію вхідних параметрів мережі шляхом інтеграції нових ознак, що описують швидкість ультразвуку в газі, вміст CO₂, частку об'ємної витрати та температуру для кожного із потоків.

На рисунку 4.2 представлені ключові метрики і графіки, які відображають динаміку навчання.

Отримані матриці коефіцієнтів взаємозалежності між нейронами ШНМ, подані в додатку П. Інші х-стики побудованої ШНМ наведені на рисунках 4.3-4.4.

Таким чином, адаптація розробленої ШНМ до нових умов функціонування газотранспортної мережі забезпечує можливість моделювання енергетичної цінності газу у випадках закачування водню та біометану. Такий підхід є перспективним для подальшого вдосконалення систем контролю якості та

енергетичної оцінки газових потоків в умовах розвитку технологій декарбонізації.

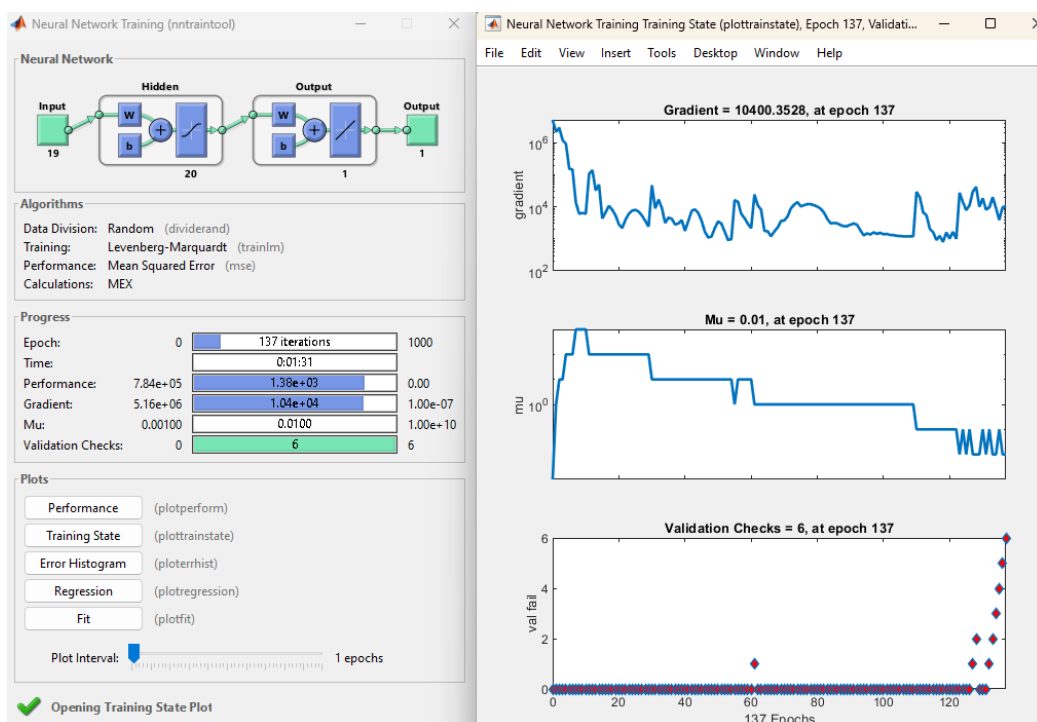


Рисунок 4.2 – Процес навчання нейронної мережі: динаміка градієнта, параметра μ та перевірки валідації

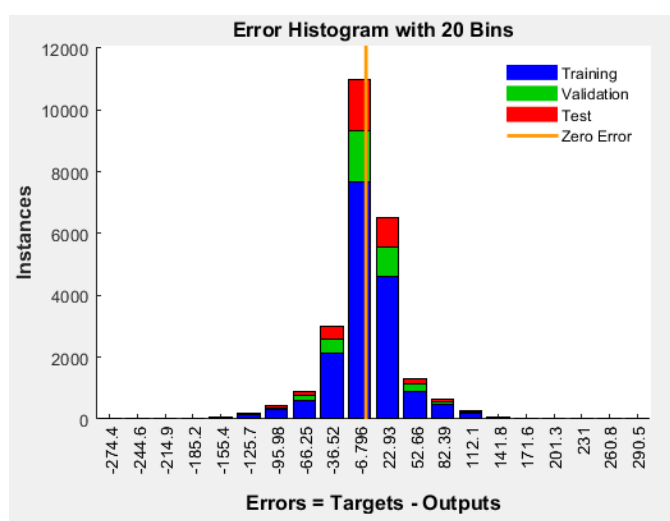


Рисунок 4.3 – Гістограма похибок розробленої, провалідованої і тестованої моделей

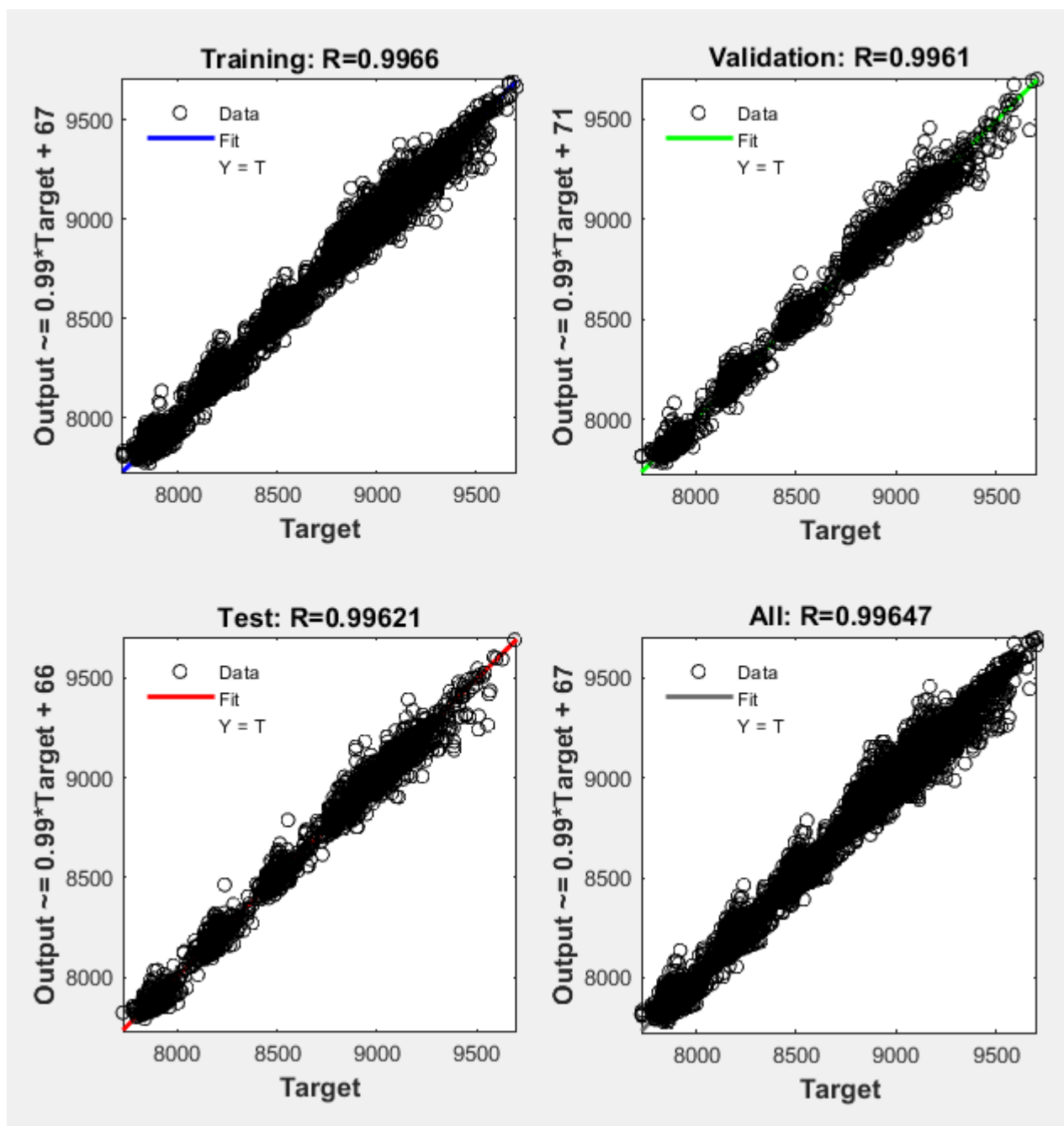


Рисунок 4.4 – Графіки залишків та коефіцієнти кореляції тренованої, валідованої моделей та моделі тестування

4.5 Розроблення нормативних документів щодо закачування біометану в мережу природного газу та прокравання трубопроводів з тиском до 16 бар

4.5.1 Розроблення проекту нормативного забезпечення ДСТУ EN 16723-1:2023

Розроблення нормативного забезпечення для закачування біометану в газотранспортні та газорозподільні мережі є етапом апробації проведених наукових досліджень. Ця ініціатива відповідає сучасним викликам у сфері відновлюваної енергетики та впровадження декарбонізованих видів енергії в Україні. Одним із центральних нормативних документів, що регулюють якість біометану для його закачування в газові мережі, став державний стандарт ДСТУ EN 16723-1:2023 «Природний газ і біометан для використання в транспорті та біометан для закачування в мережу природного газу. Частина 1: Технічні характеристики біометану для закачування в мережу природного газу». Цей документ адаптовано на основі європейського стандарту EN 16723-1:2016, що забезпечує гармонізацію національних вимог з міжнародними практиками.

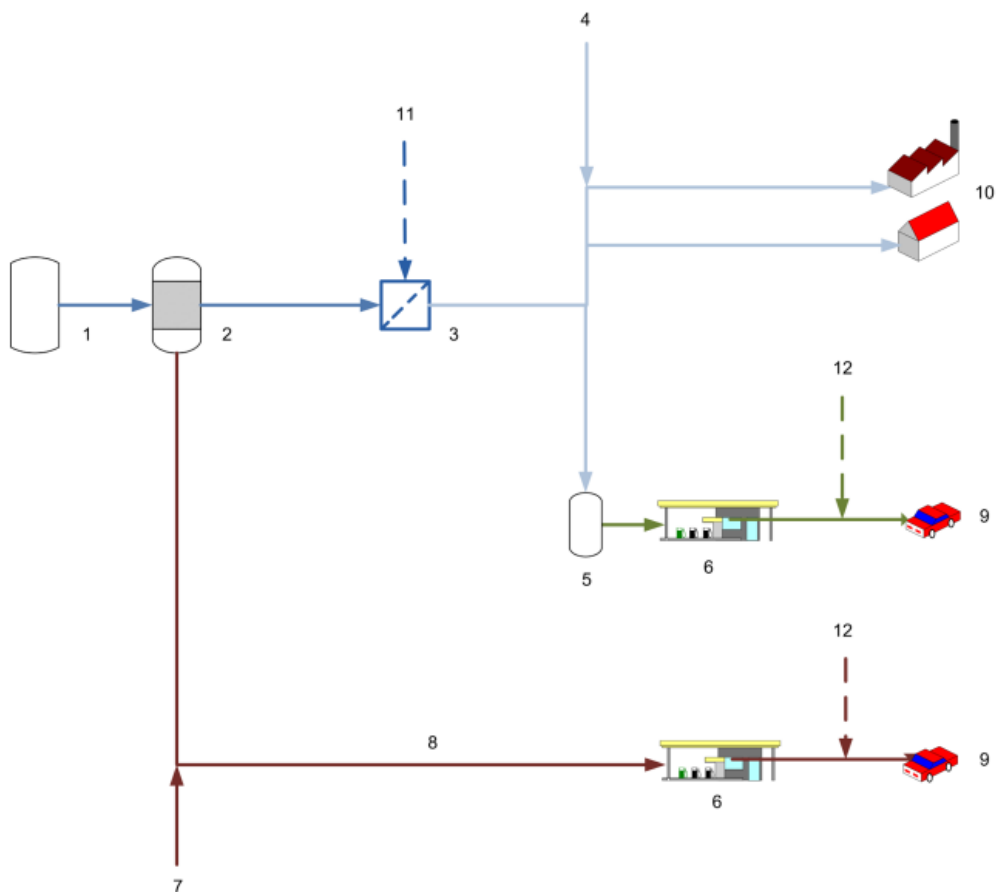
У стандарті встановлено технічні вимоги до біометану, включаючи його компонентний склад, методи випробувань і обмеження щодо вмісту домішок. Особливу увагу приділено контролю параметрів, які можуть впливати на безпеку транспортування та експлуатацію обладнання. Наприклад, встановлено граничні значення для:

- вмісту силоксанів (леткі сполуки кремнію), які можуть викликати відкладення та пошкодження газового обладнання;
- аміаку та амінів, що можуть бути присутніми у біогазі внаслідок його походження з органічних відходів;
- молекулярної частки кисню, яка врахована в попередніх регуляторних змінах для ГТС і ГРМ.

Розробкою проекту документа займався Технічний комітет стандартизації «Матеріали, обладнання, технології і споруди для нафтогазової промисловості» (ТК 146) за участі фахівців Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, АТ «Житомиргаз» та Регіональної газової компанії (РГК). Стандарт було прийнято для впровадження з 1 листопада 2023 року. Його основна мета — забезпечення єдиних критеріїв для операторів газових мереж, що дозволить створити стабільні технічні умови для приєднання біометанових заводів до газової інфраструктури. Цей державний стандарт усі оператори мереж можуть використовувати в роботі. Це важливо з точки зору розвитку ринку та технічного удосконалення процедур і регламентів. На його основі видаватимуться технічні умови на приєднання біометанових заводів до газорозподільних мереж.

Однією з основних проблем, що розглянуті в стандарті є специфічний склад біометану, що відрізняється від природного газу наявністю компонентів, таких як кремній, амоній, фторовані сполуки та інші домішки. Вони можуть негативно впливати на газову інфраструктуру, зокрема викликати корозію, засмічення фільтрів та зношування сенсорів. Для вирішення цих викликів у стандарті передбачено:

- розширені методи випробувань, включаючи використання аналітичного обладнання для визначення концентрації летких компонентів;
- граничні значення для кожного компоненту, що враховують потенційні ризики для обладнання і користувачів;
- процедури відбирання проб, орієнтовані на мінімізацію похибок через забруднення під час транспортування та аналізу.



1 - біогаз завдяки процесам ферментації або термохімії; 2 - підвищення класу; 3 - закачування у газові мережі; 4 — мережі природного газу; 5 - кондиціонування; 6 — заправна станція; 7 – природний газ, отриманий не від мереж; 8 — місцева відповідна інфраструктура; 9 - автомобільне використання; 10 побутове та промислове використання; 11 – Частина 1: технічні вимоги мереж; 12 – Частина 2: технічні вимоги автомобілів

Рисунок 4.5 - Представлення певних потоків та застосувань біометану та природного газу

Уніфікація вимог до якості біометану із європейськими стандартами є важливим кроком для інтеграції України до європейського енергетичного простору. Це не лише відкриває можливості для експорту біометану, але й сприяє створенню конкурентного ринку всередині країни. Виконання вимог

стандарту дозволить операторам газових мереж забезпечити стабільну роботу системи навіть за підключення нових джерел біометану. Фрагмент стандарту поданий в додатку Р.

4.5.2 Розроблення проекту нормативного забезпечення ДСТУ EN 12007-4

Другим напрямком апробації стало залучення автора до робочої групи з розробки проекту іншого національного стандарту ДСТУ EN 12007-4:2019 «Газова інфраструктура. Трубопроводи для максимального робочого тиску до 16 бар включно. Частина 4. Спеціальні функційні вимоги до оновлення, що стосується газової інфраструктури». Стандарт визначає спеціальні функціональні вимоги до оновлення трубопроводів, які експлуатуються під максимальним робочим тиском до 16 бар включно. Проект охоплює ключові аспекти проектування, будівництва, випробовування, введення та виведення з експлуатації газових мереж, зокрема технології їх модернізації.

Стандарт містить конкретні рекомендації щодо вибору технологій оновлення трубопроводів, включно з безтраншейними методами та відновленням трубопроводу за допомогою сучасних матеріалів (поліетиленові труби, футерування смолою тощо). Основний акцент було зроблено на забезпеченні надійності та безпеки газопостачання, екологічної відповідності та зниженні впливу на оточуючу інфраструктуру.

Розроблений стандарт має на меті уніфікувати підходи до оновлення газових систем у відповідності з європейськими нормативами та національними вимогами, що дозволить підвищити ефективність і довговічність експлуатованих мереж. Фрагмент стандарту поданий в додатку С.

Висновки до 4 розділу:

1. Досліджено вплив основних компонентів біогазу на енергетичну цінність енергоресурсу. Встановлено, що основна енергетична цінність біогазу обумовлена вмістом метану, який забезпечує теплотворну здатність у межах 35–40 МДж/м³. Збільшення концентрації метану в суміші лінійно підвищує її теплотворну здатність та знижує густину, що робить біометан конкурентним заміником природного газу. Водночас наявність домішок, таких як CO₂, H₂S, H₂O та силосани, негативно впливає на теплотворні властивості, ефективність згоряння та експлуатаційний стан газотранспортного обладнання, провокуючи корозію, абразивний знос та скорочення терміну служби систем. Це підтверджує необхідність очищення біогазу до рівня біометану для його безпечної інтеграції у газові мережі.
2. Проаналізовано характеристики біогазу, отриманого з різних джерел: сільськогосподарських відходів, енергетичних культур, промислових відходів, стічних вод та твердих побутових відходів (ТПВ). Виявлено, що енергетичний потенціал біогазу суттєво залежить від походження сировини та її хімічного складу. Найвищий біогазовий потенціал досягається при використанні енергетичних культур (до 200 м³/т сухої речовини) та промислових відходів, таких як барда (100–150 м³/т). Натомість органічна фракція ТПВ забезпечує стабільний вихід біогазу (близько 100 м³/т) за умов попереднього сортування. Експериментально доведено, що середній енергетичний потенціал ТПВ в Івано-Франківській області становить 8468,6 Дж/г, що підтверджує доцільність їх енергоутилізації.
3. Проведено дослідження вимог до якості біометану для його закачування у газові мережі. Встановлено, що для відповідності нормативам України

(Кодекс ГТС і ГРМ) та європейським стандартам (EN 16723-1:2023) необхідно досягти концентрації метану $\geq 95\%$ та знизити вміст CO_2 до $\leq 2\%$. Основними технологіями збагачення біогазу є адсорбція з переминою тиску (PSA), скрубери, мембранна сепарація та криогенна сепарація. Очищення біогазу дозволяє отримати біометан з високими енергетичними характеристиками, які є максимально наближеними до природного газу, що забезпечує його технічну сумісність з газотранспортною системою.

4. Здійснено адаптацію математичної моделі оцінки якості енергоресурсу для умов інтеграції біометану у газотранспортні мережі. Враховано підвищений вміст кисню у біометані, що є наслідком технологічних процесів його виробництва. Досліджено вплив кисню на теплотворну здатність газових сумішей та встановлено, що підвищення його частки призводить до зменшення об'ємного вмісту горючих компонентів. Це викликає необхідність коригування математичної моделі для підвищення точності розрахунків енергетичних характеристик. Удосконалена модель продемонструвала значне зниження середньої відносної похибки до 0,25% порівняно з базовою моделлю, що підтверджує її ефективність.
5. Розроблено проект нормативного забезпечення для закачування біометану у газотранспортні мережі України. Прийнятий стандарт ДСТУ EN 16723-1:2023 гармонізовано з європейськими вимогами та передбачає технічні критерії якості біометану, включаючи обмеження на вміст кисню, силоксанів, аміаку та інших домішок. Впровадження цього стандарту створює передумови для інтеграції біометанових установок у національну газову інфраструктуру та відповідає європейським цілям декарбонізації енергетичного сектору. Також розроблено проект національного стандарту ДСТУ EN 12007-4:2019, який визначає функціональні вимоги до оновлення газових трубопроводів з

максимальним робочим тиском до 16 бар. Стандарт уніфікує підходи до модернізації газових мереж відповідно до європейських нормативів, акцентуючи увагу на надійності, безпеці, екологічній відповідності та застосуванні сучасних технологій, зокрема безтраншейних методів і нових матеріалів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В результаті проведених теоретичних, експериментальних та промислових досліджень вирішена актуальна науково-прикладна задача – розроблена інформаційно-вимірювальна система оцінювання якості природного газу і його сумішей з використанням експрес-методу в процесі транспортування розгалуженими мережами і одержано такі основні результати.

1. Системний аналіз нормативно-технічного забезпечення процесів вимірювання теплотворної здатності природного газу та інших газів, що транспортуються газопроводами, показав, що сучасні методи та підходи не забезпечують необхідної точності та оперативності визначення енергетичної цінності газу через недостатню приладову базу для потокового контролю, відсутність адаптованих методик для розгалужених мереж і значні відхилення в параметрах якості газу, що виникають під час змішування газів з різних джерел, а також через непристосованість до сучасних вимог з декарбонізації, що передбачають інтеграцію нових енергоносіїв, таких як біометан і водень, у наявну газотранспортну інфраструктуру.
2. Проведене дослідження розподілу зміни якісного показника природного газу в газорозподільній мережі виявило суттєві розбіжності між фактичними та задекларованими газотранспортною організацією значеннями теплоти згоряння, зокрема середня відносна похибка складає 0,4%, а максимальне відхилення фактичного значення відповідає 282 ккал/м³. Аналіз результатів показав, що у понад 50% точок вимірювань нижча теплота згоряння, визначена газотранспортною компанією, перевищує фактичні значення, отримані лабораторним методом. Встановлено, що недосконалість сучасної інформаційно-вимірювальної системи контролю якості газу в динамічних (за параметром теплотворної здатності газу) умовах мережі спричинена періодичністю вимірювань,

неврахуванням просторових та часових коливань якості енергоносія, а також відсутністю потокового моніторингу. Це підтверджує необхідність впровадження методів реального часу для визначення теплоти згорання, які забезпечать високу точність вимірювань (клас А або В).

3. На основі проведеного кореляційного аналізу між параметрами потоків природного газу, що вимірюються приладами експрес-контролю якості на входах мережі, та теплотворною здатністю після їх змішування, розроблено регресійну математичну модель для мереж із двома джерелами газопостачання. Модель враховує такі параметри: швидкість ультразвуку, вміст CO₂ та частки комерційної витрати газу на кожному вході. В результаті побудовано нелінійну залежність, що демонструє точність із відносною похибкою 0,24%, що відповідає класу точності А.
4. Розроблено алгоритм функціонування інформаційно-вимірювальної системи контролю якості природного газу в розгалужених мережах, що забезпечує безперервний збір, обробку та аналіз даних з приладів експрес-контролю якості газу та витратомірів. Алгоритм враховує отриману залежність між швидкістю ультразвуку, вмістом CO₂, частками комерційних витрат потоків газу та теплотою згорання на виході з мережі.
5. Досліджено вплив варіативності якісних характеристик природного газу на експлуатаційні параметри газотранспортної мережі низького тиску. Зокрема, встановлено, що підвищення густини газу через його вищу теплотворну здатність спричиняє збільшення гідравлічного опору та падіння тиску в кінцевих точках мережі, що особливо виражено у мережах з високим рівнем розгалуженості. Також виявлено залежність між зміною теплотворної здатності природного газу по довжині трубопроводу та прогнозуванням утворення корозійних пошкоджень трубопроводу. На основі отриманих результатів розроблено проект

методики оцінки технічного стану газопроводів низького тиску довжиною до 2,7 км, що використовує зміну показника якості природного газу, як додаткову діагностичну ознаку.

6. На основі регресійного аналізу удосконалено математичну модель оцінки якісних характеристик енергоносія для розгалужених газорозподільних мереж, що враховує вплив домішок водню та біометану у широкому діапазоні концентрацій. Середня відносна похибка моделі не перевищує 0,31% для сумішей із воднем та 0,25% для біометану, а коефіцієнт детермінації $R^2 > 0,99$ підтвердив високу відповідність результатів моделювання емпіричним даним. Розроблену штучну нейронну мережу адаптовано до нових умов закачування водню та біометану у газотранспортну мережу, що забезпечило високу точність прогнозування теплотворної здатності газу на рівні $R \geq 0.996$ коефіцієнта кореляції для навчальної, валідаційної та тестової вибірок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Mongeon, P. and Paul-Hus, A. (2015). The journal coverage of web of science and scopus: a comparative analysis. *Scientometrics*, 106(1), 213-228. <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1765-5>
2. Torres-Salinas, D., Jiménez-Contreras, E.: Introduction and comparative study of the new scientific journal's citation indicators in Journal Citation Reports and Scopus. *El Profesional de la Información* 19(2), 201–207 (2010). <https://doi.org/10.3145/epi.2010.mar.12>
3. The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system / I. Staffell et al. *Energy & Environmental Science*. 2019. Vol. 12, no. 2. P. 463–491. URL: <https://doi.org/10.1039/c8ee01157e> (date of access: 01.12.2024).
4. Вимірювальна система для визначення показників якості природного газу. Мо-нографія [текст] / наукова бібліотека Укр. інж-пед. академії. Автори: Швейкін О.Л., Прокопенко О.О., Пономарьов А.В. – Харків: УПА, 2013. - 131 с.
5. Капітанчук, К.І. Сучасний стан переходу обліку природного газу в енергетичні одиниці / М.П. Андріїшин, К.І. Капітанчук // XXI Міжнар. наук.-тех. конф. АС ПГП "Промислова гідравліка і пневматика", 17-18 листопада 2021 року, м. Київ.: матеріали конференції. – Вінниця: «ГЛОБУС–ПРЕС». – 2021. – С. 170-173.
6. Андріїшин М. П., Капітанчук К. І., Чернишенко О. М. ENERGY EFFICIENT USAGE OF NATURAL GAS CRITERIAS. *Science-based technologies*. 2019. Vol. 41, no. 1. URL: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.41.13529> (date of access: 11.12.2024).
7. Особливості запровадження обліку газу на газосховищах України в енергетичних одиницях / О. В. Герасимов та ін. *Oil and Gas Power Engineering*.

2024. № 2(40). С. 88–99. URL: [https://doi.org/10.31471/1993-9868-2023-2\(40\)-88-99](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2023-2(40)-88-99) (дата звернення: 11.12.2024).

8. Kuz M., Zamikhovskiy L., Shulha V. Technical aspects of natural gas energy metering implementation. *Ukrainian Metrological Journal*. 2021. No. 1. P. 21–25. URL: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2021.228205> (date of access: 11.12.2024).

9. Shulha V., Zamikhovskiy L., Kuz M. The concept of a virtual point of commercial accounting of natural gas energy and the algorithm for its software implementation. *Scientific journal of the Ternopil national technical university*. 2023. Vol. 112, no. 4. P. 51–57. URL: https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2023.04.051 (date of access: 11.12.2024).

10. Determination of the calorific value of natural gas using predictive modelling / H. Kuz et al. *Scientific journal of the Ternopil national technical university*. 2021. Vol. 103, no. 3. P. 110–116. URL: https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2021.03.110 (date of access: 11.12.2024).

11. Brzeczowski, Stanislaw , Glebocka, Magdalena , and Maciej Szeniawski. "Balancing of Transmission System and Contracts in Energy Units Based on Simulation Results." Paper presented at the PSIG Annual Meeting, New Orleans, Louisiana, May 2015.

12. Brzeczowski, Stanislaw, and Maciej Szeniawski. "Forecasting of Gas Quality." Paper presented at the PSIG Annual Meeting, Atlanta, Georgia, USA, May 2017.

13. Chaczykowski M., Zarodkiewicz P. Simulation of natural gas quality distribution for pipeline systems. *Energy*. 2017. Vol. 134. P. 681–698. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.020> (date of access: 11.12.2024).

14. Guandalini G., Colbertaldo P., Campanari S. Dynamic modeling of natural gas quality within transport pipelines in presence of hydrogen injections. *Applied*

Energy. 2017. Vol. 185. P. 1712–1723. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.006> (date of access: 11.12.2024).

15. Franco A. Natural gas consumption and correlation with the uses of thermal energy: Analysis of the Italian case. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2016. Vol. 31. P. 703–714. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.03.094> (date of access: 11.12.2024).

16. Ma L., Spataru C. The use of natural gas pipeline network with different energy carriers. *Energy Strategy Reviews*. 2015. Vol. 8. P. 72–81. URL: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2015.09.002> (date of access: 11.12.2024).

17. Perianes-Rodriguez A., Waltman L., van Eck N. J. Constructing bibliometric networks: A comparison between full and fractional counting. *Journal of Informetrics*. 2016. Vol. 10, no. 4. P. 1178–1195. URL: <https://doi.org/10.1016/j.joi.2016.10.006> (date of access: 02.12.2024).

18. VOSviewer - Visualizing scientific landscapes. VOSviewer. URL: <https://www.vosviewer.com/> (date of access: 02.12.2024).

19. van Eck N. J., Waltman L. *Visualizing Bibliometric Networks. Measuring Scholarly Impact*. Cham, 2014. P. 285–320. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-10377-8_13 (date of access: 02.12.2024).

20. ЗАКОН УКРАЇНИ "Про ринок природного газу". Офіційний вебпортал парламенту України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/329-19#Text> (дата звернення: 07.12.2024).

21. Закон України "Про нафту і газ". Офіційний вебпортал парламенту України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2665-14#Text> (дата звернення: 07.12.2024).

22. Global Energy Statistics Yearbook Dataset - ENERGYDATA.INFO. Welcome to ENERGYDATA.INFO - ENERGYDATA.INFO. URL: <https://energydata.info/dataset/global-energy-statistics-yearbook-dataset> (date of access: 07.12.2024).

23. Кодекс газорозподільних систем, затверджений постановою НКРЕКП № 2494 від 30.09.2015. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1379-15#Text>

24. Кодекс газотранспортної системи, затверджений постановою НКРЕКП № 2493 від 30.09.2015. [https:// zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1378-15#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1378-15#Text).

25. Клименко Г., Кравченко Р. ЗВІТ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ АНАЛІЗУ ДОСВІДУ ФУНКЦІОНУВАННЯ РИНКІВ ПРИРОДНОГО ГАЗУ В ДЕРЖАВАХ-ЧЛЕНАХ ЄВРОПЕЙСЬКОГО СОЮЗУ. Програма USAID «РАДА: наступне покоління». URL: <https://internews.ua/storage/app/media/rang/Materials/2024/EUGasMarket.pdf>.

26. РЕГЛАМЕНТ (ЄС) № 715/2009 ЄВРОПЕЙСЬКОГО ПАРЛАМЕНТУ І РАДИ від 13 липня 2009 року про умови доступу до мереж передачі природного газу та такий, що скасовує Регламент (ЄС) № 1775/2005 - USAID Energy Security Project. USAID Energy Security Project. URL: <https://energysecurityua.org/ua/pereklad-zakonodavstva-es/rehlament-yes-715-2009-uevropeyskoho-parlamentu-i-rady-vid-13-lypnia-2009-roku-pro-umovy-dostupu-do-merezh-peredachi-pryrodnoho-hazu-ta-takyy-shcho-skasovuie-rehlament-yes-1775-2005/> (дата звернення: 08.12.2024).

27. Особливості запровадження обліку газу на газосховищах України в енергетичних одиницях / О. В. Герасимов та ін. Oil and Gas Power Engineering. 2024. № 2(40). С. 88–99. URL: [https://doi.org/10.31471/1993-9868-2023-2\(40\)-88-99](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2023-2(40)-88-99) (дата звернення: 23.11.2024).

28. Легеза, Є. О. and Власенко, Д. О. (2023). Співвідношення правових категорій «державна митна політика», «митні органи» та «сервісна функція». Проблеми Сучасних Трансформацій. Серія: Право, Публічне Управління Та Адміністрування, (10). <https://doi.org/10.54929/2786-5746-2023-10-01-04>

29. Директива 2009/73/ЄС Європейського Парламенту і Ради від 13 липня 2009 року стосовно спільних правил внутрішнього ринку природного газу та така, що скасовує Директиву 2003/55/ЄС” (Газова Директива) - USAID Energy

Security Project. USAID Energy Security Project. URL: <https://energysecurityua.org/ua/pereklad-zakonodavstva-es/dyrektyva-2009-73-yes-uevropeysko-ho-parlamentu-i-rady/> (дата звернення: 08.12.2024).

30. Про затвердження Змін до деяких постанов НКРЕКП щодо запровадження на ринку природного газу використання одиниць енергії. Офіційний вебпортал парламенту України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0084874-17#Text> (дата звернення: 08.12.2024).

31. Проект Закону про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо запровадження на ринку природного газу обліку та розрахунків за обсягом газу в одиницях енергії. Офіційний портал Верховної Ради України. URL: https://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_1?pf3511=67572 (дата звернення: 08.12.2024).

32. Про внесення змін до деяких законів України щодо запровадження на ринку природного газу обліку та розрахунків за обсягом газу в одиницях енергії щодо терміну набрання чинності. Офіційний вебпортал парламенту України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2372-20#n7> (дата звернення: 08.12.2024).

33. Rybitskyi I. V., Karpash O. M., Karpash M. O. The natural gas combustions higher heat measuring possibility modeling for the available informative parameters. METHODS AND DEVICES OF QUALITY CONTROL. 2020. No. 1(44). P. 147–154. URL: [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2020-1\(44\)-147-154](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2020-1(44)-147-154) (date of access: 08.12.2024).

34. Природні горючі гази. Метод визначення теплотворної здатності водяним калориметром під тиском: ГОСТ 27193-86.– [Введено в дію 01.01.1988].– М.: Держстандарт СРСР, 1987.– 14 с.

35. ДСТУ ISO 6974 (частини 1–4). Природний газ – Визначення складу з визначеною невизначеністю методом газової хроматографії. Чинний від 2007-01-01. Вид. офіц. Держспоживстандарт України, 2007. 62 с.

36. Звідки природний газ береться і як доставляється споживачам [Електронний ресурс] // За даними сайту 104.ua. 2015. Режим доступу до ресурсу: <https://104.ua/ua/gas/id/zvidki-prirodnii-gaz-beretsia-i-iak-dostavliaietsi-12269>.

37. Yu, Yangyang., Li, Liangchuan., Liu, Xiaohu., Xu, Jingjing., Gao, Xiang., Yin, Caixia. (2015). 2. Gas distribution system.

38. Гончарук М. І. Довідник з газопостачання населених пунктів України / М. І. Гончарук. М. Д. Середюк, В. І. Шелудченко. Івано-Франківськ: Сімик. 2006. – 1313 с.

39. ДБН В.2.5-20-2001 Газопостачання. Київ: Держбуд України. 2001.-88с

40. Новосад, О. (2020). Напрями впровадження інноваційних заходів на газорозподільних підприємствах західного регіону. *Economic Journal of Lesya Ukrainka Volyn National University*, 1(21), 165-172. <https://doi.org/10.29038/2411-4014-2020-01-165-172>

41. КОСТЮК О., БУБЕЛА Т. УПРАВЛІННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЯ РИЗИКІВ НА ГАЗОТРАНСПОРТНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ. MEASURING AND COMPUTING DEVICES IN TECHNOLOGICAL PROCESSES. 2023. № 4. С. 216–224. URL: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-76-29> (дата звернення: 23.11.2024)

42. ТОЧКИ ВХОДУ/ВИХОДУ [Електронний ресурс] // Офіційний сайт Укртрансгаз. 2015. Режим доступу до ресурсу: <http://utg.ua/utg/customers/points.html>.

43. Boikynia, A. O. and Zavorotnyi, V. F. (2022). Gas density sensor based on psoc5. *Microsystems, Electronics and Acoustics*, 27(2), 257473-1-257473-7. <https://doi.org/10.20535/2523-4455.me.257473>

44. Максим`юк, С. О. Височанський І. І., Карпаш О. М. Аналіз викликів у системному підході управління динамічними процесами мереж газотранспортної системи / Нафтогазова енергетика. - 2018. - № 2. - С. 25-31. DOI 10.31471/1993-9868-2018-2(30)-25-31

45. ДСТУ ISO 15112:2009. Природний газ. Визначення енергії. Чинний від 2011-01-01. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2010. 48 с

46. ДСТУ EN 16723-1:20_ (EN 16723-1:2016, IDT) Природний газ і біометан для використання в транспорті та біометан для закачування в мережу природного газу. Частина 1. Технічні характеристики біометану для закачування в мережу природного газу

47. Fu, S.; Angelidaki, I.; Zhang, Y. In situ Biogas Upgrading by CO₂ -to- CH₄ Bioconversion. Trends Biotechnol. 2020, 39, 336–347. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

48. Buffiere, P.; Germain, R.B.P. Freins et Développements de la Filière Biogaz: Les Besoins en Recherche et Développement. Available online: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/47/106/47106366.pdf (accessed on 12 October 2021).

49. Atelge, M.R.; Krisa, D.; Kumar, G.; Eskicioglu, C.; Nguyen, D.D.; Chang, S.W.; Atabani, A.E.; Al-Muhtaseb, A.H.; Unalan, S. Biogas Production from Organic Waste: Recent Progress and Perspectives. Waste Biomass Valorization 2020, 11, 1019–1040. [Google Scholar] [CrossRef]

50. Директива 2009/28/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 23 квітня 2009 р. про сприяння використанню енергії відновлюваних джерел .Директиві про відновлювані джерела енергії (1 - <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:EN:PDF>

51. Gas Decarbonization Pathways 2020-2050. Gas for Climate Consortium. URL: https://uabio.org/wp-content/uploads/2024/10/19-Biogas_CBAM.pdf.

52. Atelge, Rasit & Senol, Halil, et al. A Critical Overview of the State-of-the-Art Methods for Biogas Purification and Utilization Processes. *Sustainability* 2021, 13, 11515. <https://doi.org/10.3390/su132011515>.

53. Georgii Geletukha, Petro Kucheruk, Yuri Matveev. Prospects and potential for Biomethane Production in Ukraine. *Ecological Engineering & Environmental Technology*. ISSN 2719-7050. 2022, Volume 23, Issue 4, 67–80 pp. <http://www.ecoet.com/Prospects-and-Potentialfor-Biomethane-Production-in-Ukraine,149995,0,2.html>

54. 11th Edition Global Bioenergy Statistics Report 2024. WBA - Worldbioenergy. URL: <https://www.worldbioenergy.org/uploads/241023%20GBS%20Report%20Short%20Version.pdf> (date of access: 27.11.2024).

55. Geletukha G., Zheliezna T., Dragnev S., Haidai. 2022. Ten actions of Ukraine to reject Russian natural Gas. UABio Position Paper #28. April 2022. <https://uabio.org/en/materials/12834/>

56. Geletukha G., Zheliezna T. 2021. Prospects for Bioenergy Development in Ukraine: Roadmap until 2050. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 22(5). 73-81.

57. Синтез оптимального керування динамічними процесами в газотранспортних системах // Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання [текст]: матеріали Міжнар. наук.практ. конф.. м. Івано-Франківськ. 14-19 травня 2018 р. Івано-Франківськ: п. Голіней О.М., 2018.406 с.

58. Managing demand uncertainty in natural gas transmission networks. // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2016. – Pp. 100–111.

59. План розвитку ГТС України на 2018-2027 [Електронний ресурс] // Офіційний сайт ПАТ «Укртрансгаз». 2017. Режим доступу до ресурсу: <http://utg.ua/img/menu/gts/TYNDP-TSO.pdf>.

60. Законом України «Про забезпечення комерційного обліку природного газу» [Електронний ресурс] // Відомості Верховної Ради України (ВВР), № 5, ст. 28. 2012. Режим доступу до ресурсу: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3533-17>.

61. Височанський І. І., Чабан Н. І., Максим'юк С. О. Оптимізація газових мереж низького тиску з врахуванням енергетичних характеристик природного газу / Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. - 2017. - № 4. - С. 103-110.

62. Повідомлення про оприлюднення до проекту наказу Міністерства енергетики України «Про затвердження Правил приладового обліку природного газу». Міністерство енергетики України. URL: <https://mev.gov.ua/rehulyatornyy-akt/povidomlennya-pro-oprylyudnennya-do-proektu-nakazu-ministerstva-enerhetyky>.

63. Про затвердження Правил обліку природного газу під час його транспортування газорозподільними мережами, постачання та споживання : Наказ М-ва палива та енергетики України від 27.12.2005 № 618 : станом на 25 жовт. 2013 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0067-06#Text> (дата звернення: 09.12.2024).

64. Дарвай І.Я. Експрес метод контролю якості природного газу: автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин / Ірина Ярославівна Дарвай; Національний університет "Львівська політехніка". – Львів, 2010. – 20 с.

65. Спосіб експрес-визначення теплоти згоряння природного газу / О. М. Карпаш, І. Я. Дарвай, М. О. Карпаш [та ін.]: пат. 92846 С2 Україна, МПК (2009) G01N25/20. заявник і патентовласник Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. № a200905201 ; заявл. 25.05.09; опубл. 10.12.10, Бюл. № 23.

66. 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.

67. Якість газу [Електронний ресурс] // АТ "Укртрансгаз". – 2014. – Режим доступу до ресурсу: <http://utg.ua/utg/business-info/yakst-gazu.html>

68. ГОСТ 30319.1-96 Газ природний. Методи розрахунку фізичних властивостей. Визначення фізичних властивостей природного газу, його компонентів та продуктів його переробки.

69. Шпільрайн Е.Е., Кессельман П.М. Основи теорії теплофізичних властивостей речовин. М., "Енергія", 1977, 248 с.

70. ГОСТ 30319.3-2015. Газ природний. методи розрахунку фізичних властивостей Обчислення фізичних властивостей з урахуванням даних про компонентному складі. Стандартінформ, 2016.

71. Газы горючі природні. Розрахунковий метод визначення теплоти згоряння, відносної густини та числа Воббе: ГОСТ 22667-82. - [Дата запровадження 01.07.83]. - М.: Видавництво стандартів, 1982. - 4 с. - (Державний стандарт Союзу РСР).

72. Економетрія. Частина 1, 2 : навчальний посібник / [Азарова А. О., Сачанюк-Кавецька Н. В., Роїк О. М., Міронова Ю. В.] – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 118 с.

73. Економетричні моделі [Текст]: навч. посіб. для організації самост. роботи студ. ден. форми навчання екон. спец. (в рамках кредит.-модул. системи навч.)/М-во освіти і науки України, Донец. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського, Каф. вищ. і приклад. математики; В.В. Фор-туна, С.М.Латинін. – Донецьк:[ДонНУЕТ], 2009. – 126 с.

74. Економетрика. Методичні вказівки до практичних занять для студентів галузі знань 0305 «Економіка і підприємництво» за напрямом підготовки

6.030505«Управління персоналом і економіка праці», 6.030508 “Фінанси і кредит”/ Укл.: Ткач Ю.М.- Чернігів: ЧДТУ, 2012. - 117 с.

75. ДСТУ OIML R 140:2014 «Вимірювальні системи для газоподібного палива» (OIML R 140, edition 2007, IDT)

76. Maksymiuk, S., Rybitskyi, I., Karpash, O., Tsykh, V., Doroshenko, Y. (2024). Method for Estimating the Calorific Value of Natural Gas for Branched Networks Using Express Quality Control Tools. In: Babak, V., Zaporozhets, A. (eds) Systems, Decision and Control in Energy VI. Studies in Systems, Decision and Control, vol 561. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-68372-5_16

77. СОРОКА Н. Ю. ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОБІТ ПОВ'ЯЗАНИХ З ДЕКАРБОНІЗАЦІЄЮ ПОСТАЧАННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ : дис. ... д-ра філософії в галузі техн. наук : 152. Івано-Франківськ, 2024. 194 с.

78. Майкл Вундер (2020). Споживання газу (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/9425-gas-consumption>), Центральний обмін файлами MATLAB. Отримано 10 вересня 2020 р.

79. 9. Довідник працівника газотранспортного підприємства / В. В. Розгонюк, А.А. Руднік, В.М. Коломєєв та ін. – Київ: РОСТОК, 2001. – 1090 с.

80. Розгонюк В. В. Трубопровідний транспорт природного газу. – Київ: Кий, 2008. – 304 с.

81. Обслуговування і ремонт газопроводів / Грудз В. Я., Тимків Д. Ф., Михалків В. Б., Костів В. В. – Івано-Франківськ: Лілея-НВ, 2009. – 711 с.

82. Наказ Державного комітету будівництва, архітектури та житлової політики України 09.06.98 N 124 "Правила обстежень, оцінки технічного стану, паспортизації та проведення планово-запобіжних ремонтів газопроводів і споруд на них" [Електронний ресурс] // Верховна Рада України. – 1998. – Режим доступу до ресурсу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0723-98#Text>.

83. Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання: наук.-техн. посіб.: у 3 т. /Є. І. Крижанівський, Г. М. Никифорчин [за ред. В. В. Панасюка]. – Т. 3: Деградація газопроводів та її запобігання. – Івано-Франківськ: вид-во Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, 2012. – 433 с.

84. Максим'юк С.О. Карпаш О.М. Диверсифікація методів діагностики технічного стану газопроводів в умовах розвитку системи оцінки якості природного газу за принципами ЄС / Науково-технічний журнал «Методи та прилади контролю якості». 2020. №2 (45). С. 82-89. DOI 10.31471/1993-9981-2020-2(45)-82-89

85. Boulinguez, B.; Le cloirec, P. Purification de biogaz. Élimination des COV et des siloxanes. Tech. L'ingénieur 2011, 33, 1–26. [Google Scholar]

86. Demirbas, A.; Taylan, O.; Kaya, D. Biogas production from municipal sewage sludge (MSS). Energy Sources Part A Recovery Util. Environ. Eff. 2016, 38, 3027–3033. [Google Scholar] [CrossRef]

87. Atelge, M.R.; Atabani, A.E.; Banu, J.R.; Krisa, D.; Kaya, M.; Eskicioglu, C.; Kumar, G.; Lee, C.; Yildiz, Y.Ş.; Unalan, S.; et al. A critical review of pretreatment technologies to enhance anaerobic digestion and energy recovery. Fuel 2020, 270, 117494. [Google Scholar] [CrossRef]

88. Broschüre “Biogas” Fachagentur nachwachsende Rohstoffe;18276 GüzowPrüzen. Germany. 8. Auflage, 2012

89. EU Mandate M/475 to CEN for standards for biomethane for use in transport and injection in natural gas pipelines

90. Rodenhizer, J.S.; Boardman, G.D. Collection, Analysis, and Utilization of Biogas from Anaerobic Treatment of Crab Processing Waters. J. Aquat. Food Prod. Technol. 1999, 8, 59–75. [CrossRef]

91. Economic and bioenergy efficiency of cultivating sweet sorghum and corn at different levels of mineral nutrition.". The Scientific Journal Grain Crops, vol. 2, no. 2, 2018, p. 294-300. <https://doi.org/10.31867/2523-4544/0039>

92. Крамар В. ТЕХНОЛОГІЇ ЗБАГАЧЕННЯ БІОГАЗУ ТА ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКИ. Комунальна та промислова енергетика, відновлювана енергетика, енергоефективність. 2023. Т. 45, № 1. С. 64–74.

93. Nielsen, Jens Bo Holm, and Piotr Oleskowicz-Popiel. "The future of biogas in Europe: visions and targets until 2020." The Future of Biogas in Europe III 101 (2007).

94. BIOGAS – AN IMPORTANT RENEWABLE ENERGY SOURCE. WBA - Worldbioenergy. URL: <https://www.worldbioenergy.org/uploads/Factsheet%20-%20Biogas.pdf> (date of access: 27.11.2024).

95. Voronych, A., Yatsyshyn, T., Raiter, P., Zhovtulya, L., Maksymiuk, S. (2023). Research of Characteristics of Solid Waste as Energy Resource. In: Zaporozhets, A. (eds) Systems, Decision and Control in Energy IV. Studies in Systems, Decision and Control, vol 454. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22464-5_22

96. Ivano-Frankivsk Regional State Administration. 2018. Ekologichnyj pasport Ivano-Frankivskoj oblasti za 2017 rik [Ecological passport of Ivano-Frankivsk region for 2017] (in Ukrainian) http://www.if.gov.ua/files/uploads/%D0%95%D0%9A_2017.pdf

97. Ivano-Frankivsk Regional State Administration. 2019. Ekologichnyj pasport Ivano-Frankivskoj oblasti za 2018 rik [Ecological passport of Ivano-Frankivsk region for 2018] (in Ukrainian) [http://www.if.gov.ua/files/uploads/%D0%95%D0%9A%D0%9E%D0%9B%D0%9E%D0%93%D0%86%D0%A7%D0%9D%D0%98%D0%99_%D0%9F%D0%90%D0%A1%D0%9F%D0%9E%D0%A0%D0%A2_2018%20\(2\)_compressed.pdf](http://www.if.gov.ua/files/uploads/%D0%95%D0%9A%D0%9E%D0%9B%D0%9E%D0%93%D0%86%D0%A7%D0%9D%D0%98%D0%99_%D0%9F%D0%90%D0%A1%D0%9F%D0%9E%D0%A0%D0%A2_2018%20(2)_compressed.pdf)

98. Orfanova M.M., Ivanyk O.I. 2016. Improving the system of solid waste management in the city of Ivano-Frankivsk. *Man and environment. Issues of neoecology.* № 3-4 (26), 126-131.

99. International Organization for Standardization. 2009. ISO 1928:2009 Solid mineral fuels — Determination of gross calorific value by the bomb calorimetric method and calculation of net calorific value

100. Marinov K. I, Gochev Z., Lieskovský M., Ferenčík M. 2018. Exploring the energy performance of wood chips from *Salix Viminalis* – klon Tordis. *Innovation in woodworking industry and engineering design*, 2/2014 (6), 50–56.

101. Abdul Hussain A. Abbas, Wesam S. N. Al-Rekabi, Ahmed N. A. Hamdan. 2017. Prediction of Potential Electrical Energy Generation from MSW of Basrah Government. *Proc. International Conference on Waste Management, Ecology and Biological Sciences*, 172-181.

102. European Biomethane Map - Gas Infrastructure Europe. Gas Infrastructure Europe. URL: https://www.gie.eu/publications/maps/european-biomethane-map/?fbclid=IwZXh0bgNhZW0CMTAAR3vf0fOEDv5KO2cM4ytWmOv53ql02rDOhQQp4z2Qzf2__Qs9dPuDiKrN0_aem_OI0em43hk9DOL_eeGMMNXQ (date of access: 27.11.2024).

103. Baena-Moreno, F.M.; Rodríguez-Galán, M.; Vega, F.; Vilches, L.F.; Navarrete, B. Review: Recent advances in biogas purifying technologies. *Int. J. Green Energy* 2019, 16, 401–412. [CrossRef]

104. Felipe, I.; Barros, R.M.; Lucio, G.; Filho, T. Electricity generation from biogas of anaerobic wastewater treatment plants in Brazil: An assessment of feasibility and potential. *J. Clean. Prod.* 2016, 126, 504–514.

105. Kumara Behera, B.; Varma, A. Chapter 2: Biomethanization. In *Microbial Resources for Sustainable Energy*; Springer: Cham, Switzerland, 2016; pp. 35–122

106. Yentekakis, I.V.; Goula, G. Biogas Management: Advanced Utilization for Production of Renewable Energy and Added-value Chemicals. *Front. Environ. Sci.* 2017, 5, 7. [CrossRef]

107. Awe, O.W.; Zhao, Y.; Nzihou, A.; Minh, D.P.; Lyczko, N. A Review of Biogas Utilisation, Purification and Upgrading Technologies Review. *Waste Biomass Valorization* 2017, 8, 267–283. [Google Scholar] [CrossRef] [Green Version]

108. Savickis, J.; Zemite, L.; Zeltins, N.; Bode, I.; Jansons, L.; Dzelzitis, E.; Kuposovs, A.; Selickis, A.; Ansons, A. The biomethane injection into the natural gas networks: The EU's gas synergy path. *Latv. J. Phys. Tech. Sci.* 2020, 57, 34–50. [Google Scholar] [CrossRef]

109. Hakawati, R.; Smyth, B.M.; Rosa, F.D.; Rooney, D. What is the most energy efficient route for biogas utilization: Heat, electricity or transport ? *Appl. Energy* 2017, 206, 1076–1087. [Google Scholar] [CrossRef] [Green Version]

110. Hendrix Group: Material and Corrosion Engineers (HGMCE). 2004. Glossary of corrosion related terms. The Hendrix Group: Material and Corrosion Engineers. Available from <http://www.hghouston.com/c.html> (accessed on June 16, 2006)].

111. Nešić S. Key issues related to modelling of internal corrosion of oil and gas pipelines – A review. *Corrosion Science*. 2007. Vol. 49, no. 12. P. 4308–4338. URL: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2007.06.006> (date of access: 15.12.2024).

112. Kermani M. B., Morshed A. Carbon Dioxide Corrosion in Oil and Gas Production—A Compendium. *CORROSION*. 2003. Vol. 59, no. 8. P. 659–683. URL: <https://doi.org/10.5006/1.3277596> (date of access: 15.12.2024).

113. Kermani B. Recommended practice for corrosion management of pipelines in oil and gas production and transportation / ed. by B. Kermani, T. Chevrot. CRC Press, 2017. URL: <https://doi.org/10.1201/9780203741160> (date of access: 15.12.2024).

114. Crolet, J.L., 1994. Which CO₂ Corrosion, Hence Which Prediction?," in Predicting CO₂ Corrosion in the Oil and Gas Industry. European Federation of Corrosion, vol. 13 Institute of Materials, London, UK.
115. Crolet, J.L., Bonis, M.R., 2010. Algorithm of the Protectiveness of Corrosion Layers 1. Protectiveness Mechanisms and CO₂ Corrosion Prediction. NACE International.
116. Crolet, J.L., Thevenot, N., Netic, S., 1996. Role of Conductive Corrosion Products on the Protectiveness of Corrosion Layers. NACE International.
117. Dugstad, A., 2015. Fundamental Aspects of CO₂ Metal Loss Corrosion, Part I: Mechanism. NACE - International Corrosion Conference Series
118. George, K., Wang, S., Netic, S., de Waard, K., 2004. Modeling of CO₂ Corrosion of Mild Steel in the Presence of High Partial Pressures of CO₂ and Acetic Acid - Electrochemical Modeling and a Modification to the de Waard Corrosion Model. NACE International.
119. Schmitt, G., 2015. Fundamental Aspects of CO₂ Metal Loss Corrosion. Part II: Influence of Different Parameters on CO, Corrosion Mechanism. NACE International Corrosion Conference Series.
120. Schmitt, G., Engels, D., 1998. SEM/EDX Analysis of Corrosion Products for Investigations on Metallurgy and Solution Effects in CO₂ Corrosion. NACE International Corrosion Conference Series.
121. Askari M., Aliofkhaezrai M., Afroukhteh S. A comprehensive review on internal corrosion and cracking of oil and gas pipelines. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2019. Vol. 71. P. 102971. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.102971> (date of access: 15.12.2024).
122. Kermani, M.B., Smith, L.M., 1997. CO₂ Corrosion Control in Oil and Gas Production- Design Considerations. European Federation of Corrosion, vol. 23 Institute of Materials, London, UK.

123. De Waard, C., Milliams, D.E., 1975. Carbonic acid corrosion of steel. *Corrosion* 31 (5), 177-181.
124. Ogundele, G.I., White, W.E., 1987. Observations on the influences of dissolved hydro- carbon gases and variable water chemistries on corrosion of an API-L80 steel. *Corrosion* 43 (11), 665-673.
125. Nešić, S., 2007. Key issues related to modelling of internal corrosion of oil and gas pipelines a review. *Corros. Sci.* 49 (12), 4308-4338.
126. Gray, L.G.S., Anderson, B.G., Danysh, M.J., Tremaine, P.R., 1990. Effect of pH and Temperature on the Mechanism of Carbon Steel Corrosion by Aqueous Carbon Dioxide.
127. Brunner, E., Woll, W., 1980. Solubility of Sulfur in Hydrogen Sulfide and Sour Gases. (CAPP), C.A.O.P.P., 2009a. Mitigation of Internal Corrosion in Sour Gas Pipeline Systems. (CAPP), C.A.O.P.P., 2009b. Mitigation of Internal Corrosion in Sweet Gas Gathering Systems.
128. Rippon, I., 2005. Corrosion Management for an Offshore Sour Gas Pipeline System. NACE International.
129. Zheng, S., et al., 2014. Dependence of the abnormal protective property on the corrosion product film formed on H₂S-adjacent API-X52 pipeline steel. *Int. J. Hydrogen Energy* 39 (25), 13919-13925.
130. Sardisco, J.B., Pitts, R.E., 1965a. Corrosion of iron in an H₂S-CO₂-H₂O system composition and protectiveness of the sulfide film as a function of pH. *Corrosion* 21 (11), 350-354.
131. Sardisco, J.B., Pitts, R.E., 1965b. Corrosion of iron in an H₂S-CO₂-H₂O system mechanism of sulfide film formation and kinetics of corrosion reaction. *Corrosion* 21 (8), 245-253.
132. Sardisco, J.B., Wright, W.B., Greco, E.C., 1963. Corrosion of iron in on H₂S-CO₂-H₂O system: corrosion film properties on pure iron. *Corrosion* 19 (10), 354t-359t.

133. Shil, F., et al., 2016. Polymorphous FeS corrosion products of pipeline steel under highly sour conditions. *Corros. Sci.* 102, 103-113.
134. Svenningsen, G., Palencsár, A., Kvarekvå, J., 2009. Investigation of Iron Sulfide Surface
135. Abayarathna, D., Naraghi, A., Obeyesekere, N., 2003. Inhibition of Corrosion of Carbon Steel in the Presence of CO₂, H₂S and S. NACE International.

ДОДАТОК А

Бібліографічний огляд за напрямками дослідження

Таблиця А.2 – Огляд найбільш цитованих публікацій в науково-метричній базі Scopus за напрямками дослідження

Назва публікації та кількість цитувань	Короткий підсумок
<i>Напрямок дослідження №1 - Оцінка якості природного газу</i>	
«Hydrogen production for energy: An overview» [36*] Кількість цитувань - 1796 Рік – 2020	Автори проаналізували шляхи виробництва водню та пов'язані технології, підкресливши їхню залежність від типу енергії, сировини та кінцевої чистоти водню. Запропоновано інноваційний підхід до оцінки екологічності водню через індекс чистоти, який враховує чистоту джерел енергії, використаних для його виробництва.
«Optical gas sensing: A review» [37*] Кількість цитувань – 1360 Рік - 2013	У статті проведено огляд методів детекції та вимірювання концентрацій газів на основі їхньої оптичної абсорбції, зокрема таких технологій, як недисперсійна інфрачервона спектроскопія, спектрофотометрія, спектроскопія з використанням лазерів із змінною довжиною хвилі та фотоакустична спектроскопія.
<i>Напрямок дослідження №2 - Біометан в газових мережах</i>	
«Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: A proposed protocol for batch assays» [38*] Кількість цитувань - 1557 Рік - 2009	Автори акцентують увагу на важливості розробки протоколу для визначення метанового потенціалу твердих органічних субстратів, що є ключовим параметром для проектування та економічної оцінки біогазових установок. Представлено рекомендації для проведення тестів на біометановий потенціал.
«Techniques for transformation of biogas to biomethane» [39*] Кількість цитувань – 1085 Рік - 2011	Автори описують різні методи очищення біогазу, включаючи видалення водяної пари, сірководню та інших домішок, а також методи розділення метану і CO ₂ , такі як адсорбція, мембранне розділення та хімічна абсорбція. Представлено переваги, обмеження та технічні вимоги кожного з підходів.
«Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives» [40*] Кількість цитувань - 976 Рік - 2018	Автори детально описують принципи різних методів модернізації біогазу, аналізують їх ефективність, обговорюють технічні виклики для подальшого вдосконалення, а також оцінюють доцільність і стимули для впровадження цих технологій.
<i>Напрямок дослідження №3 - ІВС моніторингу газових мереж</i>	
«Survey on Unmanned Aerial Vehicle Networks for Civil Applications: A Communications Viewpoint» [41*] Кількість цитувань – 1083 Рік - 2016	Автори аналізують вимоги до якості обслуговування безпілотних літальних апаратів, параметри місій, мережеву передачу даних і ключові аспекти, такі як підключення, адаптивність, безпека, конфіденційність та масштабованість.
«Energy efficiency in wireless sensor networks: A top-down survey» [42*] Кількість цитувань – 785	Автори аналізують вимоги до застосувань безпроводних сенсорних мереж та пропонують нову класифікацію енергозберігаючих схем. Також розглянуто компроміси між вимогами додатків та розширенням часу роботи мережі

Рік - 2014	
«An introduction to distributed optical fibre sensors» [43*] Кількість цитувань – 723 Рік - 2017	Детально розглянуто принципи роботи, переваги, класифікацію, методи впровадження та критерії ефективності розподілених волоконно-оптичних сенсорів. Представлено їхнє застосування в промисловості, включаючи моніторинг нафтовидобування, ліній електропередач, екологічний контроль та виявлення пожеж.

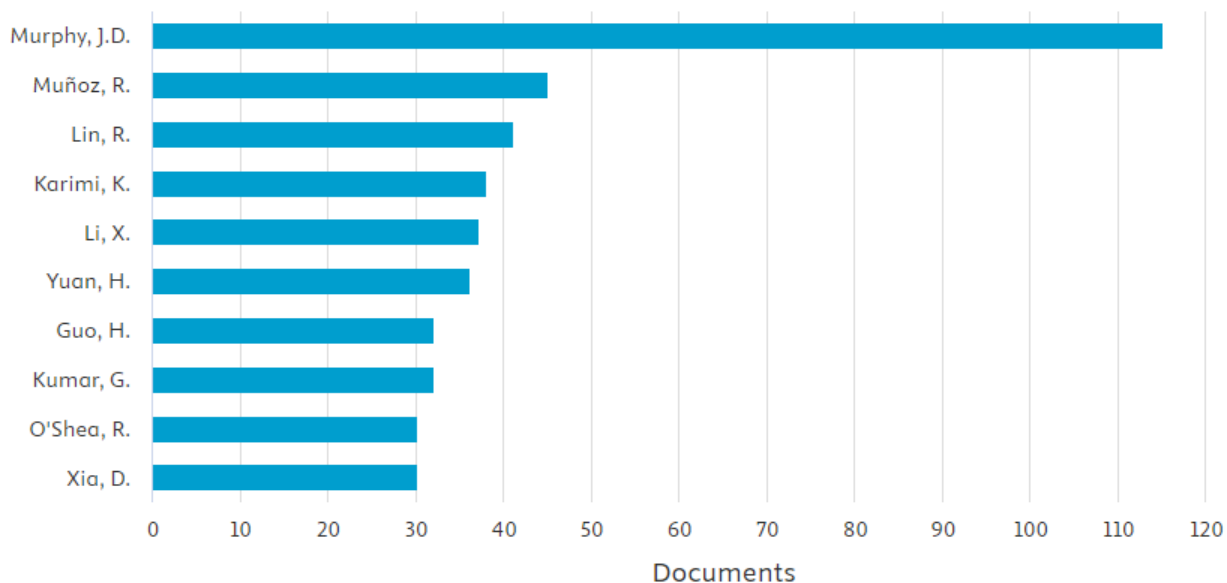


Рисунок А.1 – Публікації за авторами в кластері №2

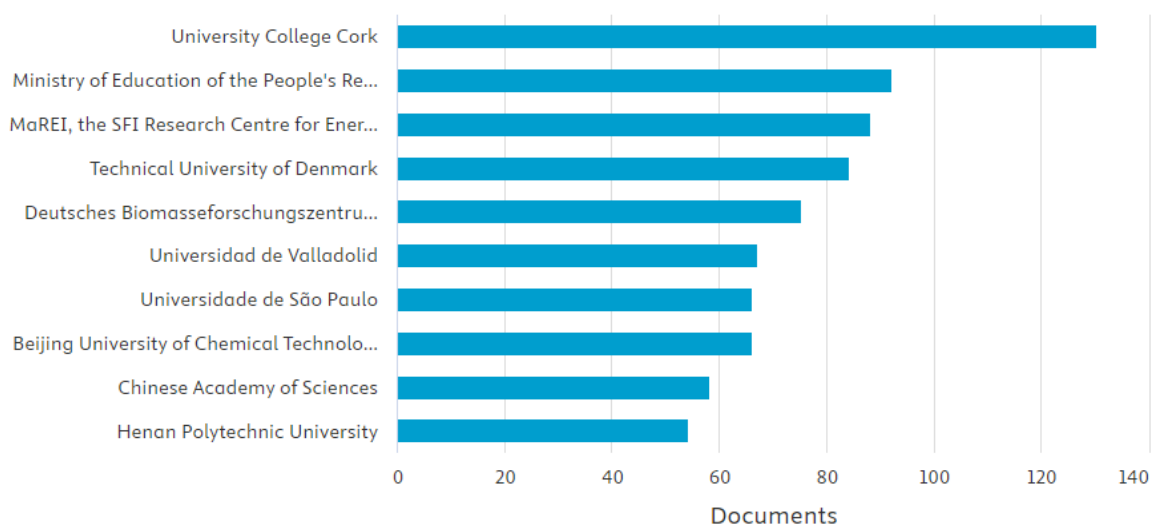


Рисунок А.2 – Публікації за науковими установами в кластері №2

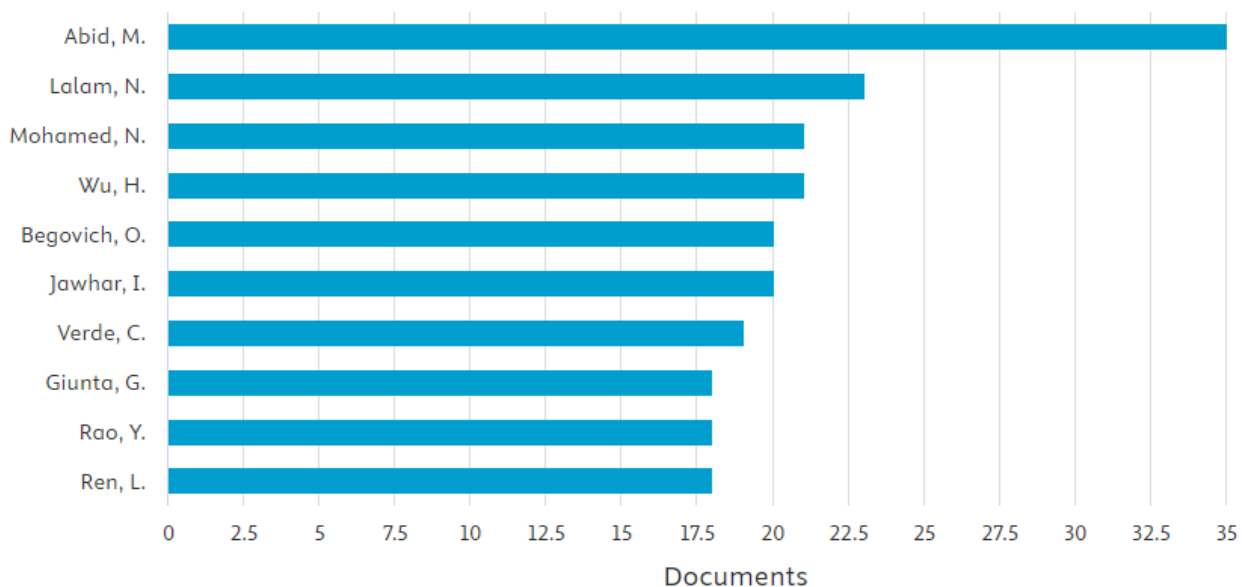


Рисунок А.3 – Публікації за авторами в кластері №3

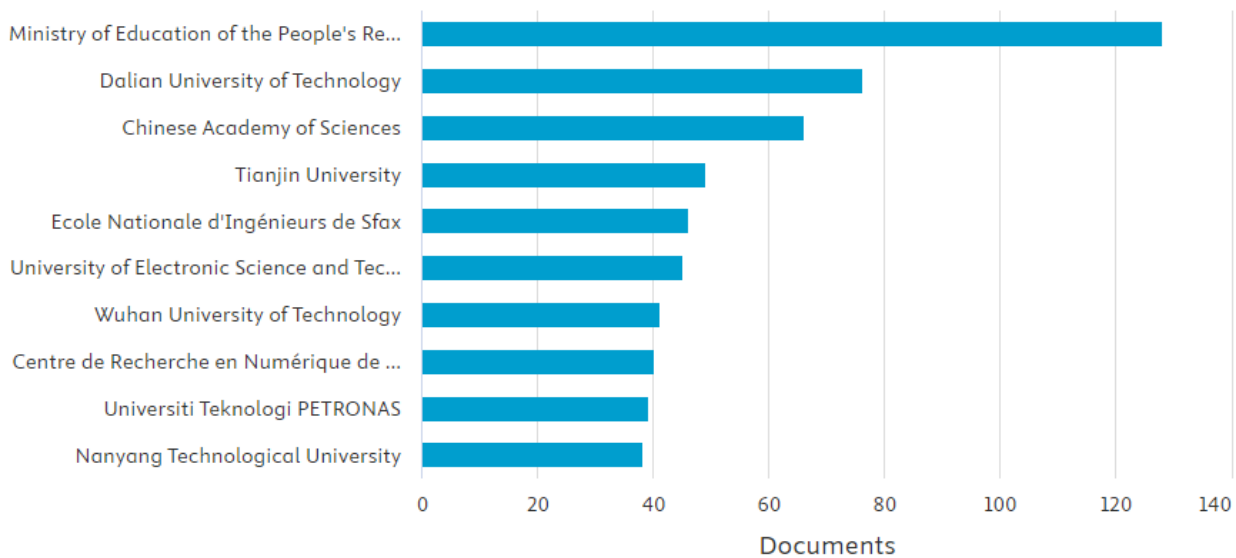


Рисунок А.4 – Публікації за науковими установами в кластері №3

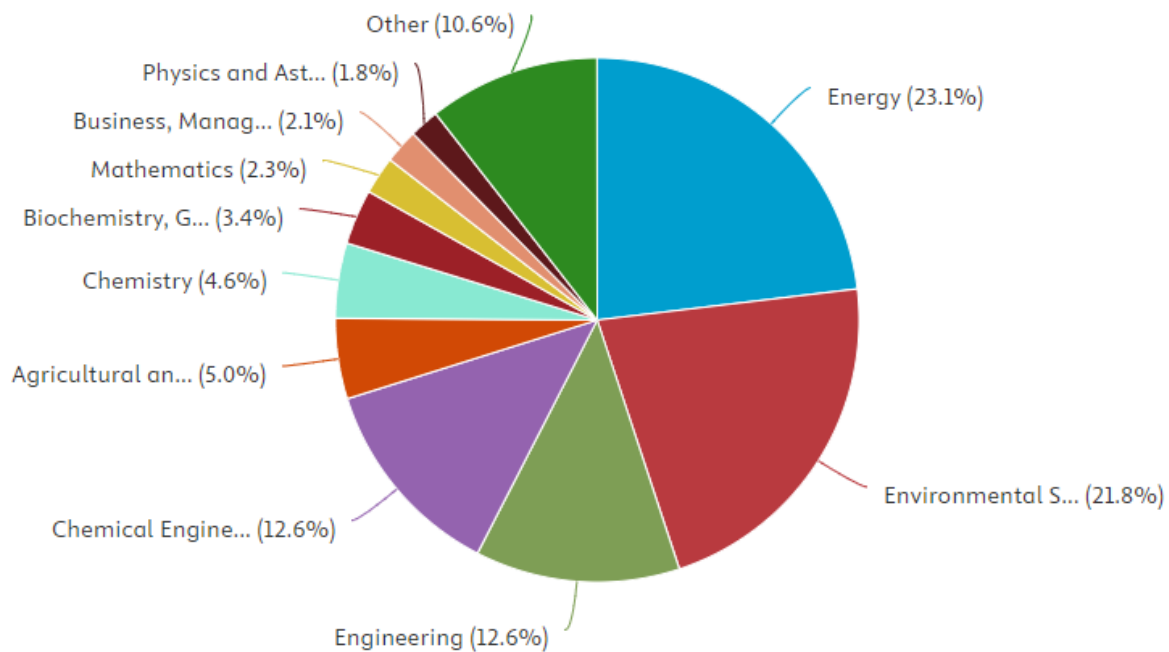


Рисунок А.5– Публікації за сферою дослідження в кластері №2

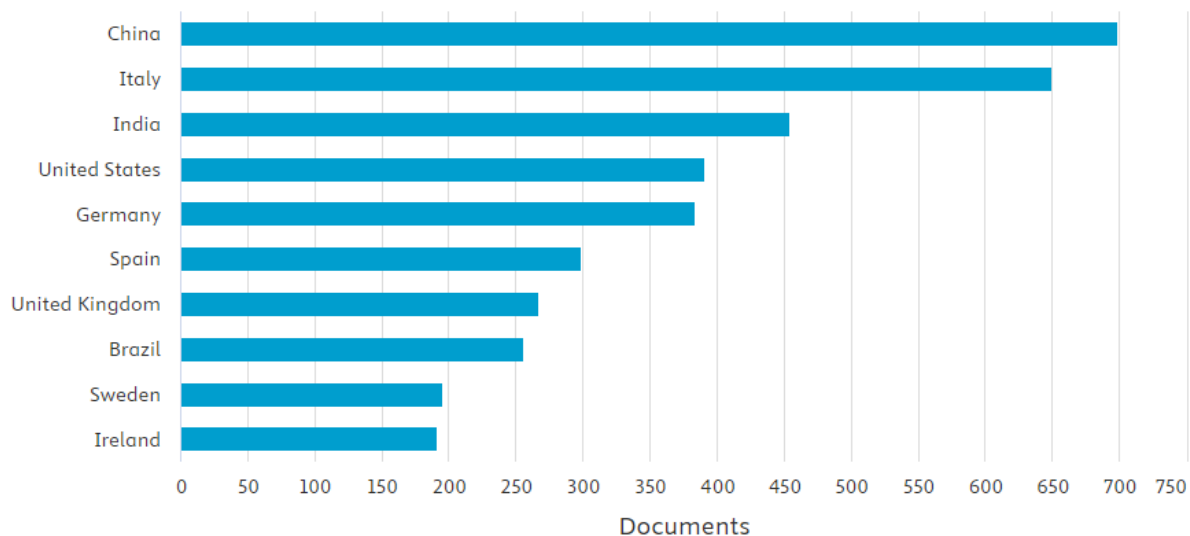


Рисунок А.6 – Публікації за країнами в кластері №2

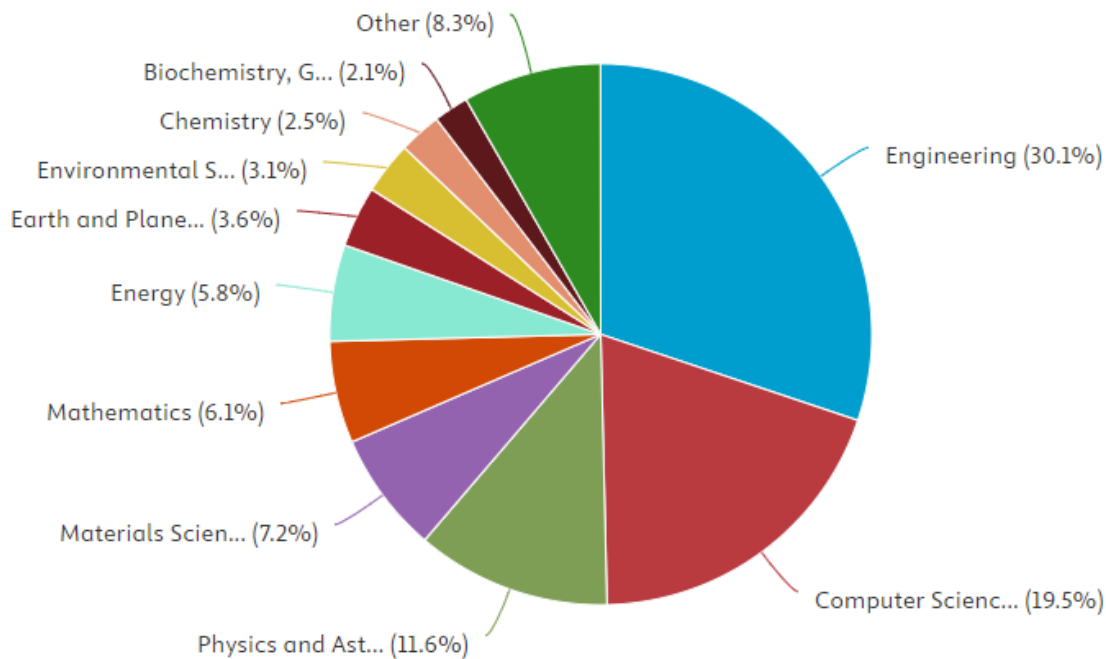


Рисунок А.7 – Публікації за сферою дослідження в кластері №3

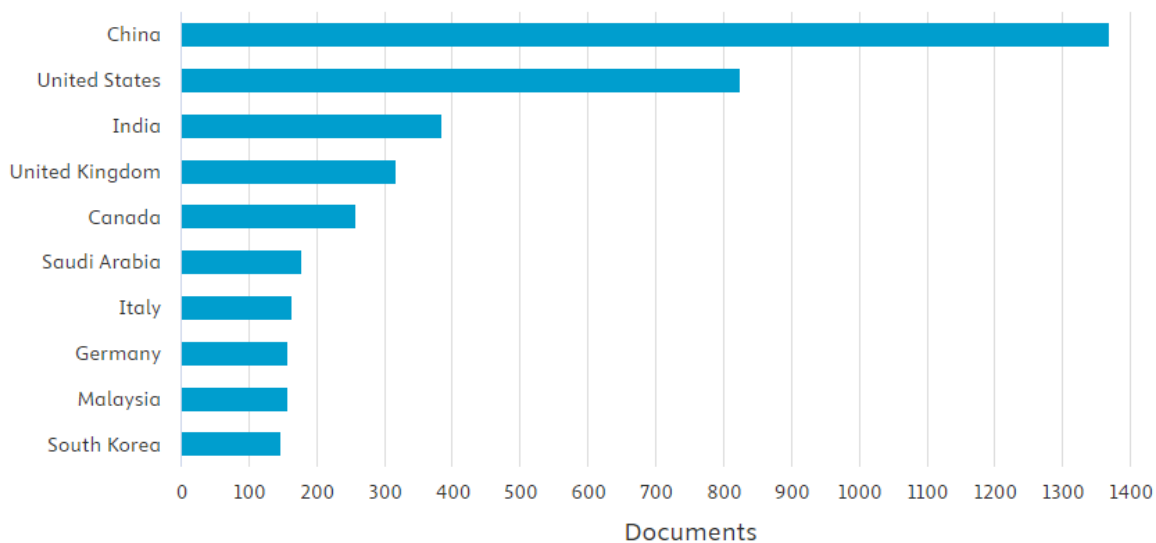


Рисунок А.8 – Публікації за країнами в кластері №3

ДОДАТОК Б

Аналіз мережевої візуалізації цитувань за трьома ключовими напрямками досліджень

Аналізуючи мережеву візуалізацію цитувань за темою "Оцінка якості природного газу" (рисунок 1.15), виділено такі основні кластери, які відображають основні напрямки досліджень:

1. Домінування природного газу (синій кластер). Найбільший за розміром кластер, що свідчить про найбільшу кількість досліджень, присвячених тематиці природного газу. Основні зв'язки цього кластеру встановлені з темами транспортування ("natural gas transportation"), трубопроводів ("natural gas pipelines") і якості природного газу ("quality control"), що підкреслює важливість цієї теми для енергетичних досліджень.
2. Біогаз та діоксид вуглецю (зелений кластер). Дослідження цього кластеру зосереджені на проблематиці екологічної сталості, зокрема на питаннях зменшення викидів CO₂ ("carbon dioxide"), інтеграції біогазу ("biogas") та його модернізації ("biogas upgrading"). Помітна взаємодія з червоним кластером (ВДЕ), що свідчить про інтеграцію біогазових технологій у відновлювані джерела енергії.
3. Кластер колорійності (фіолетовий). Менший за розміром кластер, пов'язаний з дослідженням енергетичної цінності газів ("calorific value"). Міцні зв'язки з коричневим кластером (якість газу) свідчать про тісний зв'язок між цими тематиками.
4. Водень та ВДЕ (червоний кластер). Другий за важливістю кластер після природного газу. Зростаючий інтерес до водню ("hydrogen blending," "hydrogen injection") та його ролі у відновлюваних джерелах енергії ("renewable energy sources"). Відзначено численні зв'язки з іншими кластерами, що демонструє багатогранність використання водню.

5. Якість газу (коричневий кластер). Дослідження зосереджені на методах оцінки та стандартизації газу для комерційного використання ("uncertainty analysis," "custody transfer"). Має зв'язок з технологіями вимірювання, зокрема газовою хроматографією (рожевий кластер).
6. Атомно-емісійна спектроскопія (жовтий кластер). Специфічна область досліджень, орієнтована на аналіз складу газів ("atomic emission spectroscopy"). Має менше зв'язків з іншими кластерами, що свідчить про її вузьку спеціалізацію.
7. Експериментальні дослідження (оранжевий кластер). Фокусується на практичних аспектах тестування газових технологій ("experimental study," "mean square error"). Має тісний зв'язок із кластером газової хроматографії, що підтверджує використання цих методів у дослідженнях.
8. Газова хроматографія (рожевий кластер). Присвячена вдосконаленню методів аналізу газових сумішей ("gas chromatography"). Має сильні зв'язки з кластером якості газу, що вказує на практичну орієнтацію цих досліджень.

Також проведено аналіз мережевої візуалізації цитувань статей за темою оцінки якості природного газу за хронологією. Результати на рисунку 1.16. Вони показують, що десять років тому (2014-2016) найбільша увага була зосереджена на хроматографічних методах аналізу природного газу, які використовувалися для детального визначення його складу та фізико-хімічних властивостей. Важливими напрямками були також дослідження калорійності газу, визначення вмісту домішок, таких як сірководень та вуглекислий газ, а також питання, пов'язані з транспортуванням та розподілом природного газу через газопроводи. Це свідчить про переважну увагу до традиційних методів вимірювання та контролю якості газу, що відповідають вимогам промислового використання.

З 2020 року спостерігається зміщення фокусу досліджень у напрямку декарбонізації енергетичних систем, зокрема через зниження викидів вуглекислого газу та інтеграцію відновлюваних джерел енергії. Останні тенденції також показують зростаючий інтерес до технологій закачування водню в газові мережі, що стало важливою частиною розвитку зеленої енергетики. Інноваційні методи контролю якості природного газу, включаючи ультразвукові та оптичні технології, набирають популярності, що свідчить про тенденцію до більш точних та ефективних систем моніторингу.

Біометан активно досліджується як заміна природному газу з метою зменшення викидів CO₂ та переходу до сталого розвитку. Аналізуючи мережеву візуалізацію цитувань за темою "Біометан в газових мережах" (рисунок Б.1), виділено такі основні кластери:

1. Біометан та анаеробне зброджування (зелений кластер). Основний і найбільший кластер, що зосереджується на процесах анаеробного зброджування, виробництві біометану та його застосуванні. Ключові терміни включають "biomethane," "anaerobic digestion," "methane," "biogas upgrading," що вказує на активне дослідження технологій виробництва та підвищення якості біометану.

2. Біореактори та мікробіологічні процеси (червоний кластер). Фокус на мікробіологічних аспектах виробництва біогазу, таких як "methanogenesis," "bacteria," "bioreactors," та "fermentation". Свідчить про зацікавленість у вдосконаленні біореакторів для підвищення ефективності зброджування органічних матеріалів.

3. Біомаса та біоенергія (синій кластер). Кластер зосереджується на переробці біомаси, зокрема "biomass," "cellulose," "hydrolysis," "biofuel". Показує інтеграцію біометанових технологій у ширший контекст виробництва біоенергії.

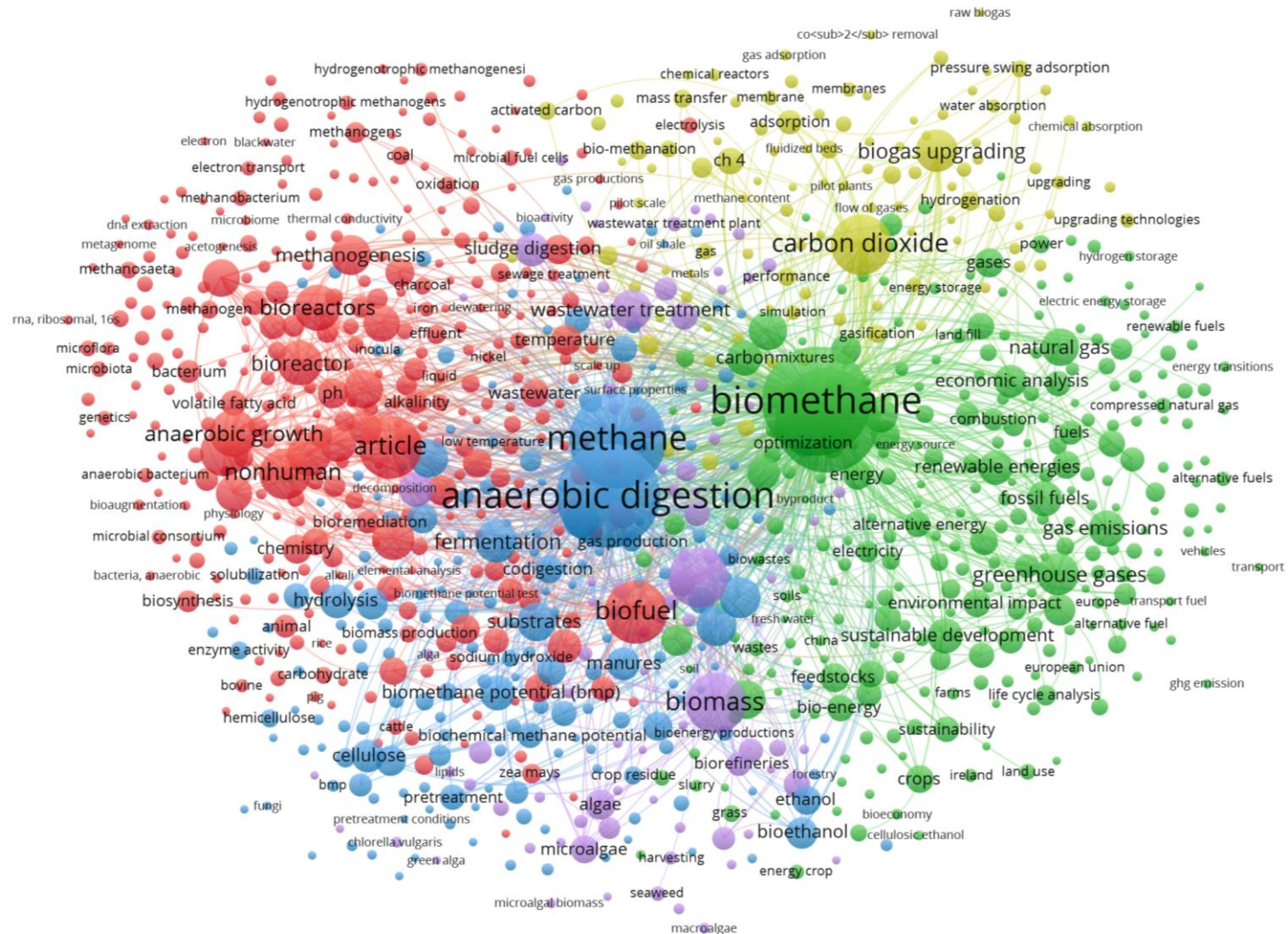


Рисунок Б.1 – Мережева візуалізація цитувань статей по напрямку дослідження №2 (біометан в газових мережах), реалізована за допомогою VOSviewer

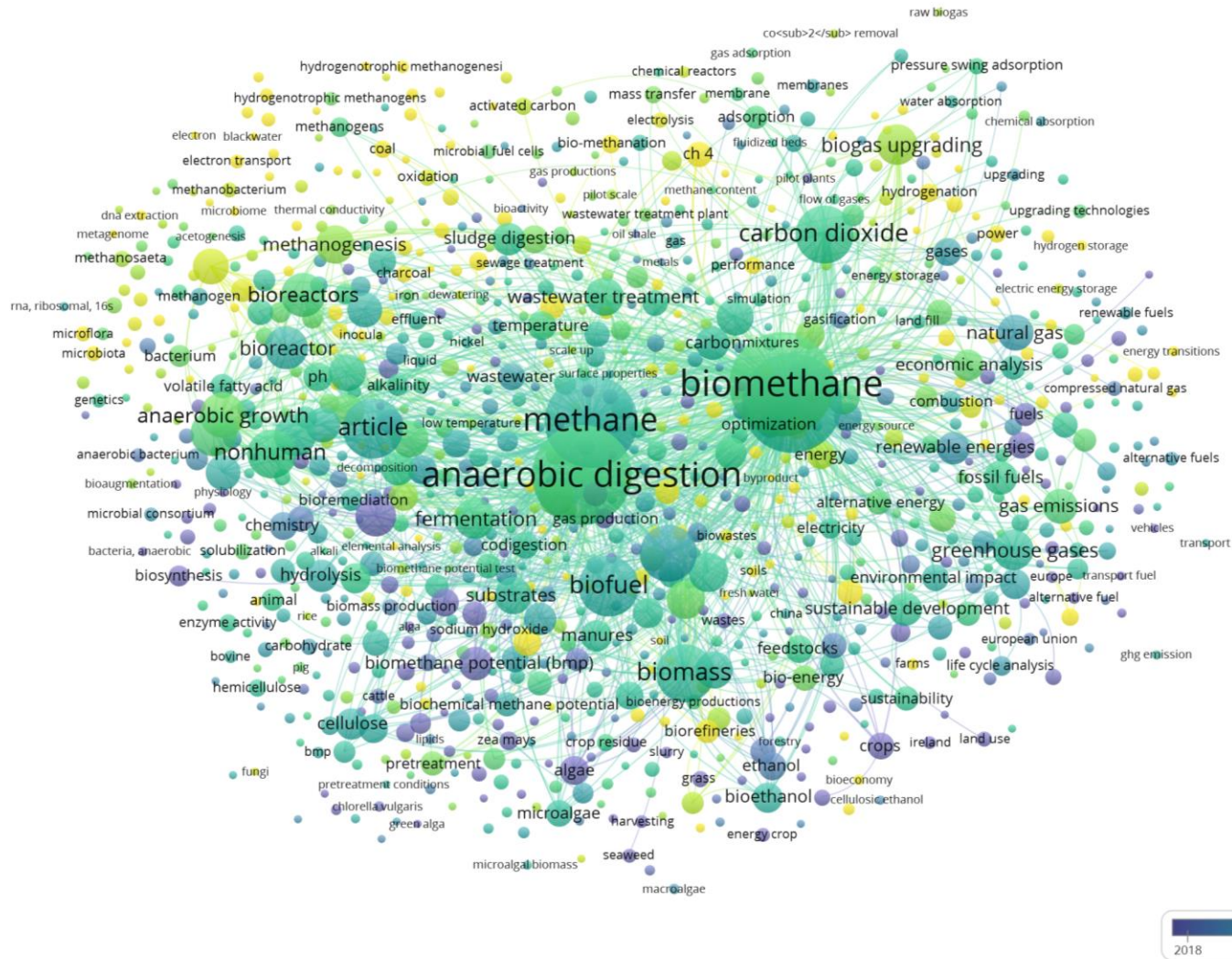


Рисунок Б.2 – Мережева візуалізація цитувань статей по напрямку дослідження №2 (біометан в газових мережах) в хронологічному, реалізована за допомогою VOSviewer

4. Економічні та екологічні аспекти (жовтий кластер). Орієнтований на аналіз впливу біометану на довкілля та економіку. Основні терміни: "economic analysis," "greenhouse gases," "sustainability," "renewable energies." Свідчить про зростаючий інтерес до біометану як до засобу зменшення викидів парникових газів.

5. Технології очищення та модернізації біогазу (фіолетовий кластер). Ключові аспекти включають "gas upgrading," "pressure swing adsorption," "chemical absorption." Демонструє важливість розробки методів для очищення біогазу до рівня, придатного для ін'єкції в газові мережі.

Аналіз хронологічної мережевої візуалізації цитувань статей за напрямком "біометан в газових мережах" (рисунок Б.2) показує, що десять років тому (2012-2015) основними напрямками досліджень були анаеробне зброджування ("anaerobic digestion"), виробництво біометану ("biomethane") та його застосування для зменшення викидів парникових газів ("greenhouse gases"). Значна увага приділялася мікробіологічним аспектам процесу метаногенезу ("methanogenesis"), управлінню біореакторами ("bioreactors") та дослідженню фізико-хімічних властивостей біогазу. У цей період розроблялися базові технології очищення біогазу, включаючи адсорбцію та хімічну абсорбцію, а також впроваджувалися нові підходи до оптимізації процесів зброджування.

Сучасні дослідження (2020-2022) змістили акцент у бік декарбонізації енергетичних систем, інтеграції біометану у природні газові мережі ("natural gas") та його використання як відновлюваного енергетичного ресурсу ("renewable energies"). Зросла увага до економічного аналізу застосування біометану ("economic analysis"), удосконалення технологій модернізації біогазу ("biogas upgrading") та дослідження сталого розвитку ("sustainability"). Останніми тенденціями є розробка рішень для інтеграції біометану у глобальну енергетичну інфраструктуру з урахуванням екологічних та економічних аспектів.

Аналізуючи мережеву візуалізацію цитувань за темою "Інформаційно-вимірвальні системи моніторингу газових мереж" (рисунок Б.3), виділено такі основні кластери, які відображають основні напрямки досліджень:

1. Жовтий кластер: "Моніторинг трубопроводів та виявлення витоків". Ключові слова: "pipelines," "pipeline monitoring," "leak detection". Охоплює дослідження систем контролю трубопроводів, виявлення витоків і методів забезпечення їхньої безпеки.

2. Зелений кластер: "Волоконно-оптичні сенсори для структурного моніторингу". Ключові слова: "fiber optic sensors," "structural health monitoring," "optical fibers." Фокусується на використанні волоконно-оптичних технологій для моніторингу стану трубопроводів, зокрема для виявлення деформацій і дефектів.

3. Червоний кластер: "Безпроводні сенсорні мережі". Ключові слова: "wireless sensor networks," "sensor nodes," "energy efficiency". Присвячено використанню безпроводних мереж для збору даних і енергоефективного моніторингу.

4. Синій кластер: "Системи розподілу води та якість води". Ключові слова: "water distribution systems," "water quality monitoring". Хоча цей кластер може бути суміжним, він показує зв'язок з іншими системами моніторингу, такими як водопостачання, які мають подібні технічні аспекти.

5. Фіолетовий кластер: "Обробка даних та машинне навчання". Ключові слова: "machine learning," "data handling," "signal processing". Зосереджується на використанні алгоритмів машинного навчання для аналізу та обробки даних, зібраних із систем моніторингу.

Аналіз хронологічної мережевої візуалізації за темою "Інформаційно-вимірвальні системи моніторингу газових мереж" (рисунок Б.4) свідчить, що близько 10 років тому (2012–2016) основний акцент досліджень був на моніторингу стану трубопроводів ("pipeline monitoring") та виявленні витоків

("leak detection"). Значна увага приділялася розробці волоконно-оптичних сенсорів ("fiber optic sensors") та їх застосуванню для структурного моніторингу ("structural health monitoring"). Технології того часу були орієнтовані на виявлення дефектів і корозії в газопроводах, а також на забезпечення безпеки транспортних систем.

Сучасні дослідження (2020–2022) зосереджуються на використанні машинного навчання ("machine learning") і обробки даних ("data handling") для оптимізації систем моніторингу. Увага змістилася до інтелектуальних систем, які інтегрують сенсорні мережі ("wireless sensor networks") з алгоритмами глибокого навчання ("deep learning") для автоматичного виявлення витоків і діагностики стану газових мереж. Інновації в галузі оптичних волокон та акустичних сенсорів ("acoustic sensing") сприяють підвищенню точності та надійності моніторингових систем, відповідаючи вимогам сучасних інфраструктур.

ДОДАТОК В

Вимоги до ФХП природного газу [24*, 25*]

Природний газ, що подається в газотранспортну систему, повинен відповідати таким вимогам:

вміст метану (C ₁), мол. %	мінімум	90
вміст етану (C ₂), мол. %	максимум	7
вміст пропану (C ₃), мол. %	максимум	3
вміст бутану (C ₄), мол. %	максимум	2
вміст пентану та інших більш важких вуглеводнів (C ₅₊), мол. %	максимум	1
вміст азоту (N ₂), мол. %	максимум	5
вміст вуглецю (CO ₂), мол. %	максимум	2
вміст кисню (O ₂), мол. %	максимум	0,2 (для ГТС) та 1 (для ГРМ)
вища теплота згоряння (25 °C/20 °C)	мінімум	36,20 МДж/м ³ (10,06 кВт·год/м ³)
	максимум	38,30 МДж/м ³ (10,64 кВт·год/м ³)
вища теплота згоряння (25 °C/0 °C)	мінімум	38,85 МДж/м ³ (10,80 кВт·год/м ³)
	максимум	41,10 МДж/м ³ (11,42 кВт·год/м ³)
нижча теплота згоряння (25 °C/20 °C)	мінімум	32,66 МДж/м ³ (09,07 кВт·год/м ³)
	максимум	34,54 МДж/м ³ (09,59 кВт·год/м ³)
температура точки роси за вологою °C	при абсолютному тиску газу 3,92 МПа	не перевищує мінус 8 (-8)
температура точки роси за вуглеводнями	при температурі газу не нижче 0 °C	не перевищує 0 °C
вміст механічних домішок:		відсутні
вміст сірководню, г/м ³	максимум	0,006
вміст меркаптанової сірки, г/м ³	максимум	0,02 (для ГТС) та 1 (для ГРМ)

ДОДАТОК Д

Огляд енергетичного законодавства України та ЄС в розрізі врахування природного газу, як енергетичного продукту

За останнє десятиліття енергетичний сектор України зазнав значного стрибку в розвитку до норм та стандартів ЄС. Каталізатором такого стрибку стало членство України в Енергетичному Співтоваристві (ЕнС) з 2011 року [57*]. Враховуючи, що метою ЕнС є створення єдиного енергетичного ринку [1], з цього часу почалися інтеграційні процеси реформування українського законодавства, так як спільні ринкові відносини не можливі без врегульованих стандартів та норм.

Цілі ЕнС виконуються через дотримання країнами-члени низки законодавчих документів про енергетичний ринок ЄС, відомих як третій енергетичний пакет. Цей пакет набув чинності у вересні 2009 р. та охоплює наступні п'ять областей [2]:

- відокремлення енергопостачання та виробництва від експлуатації мереж передачі,
- функціонування внутрішнього енергетичного ринку держав з незалежними регуляторами
- функціонування агентств з питань співпраці енергетичних регуляторів для допомоги різним національним регуляторним органам співпрацювати та забезпечити безперебійне функціонування внутрішнього енергетичного ринку
- транскордонне співробітництво для забезпечення оптимального управління мережами ЄС;
- та відкриті та справедливі роздрібні ринки (право вибору або заміни постачальника без додаткової плати, отримання інформації про споживання енергії та швидке та дешеве вирішення суперечок).

Впровадження Третього енергетичного пакету

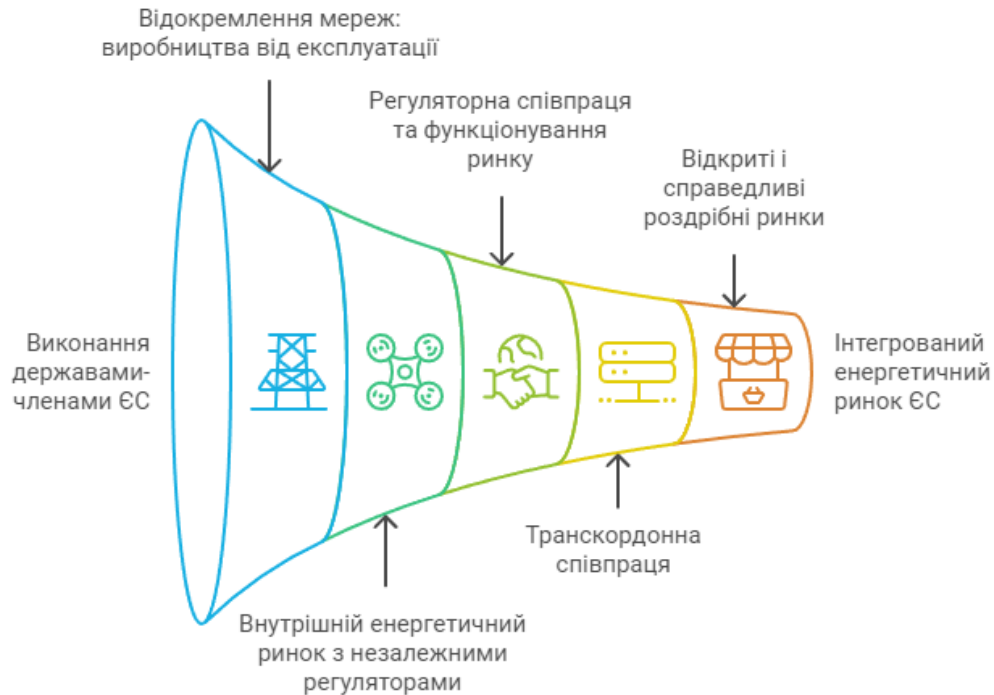


Рисунок В.1 – Області впливу третього енергопакету

Виконання цих цілей забезпечується трьома регламентами та двома директивами ЄС. Подані на рисунку В.2.

Ці документи мають різний статус гармонізації країн-учасниць ЄС (у тому числі й країн з асоційованим членством). Директиви потребують процесу імплементації в кожній країні-учасниці ЄС через форми та методи, які країна обирає самостійно керуючись національним законодавством [3]. Тобто для України визначальним є не самі директиви, а акти національного законодавства, що імплемнтують ці директиви. В той же час, на відміну від директив, регламенти не потребують додаткових актів на рівні національного законодавства, а адресовані усім країнам-учасницям Європейського Союзу, що робить їх дію схожими на національне законодавство.



Рисунок В.2 – Правова основа енергетичного ринку ЄС до 2019 року

В 2019 році в ЄС набув чинності вже наступний енергопакет законодавства «Чиста енергія для всіх європейців». Його ключовими напрямками є: відновлювальна енергетика (досягнути частки у розмірі 32% для ВДЕ в енергетичному міксі ЄС до 2030 року), енергоефективність (посилити енергоефективність щонайменше на 32,5% до 2030 року), клімат (досягнення статусу кліматично-нейтральної Європи до 2050 року, тобто такої, що не впливає на зміну клімату), дизайн ринку електроенергії (адаптованого до нових реалій) та координація дій щодо досягнення цілей Енергетичного союзу [4]. З такою новою енергетичною політикою ЄС два регламенти третього енергопакету переглянуті вже в іншому ракурсі, Директива про електроенергетику (2009/72 / ЄС) залишатиметься чинною лише до кінця 2020 року. Проте для ринків природного газу все ще застосовується третій енергетичний пакет (Директива 2009/73/ЄС [5]). На рисунку В.3 наведений аналіз одновних ідей, що стосуються цієї директиви.



Рисунок В.3 – Основні ідеї директиви, що регламентує внутрішній ринок природного газу

Імплементация директив третього енергопакету в секторі природного газу на національному рівні українського законодавства почалася з:

- введенням в дію ДСТУ ISO 15112:2009 [58*] та інших нормативних документів (до прикладу Постанови НКРЕКП №2498 [59*]);
- прийняттям двох базових ЗУ «Про ринок електричної енергії» [60*] та «Про ринок природного газу» [61*].

Таке законодавче поле створило підґрунтя для впровадження низки нових обов'язкових умов на ринку природного газу України. Однією з яких є розгляд природного газу, як енергетичного товару.

Тобто прийняті Україною законодавчі акти в газовому секторі є гармонізованими із сучасною політикою ЄС, а робота в напрямку реформування цього напрямку в нашій країні актуальна. Тому для дієздатності повноцінного українського ринку газу обов'язковою умовою є перегляд сталих методів та способів метрологічної оцінки газу в процесі торгівлі між споживачами та операторами ГТС. Основним напрямком нового такого підходу має стати розгляд природного газу, як енергетичного товару. Тобто не лише оцінювати параметри об'єму цього ресурсу, а й враховувати його якісні показники. Це дасть можливість запровадити на ринку природного газу України розрахунок за спожитий чи переданий газ в енергетичних одиницях.

ДОДАТОК Е

Особливості керування мережею ГТС та ГРМ

При певному стані системи, якому відповідає деяка схема транспортування та розподілу енергоресурсу і вимірних параметрах експлуатації мережі проводиться визначення і підтримка найбільш оптимального режиму роботи газотранспортної системи шляхом керуванням зміною режиму роботи системи газопроводів оператором. Основний метод управління газотранспортною мережею за допомогою запірної арматури вибудувати потоки газу, регулюючими пристроями на ГРС задати необхідні обсяги і тиск для поставок газу споживачам, розрахувати необхідні потужності компресорних станцій (КС) і задати потрібні параметри (режими) роботи газоперекачувальних агрегатів (ГПА) [15]. Комплекс даних установок є режимом роботи ГТС. Ключовими показниками роботи ГТС є обсяги одержуваного і переданого газу, втрати газу (паливний газ), зміна запасу газу в трубі, а також (за наявності) відбір газу з підземного сховища газу (ПСГ) або закачування газу в ПСГ.

Подальше регулювання потоків газу можна проводити шляхом скоординованого поєднання пасивного і активного впливів на ГТС:

1. Пасивне управління зміна потоків газу за допомогою запірної арматури лінійної частини. Дозволяє або зупинити транспорт і "стравити" ділянку газопроводу, або спрямувати потік газу за іншим напрямком.

2. Активне управління збільшення або скорочення подачі газу споживачам, закачування / відбору газу в / із ПСГ, режими роботи ГПА на компресорних станціях. В якості активних об'єктів управління можна також розглядати ГРС (збільшення або скорочення подачі газу з ГТС) і вузли редукування газу, що зменшують тиск при подачі газу з газопроводу з великим тиском в газопровід з меншим.

Умовно можна виділити такі кроки в процесі управління [15]:

1. Початковий крок збір або оцінка заявок на поставку газу і планування виробничої програми роботи компанії загалом і ГТО - план транспорту газу. Це, безумовно, завдання управління потоками газу, що забезпечує виконання контрактних зобов'язань.

2. На основі плану розробляються режими, або технологічні карти роботи обладнання з метою виконання плану за бажаної мінімізації витрат по паливному газу. Це технологічне планування. Віддаються команди і розпорядження, здійснюється спостереження за процесами. Надалі до процесу роботи підключається персонал операційних і диспетчерських філій компанії, що відповідають за роботу обладнання і виходу КС і інших систем на задані режими.

3. Далі можуть виникнути можливі "обурення" і відхилення від плану транспорту газу і розрахованого початкового режиму роботи обладнання. Перш за все, це зміни в споживанні газу, викликані економічними або погодними причинами. В результаті з'являється надлишок або нестача природного газу. По-друге, це техногенні причини можливі аварії або заплановані ремонтні роботи. Для виявлення відхилення режиму по ГТС загалом використовуються оперативні (технологічні) баланси газу, які будуть розглянуті далі.

4. Відхилення від заданого стабільного режиму роботи вимагають оцінити ситуацію і приймати рішення як зі зміни графіка поставок і по потоках газу, так і стосовно роботи технологічного обладнання (наприклад, локалізація аварії, відключення ділянки і т. д.).

5. З технологічної частини, і за "поставками" необхідно складати звітні документи. Найважливішою частиною звітів є баланс газу по підприємству. На відміну від оперативного балансу, він складається за підсумками місяця на основі перевірених показників і служить, в тому числі, для комерційних розрахунків.

ДОДАТОК Ж

Дослідження похибки оцінки якості газотранспортною організацією

Таблиця Ж.1 – Таблиця значень похибок для побудови гістограми розподілу

Frequency table: Var1 (Spreadsheet1)										
K-S d=.18967, p<.01 ; Lilliefors p<.01										
Shapiro-Wilk W=.83036, p=.00000										
Category	Count	Cumulative Count	Percent of Valid	Cumul % of Valid	% of all Cases	Cumulative % of All	Expected Count	Cumulative Expected	Percent Expected	Cumulative % Expected
-300,000<x<=-280,000	1	1	0,78740	0,7874	0,78740	0,7874	0,00000	0,0000	0,00000	0,00000
-280,000<x<=-260,000	0	1	0,00000	0,7874	0,00000	0,7874	0,00001	0,0000	0,00001	0,00001
-260,000<x<=-240,000	0	1	0,00000	0,7874	0,00000	0,7874	0,00009	0,0001	0,00007	0,00008
-240,000<x<=-220,000	0	1	0,00000	0,7874	0,00000	0,7874	0,00060	0,0007	0,00047	0,00055
-220,000<x<=-200,000	1	2	0,78740	1,5748	0,78740	1,5748	0,00349	0,0042	0,00275	0,00330
-200,000<x<=-180,000	0	2	0,00000	1,5748	0,00000	1,5748	0,01729	0,0215	0,01362	0,01692
-180,000<x<=-160,000	0	2	0,00000	1,5748	0,00000	1,5748	0,07276	0,0942	0,05729	0,07421
-160,000<x<=-140,000	1	3	0,78740	2,3622	0,78740	2,3622	0,26009	0,3543	0,20479	0,27900
-140,000<x<=-120,000	0	3	0,00000	2,3622	0,00000	2,3622	0,78988	1,1442	0,62195	0,90095
-120,000<x<=-100,000	2	5	1,57480	3,9370	1,57480	3,9370	2,03823	3,1824	1,60490	2,50586
-100,000<x<=-80,000	2	7	1,57480	5,5118	1,57480	5,5118	4,46899	7,6514	3,51889	6,02475
-80,000<x<=-60,000	4	11	3,14961	8,6614	3,14961	8,6614	8,32610	15,9775	6,55599	12,58073
-60,000<x<=-40,000	3	14	2,36220	11,0236	2,36220	11,0236	13,18135	29,1589	10,37901	22,95975
-40,000<x<=-20,000	12	26	9,44882	20,4724	9,44882	20,4724	17,73254	46,8914	13,96263	36,92238
-20,000<x<=0,00000	39	65	30,70866	51,1811	30,70866	51,1811	20,27121	67,1626	15,96158	52,88396
0,00000<x<=20,00000	33	98	25,98425	77,1654	25,98425	77,1654	19,69194	86,8546	15,50546	68,38942
20,00000<x<=40,00000	11	109	8,66142	85,8268	8,66142	85,8268	16,25536	103,1099	12,79950	81,18892
40,00000<x<=60,00000	11	120	8,66142	94,4882	8,66142	94,4882	11,40253	114,5125	8,97837	90,16729
60,00000<x<=80,00000	5	125	3,93701	98,4252	3,93701	98,4252	6,79667	121,3091	5,35171	95,51900
80,00000<x<=100,00000	1	126	0,78740	99,2126	0,78740	99,2126	3,44250	124,7516	2,71063	98,22963
100,00000<x<=120,00000	0	126	0,00000	99,2126	0,00000	99,2126	1,48158	126,2332	1,16659	99,39623
120,00000<x<=140,00000	0	126	0,00000	99,2126	0,00000	99,2126	0,54179	126,7750	0,42661	99,82284
140,00000<x<=160,00000	1	127	0,78740	100,0000	0,78740	100,0000	0,16834	126,9433	0,13255	99,95539
Missing	0	127	0,00000		0,00000	100,0000				

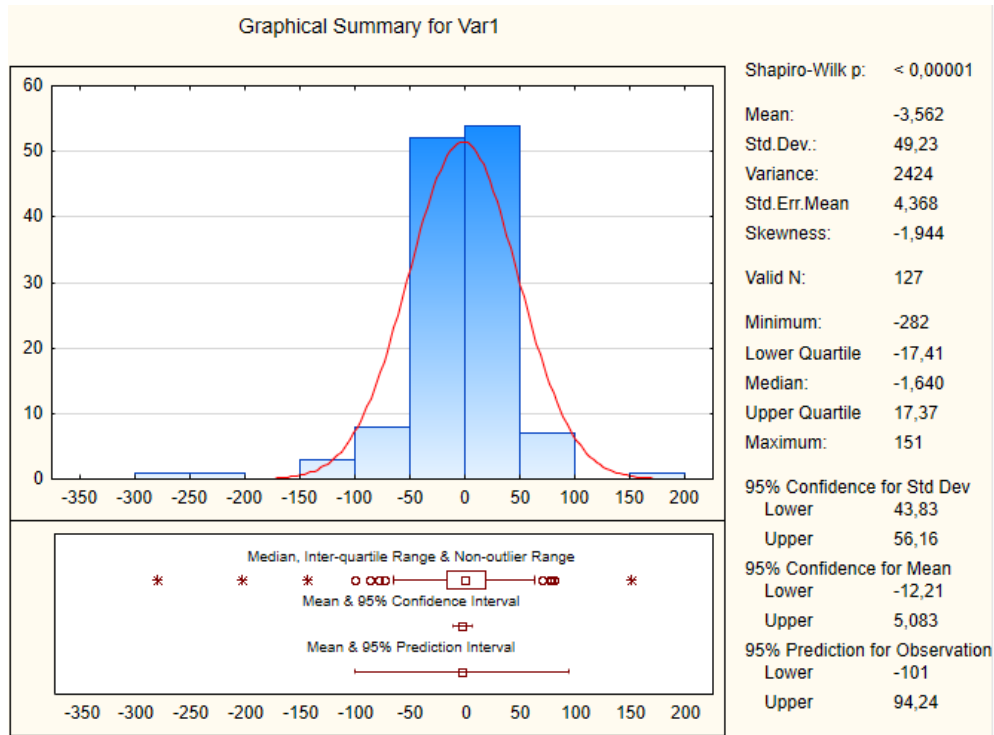


Рисунок Ж.1 – Підсумкові дані статистичної оцінки похибки вимірювання газотранспортною організацією

ДОДАТОК 3

База зразків природного газу, на основі якої розроблено методи оцінки якості природного газу

№ зразку	Компонентний склад, % мол.												Фізико-хімічні показники газу обчислені на основі компонентного складу, 101,325 кПа												
	метан, С1	етан, С2	пропан, С3	ізо-бутан, і-С4	н-бутан, н-С4	нео-пентан, нео-С5	ізо-пентан, і-С5	н-пентан, н-С5	гексани та вищі, С6+	кисень, О2	азот, N2	діоксид вуглецю, СО2	Густина абсолютна, кг/м3, при 20 °С	Температура вимірювання/згоряння при 20/25°С											
														Теплота згоряння нижча			Теплота згоряння вища			Число Воббе нище			Число Воббе вище		
														ккал/м3	МДж/м3	кВт-год/м3	ккал/м3	МДж/м3	кВт-год/м3	ккал/м3	МДж/м3	кВт-год/м3	ккал/м3	МДж/м3	кВт-год/м3
1	77.7329	13.3610	3.0030	0.1840	0.3080	0.0005	0.0328	0.0268	0.0143	0.0037	1.5690	3.7640	0.8443	8 880	37.18	10.33	9 802	41.04	11.40	10 607	44.41	12.34	11 708	49.02	13.62
2	87.2808	5.9262	3.0725	0.3772	0.6864	0.0066	0.1469	0.1268	0.1410	0.0043	1.7217	0.5096	0.7831	8 869	37.13	10.31	9 804	41.05	11.40	10 998	46.05	12.79	12 159	50.91	14.14
3	87.4280	5.8992	2.9901	0.3631	0.6514	0.0062	0.1331	0.1161	0.1780	0.0041	1.7088	0.5220	0.7817	8 853	37.07	10.30	9 788	40.98	11.38	10 989	46.01	12.78	12 149	50.87	14.13
4	87.5563	5.8979	2.9478	0.3545	0.6353	0.0061	0.1340	0.1189	0.1865	0.0039	1.6401	0.5188	0.7807	8 852	37.06	10.30	9 787	40.98	11.38	10 995	46.03	12.79	12 156	50.90	14.14
5	87.4420	5.8748	3.0338	0.3727	0.6639	0.0063	0.1339	0.1139	0.1402	0.0043	1.7127	0.5015	0.7811	8 850	37.05	10.29	9 785	40.97	11.38	10 990	46.01	12.78	12 150	50.87	14.13
6	87.4710	5.8769	2.9688	0.3561	0.6298	0.0064	0.1394	0.1224	0.1714	0.0059	1.7369	0.5149	0.7810	8 843	37.02	10.28	9 777	40.93	11.37	10 981	45.98	12.77	12 141	50.83	14.12
7	87.6648	5.7914	2.9158	0.3614	0.6468	0.0061	0.1318	0.1119	0.1548	0.0065	1.6997	0.5089	0.7791	8 829	36.96	10.27	9 762	40.87	11.35	10 977	45.96	12.77	12 138	50.82	14.12
8	87.6222	5.8421	2.9429	0.3496	0.6180	0.0060	0.1278	0.1118	0.1490	0.0064	1.7239	0.5004	0.7787	8 824	36.94	10.26	9 756	40.85	11.35	10 973	45.94	12.76	12 134	50.80	14.11
9	86.5905	9.0979	2.4656	0.1950	0.1504	0.0011	0.0111	0.0091	0.0226	0.0071	1.3708	0.0788	0.7656	8 821	36.93	10.26	9 750	40.82	11.34	11 064	46.32	12.87	12 229	51.20	14.22
10	88.7487	5.6854	2.5282	0.3406	0.6029	0.0051	0.1586	0.1264	0.0362	0.0075	1.2842	0.4763	0.7678	8 771	36.72	10.20	9 701	40.62	11.28	10 986	45.99	12.78	12 151	50.87	14.13
11	87.2676	8.5142	2.3038	0.1849	0.1480	0.0017	0.0136	0.0113	0.0530	0.0086	1.3835	0.1098	0.7615	8 768	36.71	10.20	9 695	40.59	11.28	11 028	46.17	12.83	12 193	51.05	14.18
12	75.2303	14.8680	2.6770	0.1250	0.1930	0.0001	0.0153	0.0116	0.0030	0.0027	2.6240	4.2500	0.8561	8 766	36.70	10.19	9 676	40.51	11.25	10 397	43.53	12.09	11 477	48.05	13.35
13	87.4558	8.3565	2.2561	0.1804	0.1407	0.0029	0.0129	0.0111	0.0547	0.0097	1.4149	0.1043	0.7600	8 749	36.63	10.18	9 673	40.50	11.25	11 015	46.12	12.81	12 179	50.99	14.16
14	76.5625	13.8350	2.6960	0.1430	0.2290	0.0002	0.0227	0.0176	0.0063	0.0027	2.3480	4.1370	0.8489	8 749	36.63	10.18	9 659	40.44	11.23	10 421	43.63	12.12	11 505	48.17	13.38
15	88.6505	5.0399	2.4478	0.3224	0.6618	0.0058	0.1779	0.1450	0.2044	0.0024	1.0050	1.3371	0.7782	8 744	36.61	10.17	9 666	40.47	11.24	10 877	45.54	12.65	12 024	50.34	13.98
16	88.9833	4.9994	2.4431	0.3192	0.6567	0.0093	0.1773	0.1150	0.1821	0.0024	1.0225	1.0896	0.7737	8 744	36.61	10.17	9 666	40.47	11.24	10 911	45.68	12.69	12 062	50.50	14.03
17	88.7990	5.2716	2.4180	0.3274	0.6160	0.0057	0.1526	0.1250	0.1658	0.0017	1.2255	0.8917	0.7722	8 742	36.60	10.17	9 668	40.48	11.24	10 919	45.71	12.70	12 076	50.56	14.04
18	89.4159	4.6387	2.4373	0.3081	0.6472	0.0058	0.2083	0.1278	0.1942	0.0011	0.8721	1.1435	0.7723	8 737	36.58	10.16	9 661	40.45	11.24	10 910	45.68	12.69	12 064	50.51	14.03
19	88.8774	5.0220	2.4189	0.3101	0.6428	0.0059	0.1808	0.1280	0.1933	0.0010	0.9298	1.2899	0.7757	8 737	36.58	10.16	9 659	40.44	11.23	10 887	45.58	12.66	12 035	50.39	14.00
20	88.7696	5.0444	2.3999	0.3246	0.6662	0.0058	0.1497	0.1397	0.1719	0.0029	1.0477	1.2776	0.7756	8 723	36.52	10.14	9 642	40.37	11.21	10 870	45.51	12.64	12 016	50.31	13.98
21	88.6419	5.0486	2.4574	0.3127	0.6706	0.0060	0.1467	0.1259	0.1846	0.0033	0.9406	1.4616	0.7778	8 723	36.52	10.14	9 642	40.37	11.21	10 855	45.45	12.62	12 000	50.24	13.96
22	78.2819	12.5510	2.6610	0.1660	0.2640	0.0005	0.0323	0.0254	0.0127	0.0022	1.9680	4.0350	0.8395	8 720	36.51	10.14	9 630	40.32	11.20	10 444	43.73	12.15	11 534	48.29	13.41
23	79.8393	11.3320	2.7260	0.1940	0.3210	0.0023	0.0447	0.0359	0.0198	0.0020	1.5300	3.9530	0.8322	8 718	36.50	10.14	9 628	40.31	11.20	10 487	43.91	12.20	11 582	48.49	13.47
24	78.0673	12.7130	2.6310	0.1580	0.2520	0.0005	0.0303	0.0239	0.0110	0.0060	2.0530	4.0540	0.8403	8 713	36.48	10.13	9 621	40.28	11.19	10 433	43.68	12.13	11 520	48.23	13.40
25	77.9106	12.7900	2.6240	0.1530	0.2450	0.0004	0.0288	0.0228	0.0121	0.0023	2.1220	4.0890	0.8411	8 706	36.45	10.13	9 614	40.25	11.18	10 419	43.62	12.12	11 505	48.17	13.38

№ зразку	Компонентний склад, % мол.												Фізико-хімічні показники газу обчислені на основі компонентного складу, 101.325 кПа												
	метан, С1	етан, С2	пропан, С3	ізо-бутан, і-С4	н-бутан, н-С4	ізо-пентан, і-С5	н-пентан, н-С5	гексан та вищі, С6+	кисень, О2	азот, N2	диоксид вуглецю, СО2	Густина абсолютна, кг/м3, при 20 °С.	Температура вимірювання/згоряння при 20/25°С												
													Теплота згоряння нижча			Теплота згоряння вища			Число Воббе нижче			Число Воббе вище			
													ккал/м3	МДж/м3	кВт·год/м3	ккал/м3	МДж/м3	кВт·год/м3	ккал/м3	МДж/м3	кВт·год/м3	ккал/м3	МДж/м3	кВт·год/м3	
26	88.9433	4.9044	2.3019	0.3004	0.6554	0.0062	0.1513	0.1274	0.2247	0.0033	1.0429	1.3388	0.7750	8 704	36.44	10.12	9 623	40.29	11.19	10 851	45.43	12.62	11 997	50.23	13.95
27	88.8654	5.1143	2.3420	0.3122	0.5968	0.0057	0.1970	0.1291	0.1224	0.0022	0.9891	1.3239	0.7735	8 699	36.42	10.12	9 618	40.27	11.19	10 855	45.45	12.62	12 002	50.25	13.96
28	89.0032	5.0465	2.3277	0.3110	0.5934	0.0064	0.1524	0.1193	0.1781	0.0026	1.1493	1.1101	0.7716	8 699	36.42	10.12	9 618	40.27	11.19	10 870	45.51	12.64	12 019	50.32	13.98
29	88.7882	5.1426	2.3810	0.3043	0.5986	0.0059	0.1403	0.1134	0.1427	0.0021	0.9545	1.4265	0.7740	8 687	36.37	10.10	9 606	40.22	11.17	10 836	45.37	12.60	11 983	50.17	13.94
30	89.3235	5.0150	2.2247	0.2974	0.5557	0.0065	0.1363	0.1049	0.1912	0.0026	1.0468	1.0954	0.7683	8 682	36.35	10.10	9 599	40.19	11.16	10 873	45.52	12.64	12 021	50.33	13.98
31	88.8581	5.1363	2.3328	0.3140	0.6069	0.0082	0.1417	0.1159	0.1104	0.0024	1.0972	1.2761	0.7718	8 677	36.33	10.09	9 594	40.17	11.16	10 839	45.38	12.61	11 984	50.18	13.94
32	89.1806	5.0307	2.2713	0.2980	0.5810	0.0064	0.1239	0.0970	0.1707	0.0029	1.0283	1.2091	0.7695	8 675	36.32	10.09	9 592	40.16	11.16	10 852	45.44	12.62	12 000	50.24	13.96
33	88.9526	5.1484	2.3916	0.3297	0.6319	0.0055	0.1420	0.1235	0.0166	0.0021	1.0701	1.1861	0.7695	8 672	36.31	10.09	9 592	40.16	11.16	10 849	45.42	12.62	12 000	50.24	13.96
34	89.1384	5.1187	2.3007	0.2980	0.5507	0.0055	0.1483	0.1041	0.1180	0.0032	1.0925	1.1219	0.7683	8 670	36.30	10.08	9 587	40.14	11.15	10 856	45.45	12.63	12 004	50.26	13.96
35	88.0703	7.7465	2.0861	0.1736	0.1438	0.0011	0.0133	0.0096	0.0237	0.0071	1.5684	0.1565	0.7547	8 663	36.27	10.08	9 580	40.11	11.14	10 944	45.82	12.73	12 102	50.67	14.08
36	80.7536	10.5900	2.6100	0.1960	0.3200	0.0022	0.0468	0.0373	0.0210	0.0021	1.5030	3.9180	0.8261	8 663	36.27	10.08	9 571	40.07	11.13	10 460	43.79	12.16	11 555	48.38	13.44
37	89.4191	4.8677	2.2755	0.2962	0.5753	0.0064	0.1448	0.1143	0.1152	0.0026	1.1317	1.0512	0.7664	8 661	36.26	10.07	9 578	40.10	11.14	10 855	45.45	12.62	12 004	50.26	13.96
38	89.2594	5.0126	2.2848	0.2968	0.5908	0.0054	0.1086	0.0883	0.1119	0.0025	1.1192	1.1196	0.7668	8 651	36.22	10.06	9 568	40.06	11.13	10 843	45.40	12.61	11 992	50.21	13.95
39	89.2276	5.0143	2.3064	0.2978	0.5727	0.0055	0.1233	0.0860	0.0927	0.0023	1.1008	1.1704	0.7670	8 646	36.20	10.06	9 561	40.03	11.12	10 836	45.37	12.60	11 983	50.17	13.94
40	88.5977	5.2148	2.2800	0.2801	0.5100	0.0059	0.2123	0.1113	0.1096	0.0028	1.0179	1.6576	0.7749	8 641	36.18	10.05	9 556	40.01	11.11	10 773	45.11	12.53	11 914	49.88	13.86
41	81.5131	10.2650	2.5120	0.1700	0.2760	0.0022	0.0415	0.0327	0.0312	0.0053	2.2070	2.9440	0.8140	8 639	36.17	10.05	9 544	39.96	11.10	10 509	44.00	12.22	11 610	48.61	13.50
42	89.3057	4.9587	2.2581	0.2790	0.5485	0.0063	0.1278	0.1070	0.0933	0.0022	0.9756	1.3379	0.7673	8 632	36.14	10.04	9 547	39.97	11.10	10 815	45.28	12.58	11 961	50.08	13.91
43	88.9628	7.1847	1.9438	0.1634	0.1348	0.0015	0.0139	0.0103	0.0263	0.0100	1.3964	0.1521	0.7486	8 620	36.09	10.03	9 537	39.93	11.09	10 932	45.77	12.71	12 095	50.64	14.07
44	91.8820	3.9007	1.6303	0.2820	0.5036	0.0019	0.1508	0.1299	0.2389	0.0015	0.5628	0.7156	0.7489	8 618	36.08	10.02	9 535	39.92	11.09	10 929	45.76	12.71	12 092	50.62	14.06
45	88.6964	7.7496	1.4145	0.1920	0.1793	0.0007	0.0462	0.0214	0.0145	0.0039	1.0878	0.5937	0.7513	8 601	36.01	10.00	9 516	39.84	11.07	10 889	45.59	12.66	12 047	50.44	14.01
46	88.6809	7.7542	1.4130	0.1928	0.1805	0.0007	0.0466	0.0219	0.0136	0.0041	1.0893	0.6024	0.7514	8 601	36.01	10.00	9 513	39.83	11.06	10 890	45.59	12.66	12 045	50.43	14.01
47	89.5073	4.7888	2.1924	0.2746	0.5231	0.0063	0.1324	0.0940	0.0837	0.0037	1.0835	1.3102	0.7648	8 596	35.99	10.00	9 508	39.81	11.06	10 788	45.17	12.55	11 932	49.96	13.88
48	92.4243	3.7168	1.4991	0.2662	0.4677	0.0018	0.1428	0.1261	0.2276	0.0016	0.5417	0.5843	0.7431	8 586	35.95	9.99	9 501	39.78	11.05	10 931	45.77	12.71	12 096	50.64	14.07
49	88.1496	7.9774	1.3437	0.1830	0.1781	0.0006	0.0513	0.0248	0.0301	0.0040	1.1283	0.9291	0.7564	8 582	35.93	9.98	9 492	39.74	11.04	10 825	45.32	12.59	11 973	50.13	13.93
50	90.9511	4.6064	1.9187	0.2657	0.4327	0.0039	0.0952	0.0699	0.0515	0.0068	1.2021	0.3959	0.7462	8 570	35.88	9.97	9 487	39.72	11.03	10 888	45.59	12.66	12 052	50.46	14.02
51	92.8045	3.5228	1.4076	0.2553	0.4532	0.0018	0.1398	0.1218	0.2018	0.0018	0.5172	0.5724	0.7393	8 551	35.80	9.94	9 464	39.62	11.01	10 915	45.70	12.69	12 079	50.57	14.05
52	89.5550	6.9027	1.3228	0.1930	0.1927	0.0008	0.0700	0.0357	0.0258	0.0050	1.1370	0.5595	0.7465	8 551	35.80	9.94	9 461	39.61	11.00	10 861	45.47	12.63	12 016	50.31	13.98
53	92.3674	3.6038	1.4897	0.2603	0.4648	0.0016	0.1428	0.1214	0.2009	0.0022	0.5529	0.7922	0.7438	8 549	35.79	9.94	9 461	39.61	11.00	10 879	45.55	12.65	12 039	50.41	14.00

№ зразку	Компонентний склад, % мол.												Фізико-хімічні показники газу обчислені на основі компонентного складу, 101.325 кПа												
	метан, C1	етан, C2	пропан, C3	ізо-бутан, i-C4	н-бутан, n-C4	ізо-пентан, iso-C5	ізо-пентан, i-C5	н-пентан, n-C5	гексан та вищі, C6+	кисень, O2	азот, N2	диоксид вуглецю, CO2	Густина абсолютна, кг/м ³ , при 20 °С.	Температура вимірювання/згоряння при 20/25°С											
														Теплота згоряння нижча			Теплота згоряння вища			Число Воббе нижче			Число Воббе вище		
														ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³
54	83.6015	8.9940	2.1080	0.1590	0.2580	0.0027	0.0405	0.0320	0.0279	0.0054	1.7690	3.0020	0.7996	8 532	35.72	9.92	9 432	39.49	10.97	10 472	43.84	12.18	11 577	48.47	13.46
55	83.9288	8.6920	2.0840	0.1600	0.2520	0.0025	0.0423	0.0340	0.0282	0.0052	1.8390	2.9320	0.7971	8 510	35.63	9.90	9 408	39.39	10.94	10 461	43.80	12.17	11 565	48.42	13.45
56	88.1201	5.4071	2.1590	0.2240	0.4499	0.0040	0.0860	0.0750	0.0724	0.0015	1.3404	2.0606	0.7739	8 508	35.62	9.89	9 411	39.40	10.94	10 613	44.43	12.34	11 739	49.15	13.65
57	85.1432	7.8260	2.0490	0.1740	0.2750	0.0030	0.0486	0.0386	0.0334	0.0032	1.6100	2.7960	0.7899	8 493	35.56	9.88	9 391	39.32	10.92	10 487	43.91	12.20	11 596	48.55	13.49
58	92.9982	3.3262	1.3599	0.2373	0.4064	0.0016	0.1182	0.1011	0.1669	0.0036	0.5891	0.6915	0.7361	8 484	35.52	9.87	9 391	39.32	10.92	10 852	45.44	12.62	12 013	50.29	13.97
59	93.2125	3.3245	1.3203	0.2241	0.3852	0.0000	0.1167	0.0989	0.1674		0.5989	0.5514	0.7333	8 481	35.51	9.86	9 389	39.31	10.92	10 870	45.51	12.64	12 033	50.38	13.99
60	93.1865	3.3558	1.3294	0.2238	0.3812	0.0000	0.1124	0.0957	0.1646		0.6023	0.5481	0.7333	8 481	35.51	9.86	9 389	39.31	10.92	10 870	45.51	12.64	12 033	50.38	13.99
61	93.0845	3.4232	1.3637	0.2255	0.3725	0.0014	0.1119	0.0971	0.1324	0.0019	0.5799	0.6060	0.7336	8 477	35.49	9.86	9 384	39.29	10.91	10 861	45.47	12.63	12 023	50.34	13.98
62	93.2702	3.3176	1.3171	0.2204	0.3701	0.0000	0.1104	0.0947	0.1626	0.0027	0.6082	0.5260	0.7323	8 474	35.48	9.86	9 382	39.28	10.91	10 869	45.51	12.64	12 033	50.38	13.99
63	88.4912	5.2922	1.6887	0.2193	0.3820	0.0037	0.1065	0.1019	0.1977	0.0006	0.3693	3.1469	0.7791	8 470	35.46	9.85	9 374	39.25	10.90	10 532	44.10	12.25	11 655	48.80	13.56
64	82.0319	8.6370	2.4350	0.1960	0.3360	0.0021	0.0550	0.0450	0.0460	0.0110	2.3740	3.8310	0.8173	8 469	35.46	9.85	9 360	39.19	10.89	10 283	43.05	11.96	11 364	47.58	13.22
65	93.3239	3.2989	1.3011	0.2184	0.3673	0.0000	0.1084	0.0937	0.1596		0.6030	0.5257	0.7317	8 469	35.46	9.85	9 377	39.26	10.91	10 866	45.49	12.64	12 031	50.37	13.99
66	85.9122	7.4810	1.8910	0.1640	0.2650	0.0032	0.0468	0.0369	0.0333	0.0026	1.5150	2.6490	0.7834	8 467	35.45	9.85	9 363	39.20	10.89	10 500	43.96	12.21	11 610	48.61	13.50
67	89.9317	6.0318	1.5747	0.1378	0.1325	0.0018	0.0152	0.0118	0.0415	0.0082	1.8609	0.2521	0.7410	8 458	35.41	9.84	9 360	39.19	10.89	10 782	45.14	12.54	11 933	49.96	13.88
68	88.5708	5.1724	1.6715	0.2160	0.3994	0.0035	0.1072	0.1026	0.1823	0.0014	0.4211	3.1518	0.7783	8 454	35.40	9.83	9 357	39.17	10.88	10 517	44.03	12.23	11 639	48.73	13.54
69	88.5470	5.1826	1.6228	0.2150	0.3886	0.0036	0.1137	0.1073	0.2047	0.0009	0.3899	3.2239	0.7792	8 453	35.39	9.83	9 355	39.17	10.88	10 510	44.00	12.22	11 631	48.70	13.53
70	88.6333	5.1967	1.6367	0.2126	0.3882	0.0036	0.1066	0.0999	0.1873	0.0010	0.4009	3.1332	0.7775	8 453	35.39	9.83	9 355	39.17	10.88	10 520	44.05	12.24	11 643	48.75	13.54
71	93.4856	3.2407	1.2566	0.2104	0.3512	0.0001	0.1027	0.0882	0.1522	0.0022	0.5965	0.5136	0.7298	8 453	35.39	9.83	9 358	39.18	10.88	10 858	45.46	12.63	12 021	50.33	13.98
72	90.3659	5.0658	1.5349	0.1769	0.3043	0.0071	0.0771	0.0631	0.0716		1.7903	0.5430	0.7452	8 453	35.39	9.83	9 355	39.17	10.88	10 746	44.99	12.50	11 892	49.79	13.83
73	86.5121	7.1380	1.8080	0.1620	0.2640	0.0035	0.0484	0.0385	0.0374	0.0031	1.5380	2.4470	0.7783	8 450	35.38	9.83	9 346	39.13	10.87	10 513	44.01	12.23	11 627	48.68	13.52
74	90.4845	5.1132	1.4900	0.1672	0.2867	0.0076	0.0682	0.0536	0.0646		1.7406	0.5238	0.7434	8 444	35.35	9.82	9 345	39.13	10.87	10 748	45.00	12.50	11 895	49.80	13.83
75	90.4032	5.0138	1.5237	0.1778	0.3017	0.0069	0.0716	0.0619	0.0698		1.8262	0.5434	0.7447	8 443	35.35	9.82	9 344	39.12	10.87	10 737	44.95	12.49	11 883	49.75	13.82
76	90.4024	5.1116	1.5056	0.1688	0.2828	0.0073	0.0711	0.0552	0.0630		1.7893	0.5429	0.7441	8 441	35.34	9.82	9 342	39.11	10.86	10 739	44.96	12.49	11 885	49.76	13.82
77	90.4687	5.0661	1.4868	0.1682	0.2900	0.0072	0.0697	0.0600	0.0652		1.7799	0.5382	0.7437	8 439	35.33	9.82	9 340	39.11	10.86	10 740	44.97	12.49	11 886	49.76	13.82
78	88.6158	5.1144	1.6078	0.2148	0.3837	0.0037	0.1082	0.1015	0.1999	0.0015	0.4042	3.2444	0.7784	8 439	35.33	9.81	9 340	39.10	10.86	10 497	43.95	12.21	11 618	48.64	13.51
79	93.7391	3.2280	1.1914	0.1974	0.3236	0.0000	0.0932	0.0793	0.1454		0.5803	0.4222	0.7264	8 438	35.33	9.81	9 344	39.12	10.87	10 865	45.49	12.64	12 031	50.37	13.99
80	90.5270	4.9735	1.4910	0.1757	0.2958	0.0072	0.0727	0.0588	0.0707		1.7845	0.5431	0.7438	8 438	35.33	9.81	9 339	39.10	10.86	10 738	44.96	12.49	11 884	49.76	13.82
81	93.6646	3.1818	1.2134	0.2009	0.3286	0.0001	0.0962	0.0830	0.1459	0.0018	0.6021	0.4818	0.7276	8 434	35.31	9.81	9 339	39.10	10.86	10 852	45.43	12.62	12 016	50.31	13.98

№ зразку	Компонентний склад, % мол.												Фізико-хімічні показники газу обчислені на основі компонентного складу, 101.325 кПа												
	метан, C1	етан, C2	пропан, C3	ізо-бутан, i-C4	н-бутан, n-C4	ізо-пентан, iso-C5	ізо-пентан, i-C5	н-пентан, n-C5	гексани та вищі, C6+	кисень, O2	азот, N2	диоксид вуглецю, CO2	Густина абсолютна, кг/м ³ , при 20 °С	Температура вимірювання/згоряння при 20/25°С											
														Теплота згоряння нижча			Теплота згоряння вища			Число Воббе нижче			Число Воббе вище		
														ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³
82	90.6831	4.9023	1.4519	0.1681	0.2973	0.0070	0.0750	0.0616	0.0701		1.7599	0.5237	0.7425	8 432	35.30	9.81	9 332	39.07	10.85	10 739	44.96	12.49	11 886	49.76	13.82
83	90.1188	4.3224	1.5635	0.2211	0.3618	0.0090	0.1089	0.0934	0.2006	0.0016	2.0144	0.9845	0.7546	8 431	35.30	9.81	9 329	39.06	10.85	10 652	44.60	12.39	11 787	49.35	13.71
84	88.8362	5.0447	1.5894	0.2084	0.3728	0.0037	0.1063	0.0995	0.1820	0.0011	0.4140	3.1419	0.7757	8 430	35.30	9.80	9 331	39.07	10.85	10 504	43.98	12.22	11 626	48.68	13.52
85	90.6377	4.9378	1.4735	0.1724	0.2770	0.0067	0.0718	0.0562	0.0673		1.7689	0.5307	0.7425	8 430	35.29	9.80	9 330	39.06	10.85	10 736	44.95	12.49	11 882	49.75	13.82
86	90.3832	5.2171	1.4708	0.1520	0.2237	0.0058	0.0636	0.0594	0.0646		1.7995	0.5603	0.7431	8 426	35.28	9.80	9 326	39.05	10.85	10 727	44.91	12.48	11 873	49.71	13.81
87	90.6924	4.9240	1.4523	0.1676	0.2844	0.0073	0.0642	0.0528	0.0648		1.7556	0.5346	0.7419	8 424	35.27	9.80	9 324	39.04	10.84	10 733	44.94	12.48	11 880	49.74	13.82
88	90.3353	5.2664	1.4714	0.1489	0.2151	0.0055	0.0552	0.0599	0.0625		1.8295	0.5503	0.7430	8 423	35.26	9.80	9 322	39.03	10.84	10 724	44.90	12.47	11 869	49.69	13.80
89	90.4209	5.1932	1.4579	0.1494	0.2211	0.0055	0.0632	0.0604	0.0644		1.7988	0.5652	0.7428	8 422	35.26	9.79	9 321	39.03	10.84	10 724	44.90	12.47	11 869	49.69	13.80
90	91.5571	4.1680	1.2219	0.1723	0.2933	0.0095	0.0986	0.0879	0.2035	0.0014	1.6243	0.5622	0.7404	8 419	35.25	9.79	9 320	39.02	10.84	10 737	44.95	12.49	11 885	49.76	13.82
91	93.8386	3.0802	1.1763	0.1962	0.3197	0.0000	0.0937	0.0788	0.1385		0.6174	0.4606	0.7257	8 417	35.24	9.79	9 322	39.03	10.84	10 841	45.39	12.61	12 007	50.27	13.96
92	90.6253	5.0059	1.4387	0.1588	0.2619	0.0072	0.0632	0.0497	0.0612		1.7940	0.5341	0.7417	8 416	35.24	9.79	9 316	39.00	10.83	10 726	44.91	12.47	11 871	49.70	13.81
93	90.7945	4.5919	1.3494	0.1855	0.2881	0.0046	0.0890	0.0699	0.1459	0.0015	0.3125	2.1672	0.7543	8 415	35.23	9.79	9 318	39.01	10.84	10 633	44.52	12.37	11 774	49.30	13.69
94	90.6486	5.0880	1.4078	0.1490	0.2190	0.0057	0.0627	0.0597	0.0640		1.7500	0.5455	0.7410	8 414	35.23	9.78	9 312	38.99	10.83	10 726	44.91	12.47	11 872	49.71	13.81
95	90.6669	5.1050	1.4003	0.1438	0.2122	0.0054	0.0543	0.0549	0.0653		1.7669	0.5250	0.7404	8 409	35.21	9.78	9 307	38.97	10.82	10 725	44.90	12.47	11 871	49.70	13.81
96	88.8504	4.9923	1.5481	0.2065	0.3653	0.0037	0.1045	0.0971	0.1719	0.0033	0.4132	3.2437	0.7756	8 408	35.20	9.78	9 306	38.96	10.82	10 477	43.87	12.19	11 597	48.55	13.49
97	88.8504	4.9923	1.5481	0.2065	0.3653	0.0037	0.1045	0.0971	0.1719	0.0033	0.4132	3.2437	0.7756	8 408	35.20	9.78	9 306	38.96	10.82	10 477	43.87	12.19	11 597	48.55	13.49
98	93.9796	3.0414	1.1398	0.1904	0.3032	0.0001	0.0888	0.0751	0.1365		0.6170	0.4279	0.7241	8 407	35.20	9.78	9 310	38.98	10.83	10 842	45.40	12.61	12 007	50.27	13.96
99	90.8455	4.9427	1.3818	0.1492	0.2216	0.0055	0.0656	0.0551	0.0671		1.7409	0.5250	0.7397	8 405	35.19	9.77	9 303	38.95	10.82	10 725	44.90	12.47	11 871	49.70	13.81
100	90.8617	4.9395	1.3708	0.1479	0.2218	0.0059	0.0659	0.0572	0.0671		1.7473	0.5149	0.7395	8 404	35.18	9.77	9 302	38.95	10.82	10 725	44.90	12.47	11 872	49.70	13.81
101	88.6977	5.4256	1.6651	0.1676	0.2554	0.0032	0.0858	0.0711	0.1149	0.0154	2.5373	0.9609	0.7581	8 403	35.18	9.77	9 298	38.93	10.81	10 591	44.34	12.32	11 720	49.07	13.63
102	93.2337	3.5030	1.3152	0.1886	0.2725	0.0028	0.0707	0.0598	0.0652	0.0048	0.9714	0.3123	0.7259	8 403	35.18	9.77	9 308	38.97	10.83	10 824	45.32	12.59	11 990	50.20	13.94
103	90.7833	5.0000	1.3796	0.1448	0.2171	0.0060	0.0596	0.0551	0.0649		1.7518	0.5378	0.7399	8 402	35.18	9.77	9 300	38.94	10.82	10 721	44.89	12.47	11 867	49.68	13.80
104	94.0293	3.0385	1.1318	0.1874	0.2945	0.0001	0.0840	0.0708	0.1218		0.6132	0.4286	0.7231	8 398	35.16	9.77	9 298	38.93	10.81	10 840	45.38	12.61	12 002	50.25	13.96
105	90.8427	4.5731	1.3583	0.1853	0.2848	0.0045	0.0836	0.0649	0.1049	0.0023	0.3220	2.1737	0.7529	8 398	35.16	9.77	9 299	38.93	10.82	10 621	44.47	12.35	11 762	49.24	13.68
106	90.7983	4.9611	1.3715	0.1438	0.2152	0.0056	0.0588	0.0544	0.0678		1.7769	0.5466	0.7397	8 396	35.15	9.76	9 294	38.91	10.81	10 713	44.86	12.46	11 859	49.65	13.79
107	90.7055	4.6490	1.3637	0.1759	0.2728	0.0039	0.0781	0.0618	0.1159	0.0024	0.3496	2.2215	0.7539	8 394	35.15	9.76	9 295	38.92	10.81	10 610	44.42	12.34	11 749	49.19	13.66
108	92.8423	3.9319	1.0669	0.1567	0.2208	0.0052	0.0714	0.0552	0.1608	0.0005	1.1962	0.2921	0.7276	8 395	35.15	9.76	9 296	38.92	10.81	10 803	45.23	12.56	11 961	50.08	13.91
109	90.7110	4.9981	1.3875	0.1438	0.2125	0.0051	0.0550	0.0565	0.0661		1.8249	0.5396	0.7402	8 395	35.15	9.76	9 293	38.91	10.81	10 710	44.84	12.46	11 855	49.63	13.79

№ зразку	Компонентний склад, % мол.												Фізико-хімічні показники газу обчислені на основі компонентного складу, 101.325 кПа												
	метан, C1	етан, C2	пропан, C3	ізо-бутан, i-C4	н-бутан, n-C4	ізо-пентан, iso-C5	ізо-пентан, i-C5	н-пентан, n-C5	гексани та вищі, C6+	кисень, O2	азот, N2	диоксид вуглецю, CO2	Температура вимірювання/згоряння при 20/25°C												
													Теплота згоряння нижча			Теплота згоряння вища			Число Воббе нижче			Число Воббе вище			
													ккал/м3	МДж/м3	кВт·год/м3	ккал/м3	МДж/м3	кВт·год/м3	ккал/м3	МДж/м3	кВт·год/м3	ккал/м3	МДж/м3	кВт·год/м3	
110	92.8079	3.9494	1.0541	0.1564	0.2198	0.0055	0.0717	0.0555	0.1604	0.0004	1.2115	0.3074	0.7278	8 393	35.14	9.76	9 293	38.91	10.81	10 796	45.20	12.56	11 954	50.05	13.90
111	93.3085	3.4679	1.2963	0.1837	0.2642	0.0029	0.0689	0.0563	0.0568	0.0054	0.9798	0.3094	0.7249	8 391	35.13	9.76	9 296	38.92	10.81	10 817	45.29	12.58	11 983	50.17	13.94
112	91.0042	4.8239	1.3361	0.1449	0.2267	0.0066	0.0650	0.0567	0.0655		1.7541	0.5163	0.7384	8 391	35.13	9.76	9 289	38.89	10.80	10 717	44.87	12.46	11 863	49.67	13.80
113	92.7708	3.9417	1.0553	0.1563	0.2202	0.0053	0.0717	0.0555	0.1591	0.0014	1.2722	0.2905	0.7279	8 388	35.12	9.76	9 289	38.89	10.80	10 789	45.17	12.55	11 947	50.02	13.89
114	90.5317	4.8674	1.3402	0.1675	0.2648	0.0040	0.0678	0.0540	0.0900	0.0102	1.1259	1.4764	0.7486	8 386	35.11	9.75	9 287	38.88	10.80	10 637	44.54	12.37	11 779	49.32	13.70
115	92.7315	3.9501	1.0518	0.1563	0.2197	0.0052	0.0715	0.0553	0.1583	0.0009	1.3020	0.2974	0.7281	8 386	35.11	9.75	9 284	38.87	10.80	10 787	45.16	12.55	11 942	50.00	13.89
116	94.0945	2.9665	1.1578	0.1926	0.2995	0.0015	0.0769	0.0618	0.0968	0.0024	0.6008	0.4489	0.7222	8 385	35.11	9.75	9 286	38.88	10.80	10 828	45.34	12.59	11 992	50.21	13.95
117	90.7167	4.8282	1.4044	0.1528	0.2310	0.0057	0.0581	0.0541	0.0697		1.9073	0.5720	0.7408	8 384	35.10	9.75	9 281	38.86	10.79	10 691	44.76	12.43	11 834	49.55	13.76
118	94.2434	2.9325	1.0839	0.1808	0.2823	0.0001	0.0819	0.0701	0.1224		0.6207	0.3820	0.7210	8 383	35.10	9.75	9 284	38.87	10.80	10 836	45.37	12.60	12 000	50.24	13.96
119	87.0229	6.5600	1.7220	0.1580	0.2440	0.0028	0.0459	0.0373	0.0354	0.0097	1.8540	2.3080	0.7733	8 383	35.10	9.75	9 274	38.83	10.79	10 460	43.80	12.17	11 572	48.45	13.46
120	92.7182	4.0104	0.9626	0.1368	0.1951	0.0058	0.0643	0.0526	0.2203	0.0006	1.3246	0.3087	0.7284	8 383	35.10	9.75	9 284	38.87	10.80	10 780	45.13	12.54	11 938	49.98	13.88
121	94.1979	2.9307	1.0919	0.1811	0.2873	0.0001	0.0826	0.0699	0.1205		0.6131	0.4250	0.7216	8 381	35.09	9.75	9 282	38.86	10.79	10 829	45.34	12.59	11 992	50.21	13.95
122	94.2220	2.9364	1.0860	0.1792	0.2776	0.0001	0.0808	0.0683	0.1190		0.6259	0.4047	0.7211	8 379	35.08	9.74	9 279	38.85	10.79	10 829	45.34	12.59	11 992	50.21	13.95
123	90.9575	4.9726	1.2907	0.1303	0.1947	0.0053	0.0531	0.0499	0.0601		1.7602	0.5256	0.7375	8 378	35.08	9.74	9 275	38.83	10.79	10 708	44.83	12.45	11 853	49.63	13.79
124	93.9099	3.1229	1.1284	0.1870	0.2464	0.0005	0.0615	0.0523	0.1360	0.0089	0.8809	0.2651	0.7216	8 378	35.08	9.74	9 278	38.85	10.79	10 824	45.32	12.59	11 987	50.19	13.94
125	92.6559	4.0326	0.9508	0.1378	0.1948	0.0059	0.0647	0.0528	0.2104	0.0008	1.3823	0.3112	0.7285	8 376	35.07	9.74	9 274	38.83	10.79	10 771	45.10	12.53	11 926	49.93	13.87
126	87.7442	6.1570	1.5890	0.1600	0.2620	0.0038	0.0559	0.0445	0.0517	0.0069	1.9420	1.9830	0.7673	8 374	35.06	9.74	9 265	38.79	10.78	10 492	43.93	12.20	11 608	48.60	13.50
127	92.6050	4.1040	0.9872	0.1276	0.2137	0.0093	0.0641	0.0542	0.1592		1.3409	0.3348	0.7281	8 374	35.06	9.74	9 272	38.82	10.78	10 770	45.09	12.53	11 926	49.93	13.87
128	91.0285	4.8397	1.2938	0.1398	0.2053	0.0061	0.0538	0.0533	0.0600		1.7929	0.5268	0.7374	8 373	35.05	9.74	9 269	38.81	10.78	10 701	44.80	12.45	11 846	49.60	13.78
129	90.8792	4.8478	1.3352	0.1374	0.2023	0.0053	0.0509	0.0526	0.0629		1.8877	0.5387	0.7384	8 369	35.04	9.73	9 264	38.79	10.77	10 688	44.75	12.43	11 832	49.54	13.76
130	92.4642	4.0985	1.0237	0.1326	0.2193	0.0089	0.0624	0.0525	0.1564		1.4011	0.3804	0.7294	8 369	35.04	9.73	9 267	38.80	10.78	10 755	45.03	12.51	11 909	49.86	13.85
131	91.1613	4.7875	1.2603	0.1317	0.1977	0.0056	0.0540	0.0481	0.0645		1.7763	0.5130	0.7361	8 365	35.02	9.73	9 260	38.77	10.77	10 700	44.80	12.44	11 845	49.59	13.78
132	93.1746	3.7876	1.0687	0.1399	0.1926	0.0024	0.0527	0.0424	0.1224	0.0063	1.1399	0.2705	0.7236	8 364	35.02	9.73	9 262	38.78	10.77	10 791	45.18	12.55	11 949	50.03	13.90
133	93.9692	3.1177	1.1180	0.1822	0.2396	0.0004	0.0586	0.0491	0.1083	0.0085	0.8824	0.2660	0.7203	8 364	35.02	9.73	9 263	38.78	10.77	10 815	45.28	12.58	11 978	50.15	13.93
134	92.5041	4.0579	1.0083	0.1306	0.2158	0.0099	0.0622	0.0529	0.1562		1.4308	0.3713	0.7289	8 362	35.01	9.73	9 260	38.77	10.77	10 747	45.00	12.50	11 902	49.83	13.84
135	92.6305	4.1021	0.9678	0.1200	0.1959	0.0091	0.0588	0.0500	0.1563		1.3658	0.3437	0.7274	8 360	35.00	9.72	9 258	38.76	10.77	10 758	45.04	12.51	11 914	49.88	13.86
136	93.9800	3.1284	1.1196	0.1814	0.2379	0.0006	0.0568	0.0477	0.0957	0.0095	0.8748	0.2677	0.7199	8 360	35.00	9.72	9 259	38.76	10.77	10 813	45.27	12.58	11 976	50.14	13.93
137	91.0457	4.8239	1.2738	0.1275	0.1892	0.0051	0.0472	0.0503	0.0623		1.8415	0.5335	0.7367	8 358	34.99	9.72	9 252	38.74	10.76	10 687	44.74	12.43	11 831	49.53	13.76

№ зразку	Компонентний склад, % мол.													Фізико-хімічні показники газу обчислені на основі компонентного складу, 101.325 кПа											
	метан, C1	етан, C2	пропан, C3	ізо-бутан, i-C4	н-бутан, n-C4	ізо-пентан, iso-C5	ізо-пентан, i-C5	н-пентан, n-C5	гексани та вищі, C6+	кисень, O2	азот, N2	диоксид вуглецю, CO2	Густина абсолютна, кг/м ³ , при 20 °С	Температура вимірювання/згоряння при 20/25°С											
														Теплота згоряння нижча			Теплота згоряння вища			Число Воббе нижче			Число Воббе вище		
														ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³
138	94.0007	3.1116	1.1133	0.1820	0.2364	0.0003	0.0572	0.0478	0.0953	0.0097	0.8815	0.2641	0.7197	8 358	34.99	9.72	9 256	38.75	10.77	10 812	45.27	12.57	11 975	50.13	13.93
139	94.0002	3.1079	1.1106	0.1797	0.2361	0.0002	0.0566	0.0466	0.0990	0.0091	0.8896	0.2643	0.7197	8 357	34.99	9.72	9 255	38.75	10.76	10 811	45.26	12.57	11 973	50.13	13.92
140	91.6511	4.3094	1.2689	0.1578	0.2416	0.0026	0.0562	0.0454	0.0663	0.0025	0.7649	1.4331	0.7404	8 357	34.99	9.72	9 256	38.75	10.76	10 659	44.63	12.40	11 806	49.43	13.73
141	94.0188	3.1057	1.1158	0.1811	0.2385	0.0001	0.0576	0.0481	0.0897	0.0097	0.8687	0.2660	0.7195	8 357	34.99	9.72	9 256	38.75	10.76	10 813	45.27	12.58	11 975	50.14	13.93
142	92.4268	4.0985	1.0042	0.1276	0.2116	0.0086	0.0605	0.0505	0.1474	0.0014	1.4405	0.4224	0.7293	8 355	34.98	9.72	9 251	38.73	10.76	10 736	44.95	12.49	11 887	49.77	13.83
143	94.0148	3.1153	1.1178	0.1814	0.2370	0.0002	0.0564	0.0472	0.0834	0.0103	0.8719	0.2642	0.7194	8 355	34.98	9.72	9 254	38.74	10.76	10 811	45.26	12.57	11 974	50.13	13.93
144	93.9994	3.1154	1.1134	0.1799	0.2362	0.0010	0.0568	0.0471	0.0857	0.0092	0.8911	0.2650	0.7194	8 354	34.97	9.72	9 252	38.74	10.76	10 809	45.25	12.57	11 971	50.12	13.92
145	91.9985	4.1727	1.1232	0.1438	0.2291	0.0120	0.0614	0.0570	0.1092		1.5954	0.4977	0.7325	8 352	34.97	9.71	9 248	38.72	10.76	10 710	44.84	12.46	11 859	49.65	13.79
146	94.0109	3.1095	1.1067	0.1781	0.2324	0.0004	0.0556	0.0451	0.0882	0.0087	0.8993	0.2651	0.7193	8 351	34.96	9.71	9 249	38.72	10.76	10 806	45.24	12.57	11 968	50.11	13.92
147	92.4062	4.1984	0.9917	0.1280	0.2087	0.0131	0.0586	0.0543	0.1067		1.4309	0.4034	0.7283	8 350	34.96	9.71	9 246	38.71	10.75	10 738	44.96	12.49	11 890	49.78	13.83
148	94.0541	3.0955	1.1003	0.1775	0.2300	0.0006	0.0536	0.0442	0.0884	0.0105	0.8800	0.2653	0.7189	8 349	34.96	9.71	9 247	38.72	10.75	10 807	45.25	12.57	11 969	50.11	13.92
149	88.3407	5.8180	1.5050	0.1530	0.2430	0.0040	0.0531	0.0431	0.0561	0.0070	1.9370	1.8400	0.7622	8 348	34.95	9.71	9 239	38.68	10.74	10 493	43.93	12.20	11 613	48.62	13.51
150	92.5797	3.9203	1.0092	0.1340	0.2180	0.0077	0.0601	0.0519	0.1523		1.5055	0.3613	0.7282	8 348	34.95	9.71	9 243	38.70	10.75	10 735	44.95	12.49	11 887	49.77	13.83
151	94.4906	2.8604	1.0366	0.1742	0.2584	0.0016	0.0687	0.0560	0.0732	0.0034	0.5982	0.3787	0.7173	8 347	34.95	9.71	9 246	38.71	10.75	10 817	45.29	12.58	11 981	50.16	13.93
152	91.7909	4.2491	1.2447	0.1517	0.2259	0.0026	0.0525	0.0410	0.0677	0.0036	0.7445	1.4259	0.7390	8 346	34.94	9.71	9 245	38.71	10.75	10 655	44.61	12.39	11 803	49.42	13.73
153	92.4272	3.8870	1.0519	0.1378	0.2241	0.0076	0.0642	0.0532	0.1560		1.5973	0.3937	0.7298	8 345	34.94	9.71	9 241	38.69	10.75	10 720	44.88	12.47	11 871	49.70	13.81
154	92.3716	3.9414	1.0546	0.1429	0.2253	0.0084	0.0601	0.0511	0.1450		1.6161	0.3835	0.7298	8 345	34.94	9.71	9 239	38.68	10.74	10 723	44.89	12.47	11 871	49.70	13.81
155	91.8785	4.1822	1.2320	0.1516	0.2293	0.0026	0.0543	0.0440	0.0667	0.0014	0.7725	1.3848	0.7383	8 343	34.93	9.70	9 242	38.69	10.75	10 657	44.62	12.39	11 805	49.42	13.73
156	93.4425	3.7492	0.8250	0.1124	0.1607	0.0064	0.0527	0.0419	0.1901	0.0003	1.0981	0.3207	0.7219	8 343	34.93	9.70	9 239	38.68	10.74	10 776	45.12	12.53	11 933	49.96	13.88
157	92.3114	4.0984	1.0093	0.1242	0.2066	0.0082	0.0594	0.0498	0.1471	0.0090	1.5332	0.4434	0.7299	8 343	34.93	9.70	9 239	38.68	10.74	10 718	44.87	12.46	11 868	49.69	13.80
158	94.1498	3.0619	1.0903	0.1759	0.2254	0.0004	0.0527	0.0427	0.0714	0.0093	0.8571	0.2632	0.7178	8 341	34.92	9.70	9 238	38.68	10.74	10 805	45.24	12.57	11 967	50.10	13.92
159	94.5957	2.8090	1.0037	0.1631	0.2379	0.0002	0.0675	0.0558	0.0961		0.6233	0.3476	0.7164	8 340	34.92	9.70	9 239	38.68	10.74	10 816	45.28	12.58	11 981	50.16	13.93
160	92.4768	3.9855	1.0131	0.1270	0.2066	0.0083	0.0578	0.0496	0.1475		1.5558	0.3720	0.7285	8 340	34.92	9.70	9 236	38.67	10.74	10 724	44.90	12.47	11 875	49.72	13.81
161	94.5974	2.7875	0.9972	0.1621	0.2380	0.0001	0.0670	0.0558	0.0972		0.6444	0.3533	0.7164	8 338	34.91	9.70	9 234	38.66	10.74	10 812	45.27	12.57	11 973	50.13	13.93
162	93.3653	3.7441	0.8458	0.1132	0.1600	0.0059	0.0510	0.0403	0.1906	0.0007	1.1936	0.2895	0.7221	8 338	34.91	9.70	9 234	38.66	10.74	10 769	45.09	12.52	11 926	49.93	13.87
163	93.9828	3.1318	1.1178	0.1630	0.2181	0.0025	0.0539	0.0446	0.0631	0.0064	0.9324	0.2836	0.7186	8 337	34.90	9.70	9 238	38.68	10.74	10 793	45.19	12.55	11 959	50.07	13.91
164	92.6262	3.9410	0.9670	0.1236	0.2038	0.0077	0.0595	0.0500	0.1470		1.5059	0.3683	0.7273	8 336	34.90	9.69	9 231	38.65	10.74	10 728	44.91	12.48	11 880	49.74	13.82
165	94.6363	2.7803	0.9943	0.1621	0.2331	0.0001	0.0653	0.0543	0.0948		0.6340	0.3453	0.7159	8 336	34.90	9.69	9 234	38.66	10.74	10 811	45.26	12.57	11 976	50.14	13.93

№ зразку	Компонентний склад, % мол.												Фізико-хімічні показники газу обчислені на основі компонентного складу, 101.325 кПа												
	метан, C1	етан, C2	пропан, C3	ізо-бутан, i-C4	н-бутан, n-C4	ізо-пентан, iso-C5	ізо-пентан, i-C5	н-пентан, n-C5	гексани та вищі, C6+	кисень, O2	азот, N2	диоксид вуглецю, CO2	Густина абсолютна, кг/м ³ , при 20 °С.	Температура вимірювання/згоряння при 20/25°С											
														Теплота згоряння нижча			Теплота згоряння вища			Число Воббе нижче			Число Воббе вище		
														ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³
166	93.6358	3.2395	1.1441	0.1707	0.2477	0.0034	0.0595	0.0497	0.0457	0.0000	1.1053	0.2986	0.7210	8 336	34.90	9.69	9 236	38.67	10.74	10 776	45.12	12.53	11 940	49.99	13.89
167	93.9832	3.1426	1.1218	0.1621	0.2165	0.0025	0.0524	0.0429	0.0571	0.0047	0.9310	0.2833	0.7184	8 335	34.90	9.69	9 236	38.67	10.74	10 792	45.19	12.55	11 959	50.07	13.91
168	93.3587	3.7515	0.8275	0.1127	0.1598	0.0060	0.0515	0.0407	0.1860	0.0009	1.1983	0.3064	0.7220	8 333	34.89	9.69	9 229	38.64	10.73	10 764	45.07	12.52	11 921	49.91	13.86
169	93.9631	3.1372	1.1120	0.1619	0.2179	0.0025	0.0536	0.0438	0.0571	0.0057	0.9613	0.2838	0.7185	8 332	34.88	9.69	9 232	38.65	10.74	10 787	45.16	12.55	11 953	50.05	13.90
170	94.2208	3.0570	1.0960	0.1592	0.2144	0.0022	0.0482	0.0435	0.0495	0.0037	0.8325	0.2732	0.7166	8 331	34.88	9.69	9 227	38.63	10.73	10 800	45.22	12.56	11 963	50.09	13.91
171	93.9796	3.1273	1.1094	0.1613	0.2166	0.0026	0.0532	0.0433	0.0555	0.0062	0.9623	0.2826	0.7183	8 330	34.87	9.69	9 230	38.65	10.73	10 786	45.16	12.54	11 952	50.04	13.90
172	92.3952	3.8990	1.2084	0.1453	0.2228	0.0022	0.0480	0.0399	0.0594	0.0032	0.7611	1.2156	0.7336	8 330	34.87	9.69	9 228	38.63	10.73	10 673	44.69	12.41	11 824	49.50	13.75
173	92.5190	3.8161	1.1853	0.1450	0.2215	0.0022	0.0488	0.0409	0.0649	0.0025	0.8017	1.1520	0.7325	8 325	34.86	9.68	9 223	38.62	10.73	10 676	44.70	12.42	11 827	49.52	13.75
174	92.4653	4.0314	0.9641	0.1280	0.2101	0.0065	0.0600	0.0541	0.1052		1.5565	0.4188	0.7277	8 324	34.85	9.68	9 217	38.59	10.72	10 709	44.84	12.46	11 859	49.65	13.79
175	92.4624	4.0340	0.9595	0.1211	0.2064	0.0079	0.0581	0.0477	0.1241	0.0085	1.5477	0.4226	0.7279	8 324	34.85	9.68	9 219	38.60	10.72	10 707	44.83	12.45	11 859	49.65	13.79
176	92.3638	3.9116	1.2260	0.1443	0.2146	0.0019	0.0438	0.0348	0.0482	0.0042	0.6497	1.3571	0.7343	8 323	34.85	9.68	9 220	38.60	10.72	10 659	44.63	12.40	11 809	49.44	13.73
177	92.7522	4.0332	1.0609	0.1207	0.1528	0.0020	0.0351	0.0288	0.0820	0.0059	1.4303	0.2961	0.7237	8 321	34.84	9.68	9 217	38.59	10.72	10 734	44.94	12.48	11 890	49.78	13.83
178	90.9485	4.3303	1.1770	0.1478	0.2362	0.0041	0.0729	0.0627	0.1406	0.0036	1.7875	1.0888	0.7432	8 321	34.84	9.68	9 210	38.56	10.71	10 594	44.35	12.32	11 725	49.09	13.64
179	92.0689	4.1037	1.0309	0.1285	0.2156	0.0074	0.0590	0.0492	0.1189	0.0140	1.6663	0.5376	0.7313	8 321	34.84	9.68	9 212	38.57	10.71	10 680	44.71	12.42	11 823	49.50	13.75
180	88.8046	5.6127	1.3364	0.1419	0.2112	0.0004	0.0607	0.0494	0.0711	0.0041	1.5814	2.1261	0.7605	8 320	34.83	9.68	9 208	38.55	10.71	10 471	43.84	12.18	11 588	48.52	13.48
181	92.5901	3.8931	0.9495	0.1187	0.1931	0.0075	0.0567	0.0489	0.1523		1.6226	0.3675	0.7272	8 319	34.83	9.68	9 212	38.57	10.71	10 707	44.83	12.45	11 856	49.64	13.79
182	94.3522	2.9971	1.0594	0.1585	0.2076	0.0022	0.0437	0.0367	0.0455	0.0038	0.8281	0.2652	0.7152	8 318	34.83	9.67	9 214	38.58	10.72	10 794	45.19	12.55	11 957	50.06	13.91
183	94.3688	2.9780	1.0513	0.1572	0.2089	0.0021	0.0455	0.0382	0.0482	0.0045	0.8349	0.2624	0.7151	8 317	34.82	9.67	9 213	38.57	10.71	10 793	45.19	12.55	11 956	50.06	13.90
184	88.7874	3.7068	1.8973	0.3060	0.4647	0.0064	0.1541	0.0807	0.0799	0.0027	3.5174	0.9967	0.7630	8 317	34.82	9.67	9 203	38.53	10.70	10 449	43.75	12.15	11 563	48.41	13.45
185	92.3734	3.8715	1.2203	0.1455	0.2171	0.0020	0.0444	0.0351	0.0449	0.0107	0.6920	1.3433	0.7341	8 316	34.82	9.67	9 214	38.58	10.72	10 653	44.60	12.39	11 802	49.41	13.73
186	94.3887	2.9894	1.0388	0.1523	0.2027	0.0022	0.0476	0.0402	0.0438	0.0045	0.8283	0.2616	0.7148	8 314	34.81	9.67	9 210	38.56	10.71	10 793	45.19	12.55	11 955	50.05	13.90
187	90.9406	4.2932	1.2259	0.1598	0.2544	0.0042	0.0719	0.0589	0.0989	0.0048	1.7969	1.0905	0.7429	8 314	34.81	9.67	9 205	38.54	10.71	10 586	44.32	12.31	11 720	49.07	13.63
188	92.7867	3.7145	1.1493	0.1386	0.2060	0.0021	0.0451	0.0380	0.0545	0.0014	0.7430	1.1208	0.7300	8 313	34.80	9.67	9 210	38.56	10.71	10 678	44.71	12.42	11 831	49.53	13.76
189	90.9099	4.3010	1.2200	0.1580	0.2510	0.0049	0.0680	0.0560	0.1070	0.0072	1.8290	1.0880	0.7430	8 312	34.80	9.67	9 203	38.53	10.70	10 581	44.30	12.31	11 715	49.05	13.63
190	94.4297	2.9507	1.0354	0.1508	0.1995	0.0023	0.0486	0.0413	0.0473	0.0038	0.8312	0.2593	0.7146	8 312	34.80	9.67	9 208	38.55	10.71	10 792	45.18	12.55	11 954	50.05	13.90
191	94.3890	2.9670	1.0450	0.1543	0.2004	0.0021	0.0440	0.0370	0.0454	0.0038	0.8487	0.2631	0.7147	8 311	34.80	9.67	9 206	38.54	10.71	10 788	45.17	12.55	11 951	50.04	13.90
192	91.0047	4.2864	1.2062	0.1568	0.2552	0.0042	0.0684	0.0566	0.0909	0.0017	1.8016	1.0672	0.7419	8 310	34.79	9.66	9 204	38.53	10.70	10 588	44.33	12.31	11 727	49.10	13.64
193	92.3327	4.2272	0.8328	0.1195	0.1855	0.0014	0.0528	0.0452	0.1333	0.0058	0.9125	1.1513	0.7324	8 309	34.79	9.66	9 203	38.53	10.70	10 654	44.60	12.39	11 799	49.40	13.72

№ зразку	Компонентний склад, % мол.													Фізико-хімічні показники газу обчислені на основі компонентного складу, 101.325 кПа											
	метан, C1	етан, C2	пропан, C3	ізо-бутан, i-C4	н-бутан, n-C4	ізо-пентан, iso-C5	ізо-пентан, i-C5	н-пентан, n-C5	гексан та вищі, C6+	кисень, O2	азот, N2	диоксид вуглецю, CO2	Густина абсолютна, кг/м ³ , при 20 °С	Температура вимірювання/згоряння при 20/25°С											
														Теплота згоряння нижча			Теплота згоряння вища			Число Воббе нижче			Число Воббе вище		
														ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³
194	92.7945	3.8645	0.9484	0.1372	0.2007	0.0061	0.0614	0.0484	0.0772	0.0009	1.4858	0.3749	0.7247	8 309	34.79	9.66	9 203	38.53	10.70	10 712	44.85	12.46	11 863	49.67	13.80
195	87.3188	5.1954	1.7452	0.2025	0.3892	0.0032	0.0847	0.0722	0.0787	0.0220	1.9417	2.9463	0.7799	8 308	34.79	9.66	9 196	38.50	10.69	10 325	43.23	12.01	11 428	47.85	13.29
196	90.9814	4.2904	1.2286	0.1603	0.2536	0.0041	0.0687	0.0559	0.0734	0.0043	1.7738	1.1055	0.7420	8 307	34.78	9.66	9 196	38.50	10.69	10 583	44.31	12.31	11 715	49.05	13.63
197	90.3604	4.6533	1.1577	0.1492	0.2252	0.0044	0.0665	0.0519	0.1339	0.0011	0.3078	2.8885	0.7578	8 306	34.78	9.66	9 199	38.51	10.70	10 472	43.84	12.18	11 597	48.56	13.49
198	94.5367	2.9159	1.0179	0.1471	0.1959	0.0035	0.0443	0.0356	0.0387	0.0000	0.8156	0.2488	0.7134	8 305	34.77	9.66	9 205	38.54	10.71	10 789	45.17	12.55	11 959	50.07	13.91
199	94.4753	2.9490	1.0240	0.1481	0.1952	0.0034	0.0442	0.0355	0.0381	0.0000	0.8248	0.2624	0.7138	8 305	34.77	9.66	9 205	38.54	10.71	10 787	45.16	12.55	11 957	50.06	13.91
200	94.5237	2.8873	1.0170	0.1483	0.1984	0.0022	0.0468	0.0397	0.0441	0.0041	0.8341	0.2544	0.7137	8 303	34.77	9.66	9 198	38.51	10.70	10 787	45.16	12.55	11 950	50.03	13.90
201	92.6629	3.8599	0.9567	0.1378	0.2010	0.0059	0.0608	0.0475	0.0797	0.0015	1.6193	0.3670	0.7254	8 302	34.76	9.66	9 193	38.49	10.69	10 699	44.79	12.44	11 847	49.60	13.78
202	89.4435	3.5377	1.6376	0.2858	0.4252	0.0065	0.1848	0.0876	0.1157	0.0038	3.3287	0.9431	0.7582	8 302	34.76	9.66	9 188	38.47	10.69	10 465	43.81	12.17	11 582	48.49	13.47
203	94.1753	3.1235	0.9882	0.1384	0.1807	0.0019	0.0437	0.0350	0.0668	0.0000	0.9617	0.2848	0.7157	8 302	34.76	9.66	9 203	38.53	10.70	10 769	45.09	12.52	11 938	49.98	13.88
204	94.5614	2.8812	1.0067	0.1505	0.1978	0.0022	0.0418	0.0351	0.0426	0.0039	0.8217	0.2553	0.7133	8 300	34.75	9.65	9 195	38.50	10.69	10 786	45.16	12.54	11 949	50.03	13.90
205	92.8191	3.8376	0.9556	0.1350	0.1951	0.0056	0.0574	0.0444	0.0650	0.0007	1.5156	0.3689	0.7240	8 300	34.75	9.65	9 193	38.49	10.69	10 704	44.82	12.45	11 856	49.64	13.79
206	94.6064	2.8753	1.0001	0.1447	0.1908	0.0036	0.0444	0.0340	0.0361	0.0000	0.8097	0.2549	0.7127	8 298	34.74	9.65	9 196	38.50	10.69	10 787	45.16	12.55	11 954	50.05	13.90
207	88.9550	5.1780	1.1970	0.1320	0.2070	0.0040	0.0520	0.0400	0.0460	0.0050	1.8860	2.2980	0.7536	8 295	34.73	9.65	9 188	38.47	10.69	10 486	43.90	12.20	11 615	48.63	13.51
208	88.3234	3.8463	1.9672	0.3138	0.4545	0.0050	0.0940	0.0664	0.0918	0.0054	4.0061	0.8261	0.7636	8 295	34.73	9.65	9 181	38.44	10.68	10 419	43.62	12.12	11 531	48.28	13.41
209	91.8423	3.5871	1.1968	0.1653	0.2773	0.0009	0.0754	0.0606	0.1162	0.0064	2.0691	0.6027	0.7351	8 295	34.73	9.65	9 184	38.45	10.68	10 618	44.45	12.35	11 756	49.22	13.67
210	94.5383	2.8814	1.0071	0.1467	0.1899	0.0021	0.0394	0.0335	0.0409	0.0040	0.8578	0.2590	0.7131	8 293	34.72	9.65	9 188	38.47	10.69	10 778	45.13	12.53	11 940	49.99	13.89
211	91.9531	4.4431	1.1398	0.1148	0.1301	0.0017	0.0205	0.0164	0.0220	0.0065	1.8699	0.2821	0.7262	8 293	34.72	9.64	9 184	38.45	10.68	10 680	44.72	12.42	11 828	49.52	13.76
212	91.3476	4.1520	1.1380	0.1440	0.2210	0.0046	0.0630	0.0530	0.1040	0.0068	1.7410	1.0250	0.7389	8 293	34.72	9.64	9 181	38.44	10.68	10 588	44.33	12.31	11 723	49.08	13.63
213	90.9941	4.2619	1.2147	0.1534	0.2422	0.0039	0.0605	0.0499	0.0726	0.0126	1.8641	1.0702	0.7411	8 291	34.71	9.64	9 183	38.45	10.68	10 569	44.25	12.29	11 707	49.02	13.62
214	90.7188	4.4270	1.1570	0.1450	0.2300	0.0049	0.0640	0.0520	0.1080	0.0073	1.9690	1.1170	0.7433	8 290	34.71	9.64	9 179	38.43	10.68	10 553	44.18	12.27	11 684	48.92	13.59
215	91.1290	4.2586	1.1768	0.1450	0.2284	0.0039	0.0609	0.0507	0.0792	0.0034	1.7871	1.0769	0.7401	8 290	34.71	9.64	9 183	38.45	10.68	10 576	44.28	12.30	11 715	49.05	13.62
216	92.0730	3.5500	1.1655	0.1622	0.2661	0.0017	0.0704	0.0567	0.1009	0.0071	1.9926	0.5538	0.7327	8 289	34.71	9.64	9 179	38.43	10.67	10 628	44.50	12.36	11 768	49.27	13.69
217	92.0730	3.5500	1.1655	0.1622	0.2661	0.0017	0.0704	0.0567	0.1009	0.0071	1.9926	0.5538	0.7327	8 289	34.71	9.64	9 179	38.43	10.67	10 628	44.50	12.36	11 768	49.27	13.69
218	89.8587	4.7880	1.2630	0.1550	0.2520	0.0043	0.0680	0.0600	0.0590	0.0060	1.6550	1.8310	0.7528	8 288	34.70	9.64	9 174	38.41	10.67	10 485	43.90	12.19	11 606	48.59	13.50
219	94.1064	3.0858	0.9905	0.1401	0.1812	0.0020	0.0420	0.0329	0.0531	0.0000	1.0909	0.2751	0.7156	8 286	34.69	9.64	9 184	38.45	10.68	10 749	45.00	12.50	11 914	49.88	13.86
220	92.1106	3.5669	1.1642	0.1614	0.2635	0.0010	0.0700	0.0569	0.0847	0.0059	1.9677	0.5472	0.7320	8 287	34.70	9.64	9 176	38.42	10.67	10 630	44.51	12.36	11 771	49.28	13.69
221	92.0038	3.3831	1.1869	0.1636	0.2869	0.0014	0.0760	0.0582	0.1380	0.0078	2.0800	0.6142	0.7347	8 287	34.70	9.64	9 176	38.42	10.67	10 610	44.42	12.34	11 748	49.19	13.66

№ зразку	Компонентний склад, % мол.												Фізико-хімічні показники газу обчислені на основі компонентного складу, 101.325 кПа												
	метан, С1	етан, С2	пропан, С3	ізо-бутан, і-С4	н-бутан, н-С4	ізо-пентан, ізо-С5	ізо-пентан, і-С5	н-пентан, н-С5	гексани та вищі, С6+	кисень, О2	азот, N2	диоксид вуглецю, СО2	Густина абсолютна, кг/м3, при 20 °С.	Температура вимірювання/згоряння при 20/25°С											
														Теплота згоряння нижча			Теплота згоряння вища			Число Воббе нижче			Число Воббе вище		
														ккал/м3	МДж/м3	кВт·год/м3	ккал/м3	МДж/м3	кВт·год/м3	ккал/м3	МДж/м3	кВт·год/м3	ккал/м3	МДж/м3	кВт·год/м3
222	92.1106	3.5669	1.1642	0.1614	0.2635	0.0010	0.0700	0.0569	0.0847	0.0059	1.9677	0.5472	0.7320	8 287	34.70	9.64	9 176	38.42	10.67	10 630	44.51	12.36	11 771	49.28	13.69
223	91.1820	4.2980	1.0340	0.1240	0.1750	0.0030	0.0430	0.0340	0.0370	0.0050	1.5140	1.5510	0.7355	8 281	34.67	9.63	9 174	38.41	10.67	10 598	44.37	12.33	11 742	49.16	13.66
224	93.2533	3.4590	1.0645	0.1281	0.1785	0.0019	0.0368	0.0281	0.0536	0.0112	0.7311	1.0539	0.7255	8 280	34.67	9.63	9 175	38.41	10.67	10 668	44.66	12.41	11 821	49.49	13.75
225	89.2940	4.9418	1.2518	0.1454	0.2518	0.0043	0.0740	0.0647	0.1020	0.0099	1.7052	2.1551	0.7590	8 280	34.67	9.63	9 165	38.37	10.66	10 431	43.67	12.13	11 546	48.34	13.43
226	91.1354	4.2600	1.1180	0.1400	0.2150	0.0047	0.0590	0.0470	0.0960	0.0069	1.8480	1.0700	0.7397	8 278	34.66	9.63	9 167	38.38	10.66	10 563	44.22	12.28	11 696	48.97	13.60
227	90.2615	4.6885	1.1362	0.1410	0.2112	0.0041	0.0586	0.0457	0.1065	0.0031	0.3329	3.0109	0.7578	8 277	34.66	9.63	9 168	38.38	10.66	10 436	43.69	12.14	11 558	48.39	13.44
228	89.7805	4.6988	1.2850	0.1481	0.2439	0.0000	0.0646	0.0596	0.0763	0.0000	1.6206	2.0226	0.7549	8 276	34.65	9.63	9 162	38.36	10.66	10 455	43.77	12.16	11 574	48.46	13.46
229	94.1600	3.0593	0.9600	0.1351	0.1724	0.0019	0.0404	0.0319	0.0556	0.0000	1.1132	0.2702	0.7149	8 276	34.65	9.63	9 174	38.41	10.67	10 741	44.97	12.49	11 906	49.85	13.85
230	92.0632	3.3538	1.1836	0.1659	0.2767	0.0036	0.0738	0.0663	0.1079	0.0094	2.0687	0.6271	0.7338	8 275	34.65	9.62	9 164	38.37	10.66	10 602	44.39	12.33	11 740	49.15	13.65
231	88.7510	4.9047	1.3475	0.1666	0.2822	0.0067	0.0748	0.0694	0.1160	0.0041	1.6404	2.6368	0.7666	8 274	34.64	9.62	9 155	38.33	10.65	10 372	43.42	12.06	11 477	48.05	13.35
232	91.3096	4.2224	1.1124	0.1349	0.2119	0.0039	0.0557	0.0448	0.0745	0.0019	1.7868	1.0412	0.7378	8 274	34.64	9.62	9 166	38.37	10.66	10 571	44.26	12.29	11 711	49.03	13.62
233	89.4948	4.8771	1.2790	0.1481	0.2455	0.0038	0.0669	0.0616	0.0657	0.0055	1.6683	2.0838	0.7565	8 274	34.64	9.62	9 157	38.34	10.65	10 440	43.71	12.14	11 555	48.38	13.44
234	90.1024	3.6646	1.4682	0.2038	0.3835	0.0015	0.1016	0.0818	0.1085	0.0066	2.8573	1.0202	0.7510	8 273	34.64	9.62	9 157	38.34	10.65	10 477	43.87	12.19	11 597	48.56	13.49
235	89.2091	4.9301	1.3129	0.1563	0.2552	0.0059	0.0713	0.0750	0.0526	0.0062	1.7699	2.1555	0.7589	8 273	34.64	9.62	9 161	38.35	10.65	10 422	43.63	12.12	11 540	48.32	13.42
236	88.8820	4.9440	1.3550	0.1620	0.2800	0.0044	0.0740	0.0710	0.0750	0.0046	1.5210	2.6270	0.7649	8 271	34.63	9.62	9 155	38.33	10.65	10 380	43.46	12.07	11 488	48.10	13.36
237	94.0952	3.0688	0.9614	0.1341	0.1719	0.0019	0.0402	0.0318	0.0509	0.0000	1.1621	0.2817	0.7152	8 271	34.63	9.62	9 167	38.38	10.66	10 735	44.94	12.48	11 897	49.81	13.84
238	92.0463	3.3585	1.1802	0.1628	0.2846	0.0015	0.0713	0.0596	0.1039	0.0088	2.0986	0.6239	0.7336	8 270	34.63	9.62	9 158	38.34	10.65	10 597	44.37	12.32	11 734	49.13	13.65
239	91.3635	4.1746	1.1085	0.1334	0.2071	0.0037	0.0547	0.0443	0.0789	0.0033	1.7880	1.0397	0.7375	8 270	34.63	9.62	9 162	38.36	10.65	10 569	44.25	12.29	11 708	49.02	13.62
240	91.1761	3.3607	1.3410	0.2056	0.3160	0.0096	0.1346	0.0736	0.0710	0.0041	2.7812	0.5266	0.7401	8 269	34.62	9.62	9 155	38.33	10.65	10 547	44.16	12.27	11 677	48.89	13.58
241	91.5714	4.0994	1.0842	0.1374	0.2082	0.0037	0.0575	0.0464	0.0674	0.0040	1.7133	1.0071	0.7359	8 269	34.62	9.62	9 157	38.34	10.65	10 579	44.29	12.30	11 715	49.05	13.63
242	88.5985	3.6831	1.8126	0.2514	0.5116	0.0046	0.1143	0.0948	0.0715	0.0063	3.3436	1.5077	0.7659	8 268	34.62	9.62	9 149	38.30	10.64	10 368	43.41	12.06	11 472	48.03	13.34
243	89.2278	5.0270	1.2619	0.1427	0.2284	0.0037	0.0562	0.0556	0.0892	0.0064	1.7137	2.1873	0.7585	8 268	34.62	9.62	9 152	38.32	10.64	10 419	43.62	12.12	11 533	48.29	13.41
244	90.0632	3.6906	1.4704	0.2010	0.3752	0.0014	0.0969	0.0778	0.1053	0.0059	2.8469	1.0654	0.7511	8 267	34.61	9.61	9 151	38.31	10.64	10 469	43.83	12.18	11 588	48.52	13.48
245	92.2695	3.3020	1.1576	0.1630	0.2758	0.0007	0.0674	0.0637	0.0897	0.0083	2.0063	0.5960	0.7316	8 267	34.61	9.61	9 155	38.33	10.65	10 608	44.41	12.34	11 747	49.18	13.66
246	90.5661	4.1406	1.2317	0.1450	0.2579	0.0050	0.0664	0.0561	0.1165	0.0039	1.4018	2.0090	0.7509	8 266	34.61	9.61	9 150	38.31	10.64	10 469	43.83	12.18	11 589	48.52	13.48
247	91.0992	3.3911	1.2549	0.2004	0.2979	0.0070	0.1313	0.0632	0.1464	0.0037	2.7114	0.6935	0.7422	8 266	34.61	9.61	9 153	38.32	10.64	10 529	44.08	12.25	11 658	48.81	13.56
248	91.2740	4.1961	1.1035	0.1361	0.2163	0.0041	0.0560	0.0445	0.0679	0.0066	1.8474	1.0477	0.7379	8 265	34.60	9.61	9 155	38.33	10.65	10 559	44.21	12.28	11 697	48.97	13.60
249	91.6770	4.0840	1.0490	0.1360	0.2050	0.0044	0.0532	0.0427	0.0686	0.0041	1.7030	0.9730	0.7347	8 264	34.60	9.61	9 153	38.32	10.64	10 580	44.30	12.30	11 718	49.06	13.63

№ зразку	Компонентний склад, % мол.													Фізико-хімічні показники газу обчислені на основі компонентного складу, 101.325 кПа											
	метан, С1	етан, С2	пропан, С3	ізо-бутан, і-С4	н-бутан, н-С4	ізо-пентан, і-С5	н-пентан, н-С5	гексани та вищі, С6+	кисень, О2	азот, N2	диоксид вуглецю, СО2	Густина абсолютна, кг/м3, при 20 °С	Температура вимірювання/згоряння при 20/25°С												
													Теплота згоряння нижча			Теплота згоряння вища			Число Воббе нижче			Число Воббе вище			
													ккал/м3	МДж/м3	кВт·год/м3	ккал/м3	МДж/м3	кВт·год/м3	ккал/м3	МДж/м3	кВт·год/м3	ккал/м3	МДж/м3	кВт·год/м3	
250	88.8894	5.2610	1.2834	0.1389	0.2193	0.0014	0.0693	0.0498	0.0549	0.0034	1.8261	2.2032	0.7597	8 264	34.60	9.61	9 148	38.30	10.64	10 404	43.56	12.10	11 517	48.22	13.39
251	89.3634	4.9046	1.2773	0.1472	0.2398	0.0040	0.0693	0.0639	0.0552	0.0045	1.6956	2.1752	0.7575	8 263	34.60	9.61	9 147	38.30	10.64	10 419	43.62	12.12	11 534	48.29	13.41
252	92.3388	3.2631	1.1467	0.1609	0.2738	0.0005	0.0661	0.0617	0.0874	0.0081	2.0016	0.5913	0.7310	8 262	34.59	9.61	9 149	38.31	10.64	10 606	44.40	12.33	11 745	49.17	13.66
253	89.2842	4.9384	1.2797	0.1449	0.2383	0.0003	0.0694	0.0600	0.0643	0.0091	1.7353	2.1762	0.7580	8 262	34.59	9.61	9 145	38.29	10.64	10 415	43.61	12.11	11 528	48.27	13.41
254	89.2418	5.0132	1.1672	0.1270	0.1958	0.0044	0.0555	0.0481	0.1619	0.0047	1.6667	2.3137	0.7596	8 262	34.59	9.61	9 150	38.31	10.64	10 401	43.55	12.10	11 520	48.23	13.40
255	88.8369	3.6156	1.7598	0.2419	0.4883	0.0046	0.1096	0.0898	0.0792	0.0063	3.2848	1.4832	0.7638	8 257	34.57	9.60	9 138	38.26	10.63	10 370	43.42	12.06	11 475	48.04	13.35
256	95.1611	2.6474	0.8523	0.1345	0.1451	0.0023	0.0305	0.0247	0.0356	0.0000	0.7247	0.2418	0.7075	8 257	34.57	9.60	9 153	38.32	10.64	10 774	45.11	12.53	11 942	50.00	13.89
257	89.3899	4.9522	1.1988	0.1333	0.2190	0.0040	0.0639	0.0540	0.0938	0.0096	1.7211	2.1604	0.7570	8 257	34.57	9.60	9 140	38.27	10.63	10 415	43.61	12.11	11 529	48.27	13.41
258	89.4753	4.6216	1.4443	0.1442	0.2696	0.0028	0.0510	0.0409	0.0475	0.0089	2.7254	1.0885	0.7500	8 255	34.56	9.60	9 138	38.26	10.63	10 459	43.79	12.16	11 579	48.48	13.47
259	90.5699	4.3828	1.1545	0.1345	0.2136	0.0041	0.0586	0.0528	0.0777	0.0083	1.5349	1.8207	0.7477	8 255	34.56	9.60	9 140	38.27	10.63	10 475	43.86	12.18	11 598	48.56	13.49
260	90.0940	4.7760	1.1480	0.1340	0.2080	0.0039	0.0580	0.0490	0.0490	0.0071	1.6870	1.7860	0.7490	8 255	34.56	9.60	9 138	38.26	10.63	10 466	43.82	12.17	11 586	48.51	13.48
261	93.9804	3.0884	0.9487	0.1288	0.1665	0.0018	0.0384	0.0303	0.0437	0.0000	1.2535	0.3195	0.7156	8 255	34.56	9.60	9 150	38.31	10.64	10 709	44.84	12.45	11 871	49.70	13.81
262	88.7190	3.6582	1.7677	0.2423	0.4856	0.0044	0.1084	0.0876	0.0778	0.0064	3.3052	1.5374	0.7647	8 253	34.56	9.60	9 133	38.24	10.62	10 358	43.37	12.05	11 463	47.99	13.33
263	88.6048	3.6706	1.7844	0.2447	0.4898	0.0039	0.1086	0.0870	0.0833	0.0064	3.3876	1.5289	0.7655	8 253	34.55	9.60	9 133	38.24	10.62	10 352	43.34	12.04	11 456	47.96	13.32
264	89.4937	4.9154	1.2133	0.1354	0.2144	0.0039	0.0617	0.0520	0.0763	0.0089	1.6845	2.1404	0.7559	8 254	34.56	9.60	9 137	38.25	10.63	10 419	43.62	12.12	11 534	48.29	13.41
265	89.4463	4.9435	1.2141	0.1349	0.2127	0.0039	0.0613	0.0507	0.0736	0.0098	1.6822	2.1671	0.7562	8 252	34.55	9.60	9 135	38.25	10.62	10 414	43.60	12.11	11 529	48.27	13.41
266	91.5996	4.0713	1.0516	0.1296	0.1982	0.0035	0.0501	0.0389	0.0656	0.0090	1.7766	1.0060	0.7349	8 251	34.54	9.60	9 141	38.27	10.63	10 562	44.22	12.28	11 702	48.99	13.61
267	89.5025	5.0622	1.2009	0.1280	0.2004	0.0026	0.0393	0.0345	0.0641	0.0052	1.7920	1.9683	0.7534	8 250	34.54	9.59	9 131	38.23	10.62	10 431	43.67	12.13	11 546	48.34	13.43
268	89.8972	4.8140	1.1660	0.1390	0.2150	0.0043	0.0580	0.0480	0.0460	0.0085	1.7900	1.8140	0.7504	8 250	34.54	9.59	9 131	38.23	10.62	10 453	43.76	12.16	11 570	48.44	13.46
269	94.3481	3.0879	0.9048	0.1230	0.1337	0.0003	0.0293	0.0228	0.0197	0.0043	0.8573	0.4686	0.7130	8 250	34.54	9.59	9 141	38.27	10.63	10 723	44.89	12.47	11 880	49.74	13.82
270	89.0448	5.2158	1.2110	0.1315	0.2007	0.0034	0.0482	0.0426	0.0789	0.0052	1.7492	2.2687	0.7586	8 249	34.54	9.59	9 131	38.23	10.62	10 394	43.52	12.09	11 505	48.17	13.38
271	89.4405	4.9174	1.1984	0.1355	0.2086	0.0051	0.0603	0.0636	0.0708	0.0074	1.7573	2.1349	0.7560	8 248	34.53	9.59	9 134	38.24	10.62	10 410	43.58	12.11	11 529	48.27	13.41
272	89.7140	3.7107	1.5392	0.2079	0.3965	0.0016	0.0998	0.0803	0.0604	0.0071	3.0463	1.1362	0.7532	8 248	34.53	9.59	9 130	38.22	10.62	10 430	43.67	12.13	11 545	48.34	13.43
273	88.9291	5.2749	1.2073	0.1327	0.2040	0.0036	0.0459	0.0422	0.0778	0.0055	1.8250	2.2519	0.7591	8 248	34.53	9.59	9 129	38.22	10.62	10 389	43.50	12.08	11 499	48.15	13.37
274	91.0563	4.1136	1.1768	0.1346	0.2270	0.0045	0.0537	0.0418	0.0596	0.0025	1.1725	1.9571	0.7453	8 247	34.53	9.59	9 133	38.24	10.62	10 484	43.89	12.19	11 610	48.61	13.50
275	90.3974	4.6080	1.1200	0.1320	0.2050	0.0039	0.0560	0.0490	0.0540	0.0077	1.6850	1.6820	0.7465	8 247	34.53	9.59	9 131	38.23	10.62	10 476	43.86	12.18	11 598	48.56	13.49
276	89.0970	5.1822	1.2117	0.1315	0.2006	0.0034	0.0461	0.0424	0.0755	0.0047	1.7501	2.2550	0.7581	8 247	34.53	9.59	9 128	38.22	10.62	10 394	43.52	12.09	11 506	48.17	13.38
277	90.1450	4.7120	1.0505	0.1267	0.1870	0.0042	0.0517	0.0396	0.1223	0.0007	0.3017	3.2586	0.7591	8 246	34.52	9.59	9 133	38.24	10.62	10 387	43.49	12.08	11 505	48.17	13.38

№ зразку	Компонентний склад, % мол.												Фізико-хімічні показники газу обчислені на основі компонентного складу, 101.325 кПа												
	метан, C1	етан, C2	пропан, C3	ізо-бутан, i-C4	н-бутан, n-C4	ізо-пентан, iso-C5	ізо-пентан, i-C5	н-пентан, n-C5	гексани та вищі, C6+	кисень, O2	азот, N2	диоксид вуглецю, CO2	Густина абсолютна, кг/м ³ , при 20 °С	Температура вимірювання/згоряння при 20/25°С											
														Теплота згоряння нижча			Теплота згоряння вища			Число Воббе нижче			Число Воббе вище		
														ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³
278	89.1724	5.0932	1.1791	0.1288	0.1999	0.0043	0.0553	0.0465	0.0916	0.0027	1.6611	2.3651	0.7588	8 245	34.52	9.59	9 129	38.22	10.62	10 389	43.50	12.08	11 503	48.16	13.38
279	92.9184	3.6736	0.9639	0.1205	0.1546	0.0020	0.0360	0.0273	0.0319	0.0058	1.1963	0.8697	0.7245	8 245	34.52	9.59	9 133	38.24	10.62	10 630	44.50	12.36	11 775	49.30	13.69
280	95.3195	2.6029	0.8411	0.1257	0.1396	0.0014	0.0272	0.0203	0.0158	0.0047	0.6835	0.2183	0.7056	8 245	34.52	9.59	9 136	38.25	10.63	10 773	45.11	12.53	11 938	49.98	13.88
281	89.3050	5.0181	1.1617	0.1267	0.1961	0.0044	0.0541	0.0455	0.1111	0.0034	1.6483	2.3256	0.7581	8 245	34.52	9.59	9 131	38.23	10.62	10 393	43.51	12.09	11 510	48.19	13.39
282	89.6700	3.5266	1.5593	0.2108	0.4228	0.0022	0.1113	0.0796	0.0875	0.0086	3.1051	1.2162	0.7552	8 244	34.52	9.59	9 125	38.21	10.61	10 412	43.59	12.11	11 524	48.25	13.40
283	89.2719	5.0398	1.1659	0.1268	0.1962	0.0043	0.0543	0.0456	0.1021	0.0026	1.6485	2.3420	0.7582	8 243	34.51	9.59	9 129	38.22	10.62	10 391	43.50	12.08	11 508	48.18	13.38
284	89.3820	4.9869	1.1549	0.1257	0.1947	0.0044	0.0541	0.0459	0.1033	0.0028	1.6358	2.3095	0.7573	8 243	34.51	9.59	9 129	38.22	10.62	10 395	43.52	12.09	11 512	48.20	13.39
285	89.4808	4.9402	1.2118	0.1340	0.2051	0.0037	0.0595	0.0507	0.0487	0.0052	1.6644	2.1959	0.7554	8 241	34.50	9.58	9 123	38.20	10.61	10 406	43.57	12.10	11 520	48.23	13.40
286	92.1589	3.9153	1.0139	0.1303	0.1647	0.0056	0.0430	0.0310	0.0353	0.0059	1.2068	1.2893	0.7323	8 240	34.50	9.58	9 126	38.21	10.61	10 569	44.25	12.29	11 706	49.01	13.61
287	89.3920	4.6000	1.4420	0.1461	0.2735	0.0029	0.0518	0.0400	0.0322	0.0600	2.8596	1.0999	0.7501	8 240	34.50	9.58	9 122	38.19	10.61	10 443	43.72	12.15	11 560	48.40	13.44
288	89.2495	5.0582	1.1724	0.1279	0.1986	0.0044	0.0547	0.0457	0.0869	0.0028	1.6476	2.3513	0.7581	8 240	34.50	9.58	9 126	38.21	10.61	10 386	43.48	12.08	11 503	48.16	13.38
289	89.3565	4.9846	1.1774	0.1321	0.2126	0.0040	0.0568	0.0470	0.0724	0.0079	1.7357	2.2130	0.7565	8 239	34.50	9.58	9 121	38.19	10.61	10 396	43.53	12.09	11 509	48.18	13.38
290	89.2844	5.0420	1.1679	0.1269	0.1966	0.0045	0.0537	0.0446	0.0827	0.0033	1.6481	2.3453	0.7576	8 238	34.49	9.58	9 122	38.19	10.61	10 388	43.49	12.08	11 503	48.16	13.38
291	92.2821	3.8469	1.0118	0.1250	0.1662	0.0026	0.0383	0.0314	0.0405	0.0053	1.2673	1.1826	0.7308	8 238	34.49	9.58	9 124	38.20	10.61	10 573	44.27	12.30	11 711	49.03	13.62
292	89.1116	5.1357	1.1779	0.1273	0.2004	0.0040	0.0552	0.0455	0.0762	0.0029	1.6937	2.3696	0.7587	8 238	34.49	9.58	9 119	38.18	10.61	10 378	43.45	12.07	11 488	48.10	13.36
293	89.5445	4.9021	1.1962	0.1334	0.2059	0.0061	0.0612	0.0637	0.0304	0.0060	1.6700	2.1804	0.7548	8 237	34.49	9.58	9 123	38.19	10.61	10 405	43.56	12.10	11 524	48.25	13.40
294	89.4208	4.9484	1.1662	0.1313	0.2106	0.0040	0.0565	0.0464	0.0714	0.0104	1.7203	2.2138	0.7560	8 236	34.48	9.58	9 117	38.17	10.60	10 395	43.52	12.09	11 507	48.18	13.38
295	92.3415	3.8353	1.0020	0.1216	0.1633	0.0024	0.0383	0.0317	0.0313	0.0043	1.2437	1.1846	0.7301	8 235	34.48	9.58	9 122	38.19	10.61	10 577	44.28	12.30	11 715	49.05	13.63
296	89.2539	5.0670	1.1696	0.1271	0.1961	0.0043	0.0531	0.0443	0.0741	0.0027	1.6600	2.3478	0.7576	8 235	34.48	9.58	9 119	38.18	10.61	10 384	43.47	12.08	11 498	48.14	13.37
297	95.4708	2.4712	0.8501	0.1179	0.1245	0.0003	0.0240	0.0178	0.0211		0.6946	0.2077	0.7044	8 233	34.47	9.58	9 124	38.20	10.61	10 765	45.07	12.52	11 930	49.95	13.88
298	92.4302	3.7769	0.9865	0.1232	0.1643	0.0022	0.0367	0.0307	0.0376	0.0045	1.2467	1.1605	0.7295	8 233	34.47	9.58	9 119	38.18	10.61	10 577	44.28	12.30	11 715	49.05	13.63
299	92.5421	3.7319	0.9812	0.1240	0.1637	0.0022	0.0359	0.0294	0.0350	0.0046	1.2241	1.1259	0.7286	8 233	34.47	9.58	9 119	38.18	10.61	10 586	44.32	12.31	11 725	49.09	13.64
300	89.3278	5.0324	1.1646	0.1263	0.1946	0.0042	0.0526	0.0436	0.0694	0.0028	1.6531	2.3286	0.7569	8 233	34.47	9.58	9 117	38.17	10.60	10 386	43.48	12.08	11 500	48.15	13.38
301	95.5069	2.5154	0.7925	0.1265	0.1256	0.0015	0.0250	0.0190	0.0166	0.0000	0.6617	0.2093	0.7040	8 233	34.47	9.58	9 129	38.22	10.62	10 768	45.09	12.52	11 940	49.99	13.89
302	92.7149	3.6741	0.9674	0.1185	0.1543	0.0021	0.0360	0.0283	0.0346	0.0053	1.1899	1.0746	0.7270	8 231	34.46	9.57	9 117	38.17	10.60	10 594	44.35	12.32	11 734	49.13	13.65
303	92.8550	3.6012	0.9532	0.1228	0.1590	0.0016	0.0330	0.0277	0.0368	0.0041	1.1696	1.0360	0.7260	8 231	34.46	9.57	9 117	38.17	10.60	10 603	44.39	12.33	11 744	49.17	13.66
304	89.2816	5.0427	1.1582	0.1250	0.1960	0.0039	0.0537	0.0443	0.0725	0.0027	1.6716	2.3478	0.7573	8 231	34.46	9.57	9 110	38.14	10.59	10 380	43.46	12.07	11 488	48.10	13.36
305	92.6700	3.6838	0.9679	0.1174	0.1558	0.0027	0.0343	0.0277	0.0267	0.0046	1.2130	1.0961	0.7272	8 231	34.46	9.57	9 110	38.14	10.59	10 594	44.35	12.32	11 725	49.09	13.64

№ зразку	Компонентний склад, % мол.												Фізико-хімічні показники газу обчислені на основі компонентного складу, 101.325 кПа												
	метан, C1	етан, C2	пропан, C3	ізо-бутан, i-C4	н-бутан, n-C4	ізо-пентан, iso-C5	ізо-пентан, i-C5	н-пентан, n-C5	гексани та вищі, C6+	кисень, O2	азот, N2	диоксид вуглецю, CO2	Густина абсолютна, кг/м ³ , при 20 °С	Температура вимірювання/згоряння при 20/25°С											
														Теплота згоряння нижча			Теплота згоряння вища			Число Воббе нижче			Число Воббе вище		
														ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³
306	89.7308	4.8614	1.1466	0.1251	0.1917	0.0000	0.0490	0.0418	0.0570	0.0000	1.6576	2.1390	0.7530	8 228	34.45	9.57	9 110	38.14	10.59	10 407	43.57	12.10	11 522	48.24	13.40
307	95.5578	2.4904	0.7781	0.1237	0.1216	0.0015	0.0240	0.0182	0.0163	0.0000	0.6614	0.2070	0.7035	8 228	34.45	9.57	9 124	38.20	10.61	10 766	45.07	12.52	11 938	49.98	13.88
308	92.6861	3.6827	0.9676	0.1193	0.1572	0.0022	0.0344	0.0281	0.0296	0.0046	1.2031	1.0851	0.7271	8 228	34.45	9.57	9 114	38.16	10.60	10 589	44.34	12.32	11 730	49.11	13.64
309	92.2098	3.8426	0.9984	0.1213	0.1625	0.0004	0.0398	0.0308	0.0394	0.0082	1.3191	1.2277	0.7312	8 227	34.44	9.57	9 112	38.15	10.60	10 558	44.21	12.28	11 694	48.96	13.60
310	92.6400	3.6935	0.9718	0.1229	0.1589	0.0030	0.0356	0.0291	0.0238	0.0063	1.2231	1.0920	0.7274	8 227	34.44	9.57	9 112	38.15	10.60	10 586	44.32	12.31	11 725	49.09	13.64
311	90.7932	4.3379	1.0738	0.1203	0.1792	0.0000	0.0500	0.0429	0.0697	0.0000	1.5253	1.8077	0.7447	8 226	34.44	9.57	9 110	38.14	10.59	10 460	43.79	12.17	11 584	48.50	13.47
312	94.6175	2.8496	0.8322	0.1212	0.1328	0.0017	0.0278	0.0225	0.0297	0.0000	1.1133	0.2517	0.7097	8 226	34.44	9.57	9 119	38.18	10.61	10 716	44.87	12.46	11 880	49.74	13.82
313	93.0181	3.5298	0.9369	0.1212	0.1520	0.0019	0.0327	0.0270	0.0348	0.0037	1.1375	1.0044	0.7246	8 226	34.44	9.57	9 112	38.15	10.60	10 606	44.41	12.34	11 749	49.19	13.66
314	89.8933	4.7487	1.0896	0.1235	0.1875	0.0034	0.0457	0.0428	0.0910	0.0045	1.6658	2.1043	0.7520	8 224	34.43	9.56	9 105	38.12	10.59	10 407	43.57	12.10	11 522	48.24	13.40
315	89.8656	4.7570	1.1008	0.1242	0.1886	0.0034	0.0457	0.0430	0.0876	0.0053	1.6732	2.1056	0.7522	8 224	34.43	9.56	9 105	38.12	10.59	10 407	43.57	12.10	11 522	48.24	13.40
316	95.6362	2.4280	0.7643	0.1216	0.1199	0.0015	0.0237	0.0181	0.0165	0.0000	0.6690	0.2012	0.7028	8 223	34.43	9.56	9 117	38.17	10.60	10 766	45.07	12.52	11 935	49.97	13.88
317	92.8683	3.5990	0.9475	0.1206	0.1544	0.0020	0.0330	0.0260	0.0233	0.0059	1.1850	1.0350	0.7254	8 223	34.43	9.56	9 107	38.13	10.59	10 598	44.37	12.33	11 737	49.14	13.65
318	93.2232	3.4107	0.9240	0.1190	0.1487	0.0003	0.0357	0.0277	0.0294	0.0075	1.1433	0.9304	0.7227	8 221	34.42	9.56	9 107	38.13	10.59	10 612	44.43	12.34	11 756	49.22	13.67
319	95.5212	2.4885	0.7657	0.1211	0.1181	0.0015	0.0229	0.0173	0.0149	0.0000	0.7156	0.2132	0.7035	8 221	34.42	9.56	9 114	38.16	10.60	10 757	45.04	12.51	11 926	49.93	13.87
320	95.6139	2.4239	0.7744	0.1162	0.1240	0.0013	0.0237	0.0179	0.0157	0.0039	0.6786	0.2065	0.7030	8 221	34.42	9.56	9 110	38.14	10.59	10 762	45.06	12.52	11 926	49.93	13.87
321	89.8467	4.7222	1.1232	0.1266	0.1908	0.0038	0.0536	0.0560	0.0594	0.0079	1.7447	2.0650	0.7519	8 220	34.42	9.56	9 105	38.12	10.59	10 404	43.56	12.10	11 523	48.25	13.40
322	89.6008	4.8798	1.1652	0.1256	0.1868	0.0044	0.0482	0.0504	0.0416	0.0076	1.7475	2.1422	0.7534	8 220	34.42	9.56	9 104	38.12	10.59	10 393	43.51	12.09	11 511	48.20	13.39
323	94.6095	2.8244	0.8210	0.1187	0.1330	0.0017	0.0280	0.0226	0.0289	0.0000	1.1507	0.2615	0.7097	8 219	34.41	9.56	9 112	38.15	10.60	10 707	44.83	12.45	11 871	49.70	13.81
324	95.4363	2.5148	0.7754	0.1143	0.1205	0.0013	0.0233	0.0176	0.0155	0.0043	0.7596	0.2171	0.7040	8 219	34.41	9.56	9 107	38.13	10.59	10 751	45.01	12.50	11 914	49.88	13.86
325	95.4945	2.4502	0.7800	0.1132	0.1193	0.0002	0.0237	0.0178	0.0239		0.7703	0.2069	0.7038	8 216	34.40	9.56	9 107	38.13	10.59	10 748	45.00	12.50	11 914	49.88	13.86
326	95.6213	2.4812	0.7605	0.1123	0.1079	0.0014	0.0190	0.0131	0.0102	0.0036	0.6611	0.2084	0.7024	8 216	34.40	9.56	9 105	38.12	10.59	10 760	45.05	12.51	11 923	49.92	13.87
327	95.6431	2.4391	0.7632	0.1187	0.1131	0.0003	0.0212	0.0150	0.0078	0.0055	0.6723	0.2009	0.7024	8 216	34.40	9.55	9 105	38.12	10.59	10 759	45.04	12.51	11 923	49.92	13.87
328	93.6923	3.2062	0.8899	0.1179	0.1418	0.0001	0.0319	0.0246	0.0226	0.0078	1.0758	0.7890	0.7186	8 215	34.39	9.55	9 101	38.10	10.58	10 635	44.53	12.37	11 782	49.33	13.70
329	89.8774	4.7188	1.1063	0.1253	0.1931	0.0037	0.0564	0.0487	0.0553	0.0050	1.6762	2.1338	0.7519	8 215	34.40	9.55	9 096	38.08	10.58	10 397	43.53	12.09	11 511	48.20	13.39
330	95.6374	2.4329	0.7657	0.1181	0.1150	0.0003	0.0219	0.0153	0.0055	0.0058	0.6877	0.1943	0.7023	8 215	34.39	9.55	9 104	38.12	10.59	10 757	45.04	12.51	11 922	49.92	13.87
331	95.7007	2.4183	0.7446	0.1143	0.1103	0.0015	0.0202	0.0144	0.0111	0.0086	0.6535	0.2025	0.7019	8 214	34.39	9.55	9 102	38.11	10.59	10 759	45.05	12.51	11 923	49.92	13.87
332	91.7214	3.9420	0.9864	0.1169	0.1659	0.0000	0.0449	0.0376	0.0615	0.0000	1.3794	1.5440	0.7368	8 214	34.39	9.55	9 098	38.09	10.58	10 502	43.97	12.21	11 632	48.70	13.53
333	95.6477	2.4380	0.7648	0.1180	0.1132	0.0004	0.0209	0.0144	0.0042	0.0060	0.6716	0.2008	0.7022	8 214	34.39	9.55	9 104	38.12	10.59	10 758	45.04	12.51	11 923	49.92	13.87

№ зразку	Компонентний склад, % мол.												Фізико-хімічні показники газу обчислені на основі компонентного складу, 101.325 кПа												
	метан, С1	етан, С2	пропан, С3	ізо-бутан, і-С4	н-бутан, н-С4	ізо-пентан, ізо-С5	ізо-пентан, і-С5	н-пентан, н-С5	гексани та вищі, С6+	кисень, О2	азот, N2	диоксид вуглецю, СО2	Густина абсолютна, кг/м3, при 20 °С.	Температура вимірювання/згоряння при 20/25°С											
														Теплота згоряння нижча			Теплота згоряння вища			Число Воббе нижче			Число Воббе вище		
														ккал/м3	МДж/м3	кВт·год/м3	ккал/м3	МДж/м3	кВт·год/м3	ккал/м3	МДж/м3	кВт·год/м3	ккал/м3	МДж/м3	кВт·год/м3
334	95.6268	2.4398	0.7639	0.1176	0.1123	0.0004	0.0216	0.0153	0.0051	0.0065	0.6937	0.1972	0.7023	8 213	34.39	9.55	9 102	38.11	10.59	10 756	45.03	12.51	11 920	49.91	13.86
335	95.7209	2.4086	0.7410	0.1139	0.1098	0.0014	0.0199	0.0142	0.0105	0.0098	0.6492	0.2008	0.7017	8 212	34.38	9.55	9 100	38.10	10.58	10 759	45.05	12.51	11 923	49.92	13.87
336	95.6987	2.4180	0.7358	0.1144	0.1109	0.0014	0.0219	0.0161	0.0113	0.0042	0.6607	0.2066	0.7020	8 212	34.38	9.55	9 101	38.11	10.58	10 757	45.04	12.51	11 922	49.91	13.86
337	95.6695	2.4023	0.7571	0.1171	0.1140	0.0003	0.0239	0.0162	0.0062	0.0066	0.6935	0.1934	0.7021	8 212	34.38	9.55	9 101	38.10	10.58	10 755	45.03	12.51	11 920	49.91	13.86
338	95.3190	2.5222	0.7764	0.1113	0.1209	0.0014	0.0232	0.0180	0.0187	0.0046	0.8576	0.2268	0.7047	8 211	34.38	9.55	9 099	38.10	10.58	10 734	44.94	12.48	11 896	49.80	13.83
339	95.0734	2.6168	0.7901	0.1155	0.1294	0.0013	0.0237	0.0190	0.0191	0.0040	0.9579	0.2498	0.7064	8 211	34.38	9.55	9 099	38.10	10.58	10 722	44.89	12.47	11 881	49.74	13.82
340	95.6936	2.3940	0.7561	0.1141	0.1128	0.0003	0.0220	0.0154	0.0055	0.0068	0.6864	0.1929	0.7019	8 210	34.37	9.55	9 099	38.10	10.58	10 755	45.03	12.51	11 920	49.90	13.86
341	95.6985	2.3919	0.7518	0.1148	0.1123	0.0003	0.0221	0.0163	0.0045	0.0060	0.6909	0.1907	0.7018	8 209	34.37	9.55	9 098	38.09	10.58	10 755	45.03	12.51	11 919	49.90	13.86
342	95.7712	2.3828	0.7299	0.1120	0.1082	0.0015	0.0196	0.0142	0.0107	0.0070	0.6447	0.1982	0.7013	8 209	34.37	9.55	9 098	38.09	10.58	10 759	45.04	12.51	11 923	49.92	13.87
343	95.7263	2.3925	0.7312	0.1133	0.1105	0.0015	0.0217	0.0158	0.0113	0.0040	0.6677	0.2042	0.7017	8 209	34.37	9.55	9 098	38.09	10.58	10 755	45.03	12.51	11 920	49.90	13.86
344	95.7632	2.3870	0.7308	0.1121	0.1083	0.0015	0.0198	0.0141	0.0108	0.0076	0.6458	0.1990	0.7014	8 209	34.37	9.55	9 098	38.09	10.58	10 759	45.04	12.51	11 923	49.92	13.87
345	95.5570	2.3911	0.7592	0.1150	0.1225	0.0015	0.0235	0.0175	0.0167	0.0058	0.7734	0.2167	0.7032	8 208	34.37	9.55	9 097	38.09	10.58	10 742	44.98	12.49	11 905	49.84	13.85
346	95.8274	2.2401	0.8192	0.1051	0.1016	0.0014	0.0183	0.0130	0.0100	0.0083	0.6630	0.1926	0.7013	8 207	34.36	9.54	9 095	38.08	10.58	10 756	45.03	12.51	11 921	49.91	13.86
347	95.7774	2.3781	0.7327	0.1089	0.1050	0.0013	0.0186	0.0126	0.0094	0.0034	0.6534	0.1992	0.7012	8 207	34.36	9.54	9 095	38.08	10.58	10 756	45.03	12.51	11 921	49.91	13.86
348	95.7617	2.3960	0.7251	0.1125	0.1065	0.0020	0.0178	0.0133	0.0052	0.0048	0.6782	0.1769	0.7010	8 207	34.36	9.54	9 095	38.08	10.58	10 756	45.03	12.51	11 921	49.91	13.86
349	94.6454	2.7825	0.8223	0.1149	0.1295	0.0001	0.0271	0.0204	0.0097	0.0090	0.9460	0.4931	0.7104	8 205	34.35	9.54	9 092	38.06	10.57	10 683	44.73	12.42	11 838	49.56	13.77
350	89.9648	4.7393	0.9677	0.1132	0.1658	0.0042	0.0455	0.0340	0.1204	0.0017	0.3109	3.5325	0.7606	8 205	34.35	9.54	9 088	38.05	10.57	10 325	43.23	12.01	11 437	47.88	13.30
351	95.7308	2.3785	0.7296	0.1125	0.1077	0.0022	0.0186	0.0137	0.0079	0.0059	0.7178	0.1748	0.7013	8 204	34.35	9.54	9 093	38.07	10.58	10 752	45.02	12.50	11 916	49.89	13.86
352	89.2108	4.9960	1.1580	0.1240	0.1900	0.0036	0.0520	0.0450	0.0440	0.0046	1.5320	2.6400	0.7588	8 204	34.35	9.54	9 083	38.03	10.56	10 310	43.17	11.99	11 414	47.79	13.28
353	95.7710	2.3642	0.7263	0.1117	0.1077	0.0014	0.0197	0.0142	0.0110	0.0108	0.6639	0.1981	0.7013	8 204	34.35	9.54	9 093	38.07	10.58	10 754	45.02	12.51	11 918	49.90	13.86
354	95.7535	2.3616	0.7023	0.1098	0.1082	0.0012	0.0220	0.0154	0.0154	0.0034	0.6749	0.2324	0.7016	8 202	34.34	9.54	9 093	38.07	10.58	10 749	45.00	12.50	11 916	49.89	13.86
355	95.8438	2.3256	0.7151	0.1102	0.1063	0.0013	0.0194	0.0140	0.0105	0.0087	0.6506	0.1945	0.7007	8 202	34.34	9.54	9 090	38.06	10.57	10 754	45.02	12.51	11 918	49.90	13.86
356	95.7911	2.3655	0.7189	0.1107	0.1061	0.0014	0.0184	0.0136	0.0058	0.0051	0.6872	0.1762	0.7008	8 202	34.34	9.54	9 090	38.06	10.57	10 754	45.02	12.51	11 918	49.90	13.86
357	89.2374	4.3195	1.0917	0.1795	0.2335	0.0074	0.0877	0.0618	0.2013	0.0029	3.5465	1.0308	0.7529	8 202	34.34	9.54	9 079	38.01	10.56	10 373	43.43	12.06	11 481	48.07	13.35
358	86.4904	8.6441	0.1060	0.0046	0.0117	0.0000	0.0196	0.0224	0.0599	0.0043	2.2897	2.3474	0.7620	8 201	34.33	9.54	9 081	38.02	10.56	10 310	43.16	11.99	11 417	47.80	13.28
359	95.5845	2.4552	0.6932	0.1097	0.1078	0.0025	0.0205	0.0158	0.0161	0.0049	0.7100	0.2798	0.7028	8 200	34.33	9.54	9 088	38.05	10.57	10 734	44.94	12.48	11 897	49.81	13.84
360	95.8309	2.3324	0.7135	0.1102	0.1051	0.0023	0.0180	0.0131	0.0038	0.0049	0.6931	0.1727	0.7004	8 200	34.33	9.54	9 086	38.04	10.57	10 754	45.02	12.51	11 916	49.89	13.86
361	95.9031	2.2950	0.6981	0.1098	0.1013	0.0013	0.0183	0.0126	0.0123	0.0036	0.6608	0.1838	0.7001	8 198	34.32	9.53	9 086	38.04	10.57	10 752	45.02	12.50	11 917	49.89	13.86

№ зразку	Компонентний склад, % мол.												Фізико-хімічні показники газу обчислені на основі компонентного складу, 101.325 кПа												
	метан, C1	етан, C2	пропан, C3	ізо-бутан, i-C4	н-бутан, n-C4	ізо-пентан, iso-C5	ізо-пентан, i-C5	н-пентан, n-C5	гексани та вищі, C6+	кисень, O2	азот, N2	диоксид вуглецю, CO2	Густина абсолютна, кг/м ³ , при 20 °С	Температура вимірювання/згоряння при 20/25°С											
														Теплота згоряння нижча			Теплота згоряння вища			Число Воббе нижче			Число Воббе вище		
														ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³
362	95.9167	2.2903	0.6953	0.1078	0.1043	0.0015	0.0198	0.0149	0.0110	0.0042	0.6422	0.1920	0.7002	8 198	34.33	9.53	9 087	38.04	10.57	10 753	45.02	12.51	11 918	49.90	13.86
363	95.5921	2.4539	0.6915	0.1076	0.1065	0.0018	0.0206	0.0159	0.0105	0.0054	0.7100	0.2842	0.7026	8 197	34.32	9.53	9 083	38.03	10.56	10 734	44.94	12.48	11 895	49.80	13.83
364	95.9031	2.2950	0.6981	0.1098	0.1013	0.0013	0.0183	0.0126	0.0123	0.0036	0.6608	0.1838	0.7001	8 197	34.32	9.53	9 086	38.04	10.57	10 751	45.01	12.50	11 916	49.89	13.86
365	95.8534	2.3139	0.7078	0.1063	0.1027	0.0013	0.0182	0.0131	0.0100	0.0095	0.6681	0.1957	0.7005	8 197	34.32	9.53	9 086	38.04	10.57	10 749	45.00	12.50	11 914	49.88	13.86
366	86.6051	5.5810	1.4810	0.1850	0.2750	0.0058	0.0740	0.0550	0.0510	0.0151	1.7660	3.9060	0.7856	8 197	34.32	9.53	9 071	37.98	10.55	10 150	42.50	11.81	11 233	47.03	13.06
367	95.6337	2.4272	0.6868	0.1084	0.1065	0.0022	0.0206	0.0157	0.0124	0.0051	0.7082	0.2732	0.7023	8 195	34.31	9.53	9 083	38.03	10.56	10 731	44.93	12.48	11 895	49.80	13.83
368	95.3005	2.4997	0.7729	0.1032	0.1048	0.0001	0.0201	0.0146	0.0177		0.9335	0.2329	0.7043	8 195	34.31	9.53	9 083	38.03	10.56	10 716	44.87	12.46	11 878	49.73	13.81
369	95.9156	2.2943	0.6916	0.1025	0.0994	0.0012	0.0176	0.0126	0.0104	0.0040	0.6625	0.1883	0.6999	8 195	34.31	9.53	9 086	38.04	10.57	10 750	45.01	12.50	11 918	49.90	13.86
370	95.9096	2.2603	0.7041	0.1072	0.1038	0.0013	0.0185	0.0133	0.0103	0.0098	0.6696	0.1922	0.7002	8 195	34.31	9.53	9 081	38.02	10.56	10 749	45.00	12.50	11 911	49.87	13.85
371	92.9835	3.1848	0.9500	0.1235	0.1939	0.0020	0.0409	0.0298	0.0380	0.0091	2.0054	0.4391	0.7216	8 194	34.31	9.53	9 077	38.00	10.56	10 586	44.32	12.31	11 727	49.10	13.64
372	95.6242	2.4437	0.6832	0.1038	0.1016	0.0015	0.0199	0.0141	0.0133	0.0041	0.7005	0.2901	0.7023	8 192	34.30	9.53	9 081	38.02	10.56	10 729	44.92	12.48	11 892	49.79	13.83
373	95.8189	2.3085	0.6832	0.1063	0.1049	0.0013	0.0211	0.0149	0.0152	0.0043	0.6906	0.2310	0.7010	8 192	34.30	9.53	9 086	38.04	10.57	10 738	44.96	12.49	11 909	49.86	13.85
374	95.9237	2.2732	0.6973	0.1091	0.1042	0.0007	0.0180	0.0134	0.0044	0.0049	0.6807	0.1704	0.6998	8 192	34.30	9.53	9 081	38.02	10.56	10 748	45.00	12.50	11 914	49.88	13.86
375	89.6346	4.7520	1.1130	0.1220	0.1860	0.0036	0.0500	0.0430	0.0470	0.0048	1.4970	2.5470	0.7554	8 192	34.30	9.53	9 069	37.97	10.55	10 346	43.32	12.03	11 453	47.95	13.32
376	95.8891	2.2502	0.7094	0.1086	0.1058	0.0014	0.0190	0.0137	0.0106	0.0120	0.6864	0.1938	0.7004	8 192	34.30	9.53	9 081	38.02	10.56	10 744	44.98	12.49	11 909	49.86	13.85
377	95.4932	2.4944	0.6762	0.1060	0.1069	0.0021	0.0216	0.0168	0.0157	0.0058	0.7358	0.3255	0.7034	8 192	34.30	9.53	9 081	38.02	10.56	10 720	44.88	12.47	11 883	49.75	13.82
378	96.0163	2.2335	0.6771	0.1061	0.0978	0.0012	0.0189	0.0120	0.0121	0.0039	0.6437	0.1774	0.6992	8 191	34.30	9.53	9 079	38.01	10.56	10 751	45.01	12.50	11 916	49.89	13.86
379	96.0166	2.2220	0.6825	0.1052	0.0972	0.0007	0.0170	0.0119	0.0115	0.0033	0.6496	0.1825	0.6992	8 190	34.29	9.53	9 076	38.00	10.56	10 750	45.01	12.50	11 914	49.88	13.86
380	95.5211	2.4701	0.6645	0.1025	0.1086	0.0029	0.0218	0.0166	0.0199	0.0046	0.7296	0.3378	0.7034	8 190	34.29	9.53	9 079	38.01	10.56	10 717	44.87	12.46	11 880	49.74	13.82
381	95.9457	2.2343	0.6953	0.1056	0.1023	0.0013	0.0182	0.0131	0.0103	0.0090	0.6707	0.1942	0.6999	8 190	34.29	9.53	9 079	38.01	10.56	10 743	44.98	12.49	11 909	49.86	13.85
382	94.6602	2.7660	0.7680	0.1065	0.1183	0.0007	0.0234	0.0176	0.0234	0.0000	1.2268	0.2891	0.7085	8 190	34.29	9.53	9 081	38.02	10.56	10 678	44.71	12.42	11 840	49.57	13.77
383	89.4398	4.7682	1.1253	0.1267	0.1904	0.0071	0.0487	0.0412	0.0611	0.0038	1.6062	2.5814	0.7572	8 190	34.29	9.53	9 067	37.96	10.54	10 330	43.25	12.01	11 436	47.88	13.30
384	95.9811	2.2016	0.6890	0.1050	0.1016	0.0013	0.0183	0.0130	0.0099	0.0112	0.6794	0.1886	0.6996	8 188	34.28	9.52	9 074	37.99	10.55	10 744	44.98	12.50	11 906	49.85	13.85
385	95.8681	2.2830	0.6766	0.1054	0.1044	0.0012	0.0198	0.0144	0.0116	0.0035	0.6832	0.2288	0.7004	8 188	34.28	9.52	9 076	38.00	10.56	10 737	44.95	12.49	11 902	49.83	13.84
386	96.0111	2.2203	0.6727	0.1051	0.0977	0.0013	0.0172	0.0121	0.0121	0.0042	0.6696	0.1766	0.6992	8 188	34.28	9.52	9 074	37.99	10.55	10 748	45.00	12.50	11 911	49.87	13.85
387	95.9836	2.2153	0.6885	0.1042	0.1006	0.0013	0.0180	0.0129	0.0098	0.0090	0.6643	0.1925	0.6995	8 188	34.28	9.52	9 076	38.00	10.56	10 743	44.98	12.49	11 909	49.86	13.85
388	95.9303	2.2426	0.6826	0.1035	0.0977	0.0001	0.0193	0.0134	0.0126		0.7049	0.1928	0.6998	8 188	34.28	9.52	9 074	37.99	10.55	10 742	44.97	12.49	11 904	49.84	13.84
389	95.1957	2.4899	0.7205	0.1053	0.1149	0.0015	0.0268	0.0181	0.0308	0.0067	0.8372	0.4526	0.7066	8 188	34.28	9.52	9 079	38.01	10.56	10 689	44.75	12.43	11 852	49.62	13.78

№ зразку	Компонентний склад, % мол.													Фізико-хімічні показники газу обчислені на основі компонентного складу, 101.325 кПа											
	метан, C1	етан, C2	пропан, C3	ізо-бутан, i-C4	н-бутан, n-C4	ізо-пентан, iso-C5	ізо-пентан, i-C5	н-пентан, n-C5	гексани та вищі, C6+	кисень, O2	азот, N2	диоксид вуглецю, CO2	Густина абсолютна, кг/м ³ , при 20 °С	Температура вимірювання/згоряння при 20/25°С											
														Теплота згоряння нижча			Теплота згоряння вища			Число Воббе нижче			Число Воббе вище		
														ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³
390	95.5176	2.4757	0.6648	0.1037	0.1055	0.0016	0.0221	0.0170	0.0140	0.0062	0.7368	0.3350	0.7032	8 188	34.28	9.52	9 076	38.00	10.56	10 715	44.86	12.46	11 878	49.73	13.81
391	90.2170	3.3060	1.3820	0.1892	0.3653	0.0014	0.0856	0.0822	0.0761	0.0083	3.1546	1.1323	0.7498	8 187	34.28	9.52	9 064	37.95	10.54	10 384	43.48	12.08	11 496	48.13	13.37
392	95.9892	2.2276	0.6752	0.1053	0.0980	0.0012	0.0175	0.0124	0.0119	0.0044	0.6798	0.1775	0.6993	8 187	34.28	9.52	9 075	38.00	10.55	10 745	44.99	12.50	11 910	49.86	13.85
393	90.8267	4.3985	0.9668	0.1075	0.1601	0.0033	0.0425	0.0361	0.0369	0.0053	1.8278	1.5885	0.7407	8 187	34.28	9.52	9 067	37.96	10.54	10 440	43.71	12.14	11 562	48.41	13.45
394	95.9892	2.2276	0.6752	0.1053	0.0980	0.0012	0.0175	0.0124	0.0119	0.0044	0.6798	0.1775	0.6993	8 187	34.28	9.52	9 075	38.00	10.55	10 745	44.99	12.50	11 910	49.86	13.85
395	96.0079	2.2265	0.6607	0.1005	0.0974	0.0015	0.0183	0.0134	0.0127	0.0040	0.6710	0.1861	0.6992	8 185	34.27	9.52	9 076	38.00	10.56	10 744	44.98	12.50	11 914	49.88	13.86
396	95.6074	2.4353	0.6553	0.1005	0.1014	0.0015	0.0211	0.0155	0.0175	0.0041	0.7022	0.3382	0.7026	8 185	34.27	9.52	9 074	37.99	10.55	10 717	44.87	12.46	11 880	49.74	13.82
397	89.1669	4.8989	1.1353	0.1260	0.1889	0.0081	0.0497	0.0416	0.0539	0.0044	1.6462	2.6801	0.7592	8 185	34.27	9.52	9 062	37.94	10.54	10 310	43.17	11.99	11 414	47.79	13.28
398	95.9930	2.2314	0.6694	0.1006	0.0991	0.0014	0.0176	0.0126	0.0109	0.0048	0.6723	0.1871	0.6993	8 185	34.27	9.52	9 079	38.01	10.56	10 741	44.97	12.49	11 914	49.88	13.86
399	96.0785	2.1851	0.6642	0.1022	0.0947	0.0012	0.0165	0.0116	0.0105	0.0034	0.6587	0.1734	0.6986	8 184	34.26	9.52	9 071	37.98	10.55	10 745	44.99	12.50	11 910	49.87	13.85
400	96.0785	2.1851	0.6642	0.1022	0.0947	0.0012	0.0165	0.0116	0.0105	0.0034	0.6587	0.1734	0.6986	8 184	34.26	9.52	9 071	37.98	10.55	10 745	44.99	12.50	11 910	49.87	13.85
401	96.0335	2.2031	0.6633	0.1035	0.0959	0.0014	0.0171	0.0118	0.0120	0.0039	0.6803	0.1742	0.6989	8 184	34.26	9.52	9 071	37.98	10.55	10 743	44.98	12.49	11 908	49.86	13.85
402	96.0785	2.1851	0.6642	0.1022	0.0947	0.0012	0.0165	0.0116	0.0105	0.0034	0.6587	0.1734	0.6986	8 183	34.26	9.52	9 071	37.98	10.55	10 745	44.99	12.50	11 911	49.87	13.85
403	95.9533	2.2306	0.6721	0.1010	0.0953	0.0008	0.0195	0.0137	0.0120		0.7145	0.1873	0.6995	8 183	34.26	9.52	9 071	37.98	10.55	10 736	44.95	12.49	11 902	49.83	13.84
404	96.0887	2.1833	0.6473	0.0983	0.0951	0.0013	0.0178	0.0129	0.0121	0.0038	0.6570	0.1823	0.6985	8 183	34.26	9.52	9 074	37.99	10.55	10 744	44.98	12.50	11 914	49.88	13.86
405	92.4034	3.4343	0.9639	0.1121	0.1772	0.0017	0.0449	0.0368	0.0387	0.0059	2.2050	0.5761	0.7256	8 182	34.26	9.52	9 063	37.95	10.54	10 542	44.14	12.26	11 677	48.89	13.58
406	96.0403	2.1678	0.6553	0.0992	0.0912	0.0018	0.0404	0.0165	0.0039	0.0072	0.6882	0.1882	0.6991	8 182	34.26	9.52	9 073	37.99	10.55	10 739	44.96	12.49	11 909	49.86	13.85
407	91.5108	3.2836	1.0191	0.1341	0.2469	0.0015	0.0703	0.0529	0.1497	0.0095	3.4348	0.0868	0.7316	8 181	34.25	9.51	9 060	37.93	10.54	10 497	43.95	12.21	11 625	48.67	13.52
408	91.5108	3.2836	1.0191	0.1341	0.2469	0.0015	0.0703	0.0529	0.1497	0.0095	3.4348	0.0868	0.7316	8 181	34.25	9.51	9 060	37.93	10.54	10 497	43.95	12.21	11 625	48.67	13.52
409	96.0496	2.1612	0.6526	0.0982	0.0905	0.0013	0.0415	0.0165	0.0047	0.0073	0.6917	0.1849	0.6990	8 181	34.25	9.51	9 072	37.98	10.55	10 739	44.96	12.49	11 909	49.86	13.85
410	96.0916	2.1225	0.6568	0.1048	0.1033	0.0017	0.0230	0.0170	0.0104	0.0048	0.6779	0.1862	0.6989	8 180	34.25	9.51	9 069	37.97	10.55	10 738	44.96	12.49	11 904	49.84	13.84
411	96.0918	2.1225	0.6568	0.1048	0.1033	0.0015	0.0230	0.0170	0.0104	0.0048	0.6779	0.1862	0.6989	8 180	34.25	9.51	9 069	37.97	10.55	10 738	44.96	12.49	11 904	49.84	13.84
412	94.2239	2.9445	0.7637	0.0980	0.1109	0.0005	0.0237	0.0185	0.0330	0.0000	1.4571	0.3262	0.7111	8 180	34.25	9.51	9 069	37.97	10.55	10 645	44.57	12.38	11 801	49.41	13.73
413	89.1102	5.0870	1.0590	0.1170	0.1810	0.0035	0.0480	0.0410	0.0420	0.0053	1.6680	2.6380	0.7583	8 180	34.25	9.51	9 057	37.92	10.53	10 310	43.16	11.99	11 414	47.79	13.28
414	96.1068	2.1459	0.6643	0.1009	0.0965	0.0012	0.0177	0.0124	0.0098	0.0033	0.6495	0.1917	0.6986	8 180	34.25	9.51	9 071	37.98	10.55	10 744	44.98	12.49	11 914	49.88	13.86
415	96.0619	2.1837	0.6568	0.0996	0.0959	0.0012	0.0173	0.0116	0.0084	0.0038	0.6814	0.1784	0.6986	8 180	34.25	9.51	9 067	37.96	10.54	10 741	44.97	12.49	11 904	49.84	13.84
416	96.2013	2.1039	0.6240	0.0997	0.0950	0.0000	0.0185	0.0127	0.0231		0.6044	0.2174	0.6983	8 180	34.25	9.51	9 067	37.96	10.54	10 743	44.98	12.49	11 906	49.85	13.85
417	96.0759	2.1878	0.6470	0.0987	0.0953	0.0014	0.0177	0.0129	0.0121	0.0052	0.6629	0.1832	0.6986	8 180	34.25	9.51	9 071	37.98	10.55	10 741	44.97	12.49	11 911	49.87	13.85

№ зразку	Компонентний склад, % мол.												Фізико-хімічні показники газу обчислені на основі компонентного складу, 101.325 кПа												
	метан, С1	етан, С2	пропан, С3	ізо-бутан, і-С4	н-бутан, н-С4	ізо-пентан, ізо-С5	ізо-пентан, і-С5	н-пентан, н-С5	гексани та вищі, С6+	кисень, О2	азот, N2	диоксид вуглецю, СО2	Густина абсолютна, кг/м3, при 20 °С.	Температура вимірювання/згоряння при 20/25°С											
														Теплота згоряння нижча			Теплота згоряння вища			Число Воббе нище			Число Воббе вище		
														ккал/м3	МДж/м3	кВт·год/м3	ккал/м3	МДж/м3	кВт·год/м3	ккал/м3	МДж/м3	кВт·год/м3	ккал/м3	МДж/м3	кВт·год/м3
418	96.0859	2.1609	0.6516	0.1015	0.0948	0.0012	0.0176	0.0121	0.0118	0.0039	0.6875	0.1712	0.6985	8 179	34.24	9.51	9 066	37.96	10.54	10 740	44.97	12.49	11 905	49.84	13.85
419	96.0333	2.1599	0.6557	0.0999	0.0918	0.0015	0.0385	0.0160	0.0022	0.0081	0.7054	0.1877	0.6991	8 179	34.24	9.51	9 070	37.97	10.55	10 736	44.95	12.49	11 905	49.85	13.85
420	95.9843	2.2000	0.6612	0.0999	0.0946	0.0000	0.0192	0.0136	0.0126		0.7276	0.1868	0.6992	8 178	34.24	9.51	9 067	37.96	10.54	10 733	44.94	12.48	11 899	49.82	13.84
421	96.0017	2.1947	0.6592	0.0989	0.0930	0.0008	0.0189	0.0134	0.0118		0.7242	0.1833	0.6991	8 178	34.24	9.51	9 064	37.95	10.54	10 736	44.95	12.49	11 899	49.82	13.84
422	95.9613	2.2043	0.6649	0.0997	0.0948	0.0000	0.0193	0.0137	0.0126		0.7422	0.1873	0.6994	8 178	34.24	9.51	9 064	37.95	10.54	10 734	44.94	12.48	11 897	49.81	13.84
423	96.1432	2.1188	0.6494	0.1018	0.0948	0.0012	0.0171	0.0121	0.0119	0.0034	0.6796	0.1667	0.6981	8 177	34.24	9.51	9 064	37.95	10.54	10 740	44.97	12.49	11 905	49.84	13.85
424	96.1432	2.1188	0.6494	0.1018	0.0948	0.0012	0.0171	0.0121	0.0119	0.0034	0.6796	0.1667	0.6981	8 177	34.24	9.51	9 064	37.95	10.54	10 740	44.97	12.49	11 905	49.84	13.85
425	96.0410	2.1664	0.6436	0.0956	0.0873	0.0002	0.0398	0.0164	0.0051	0.0078	0.7086	0.1882	0.6989	8 177	34.24	9.51	9 068	37.97	10.55	10 735	44.94	12.48	11 904	49.84	13.84
426	96.1345	2.0669	0.6615	0.1049	0.1029	0.0012	0.0208	0.0147	0.0132	0.0046	0.6970	0.1778	0.6986	8 176	34.23	9.51	9 064	37.95	10.54	10 735	44.95	12.48	11 902	49.83	13.84
427	96.1132	2.1152	0.6451	0.0984	0.0956	0.0010	0.0184	0.0131	0.0164	0.0037	0.7061	0.1736	0.6984	8 176	34.23	9.51	9 062	37.94	10.54	10 738	44.96	12.49	11 902	49.83	13.84
428	95.9734	2.1606	0.6573	0.1022	0.0994	0.0015	0.0190	0.0140	0.0148	0.0048	0.7825	0.1705	0.6993	8 176	34.23	9.51	9 067	37.96	10.54	10 728	44.92	12.48	11 897	49.81	13.84
429	94.5008	2.8109	0.7498	0.0972	0.1084	0.0012	0.0214	0.0163	0.0242	0.0070	1.3614	0.3015	0.7091	8 175	34.23	9.51	9 063	37.95	10.54	10 655	44.61	12.39	11 813	49.46	13.74
430	90.8720	3.3370	1.1696	0.1488	0.3062	0.0023	0.0678	0.0667	0.1031	0.0081	3.3974	0.5210	0.7388	8 174	34.22	9.51	9 051	37.90	10.53	10 437	43.70	12.14	11 557	48.39	13.44
431	89.9257	3.3084	1.4271	0.1908	0.3694	0.0032	0.0824	0.0658	0.0873	0.0061	3.3636	1.1702	0.7520	8 174	34.22	9.51	9 049	37.89	10.52	10 353	43.34	12.04	11 461	47.99	13.33
432	85.4928	3.8379	1.9189	0.2535	0.6518	0.0176	0.1379	0.1218	0.2070	0.0066	6.7623	0.5919	0.7824	8 174	34.22	9.51	9 040	37.85	10.51	10 142	42.46	11.79	11 217	46.96	13.04
433	96.1741	2.1086	0.6439	0.0984	0.0927	0.0012	0.0163	0.0114	0.0090	0.0037	0.6713	0.1694	0.6978	8 174	34.22	9.51	9 060	37.93	10.54	10 739	44.96	12.49	11 904	49.84	13.84
434	96.1832	2.1044	0.6399	0.0982	0.0913	0.0012	0.0161	0.0111	0.0105	0.0037	0.6721	0.1683	0.6977	8 173	34.22	9.51	9 060	37.93	10.54	10 739	44.96	12.49	11 903	49.84	13.84
435	96.1741	2.1086	0.6439	0.0984	0.0927	0.0012	0.0163	0.0114	0.0090	0.0037	0.6713	0.1694	0.6978	8 173	34.22	9.51	9 059	37.93	10.54	10 740	44.97	12.49	11 904	49.84	13.84
436	96.0776	2.1068	0.6039	0.0954	0.0967	0.0011	0.0229	0.0157	0.0422	0.0023	0.6772	0.2582	0.6996	8 173	34.22	9.51	9 059	37.93	10.54	10 725	44.90	12.47	11 887	49.77	13.83
437	96.0027	2.1744	0.6549	0.0981	0.0930	0.0000	0.0191	0.0136	0.0119	0.0023	0.7491	0.1832	0.6990	8 173	34.22	9.51	9 059	37.93	10.54	10 731	44.93	12.48	11 895	49.80	13.83
438	96.1528	2.1050	0.6402	0.0969	0.0928	0.0006	0.0181	0.0129	0.0116		0.6939	0.1751	0.6980	8 173	34.22	9.51	9 059	37.93	10.54	10 735	44.95	12.49	11 899	49.82	13.84
439	96.1371	2.1082	0.6325	0.0948	0.0870	0.0005	0.0365	0.0150	0.0033	0.0078	0.6979	0.1794	0.6981	8 172	34.21	9.50	9 062	37.94	10.54	10 734	44.94	12.48	11 903	49.84	13.84
440	96.3170	2.0308	0.6011	0.0963	0.0917	0.0000	0.0179	0.0122	0.0201		0.5968	0.2161	0.6973	8 171	34.21	9.50	9 057	37.92	10.53	10 737	44.95	12.49	11 902	49.83	13.84
441	96.1619	2.0905	0.6354	0.0959	0.0929	0.0010	0.0177	0.0124	0.0162	0.0056	0.7001	0.1705	0.6979	8 171	34.21	9.50	9 057	37.92	10.53	10 735	44.95	12.49	11 899	49.82	13.84
442	96.1431	2.0938	0.6417	0.0965	0.0926	0.0005	0.0179	0.0125	0.0120		0.7162	0.1731	0.6980	8 171	34.21	9.50	9 057	37.92	10.53	10 733	44.94	12.48	11 897	49.81	13.84
443	96.2096	2.0753	0.6331	0.0983	0.0916	0.0012	0.0163	0.0116	0.0094	0.0033	0.6837	0.1666	0.6975	8 170	34.20	9.50	9 056	37.92	10.53	10 736	44.95	12.49	11 900	49.82	13.84
444	96.2096	2.0753	0.6331	0.0983	0.0916	0.0012	0.0163	0.0116	0.0094	0.0033	0.6837	0.1666	0.6975	8 170	34.20	9.50	9 056	37.92	10.53	10 736	44.95	12.49	11 900	49.82	13.84
445	96.1569	2.0941	0.5929	0.0948	0.0952	0.0010	0.0215	0.0154	0.0212	0.0038	0.6605	0.2427	0.6984	8 169	34.20	9.50	9 052	37.90	10.53	10 729	44.92	12.48	11 890	49.78	13.83

№ зразку	Компонентний склад, % мол.												Фізико-хімічні показники газу обчислені на основі компонентного складу, 101.325 кПа												
	метан, C1	етан, C2	пропан, C3	ізо-бутан, i-C4	н-бутан, n-C4	ізо-пентан, iso-C5	ізо-пентан, i-C5	н-пентан, n-C5	гексани та вищі, C6+	кисень, O2	азот, N2	диоксид вуглецю, CO2	Густина абсолютна, кг/м ³ , при 20 °С	Температура вимірювання/згоряння при 20/25°С											
														Теплота згоряння нижча			Теплота згоряння вища			Число Воббе нижче			Число Воббе вище		
														ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³
446	96.2084	2.0774	0.6299	0.0972	0.0900	0.0012	0.0160	0.0112	0.0109	0.0041	0.6867	0.1670	0.6975	8 169	34.20	9.50	9 055	37.91	10.53	10 735	44.94	12.48	11 899	49.82	13.84
447	89.3571	4.8909	1.0241	0.1161	0.1771	0.0070	0.0461	0.0387	0.0530	0.0039	1.6884	2.5977	0.7566	8 169	34.20	9.50	9 045	37.87	10.52	10 306	43.15	11.99	11 412	47.78	13.27
448	96.1080	2.1058	0.6429	0.0968	0.0932	0.0006	0.0184	0.0129	0.0112		0.7306	0.1797	0.6983	8 169	34.20	9.50	9 055	37.91	10.53	10 730	44.93	12.48	11 895	49.80	13.83
449	93.3372	3.1974	0.7948	0.0844	0.1211	0.1055	0.0005	0.0082	0.0166		1.9833	0.3510	0.7170	8 168	34.20	9.50	9 054	37.91	10.53	10 586	44.32	12.31	11 734	49.13	13.65
450	96.1850	2.0331	0.6107	0.1000	0.0978	0.0012	0.0238	0.0163	0.0199	0.0044	0.6771	0.2307	0.6984	8 167	34.19	9.50	9 053	37.90	10.53	10 725	44.91	12.47	11 889	49.78	13.83
451	96.1761	2.0345	0.6129	0.1001	0.0980	0.0013	0.0239	0.0159	0.0198	0.0047	0.6820	0.2308	0.6985	8 167	34.19	9.50	9 053	37.90	10.53	10 725	44.90	12.47	11 888	49.77	13.83
452	96.1770	2.0779	0.6198	0.0926	0.0851	0.0006	0.0366	0.0154	0.0033	0.0068	0.7058	0.1791	0.6978	8 167	34.19	9.50	9 057	37.92	10.53	10 730	44.93	12.48	11 900	49.82	13.84
453	92.3801	3.3115	0.9461	0.1109	0.1861	0.0018	0.0468	0.0362	0.0508	0.0076	2.4127	0.5094	0.7254	8 166	34.19	9.50	9 046	37.87	10.52	10 522	44.06	12.24	11 656	48.80	13.56
454	96.3024	1.9789	0.6155	0.0992	0.0968	0.0014	0.0216	0.0152	0.0119	0.0048	0.6758	0.1765	0.6972	8 166	34.19	9.50	9 050	37.89	10.53	10 735	44.95	12.49	11 897	49.81	13.84
455	96.2788	2.0235	0.6188	0.0950	0.0949	0.0015	0.0175	0.0130	0.0093	0.0032	0.6837	0.1608	0.6970	8 166	34.19	9.50	9 057	37.92	10.53	10 733	44.94	12.48	11 904	49.84	13.84
456	96.1594	2.0854	0.6304	0.0941	0.0904	0.0008	0.0176	0.0123	0.0111		0.7217	0.1768	0.6978	8 166	34.19	9.50	9 052	37.90	10.53	10 728	44.92	12.48	11 892	49.79	13.83
457	86.0141	5.6350	1.5050	0.1880	0.2780	0.0060	0.0760	0.0560	0.0500	0.0169	2.0290	4.1460	0.7905	8 166	34.19	9.50	9 036	37.83	10.51	10 079	42.20	11.72	11 152	46.69	12.97
458	96.2056	2.0386	0.6184	0.0948	0.0873	0.0011	0.0385	0.0151	0.0024	0.0081	0.7161	0.1740	0.6976	8 165	34.19	9.50	9 055	37.91	10.53	10 729	44.92	12.48	11 898	49.81	13.84
459	93.5026	3.0658	0.8190	0.1083	0.1524	0.0016	0.0213	0.0165	0.0309	0.0062	1.9150	0.3604	0.7160	8 164	34.18	9.49	9 045	37.87	10.52	10 587	44.32	12.31	11 730	49.11	13.64
460	93.0216	3.1758	0.8602	0.1044	0.1555	0.0031	0.0349	0.0294	0.0488	0.0082	2.0977	0.4604	0.7204	8 164	34.18	9.50	9 045	37.87	10.52	10 557	44.20	12.28	11 695	48.97	13.60
461	96.2447	1.9868	0.5974	0.0988	0.0960	0.0011	0.0236	0.0152	0.0238	0.0044	0.6770	0.2313	0.6980	8 164	34.18	9.49	9 052	37.90	10.53	10 725	44.90	12.47	11 892	49.79	13.83
462	96.3273	1.9933	0.6056	0.0940	0.0946	0.0015	0.0177	0.0135	0.0098	0.0035	0.6818	0.1574	0.6966	8 164	34.18	9.49	9 052	37.90	10.53	10 736	44.95	12.49	11 904	49.84	13.84
463	96.1512	2.0842	0.6289	0.0936	0.0897	0.0006	0.0175	0.0121	0.0106	0.0057	0.7294	0.1764	0.6977	8 164	34.18	9.49	9 050	37.89	10.53	10 728	44.91	12.48	11 892	49.79	13.83
464	96.2328	2.0453	0.6196	0.0960	0.0892	0.0012	0.0160	0.0115	0.0096	0.0060	0.7068	0.1660	0.6972	8 163	34.18	9.49	9 049	37.89	10.52	10 730	44.92	12.48	11 894	49.80	13.83
465	96.2825	1.9871	0.6028	0.0942	0.0871	0.0014	0.0412	0.0165	0.0029	0.0069	0.7094	0.1680	0.6971	8 162	34.17	9.49	9 052	37.90	10.53	10 729	44.92	12.48	11 898	49.81	13.84
466	93.3445	3.1088	0.8483	0.1097	0.1539	0.0018	0.0220	0.0167	0.0228	0.0085	1.9696	0.3934	0.7171	8 161	34.17	9.49	9 040	37.85	10.51	10 579	44.29	12.30	11 718	49.06	13.63
467	96.2010	2.0296	0.6071	0.0977	0.0933	0.0012	0.0210	0.0134	0.0125	0.0043	0.6893	0.2296	0.6979	8 161	34.17	9.49	9 045	37.87	10.52	10 722	44.89	12.47	11 883	49.75	13.82
468	96.3501	1.9888	0.5987	0.0916	0.0917	0.0015	0.0170	0.0130	0.0100	0.0033	0.6773	0.1570	0.6964	8 161	34.17	9.49	9 052	37.90	10.53	10 733	44.93	12.48	11 904	49.84	13.84
469	96.2999	2.0196	0.6099	0.0941	0.0875	0.0011	0.0155	0.0111	0.0093	0.0033	0.6879	0.1608	0.6966	8 161	34.17	9.49	9 047	37.88	10.52	10 731	44.93	12.48	11 896	49.81	13.84
470	93.9265	3.0584	0.7682	0.0889	0.1050	0.0008	0.0207	0.0172	0.0141	0.0045	1.6878	0.3080	0.7119	8 161	34.17	9.49	9 043	37.86	10.52	10 617	44.45	12.35	11 763	49.25	13.68
471	96.3193	1.9852	0.5953	0.0894	0.0848	0.0012	0.0383	0.0149	0.0025	0.0066	0.6910	0.1715	0.6967	8 160	34.16	9.49	9 049	37.89	10.52	10 729	44.92	12.48	11 898	49.82	13.84
472	96.3281	1.9648	0.5928	0.0910	0.0843	0.0016	0.0416	0.0166	0.0041	0.0070	0.7015	0.1666	0.6968	8 160	34.16	9.49	9 049	37.89	10.52	10 728	44.92	12.48	11 898	49.81	13.84
473	93.4538	3.0799	0.8321	0.1081	0.1475	0.0018	0.0208	0.0164	0.0208	0.0068	1.9275	0.3845	0.7162	8 159	34.16	9.49	9 038	37.84	10.51	10 583	44.31	12.31	11 723	49.08	13.63

№ зразку	Компонентний склад, % мол.												Фізико-хімічні показники газу обчислені на основі компонентного складу, 101.325 кПа												
	метан, С1	етан, С2	пропан, С3	ізо-бутан, і-С4	н-бутан, н-С4	ізо-пентан, і-С5	н-пентан, н-С5	гексан та вищі, С6+	кисень, О2	азот, N2	диоксид вуглецю, СО2	Густина абсолютна, кг/м3, при 20 °С.	Температура вимірювання/згоряння при 20/25°С												
													Теплота згоряння нижча			Теплота згоряння вища			Число Воббе нижче			Число Воббе вище			
													ккал/м3	МДж/м3	кВт·год/м3	ккал/м3	МДж/м3	кВт·год/м3	ккал/м3	МДж/м3	кВт·год/м3	ккал/м3	МДж/м3	кВт·год/м3	
474	96.3658	1.9825	0.5953	0.0898	0.0890	0.0014	0.0166	0.0125	0.0089	0.0038	0.6769	0.1575	0.6962	8 159	34.16	9.49	9 047	37.88	10.52	10 733	44.94	12.48	11 902	49.83	13.84
475	96.3418	1.9722	0.6037	0.0919	0.0920	0.0014	0.0171	0.0128	0.0089	0.0034	0.6979	0.1569	0.6964	8 159	34.16	9.49	9 047	37.88	10.52	10 731	44.93	12.48	11 899	49.82	13.84
476	96.3012	1.9680	0.6019	0.0904	0.0842	0.0007	0.0396	0.0162	0.0036	0.0075	0.7194	0.1673	0.6969	8 158	34.16	9.49	9 048	37.88	10.52	10 726	44.91	12.47	11 895	49.80	13.83
477	96.4936	1.7088	0.6006	0.1125	0.1249	0.0013	0.0293	0.0195	0.0178	0.0046	0.7325	0.1546	0.6966	8 157	34.15	9.49	9 040	37.85	10.51	10 725	44.90	12.47	11 887	49.77	13.83
478	93.5232	3.0386	0.8203	0.1068	0.1459	0.0015	0.0209	0.0171	0.0228	0.0062	1.9288	0.3679	0.7156	8 157	34.15	9.49	9 036	37.83	10.51	10 582	44.31	12.31	11 723	49.08	13.63
479	96.3521	1.9737	0.5972	0.0907	0.0906	0.0014	0.0164	0.0125	0.0087	0.0033	0.6969	0.1565	0.6963	8 157	34.15	9.49	9 047	37.88	10.52	10 728	44.91	12.48	11 899	49.82	13.84
480	96.1710	2.0086	0.6233	0.0967	0.0967	0.0067	0.0190	0.0129	0.0044	0.0084	0.7796	0.1727	0.6977	8 157	34.15	9.49	9 042	37.86	10.52	10 718	44.87	12.46	11 881	49.74	13.82
481	93.5540	3.2219	0.7802	0.0833	0.1034	0.0000	0.0220	0.0168	0.0187		1.8180	0.3817	0.7146	8 157	34.15	9.49	9 039	37.84	10.51	10 591	44.34	12.32	11 735	49.13	13.65
482	96.2579	2.0030	0.5976	0.0890	0.0816	0.0013	0.0373	0.0149	0.0017	0.0071	0.7362	0.1724	0.6970	8 156	34.15	9.49	9 045	37.87	10.52	10 722	44.89	12.47	11 891	49.78	13.83
483	96.2095	2.0032	0.6110	0.0947	0.0959	0.0092	0.0172	0.0124	0.0049	0.0092	0.7682	0.1646	0.6973	8 156	34.15	9.49	9 041	37.85	10.52	10 719	44.88	12.47	11 883	49.75	13.82
484	93.2404	3.2452	0.7667	0.0774	0.1121	0.0975	0.0014	0.0096	0.0164		2.0592	0.3741	0.7172	8 155	34.14	9.48	9 040	37.85	10.51	10 568	44.25	12.29	11 714	49.05	13.62
485	93.7139	2.9875	0.8065	0.1045	0.1376	0.0000	0.0207	0.0157	0.0158		1.8921	0.3057	0.7138	8 155	34.14	9.48	9 036	37.83	10.51	10 593	44.35	12.32	11 737	49.14	13.65
486	96.1901	1.9903	0.6204	0.0959	0.0959	0.0065	0.0187	0.0127	0.0046	0.0085	0.7847	0.1717	0.6975	8 155	34.14	9.48	9 040	37.85	10.51	10 716	44.87	12.46	11 879	49.73	13.81
487	96.1526	2.0024	0.6057	0.1013	0.1026	0.0066	0.0183	0.0124	0.0047	0.0090	0.8112	0.1733	0.6978	8 154	34.14	9.48	9 038	37.84	10.51	10 712	44.85	12.46	11 875	49.72	13.81
488	96.2342	1.9748	0.6106	0.0945	0.0948	0.0077	0.0182	0.0123	0.0048	0.0082	0.7736	0.1662	0.6972	8 154	34.14	9.48	9 039	37.84	10.51	10 717	44.87	12.46	11 880	49.74	13.82
489	92.6325	3.6721	0.8168	0.0785	0.1019	0.0000	0.0206	0.0163	0.0188		2.2941	0.3484	0.7195	8 153	34.14	9.48	9 033	37.82	10.51	10 549	44.17	12.27	11 687	48.93	13.59
490	96.2167	1.9960	0.6066	0.0927	0.0929	0.0048	0.0177	0.0118	0.0067	0.0098	0.7809	0.1634	0.6972	8 153	34.14	9.48	9 038	37.84	10.51	10 716	44.87	12.46	11 879	49.74	13.82
491	96.2649	1.9789	0.6029	0.0916	0.0916	0.0056	0.0173	0.0115	0.0075	0.0092	0.7614	0.1575	0.6965	8 153	34.14	9.48	9 038	37.84	10.51	10 719	44.88	12.47	11 883	49.75	13.82
492	90.7863	3.3390	1.1362	0.1417	0.2934	0.0062	0.0653	0.0527	0.1039	0.0061	3.6062	0.4630	0.7381	8 152	34.13	9.48	9 027	37.79	10.50	10 413	43.60	12.11	11 530	48.28	13.41
493	96.4058	1.9358	0.5817	0.0884	0.0883	0.0014	0.0164	0.0124	0.0097	0.0032	0.7028	0.1541	0.6958	8 152	34.13	9.48	9 043	37.86	10.52	10 725	44.90	12.47	11 897	49.81	13.84
494	96.2550	1.9771	0.6034	0.0918	0.0925	0.0075	0.0173	0.0121	0.0047	0.0090	0.7672	0.1623	0.6969	8 152	34.13	9.48	9 037	37.84	10.51	10 718	44.87	12.46	11 881	49.74	13.82
495	93.6568	3.0170	0.8027	0.1017	0.1328	0.0000	0.0200	0.0153	0.0173		1.8989	0.3375	0.7142	8 152	34.13	9.48	9 033	37.82	10.51	10 586	44.32	12.31	11 730	49.11	13.64
496	93.2359	3.2050	0.7704	0.0779	0.1143	0.0996	0.0009	0.0090	0.0167		2.0932	0.3771	0.7173	8 151	34.13	9.48	9 035	37.83	10.51	10 562	44.22	12.28	11 708	49.02	13.62
497	93.4831	3.1206	0.7959	0.0958	0.1272	0.0000	0.0213	0.0165	0.0193		1.9492	0.3711	0.7153	8 150	34.12	9.48	9 030	37.81	10.50	10 576	44.28	12.30	11 718	49.06	13.63
498	93.5795	3.1723	0.7547	0.0834	0.1089	0.0000	0.0233	0.0180	0.0197		1.9053	0.3349	0.7141	8 150	34.12	9.48	9 031	37.81	10.50	10 585	44.32	12.31	11 728	49.10	13.64
499	92.5500	3.7200	0.8163	0.0785	0.1017	0.0004	0.0230	0.0165	0.0075	0.0115	2.3476	0.3270	0.7195	8 149	34.12	9.48	9 028	37.80	10.50	10 545	44.15	12.26	11 682	48.91	13.59
500	96.4465	1.8529	0.5591	0.0952	0.0897	0.0010	0.0243	0.0140	0.0251	0.0044	0.6596	0.2283	0.6965	8 149	34.12	9.48	9 040	37.85	10.51	10 716	44.87	12.46	11 887	49.77	13.83
501	93.9905	2.8100	0.7900	0.1050	0.1420	0.0008	0.0217	0.0171	0.0164	0.0065	1.7900	0.3100	0.7122	8 149	34.12	9.48	9 031	37.81	10.50	10 598	44.37	12.33	11 744	49.17	13.66

№ зразку	Компонентний склад, % мол.													Фізико-хімічні показники газу обчислені на основі компонентного складу, 101.325 кПа											
	метан, C1	етан, C2	пропан, C3	ізо-бутан, i-C4	н-бутан, n-C4	ізо-пентан, iso-C5	ізо-пентан, i-C5	н-пентан, n-C5	гексани та вищі, C6+	кисень, O2	азот, N2	диоксид вуглецю, CO2	Густина абсолютна, кг/м ³ , при 20 °С	Температура вимірювання/згоряння при 20/25°С											
														Теплота згоряння нижча			Теплота згоряння вища			Число Воббе нижче			Число Воббе вище		
														ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³
502	96.5475	1.8210	0.5483	0.0945	0.0887	0.0000	0.0216	0.0133	0.0231		0.6191	0.2229	0.6958	8 149	34.12	9.48	9 036	37.83	10.51	10 722	44.89	12.47	11 887	49.77	13.83
503	93.4150	3.1262	0.8059	0.0970	0.1292	0.0023	0.0215	0.0175	0.0204	0.0073	1.9986	0.3591	0.7157	8 149	34.12	9.48	9 028	37.80	10.50	10 573	44.27	12.30	11 713	49.04	13.62
504	93.5773	3.0569	0.7190	0.0804	0.1035	0.0072	0.0567	0.0680	0.0106	0.0060	1.9982	0.3161	0.7149	8 149	34.12	9.48	9 028	37.80	10.50	10 579	44.29	12.30	11 720	49.07	13.63
505	96.3573	1.9211	0.5966	0.0903	0.0876	0.0012	0.0162	0.0114	0.0097	0.0044	0.7527	0.1514	0.6961	8 149	34.12	9.48	9 038	37.84	10.51	10 721	44.89	12.47	11 890	49.78	13.83
506	93.6475	3.0588	0.8043	0.0992	0.1254	0.0014	0.0180	0.0134	0.0078	0.0065	1.8556	0.3621	0.7140	8 149	34.12	9.48	9 031	37.81	10.50	10 583	44.31	12.31	11 727	49.10	13.64
507	90.5669	3.2600	1.1474	0.1474	0.2921	0.0092	0.0689	0.0616	0.1464	0.0094	3.8401	0.4506	0.7405	8 148	34.11	9.48	9 022	37.77	10.49	10 391	43.50	12.08	11 506	48.17	13.38
508	93.4618	3.1397	0.7866	0.0931	0.1238	0.0000	0.0211	0.0163	0.0195		1.9593	0.3788	0.7154	8 148	34.11	9.48	9 028	37.80	10.50	10 572	44.26	12.30	11 714	49.04	13.62
509	93.4152	3.0784	0.8076	0.1009	0.1431	0.0000	0.0220	0.0170	0.0204		2.0518	0.3436	0.7158	8 148	34.11	9.48	9 027	37.80	10.50	10 568	44.25	12.29	11 710	49.03	13.62
510	93.3999	3.2346	0.7304	0.0689	0.0962	0.0839	0.0002	0.0064	0.0162		1.9808	0.3825	0.7156	8 147	34.11	9.47	9 031	37.81	10.50	10 569	44.25	12.29	11 716	49.05	13.63
511	96.2606	2.0335	0.6571	0.0095	0.0931	0.0018	0.0163	0.0112	0.0035	0.0080	0.7101	0.1953	0.6963	8 147	34.11	9.48	9 036	37.83	10.51	10 716	44.87	12.46	11 885	49.76	13.82
512	96.4191	1.8920	0.5909	0.0886	0.0864	0.0012	0.0160	0.0112	0.0099	0.0050	0.7318	0.1478	0.6957	8 147	34.11	9.48	9 038	37.84	10.51	10 718	44.87	12.46	11 890	49.78	13.83
513	93.6045	3.1597	0.7501	0.0798	0.1004	0.0000	0.0215	0.0165	0.0195		1.8465	0.4015	0.7141	8 145	34.10	9.47	9 025	37.79	10.50	10 578	44.29	12.30	11 721	49.07	13.63
514	93.3731	3.2104	0.7679	0.0816	0.1039	0.0053	0.0227	0.0181	0.0318	0.0089	1.9609	0.4154	0.7160	8 145	34.10	9.47	9 025	37.79	10.50	10 564	44.23	12.29	11 705	49.01	13.61
515	93.6004	3.1386	0.7394	0.0799	0.1032	0.0011	0.0199	0.0167	0.0338	0.0050	1.9248	0.3373	0.7139	8 145	34.10	9.47	9 028	37.80	10.50	10 579	44.29	12.30	11 727	49.10	13.64
516	93.3898	3.1850	0.7761	0.0892	0.1195	0.0000	0.0212	0.0166	0.0198		1.9993	0.3835	0.7156	8 144	34.10	9.47	9 024	37.78	10.49	10 566	44.24	12.29	11 707	49.01	13.62
517	93.3662	3.0772	0.8294	0.1070	0.1441	0.0046	0.0064	0.0150	0.0150		2.0429	0.3922	0.7162	8 143	34.09	9.47	9 027	37.79	10.50	10 560	44.21	12.28	11 706	49.01	13.61
518	93.8570	2.9898	0.7426	0.0891	0.1142	0.0000	0.0203	0.0155	0.0155		1.8536	0.3024	0.7121	8 143	34.09	9.47	9 023	37.78	10.49	10 590	44.34	12.32	11 735	49.13	13.65
519	93.3461	3.2066	0.7798	0.0903	0.1212	0.0015	0.0215	0.0172	0.0145	0.0078	2.0019	0.3916	0.7158	8 142	34.09	9.47	9 024	37.78	10.49	10 560	44.21	12.28	11 703	49.00	13.61
520	96.6530	1.7292	0.5242	0.0935	0.0867	0.0000	0.0232	0.0136	0.0263		0.6228	0.2275	0.6952	8 142	34.09	9.47	9 026	37.79	10.50	10 717	44.87	12.46	11 880	49.74	13.82
521	93.8467	2.8829	0.7571	0.0817	0.1223	0.0493	0.0077	0.0118	0.0185	0.0080	1.9665	0.2475	0.7124	8 142	34.09	9.47	9 027	37.79	10.50	10 587	44.33	12.31	11 737	49.14	13.65
522	93.8422	2.9521	0.7103	0.0839	0.1075	0.0089	0.0461	0.0378	0.0064	0.0064	1.9148	0.2836	0.7125	8 142	34.09	9.47	9 021	37.77	10.49	10 587	44.33	12.31	11 730	49.11	13.64
523	92.7724	3.5434	0.7971	0.0774	0.1024	0.0000	0.0213	0.0168	0.0189		2.3026	0.3477	0.7186	8 142	34.09	9.47	9 021	37.77	10.49	10 542	44.14	12.26	11 679	48.90	13.58
524	93.3409	3.1385	0.7933	0.0944	0.1263	0.0003	0.0210	0.0186	0.0208	0.0090	2.0580	0.3789	0.7161	8 141	34.08	9.47	9 020	37.76	10.49	10 558	44.20	12.28	11 698	48.98	13.60
525	92.8688	3.3447	0.8413	0.0878	0.1200	0.0013	0.0314	0.0227	0.0146	0.0081	2.1375	0.5218	0.7199	8 141	34.09	9.47	9 020	37.76	10.49	10 531	44.09	12.25	11 667	48.85	13.57
526	93.3409	3.1385	0.7933	0.0944	0.1263	0.0003	0.0210	0.0186	0.0208	0.0090	2.0580	0.3789	0.7161	8 141	34.08	9.47	9 020	37.76	10.49	10 558	44.20	12.28	11 698	48.98	13.60
527	96.5893	1.7429	0.5328	0.0927	0.0885	0.0009	0.0253	0.0159	0.0202	0.0038	0.6628	0.2250	0.6954	8 140	34.08	9.47	9 026	37.79	10.50	10 714	44.86	12.46	11 880	49.74	13.82
528	96.5893	1.7429	0.5328	0.0927	0.0885	0.0009	0.0253	0.0159	0.0202	0.0038	0.6628	0.2250	0.6954	8 140	34.08	9.47	9 026	37.79	10.50	10 714	44.86	12.46	11 880	49.74	13.82
529	93.9965	2.7344	0.7489	0.0645	0.1184	0.1026	0.0002	0.0029	0.0236		2.0346	0.1734	0.7116	8 139	34.08	9.47	9 023	37.78	10.49	10 589	44.34	12.32	11 740	49.15	13.65

№ зразку	Компонентний склад, % мол.												Фізико-хімічні показники газу обчислені на основі компонентного складу, 101.325 кПа												
	метан, С1	етан, С2	пропан, С3	ізо-бутан, і-С4	н-бутан, н-С4	ізо-пентан, і-С5	н-пентан, н-С5	гексани та вищі, С6+	кисень, О2	азот, N2	диоксид вуглецю, СО2	Густина абсолютна, кг/м ³ , при 20 °С	Температура вимірювання/згоряння при 20/25°С												
													Теплота згоряння нижча			Теплота згоряння вища			Число Воббе нижче			Число Воббе вище			
													ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	
530	96.4299	1.8154	0.5473	0.0931	0.0895	0.0011	0.0257	0.0161	0.0198	0.0055	0.6874	0.2692	0.6967	8 139	34.08	9.47	9 023	37.78	10.49	10 702	44.81	12.45	11 864	49.67	13.80
531	93.6757	3.1266	0.7193	0.0781	0.0991	0.0000	0.0207	0.0161	0.0193		1.8985	0.3466	0.7131	8 138	34.07	9.46	9 018	37.76	10.49	10 577	44.28	12.30	11 720	49.07	13.63
532	91.7208	4.0227	0.7537	0.0842	0.1251	0.0033	0.0333	0.0264	0.0277	0.0068	1.9621	1.2339	0.7308	8 137	34.07	9.46	9 013	37.74	10.48	10 445	43.73	12.15	11 571	48.44	13.46
533	93.3857	3.2243	0.7559	0.0777	0.0961	0.0049	0.0213	0.0177	0.0191	0.0092	1.9550	0.4331	0.7155	8 137	34.07	9.46	9 016	37.75	10.49	10 558	44.20	12.28	11 698	48.98	13.60
534	93.7980	3.0318	0.7245	0.0806	0.1023	0.0000	0.0216	0.0168	0.0176		1.8801	0.3267	0.7124	8 137	34.07	9.46	9 017	37.75	10.49	10 580	44.30	12.31	11 724	49.09	13.64
535	93.6317	3.1000	0.7422	0.0828	0.1059	0.0007	0.0216	0.0183	0.0149	0.0041	1.9480	0.3298	0.7134	8 137	34.07	9.46	9 016	37.75	10.49	10 573	44.27	12.30	11 715	49.05	13.63
536	93.5998	3.0194	0.7578	0.0904	0.1210	0.0006	0.0202	0.0169	0.0253	0.0085	2.0118	0.3283	0.7140	8 136	34.06	9.46	9 015	37.74	10.48	10 566	44.24	12.29	11 708	49.02	13.62
537	93.5532	3.1625	0.7518	0.0830	0.1069	0.0044	0.0004	0.0093	0.0184		1.9810	0.3291	0.7135	8 136	34.06	9.46	9 019	37.76	10.49	10 570	44.26	12.29	11 718	49.06	13.63
538	92.6620	3.1324	0.7563	0.1047	0.1931	0.0035	0.0571	0.0503	0.0581	0.0007	2.7532	0.2285	0.7214	8 136	34.07	9.46	9 018	37.76	10.49	10 514	44.02	12.23	11 652	48.79	13.55
539	93.6149	3.1441	0.7234	0.0780	0.0990	0.0021	0.0198	0.0165	0.0146	0.0063	1.9143	0.3670	0.7134	8 135	34.06	9.46	9 014	37.74	10.48	10 571	44.26	12.29	11 713	49.04	13.62
540	93.3251	3.1985	0.7273	0.0767	0.1050	0.0086	0.0398	0.0408	0.0079	0.0065	2.1390	0.3248	0.7155	8 135	34.06	9.46	9 014	37.74	10.48	10 556	44.19	12.28	11 696	48.97	13.60
541	96.5904	1.7355	0.5279	0.0918	0.0871	0.0012	0.0256	0.0158	0.0191	0.0052	0.6704	0.2300	0.6953	8 135	34.06	9.46	9 019	37.76	10.49	10 707	44.83	12.45	11 870	49.70	13.81
542	93.7089	3.0400	0.7400	0.0840	0.1060	0.0006	0.0223	0.0181	0.0172	0.0079	1.9200	0.3350	0.7130	8 135	34.06	9.46	9 014	37.74	10.48	10 573	44.27	12.30	11 715	49.05	13.63
543	93.1386	3.3404	0.7597	0.0783	0.1051	0.0003	0.0219	0.0186	0.0139	0.0040	2.1645	0.3548	0.7162	8 135	34.06	9.46	9 012	37.73	10.48	10 550	44.17	12.27	11 687	48.93	13.59
544	93.4153	3.2003	0.7442	0.0779	0.1007	0.0000	0.0210	0.0165	0.0195		2.0673	0.3373	0.7146	8 134	34.05	9.46	9 013	37.73	10.48	10 560	44.21	12.28	11 701	48.99	13.61
545	94.1741	2.6181	0.7368	0.0593	0.1173	0.1016	0.0001	0.0015	0.0254		2.0372	0.1286	0.7101	8 133	34.05	9.46	9 016	37.75	10.49	10 591	44.34	12.32	11 742	49.16	13.66
546	93.5770	3.1444	0.7263	0.0785	0.0998	0.0021	0.0203	0.0166	0.0149	0.0066	1.9547	0.3588	0.7136	8 133	34.05	9.46	9 012	37.73	10.48	10 566	44.24	12.29	11 708	49.02	13.62
547	96.7686	1.5821	0.5303	0.0949	0.1009	0.0012	0.0298	0.0210	0.0138	0.0053	0.7017	0.1504	0.6941	8 133	34.05	9.46	9 016	37.75	10.49	10 714	44.86	12.46	11 878	49.73	13.81
548	96.6642	1.6666	0.5088	0.0912	0.0862	0.0010	0.0261	0.0151	0.0300	0.0046	0.6787	0.2275	0.6950	8 133	34.05	9.46	9 019	37.76	10.49	10 706	44.83	12.45	11 873	49.71	13.81
549	93.3812	3.2330	0.7683	0.0802	0.0964	0.0047	0.0014	0.0114	0.0158		1.9601	0.4475	0.7151	8 132	34.05	9.46	9 015	37.74	10.48	10 553	44.18	12.27	11 699	48.98	13.61
550	93.2088	3.2975	0.7466	0.0771	0.1036	0.0000	0.0218	0.0172	0.0186		2.1685	0.3403	0.7158	8 132	34.05	9.46	9 011	37.73	10.48	10 549	44.17	12.27	11 689	48.94	13.59
551	93.0159	3.3739	0.7641	0.0760	0.1031	0.0000	0.0213	0.0166	0.0194		2.2676	0.3421	0.7169	8 131	34.04	9.46	9 009	37.72	10.48	10 539	44.12	12.26	11 677	48.89	13.58
552	93.3496	3.1449	0.7661	0.0859	0.1180	0.0000	0.0206	0.0164	0.0190		2.0790	0.4005	0.7158	8 131	34.04	9.46	9 010	37.72	10.48	10 548	44.16	12.27	11 688	48.93	13.59
553	93.3610	3.2399	0.7426	0.0792	0.0975	0.0027	0.0192	0.0150	0.0108		2.0825	0.3496	0.7147	8 130	34.04	9.46	9 014	37.74	10.48	10 554	44.19	12.27	11 701	48.99	13.61
554	85.6700	3.7545	1.7795	0.2350	0.6251	0.0145	0.1399	0.1239	0.1898	0.0062	6.9107	0.5509	0.7792	8 129	34.03	9.45	8 992	37.65	10.46	10 107	42.31	11.75	11 180	46.81	13.00
555	93.5539	3.1325	0.7222	0.0763	0.0976		0.0203	0.0158	0.0190		1.9986	0.3638	0.7138	8 129	34.03	9.45	9 007	37.71	10.48	10 559	44.21	12.28	11 701	48.99	13.61
556	93.7449	3.0190	0.7209	0.0830	0.1005	0.0045	0.0135	0.0168	0.0148		1.9562	0.3259	0.7124	8 128	34.03	9.45	9 011	37.73	10.48	10 568	44.25	12.29	11 716	49.05	13.63
557	96.7636	1.6370	0.4983	0.0877	0.0828	0.0010	0.0231	0.0139	0.0181	0.0043	0.6647	0.2055	0.6938	8 126	34.02	9.45	9 012	37.73	10.48	10 708	44.83	12.45	11 875	49.72	13.81

№ зразку	Компонентний склад, % мол.													Фізико-хімічні показники газу обчислені на основі компонентного складу, 101.325 кПа											
	метан, C1	етан, C2	пропан, C3	ізо-бутан, i-C4	н-бутан, n-C4	ізо-пентан, iso-C5	ізо-пентан, i-C5	н-пентан, n-C5	гексани та вищі, C6+	кисень, O2	азот, N2	диоксид вуглецю, CO2	Густина абсолютна, кг/м ³ , при 20 °С	Температура вимірювання/згоряння при 20/25°С											
														Теплота згоряння нижча			Теплота згоряння вища			Число Воббе нижче			Число Воббе вище		
														ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³
558	93.5948	3.1256	0.7247	0.0782	0.0980	0.0048	0.0010	0.0104	0.0171		1.9918	0.3536	0.7131	8 125	34.02	9.45	9 007	37.71	10.48	10 559	44.21	12.28	11 706	49.01	13.61
559	93.5633	3.0743	0.7177	0.0765	0.0987	0.0004	0.0199	0.0177	0.0221	0.0089	2.0396	0.3609	0.7137	8 122	34.00	9.45	9 000	37.68	10.47	10 551	44.17	12.27	11 691	48.95	13.60
560	93.5633	3.0743	0.7177	0.0765	0.0987	0.0004	0.0199	0.0177	0.0221	0.0089	2.0396	0.3609	0.7137	8 122	34.00	9.45	9 000	37.68	10.47	10 551	44.17	12.27	11 691	48.95	13.60
561	92.7757	3.4841	0.7773	0.0774	0.0996	0.0043	0.0015	0.0115	0.0157		2.4044	0.3485	0.7178	8 121	34.00	9.44	9 002	37.69	10.47	10 520	44.04	12.23	11 661	48.82	13.56
562	93.0051	3.3048	0.7600	0.0789	0.1111	0.0027	0.0243	0.0181	0.0124		2.3310	0.3516	0.7170	8 121	34.00	9.44	9 002	37.69	10.47	10 525	44.07	12.24	11 668	48.85	13.57
563	92.7365	3.0650	0.7186	0.0993	0.1855	0.0034	0.0527	0.0474	0.0617	0.0047	2.7968	0.2283	0.7205	8 121	34.00	9.44	9 001	37.68	10.47	10 500	43.96	12.21	11 638	48.72	13.53
564	93.3481	3.2058	0.7445	0.0786	0.0998	0.0058	0.0012	0.0099	0.0153		2.1564	0.3346	0.7144	8 120	34.00	9.44	9 002	37.69	10.47	10 544	44.15	12.26	11 689	48.94	13.59
565	93.1749	3.2897	0.6949	0.0598	0.0849	0.0740	0.0003	0.0054	0.0148		2.2296	0.3717	0.7159	8 120	34.00	9.44	9 001	37.69	10.47	10 532	44.09	12.25	11 675	48.88	13.58
566	93.5677	3.1079	0.7233	0.0780	0.0966	0.0045	0.0014	0.0112	0.0164		2.0329	0.3601	0.7132	8 119	33.99	9.44	9 001	37.69	10.47	10 551	44.18	12.27	11 698	48.98	13.60
567	93.1573	3.2924	0.7452	0.0779	0.1027	0.0079	0.0008	0.0088	0.0163		2.2553	0.3354	0.7155	8 119	33.99	9.44	9 000	37.68	10.47	10 534	44.10	12.25	11 678	48.89	13.58
568	93.1944	3.2429	0.7287	0.0745	0.1037	0.0000	0.0222	0.0173	0.0190		2.2721	0.3252	0.7156	8 119	33.99	9.44	8 997	37.67	10.46	10 534	44.10	12.25	11 672	48.87	13.57
569	93.0175	3.3069	0.7513	0.0748	0.1022	0.0009	0.0202	0.0185	0.0197	0.0092	2.3415	0.3373	0.7167	8 118	33.99	9.44	8 995	37.66	10.46	10 524	44.06	12.24	11 661	48.82	13.56
570	93.0175	3.3069	0.7513	0.0748	0.1022	0.0009	0.0202	0.0185	0.0197	0.0092	2.3415	0.3373	0.7167	8 118	33.99	9.44	8 995	37.66	10.46	10 524	44.06	12.24	11 661	48.82	13.56
571	97.0708	1.4513	0.4444	0.0769	0.0742	0.0008	0.0193	0.0120	0.0538	0.0048	0.6506	0.1411	0.6918	8 118	33.99	9.44	9 002	37.69	10.47	10 712	44.85	12.46	11 878	49.73	13.81
572	96.7858	1.5672	0.4750	0.0890	0.0789	0.0000	0.0238	0.0125	0.0337		0.7060	0.2281	0.6941	8 118	33.99	9.44	9 000	37.68	10.47	10 695	44.78	12.44	11 856	49.64	13.79
573	93.1116	3.2970	0.7304	0.0726	0.0977	0.0000	0.0208	0.0163	0.0186		2.2835	0.3515	0.7161	8 118	33.99	9.44	8 995	37.66	10.46	10 528	44.08	12.24	11 666	48.84	13.57
574	92.7705	3.0450	0.7112	0.0974	0.1820	0.0035	0.0541	0.0487	0.0586	0.0061	2.7960	0.2271	0.7201	8 117	33.99	9.44	8 997	37.67	10.46	10 498	43.95	12.21	11 636	48.72	13.53
575	93.1023	3.2728	0.7355	0.0748	0.1033	0.0000	0.0211	0.0164	0.0182		2.3199	0.3357	0.7161	8 117	33.98	9.44	8 993	37.65	10.46	10 526	44.07	12.24	11 664	48.83	13.56
576	91.3922	4.0622	0.7697	0.0784	0.1207	0.0031	0.0315	0.0257	0.0273	0.0067	2.2522	1.2303	0.7324	8 115	33.98	9.44	8 990	37.64	10.45	10 407	43.57	12.10	11 528	48.27	13.41
577	97.6744	0.6113	0.4145	0.1208	0.1525	0.0007	0.0744	0.0532	0.0764	0.0058	0.7414	0.0746	0.6913	8 114	33.97	9.44	8 997	37.67	10.46	10 709	44.84	12.45	11 875	49.72	13.81
578	96.5637	1.5906	0.4831	0.0897	0.0804	0.0000	0.0246	0.0126	0.0491		0.8799	0.2263	0.6957	8 114	33.97	9.44	8 995	37.66	10.46	10 675	44.69	12.42	11 835	49.55	13.76
579	93.0580	3.2846	0.7486	0.0773	0.1028	0.0042	0.0026	0.0128	0.0161		2.3541	0.3389	0.7160	8 111	33.96	9.43	8 991	37.65	10.46	10 520	44.04	12.23	11 662	48.83	13.56
580	93.4478	3.1439	0.7045	0.0683	0.0914	0.0004	0.0170	0.0191	0.0115	0.0068	2.1173	0.3720	0.7138	8 111	33.96	9.43	8 988	37.63	10.45	10 536	44.11	12.25	11 675	48.88	13.58
581	93.4031	3.0719	0.7283	0.0823	0.1130	0.0004	0.0178	0.0160	0.0128	0.0086	2.1984	0.3474	0.7144	8 111	33.96	9.43	8 988	37.63	10.45	10 532	44.09	12.25	11 670	48.86	13.57
582	97.6665	0.6192	0.4188	0.1222	0.1555	0.0009	0.0781	0.0567	0.0578	0.0054	0.7422	0.0767	0.6911	8 111	33.96	9.43	8 993	37.65	10.46	10 709	44.84	12.46	11 873	49.71	13.81
583	89.3559	3.7304	1.1249	0.1526	0.2656	0.0048	0.0777	0.0679	0.1363	0.0010	4.5172	0.5656	0.7473	8 108	33.95	9.43	8 981	37.60	10.44	10 293	43.10	11.97	11 401	47.74	13.26
584	93.0618	3.3067	0.7319	0.0741	0.0972	0.0043	0.0008	0.0087	0.0160		2.3512	0.3473	0.7157	8 107	33.94	9.43	8 987	37.63	10.45	10 516	44.03	12.23	11 658	48.81	13.56
585	93.0342	3.2465	0.7469	0.0807	0.1081	0.0047	0.0053	0.0146	0.0155		2.3984	0.3451	0.7163	8 107	33.94	9.43	8 987	37.63	10.45	10 512	44.01	12.23	11 653	48.79	13.55

№ зразку	Компонентний склад, % мол.													Фізико-хімічні показники газу обчислені на основі компонентного складу, 101.325 кПа											
	метан, C1	етан, C2	пропан, C3	ізо-бутан, i-C4	н-бутан, n-C4	ізо-пентан, iso-C5	ізо-пентан, i-C5	н-пентан, n-C5	гексани та вищі, C6+	кисень, O2	азот, N2	диоксид вуглецю, CO2	Густина абсолютна, кг/м ³ , при 20 °С.	Температура вимірювання/згоряння при 20/25°С											
														Теплота згоряння нижча			Теплота згоряння вища			Число Воббе нижче			Число Воббе вище		
														ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³
586	92.7985	3.1942	0.7877	0.0813	0.1217	0.0013	0.0353	0.0255	0.0179	0.0082	2.4445	0.4839	0.7196	8 105	33.94	9.43	8 981	37.60	10.44	10 486	43.90	12.20	11 619	48.65	13.51
587	92.7985	3.1942	0.7877	0.0813	0.1217	0.0013	0.0353	0.0255	0.0179	0.0082	2.4445	0.4839	0.7196	8 105	33.94	9.43	8 981	37.60	10.44	10 486	43.90	12.20	11 619	48.65	13.51
588	93.1219	3.2447	0.7246	0.0754	0.1010	0.0045	0.0031	0.0137	0.0158		2.3738	0.3215	0.7154	8 105	33.93	9.43	8 985	37.62	10.45	10 517	44.03	12.23	11 659	48.81	13.56
589	93.1161	3.2220	0.7288	0.0650	0.0979	0.0043	0.0210	0.0207	0.0187	0.0073	2.1310	0.5672	0.7174	8 106	33.94	9.43	8 983	37.61	10.45	10 503	43.97	12.22	11 639	48.73	13.54
590	93.1728	3.2601	0.6997	0.0676	0.0888	0.0030	0.0187	0.0165	0.0106	0.0076	2.2517	0.4029	0.7154	8 104	33.93	9.43	8 985	37.62	10.45	10 515	44.02	12.23	11 658	48.81	13.56
591	96.9629	1.4402	0.4418	0.0846	0.0759	0.0009	0.0260	0.0137	0.0276	0.0038	0.6554	0.2672	0.6928	8 104	33.93	9.43	8 990	37.64	10.46	10 683	44.73	12.42	11 852	49.62	13.78
592	96.9629	1.4402	0.4418	0.0846	0.0759	0.0009	0.0260	0.0137	0.0276	0.0038	0.6554	0.2672	0.6928	8 104	33.93	9.43	8 990	37.64	10.46	10 683	44.73	12.42	11 852	49.62	13.78
593	93.2512	3.2553	0.6798	0.0617	0.0817	0.0030	0.0188	0.0130	0.0096		2.2430	0.3829	0.7145	8 102	33.92	9.42	8 981	37.60	10.44	10 519	44.04	12.23	11 660	48.82	13.56
594	93.6739	3.1010	0.6295	0.0581	0.0708	0.0035	0.0138	0.0113	0.0187	0.0062	2.0861	0.3271	0.7115	8 099	33.91	9.42	8 976	37.58	10.44	10 539	44.12	12.26	11 680	48.90	13.58
595	93.9139	2.5100	0.8100	0.1010	0.1330	0.0007	0.0208	0.0164	0.0161	0.0071	2.1300	0.3410	0.7124	8 099	33.91	9.42	8 976	37.58	10.44	10 530	44.09	12.25	11 670	48.86	13.57
596	93.2241	3.2033	0.7071	0.0645	0.0844	0.0006	0.0175	0.0139	0.0123	0.0062	2.2514	0.4147	0.7151	8 097	33.90	9.42	8 973	37.57	10.44	10 508	44.00	12.22	11 646	48.76	13.54
597	93.0271	3.1198	0.7411	0.0753	0.1076	0.0010	0.0299	0.0224	0.0182	0.0081	2.3818	0.4677	0.7176	8 096	33.89	9.42	8 970	37.56	10.43	10 488	43.91	12.20	11 622	48.66	13.52
598	93.0271	3.1198	0.7411	0.0753	0.1076	0.0010	0.0299	0.0224	0.0182	0.0081	2.3818	0.4677	0.7176	8 096	33.89	9.42	8 970	37.56	10.43	10 488	43.91	12.20	11 622	48.66	13.52
599	93.1408	3.2336	0.6959	0.0631	0.0863	0.0028	0.0183	0.0163	0.0109		2.2868	0.4452	0.7157	8 094	33.89	9.41	8 973	37.57	10.44	10 501	43.97	12.21	11 641	48.74	13.54
600	91.6488	3.0562	0.8731	0.1326	0.2024	0.0020	0.0599	0.0496	0.1003	0.0102	3.8047	0.0602	0.7275	8 094	33.89	9.41	8 966	37.54	10.43	10 415	43.60	12.11	11 536	48.30	13.42
601	97.2766	1.3860	0.4120	0.0643	0.0615	0.0000	0.0127	0.0082	0.0094		0.6454	0.1239	0.6888	8 092	33.88	9.41	8 973	37.57	10.44	10 700	44.80	12.44	11 866	49.68	13.80
602	89.0848	3.7951	1.1771	0.1561	0.2686	0.0046	0.0746	0.0645	0.1008	0.0014	4.6969	0.5755	0.7482	8 092	33.88	9.41	8 963	37.52	10.42	10 267	42.98	11.94	11 372	47.61	13.23
603	97.2156	1.3947	0.4158	0.0658	0.0624	0.0000	0.0132	0.0086	0.0112		0.6850	0.1276	0.6893	8 090	33.87	9.41	8 971	37.56	10.43	10 694	44.77	12.44	11 859	49.65	13.79
604	93.1901	3.2386	0.6701	0.0589	0.0801	0.0028	0.0183	0.0139	0.0092		2.3436	0.3744	0.7146	8 090	33.87	9.41	8 969	37.55	10.43	10 503	43.97	12.21	11 644	48.75	13.54
605	97.1671	1.1078	0.3886	0.1006	0.0866	0.0007	0.0457	0.0218	0.0579	0.0056	0.7505	0.2671	0.6927	8 090	33.87	9.41	8 973	37.57	10.44	10 667	44.66	12.41	11 832	49.54	13.76
606	88.4773	5.4002	0.9248	0.0301	0.0686	0.0008	0.0216	0.0183	0.0607	0.0083	1.8699	3.1193	0.7610	8 086	33.85	9.40	8 957	37.50	10.42	10 173	42.59	11.83	11 269	47.18	13.11
607	93.1001	3.1305	0.7174	0.0661	0.0967	0.0010	0.0216	0.0190	0.0077	0.0068	2.2951	0.5380	0.7168	8 085	33.85	9.40	8 959	37.51	10.42	10 480	43.88	12.19	11 613	48.62	13.51
608	91.6643	3.3377	0.8686	0.1274	0.0987	0.0093	0.0542	0.0215	0.0602	0.0055	2.6910	1.0615	0.7315	8 083	33.84	9.40	8 957	37.50	10.42	10 372	43.42	12.06	11 493	48.12	13.37
609	97.3435	1.3090	0.3970	0.0643	0.0604	0.0006	0.0121	0.0080	0.0082	0.0055	0.6664	0.1250	0.6883	8 082	33.84	9.40	8 963	37.52	10.42	10 692	44.76	12.43	11 856	49.64	13.79
610	97.2909	1.1240	0.3800	0.0913	0.0774	0.0007	0.0313	0.0152	0.0375	0.0051	0.6933	0.2533	0.6909	8 080	33.83	9.40	8 964	37.53	10.43	10 670	44.67	12.41	11 837	49.56	13.77
611	97.4315	1.2803	0.3827	0.0621	0.0550	0.0007	0.0111	0.0068	0.0071	0.0068	0.6373	0.1186	0.6875	8 079	33.83	9.40	8 959	37.51	10.42	10 694	44.77	12.44	11 859	49.65	13.79
612	89.2764	3.7421	1.1359	0.1538	0.2636	0.0046	0.0732	0.0615	0.0704	0.0025	4.6346	0.5815	0.7460	8 076	33.81	9.39	8 946	37.45	10.40	10 261	42.96	11.93	11 367	47.59	13.22
613	97.4151	1.2626	0.3788	0.0617	0.0578	0.0006	0.0120	0.0071	0.0061	0.0061	0.6694	0.1227	0.6876	8 075	33.81	9.39	8 955	37.49	10.41	10 688	44.75	12.43	11 852	49.62	13.78

№ зразку	Компонентний склад, % мол.													Фізико-хімічні показники газу обчислені на основі компонентного складу, 101.325 кПа											
	метан, C1	етан, C2	пропан, C3	ізо-бутан, i-C4	н-бутан, n-C4	ізо-пентан, iso-C5	ізо-пентан, i-C5	н-пентан, n-C5	гексан та вищі, C6+	кисень, O2	азот, N2	диоксид вуглецю, CO2	Густина абсолютна, кг/м ³ , при 20 °С.	Температура вимірювання/згоряння при 20/25°С											
														Теплота згоряння нижча			Теплота згоряння вища			Число Воббе нижче			Число Воббе вище		
														ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³
614	88.8975	5.0962	0.8636	0.0423	0.0898	0.0009	0.0249	0.0208	0.0584	0.0193	1.8976	2.9886	0.7578	8 074	33.80	9.39	8 944	37.45	10.40	10 178	42.61	11.84	11 276	47.21	13.11
615	86.9551	4.0391	1.3945	0.1948	0.3492	0.0034	0.1107	0.0979	0.1402	0.0254	4.0246	2.6651	0.7782	8 071	33.79	9.39	8 930	37.39	10.39	10 041	42.04	11.68	11 111	46.52	12.92
616	97.5806	1.1751	0.3661	0.0560	0.0526	0.0006	0.0110	0.0072	0.0060	0.0047	0.6250	0.1151	0.6864	8 070	33.79	9.39	8 950	37.47	10.41	10 690	44.76	12.43	11 855	49.64	13.79
617	97.5016	1.2040	0.3594	0.0585	0.0533	0.0006	0.0115	0.0069	0.0058	0.0063	0.6715	0.1206	0.6869	8 067	33.78	9.38	8 947	37.46	10.41	10 683	44.73	12.42	11 847	49.60	13.78
618	86.9328	4.0339	1.3815	0.1931	0.3435	0.0035	0.1103	0.0986	0.1480	0.0330	4.0479	2.6739	0.7784	8 066	33.77	9.38	8 926	37.37	10.38	10 034	42.01	11.67	11 104	46.49	12.91
619	97.6573	1.1331	0.3365	0.0519	0.0492	0.0007	0.0105	0.0067	0.0077	0.0045	0.6273	0.1146	0.6857	8 063	33.76	9.38	8 942	37.44	10.40	10 686	44.74	12.43	11 851	49.62	13.78
620	97.6290	1.1392	0.3363	0.0533	0.0500	0.0000	0.0106	0.0067	0.0086	0.0041	0.6529	0.1093	0.6858	8 063	33.76	9.38	8 942	37.44	10.40	10 684	44.73	12.43	11 849	49.61	13.78
621	87.0045	4.0086	1.3808	0.1917	0.3439	0.0034	0.1104	0.0958	0.1380	0.0171	3.9889	2.7169	0.7780	8 063	33.76	9.38	8 923	37.36	10.38	10 034	42.01	11.67	11 104	46.49	12.91
622	92.2628	2.9551	0.7811	0.1272	0.0981	0.0090	0.0584	0.0243	0.0613	0.0069	2.7775	0.8384	0.7263	8 061	33.75	9.38	8 935	37.41	10.39	10 380	43.46	12.07	11 505	48.17	13.38
623	85.7601	3.4421	1.6415	0.2161	0.5465	0.0151	0.1298	0.1252	0.2569	0.0059	7.4162	0.4446	0.7771	8 061	33.75	9.38	8 918	37.34	10.37	10 036	42.02	11.67	11 103	46.48	12.91
624	86.6649	5.6260	1.1480	0.1000	0.1450	0.0029	0.0400	0.0360	0.0320	0.0082	1.3710	4.8260	0.7850	8 059	33.74	9.37	8 921	37.35	10.38	9 981	41.79	11.61	11 049	46.26	12.85
625	89.2315	3.7368	1.1073	0.1502	0.2534	0.0044	0.0670	0.0555	0.0688	0.0048	4.7379	0.5824	0.7456	8 057	33.73	9.37	8 926	37.37	10.38	10 241	42.88	11.91	11 344	47.50	13.19
626	97.9717	0.5940	0.3860	0.0951	0.1051	0.0004	0.0197	0.0103	0.0170	0.0058	0.7255	0.0694	0.6854	8 054	33.72	9.37	8 933	37.40	10.39	10 677	44.70	12.42	11 842	49.58	13.77
627	97.8249	1.0169	0.3019	0.0486	0.0450	0.0000	0.0098	0.0059	0.0073		0.6383	0.1013	0.6843	8 049	33.70	9.36	8 928	37.38	10.38	10 678	44.71	12.42	11 844	49.59	13.78
628	97.7730	1.0403	0.3062	0.0488	0.0449	0.0000	0.0102	0.0061	0.0080		0.6596	0.1030	0.6846	8 049	33.70	9.36	8 928	37.38	10.38	10 676	44.70	12.42	11 842	49.58	13.77
629	97.5654	0.7517	0.3069	0.0989	0.0826	0.0005	0.0492	0.0223	0.0457	0.0051	0.7866	0.2851	0.6897	8 049	33.70	9.36	8 930	37.39	10.39	10 637	44.53	12.37	11 801	49.41	13.73
630	87.3586	5.2590	1.0940	0.1000	0.1460	0.0031	0.0380	0.0330	0.0310	0.0083	1.2900	4.6390	0.7795	8 049	33.70	9.36	8 911	37.31	10.36	10 006	41.89	11.64	11 078	46.38	12.88
631	97.8201	1.0135	0.2950	0.0470	0.0429	0.0000	0.0098	0.0058	0.0073		0.6585	0.1002	0.6842	8 047	33.69	9.36	8 923	37.36	10.38	10 677	44.70	12.42	11 840	49.57	13.77
632	97.9334	0.9389	0.2738	0.0450	0.0410	0.0000	0.0096	0.0055	0.0085		0.6495	0.0948	0.6834	8 040	33.66	9.35	8 916	37.33	10.37	10 673	44.69	12.41	11 837	49.56	13.77
633	97.9007	0.9611	0.2789	0.0449	0.0408	0.0000	0.0095	0.0055	0.0072		0.6538	0.0978	0.6836	8 040	33.66	9.35	8 919	37.34	10.37	10 671	44.68	12.41	11 837	49.56	13.77
634	97.7712	0.5888	0.2528	0.0931	0.0758	0.0003	0.0538	0.0235	0.0727	0.0054	0.7786	0.2840	0.6888	8 040	33.66	9.35	8 921	37.35	10.38	10 631	44.51	12.36	11 797	49.39	13.72
635	98.2440	0.7796	0.2276	0.0389	0.0345	0.0004	0.0091	0.0046	0.0039	0.0057	0.5585	0.0932	0.6811	8 027	33.61	9.34	8 904	37.28	10.35	10 674	44.69	12.41	11 840	49.57	13.77
636	98.1984	0.7790	0.2359	0.0374	0.0338	0.0003	0.0080	0.0048	0.0063	0.0045	0.6033	0.0883	0.6813	8 025	33.60	9.33	8 901	37.27	10.35	10 670	44.67	12.41	11 835	49.55	13.76
637	98.5254	0.3096	0.1398	0.0439	0.0441	0.0015	0.0259	0.0146	0.1190	0.0067	0.6940	0.0755	0.6821	8 023	33.59	9.33	8 899	37.26	10.35	10 661	44.63	12.40	11 825	49.51	13.75
638	98.1988	0.7757	0.2257	0.0370	0.0331	0.0000	0.0079	0.0042	0.0063		0.6258	0.0856	0.6812	8 023	33.59	9.33	8 897	37.25	10.35	10 670	44.67	12.41	11 832	49.54	13.76
639	97.9929	0.7655	0.2256	0.0589	0.0376	0.0005	0.0201	0.0075	0.0206	0.0050	0.6281	0.2377	0.6842	8 023	33.59	9.33	8 902	37.27	10.35	10 645	44.57	12.38	11 811	49.45	13.74
640	98.2592	0.7430	0.2146	0.0351	0.0315	0.0000	0.0075	0.0040	0.0055		0.6171	0.0825	0.6807	8 018	33.57	9.33	8 895	37.24	10.34	10 664	44.65	12.40	11 830	49.53	13.76
641	98.2601	0.7186	0.2074	0.0361	0.0296	0.0004	0.0074	0.0041	0.0043	0.0054	0.6462	0.0804	0.6806	8 013	33.55	9.32	8 888	37.21	10.34	10 659	44.63	12.40	11 824	49.51	13.75

№ зразку	Компонентний склад, % мол.												Фізико-хімічні показники газу обчислені на основі компонентного складу, 101.325 кПа												
	метан, С1	етан, С2	пропан, С3	ізо-бутан, і-С4	н-бутан, н-С4	ізо-пентан, і-С5	н-пентан, н-С5	гексан та вищі, С6+	кисень, О2	азот, N2	диоксид вуглецю, СО2	Густина абсолютна, кг/м3, при 20 °С.	Температура вимірювання/згоряння при 20/25°С												
													Теплота згоряння нижча			Теплота згоряння вища			Число Воббе нижче			Число Воббе вище			
													ккал/м3	МДж/м3	кВт·год/м3	ккал/м3	МДж/м3	кВт·год/м3	ккал/м3	МДж/м3	кВт·год/м3	ккал/м3	МДж/м3	кВт·год/м3	
642	98.5638	0.3090	0.1436	0.0429	0.0440	0.0001	0.0247	0.0142	0.0858	0.0049	0.6714	0.0956	0.6811	8 011	33.54	9.32	8 887	37.21	10.34	10 652	44.60	12.39	11 818	49.48	13.74
643	98.3945	0.6502	0.1862	0.0311	0.0273	0.0000	0.0068	0.0033	0.0052		0.6191	0.0762	0.6796	8 009	33.53	9.31	8 883	37.19	10.33	10 661	44.64	12.40	11 825	49.51	13.75
644	98.3574	0.6675	0.1894	0.0323	0.0281	0.0000	0.0073	0.0038	0.0059		0.6312	0.0772	0.6799	8 009	33.53	9.31	8 883	37.19	10.33	10 661	44.64	12.40	11 825	49.51	13.75
645	98.1390	0.3728	0.1920	0.0803	0.0657	0.0003	0.0405	0.0184	0.0469	0.0054	0.7649	0.2740	0.6850	8 004	33.51	9.31	8 883	37.19	10.33	10 612	44.43	12.34	11 777	49.31	13.70
646	87.0323	5.7450	0.8120	0.0690	0.1020	0.0021	0.0270	0.0240	0.0210	0.0086	1.4330	4.7240	0.7787	8 004	33.51	9.31	8 864	37.11	10.31	9 953	41.67	11.58	11 023	46.15	12.82
647	98.5021	0.5871	0.1671	0.0284	0.0247	0.0000	0.0064	0.0031	0.0046		0.6068	0.0696	0.6787	8 001	33.50	9.31	8 876	37.16	10.32	10 661	44.63	12.40	11 825	49.51	13.75
648	98.7009	0.5134	0.1434	0.0261	0.0209	0.0002	0.0069	0.0033	0.0028	0.0067	0.5010	0.0744	0.6774	8 000	33.49	9.30	8 875	37.16	10.32	10 667	44.66	12.41	11 833	49.54	13.76
649	98.4510	0.5930	0.1664	0.0288	0.0243	0.0000	0.0069	0.0033	0.0057	0.0055	0.6427	0.0724	0.6790	7 999	33.49	9.30	8 873	37.15	10.32	10 654	44.61	12.39	11 818	49.48	13.74
650	98.5404	0.4884	0.1525	0.0353	0.0263	0.0002	0.0109	0.0054	0.0127	0.0043	0.5463	0.1773	0.6795	7 997	33.48	9.30	8 873	37.15	10.32	10 646	44.57	12.38	11 813	49.46	13.74
651	98.5109	0.1891	0.0813	0.0604	0.0632	0.0001	0.0579	0.0259	0.0720	0.0054	0.7372	0.1966	0.6825	7 997	33.48	9.30	8 876	37.16	10.32	10 622	44.47	12.35	11 789	49.36	13.71
652	98.3796	0.2992	0.1458	0.0682	0.0505	0.0002	0.0396	0.0173	0.0494	0.0051	0.7355	0.2096	0.6827	7 997	33.48	9.30	8 876	37.16	10.32	10 620	44.46	12.35	11 787	49.35	13.71
653	98.5697	0.4728	0.1481	0.0351	0.0259	0.0003	0.0107	0.0051	0.0121	0.0041	0.5415	0.1746	0.6793	7 994	33.47	9.30	8 873	37.15	10.32	10 643	44.56	12.38	11 813	49.46	13.74
654	98.6780	0.2632	0.1200	0.0397	0.0376	0.0009	0.0230	0.0119	0.0469	0.0070	0.6960	0.0758	0.6791	7 992	33.46	9.29	8 864	37.11	10.31	10 645	44.57	12.38	11 806	49.43	13.73
655	98.7032	0.2600	0.1181	0.0389	0.0369	0.0010	0.0232	0.0118	0.0424	0.0062	0.6829	0.0754	0.6788	7 989	33.45	9.29	8 864	37.11	10.31	10 642	44.55	12.38	11 806	49.43	13.73
656	98.7565	0.4200	0.1142	0.0207	0.0168	0.0000	0.0051	0.0019	0.0036		0.6017	0.0596	0.6766	7 982	33.42	9.28	8 854	37.07	10.30	10 650	44.59	12.39	11 813	49.46	13.74
657	99.0518	0.1814	0.0648	0.0286	0.0189	0.0000	0.0153	0.0059	0.0197	0.0055	0.4832	0.1249	0.6758	7 975	33.39	9.28	8 852	37.06	10.29	10 648	44.58	12.38	11 818	49.48	13.74
658	93.5625	2.6068	0.3176	0.0472	0.0596	0.0077	0.0274	0.0172	0.0607	0.0013	0.1130	3.1790	0.7298	7 975	33.39	9.28	8 840	37.01	10.28	10 246	42.90	11.92	11 357	47.55	13.21
659	98.9160	0.2973	0.0816	0.0207	0.0129	0.0002	0.0067	0.0030	0.0075	0.0055	0.4900	0.1586	0.6763	7 973	33.38	9.27	8 849	37.05	10.29	10 639	44.54	12.37	11 809	49.44	13.73
660	98.9160	0.2973	0.0816	0.0207	0.0129	0.0002	0.0067	0.0030	0.0075	0.0055	0.4900	0.1586	0.6763	7 973	33.38	9.27	8 849	37.05	10.29	10 639	44.54	12.37	11 809	49.44	13.73
661	98.5888	0.3561	0.1045	0.0456	0.0167	0.0003	0.0155	0.0041	0.0137	0.0036	0.6052	0.2459	0.6794	7 973	33.38	9.27	8 849	37.05	10.29	10 615	44.44	12.35	11 782	49.33	13.70
662	99.0897	0.1773	0.0573	0.0263	0.0156	0.0001	0.0134	0.0048	0.0142	0.0054	0.4643	0.1316	0.6754	7 973	33.38	9.27	8 849	37.05	10.29	10 645	44.57	12.38	11 816	49.47	13.74
663	99.1009	0.1732	0.0561	0.0243	0.0145	0.0002	0.0124	0.0044	0.0134	0.0043	0.4844	0.1119	0.6751	7 970	33.37	9.27	8 847	37.04	10.29	10 647	44.58	12.38	11 818	49.48	13.74
664	98.7803	0.1552	0.0420	0.0165	0.0143	0.0000	0.0311	0.0184	0.0726	0.0047	0.7109	0.1540	0.6788	7 970	33.37	9.27	8 847	37.04	10.29	10 617	44.45	12.35	11 785	49.34	13.71
665	87.2685	3.7251	1.1864	0.1616	0.2808	0.0035	0.0900	0.0823	0.1443	0.0152	4.4976	2.5447	0.7723	7 970	33.37	9.27	8 823	36.94	10.26	9 953	41.67	11.58	11 018	46.13	12.81
666	98.9189	0.3067	0.0789	0.0156	0.0114	0.0000	0.0044	0.0012	0.0038		0.6064	0.0528	0.6753	7 968	33.36	9.27	8 840	37.01	10.28	10 642	44.56	12.38	11 806	49.43	13.73
667	99.3107	0.1539	0.0309	0.0097	0.0038	0.0001	0.0044	0.0011	0.0001	0.0074	0.4187	0.0592	0.6727	7 963	33.34	9.26	8 836	36.99	10.28	10 655	44.61	12.39	11 823	49.50	13.75
668	98.9287	0.2182	0.0597	0.0341	0.0095	0.0002	0.0128	0.0032	0.0084	0.0047	0.5759	0.1446	0.6761	7 963	33.34	9.26	8 837	37.00	10.28	10 630	44.50	12.36	11 797	49.39	13.72
669	93.2718	2.9758	0.3184	0.0261	0.0388	0.0025	0.0099	0.0066	0.0092	0.0103	3.0802	0.2504	0.7096	7 962	33.34	9.26	8 826	36.95	10.26	10 374	43.43	12.06	11 499	48.14	13.37

№ зразку	Компонентний склад, % мол.												Фізико-хімічні показники газу обчислені на основі компонентного складу, 101.325 кПа												
	метан, C1	етан, C2	пропан, C3	ізо-бутан, i-C4	н-бутан, n-C4	ізо-пентан, iso-C5	ізо-пентан, i-C5	н-пентан, n-C5	гексани та вищі, C6+	кисень, O2	азот, N2	диоксид вуглецю, CO2	Густина абсолютна, кг/м ³ , при 20 °С.	Температура вимірювання/згоряння при 20/25°С											
														Теплота згоряння нижча			Теплота згоряння вища			Число Воббе нижче			Число Воббе вище		
														ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	кВт·год/м ³
670	87.2213	3.7082	1.1889	0.1647	0.2841	0.0034	0.0911	0.0836	0.1268	0.0199	4.5840	2.5239	0.7721	7 961	33.33	9.26	8 813	36.90	10.25	9 943	41.63	11.56	11 007	46.08	12.80
671	98.8239	0.2243	0.0611	0.0362	0.0099	0.0003	0.0134	0.0031	0.0114	0.0045	0.5801	0.2319	0.6774	7 958	33.32	9.26	8 833	36.98	10.27	10 612	44.43	12.34	11 777	49.31	13.70
672	87.5110	3.7221	1.1672	0.1574	0.2709	0.0034	0.0828	0.0737	0.0958	0.0217	4.4371	2.4569	0.7687	7 958	33.32	9.26	8 811	36.89	10.25	9 960	41.70	11.58	11 028	46.17	12.83
673	99.1740	0.1531	0.0354	0.0113	0.0048	0.0000	0.0037	0.0014	0.0042	0.0049	0.4622	0.1451	0.6741	7 956	33.31	9.25	8 830	36.97	10.27	10 635	44.53	12.37	11 804	49.42	13.73
674	87.2634	3.6982	1.1777	0.1616	0.2782	0.0033	0.0894	0.0819	0.1249	0.0168	4.5804	2.5244	0.7716	7 956	33.31	9.25	8 808	36.88	10.24	9 940	41.62	11.56	11 004	46.07	12.80
675	99.1740	0.1531	0.0354	0.0113	0.0048	0.0000	0.0037	0.0014	0.0042	0.0049	0.4622	0.1451	0.6741	7 956	33.31	9.25	8 830	36.97	10.27	10 635	44.53	12.37	11 804	49.42	13.73
676	87.2406	3.7047	1.1790	0.1613	0.2768	0.0033	0.0872	0.0792	0.1284	0.0246	4.5849	2.5300	0.7717	7 955	33.30	9.25	8 806	36.87	10.24	9 937	41.61	11.56	11 001	46.06	12.79
677	87.1964	3.7398	1.1879	0.1610	0.2801	0.0034	0.0880	0.0793	0.1154	0.0223	4.5594	2.5670	0.7720	7 954	33.30	9.25	8 806	36.87	10.24	9 934	41.59	11.55	10 999	46.05	12.79
678	87.2265	3.7103	1.1812	0.1611	0.2750	0.0033	0.0849	0.0765	0.1271	0.0236	4.5967	2.5337	0.7717	7 952	33.29	9.25	8 803	36.86	10.24	9 935	41.59	11.55	10 998	46.05	12.79
679	98.7573	0.2217	0.0601	0.0342	0.0094	0.0002	0.0125	0.0030	0.0104	0.0037	0.5671	0.3205	0.6782	7 951	33.29	9.25	8 825	36.95	10.26	10 596	44.36	12.32	11 761	49.24	13.68
680	98.6577	0.2471	0.0677	0.0415	0.0109	0.0001	0.0151	0.0036	0.0135	0.0058	0.6294	0.3076	0.6790	7 951	33.29	9.25	8 825	36.95	10.26	10 592	44.34	12.32	11 756	49.22	13.67
681	87.2889	3.7111	1.1841	0.1610	0.2788	0.0034	0.0872	0.0776	0.1035	0.0174	4.5571	2.5299	0.7709	7 951	33.29	9.25	8 801	36.85	10.24	9 938	41.61	11.56	11 001	46.06	12.79
682	87.2357	3.7323	1.1849	0.1605	0.2767	0.0034	0.0861	0.0767	0.1085	0.0226	4.5614	2.5512	0.7714	7 951	33.29	9.25	8 801	36.85	10.24	9 936	41.60	11.56	10 999	46.05	12.79
683	87.3050	3.6743	1.1538	0.1574	0.2674	0.0033	0.0847	0.0770	0.1358	0.0264	4.5914	2.5235	0.7711	7 948	33.28	9.24	8 799	36.84	10.23	9 933	41.59	11.55	10 997	46.04	12.79
684	87.2872	3.7222	1.1838	0.1612	0.2792	0.0034	0.0862	0.0774	0.0922	0.0207	4.5502	2.5363	0.7707	7 946	33.27	9.24	8 799	36.84	10.23	9 933	41.59	11.55	10 999	46.05	12.79
685	87.2649	3.7045	1.1764	0.1610	0.2745	0.0033	0.0865	0.0772	0.0964	0.0283	4.6038	2.5232	0.7707	7 942	33.25	9.24	8 792	36.81	10.23	9 929	41.57	11.55	10 992	46.02	12.78
686	87.3315	3.7089	1.1767	0.1584	0.2720	0.0032	0.0823	0.0725	0.0903	0.0165	4.5573	2.5304	0.7700	7 942	33.25	9.24	8 792	36.81	10.23	9 933	41.59	11.55	10 996	46.04	12.79
687	87.2702	3.7352	1.1784	0.1580	0.2704	0.0033	0.0814	0.0705	0.0832	0.0266	4.5791	2.5437	0.7702	7 937	33.23	9.23	8 787	36.79	10.22	9 924	41.55	11.54	10 987	46.00	12.78
688	87.3153	3.6979	1.1669	0.1580	0.2674	0.0032	0.0806	0.0712	0.0874	0.0237	4.6149	2.5135	0.7697	7 932	33.21	9.23	8 782	36.77	10.21	9 923	41.55	11.54	10 987	46.00	12.78
689	97.4615	0.0386	0.0004	0.0050	0.0001	0.0002	0.0001	0.0010	0.0002	0.0136	2.4661	0.0133	0.6811	7 789	32.61	9.06	8 643	36.19	10.05	10 358	43.37	12.05	11 493	48.12	13.37
690	97.4627	0.0253	0.0002	0.0004	0.0003	0.0010	0.0017	0.0001	0.0048	0.0189	2.4443	0.0403	0.6813	7 788	32.61	9.06	8 642	36.18	10.05	10 355	43.35	12.04	11 490	48.11	13.36
691	97.4608	0.0258	0.0003	0.0004	0.0005	0.0020	0.0017	0.0003	0.0033	0.0177	2.4466	0.0407	0.6813	7 788	32.61	9.06	8 642	36.18	10.05	10 354	43.35	12.04	11 490	48.11	13.36
692	97.4604	0.0260	0.0003	0.0003	0.0004	0.0017	0.0019	0.0001	0.0038	0.0177	2.4459	0.0413	0.6813	7 788	32.61	9.06	8 642	36.18	10.05	10 355	43.35	12.04	11 490	48.11	13.36
693	97.4509	0.0253	0.0002	0.0004	0.0004	0.0037	0.0018	0.0002	0.0032	0.0181	2.4555	0.0404	0.6814	7 787	32.60	9.06	8 641	36.18	10.05	10 353	43.35	12.04	11 489	48.10	13.36
694	97.4458	0.0260	0.0004	0.0003	0.0001	0.0026	0.0018	0.0001	0.0042	0.0173	2.4609	0.0405	0.6814	7 787	32.60	9.06	8 641	36.18	10.05	10 353	43.34	12.04	11 488	48.10	13.36
695	97.4583	0.0258	0.0002	0.0002	0.0003	0.0025	0.0018	0.0002	0.0032	0.0179	2.4490	0.0405	0.6813	7 787	32.60	9.06	8 641	36.18	10.05	10 354	43.35	12.04	11 490	48.10	13.36
696	97.4439	0.0260	0.0004	0.0002	0.0005	0.0026	0.0017	0.0001	0.0023	0.0170	2.4653	0.0401	0.6814	7 786	32.60	9.06	8 640	36.17	10.05	10 352	43.34	12.04	11 487	48.09	13.36
697	97.4488	0.0256	0.0003	0.0001	0.0002	0.0019	0.0017	0.0001	0.0021	0.0196	2.4588	0.0406	0.6813	7 786	32.60	9.06	8 640	36.17	10.05	10 352	43.34	12.04	11 487	48.10	13.36

№ зразку	Компонентний склад, % мол.												Фізико-хімічні показники газу обчислені на основі компонентного складу, 101.325 кПа												
	метан, С1	етан, С2	пропан, С3	ізо-бутан, і-С4	н-бутан, н-С4	ізо-пентан, і-С5	н-пентан, н-С5	гексани та вищі, С6+	кисень, О2	азот, N2	діоксид вуглецю, СО2	Густина абсолютна, кг/м3, при 20 °С.	Температура вимірювання/згоряння при 20/25°С												
													Теплота згоряння нижча			Теплота згоряння вища			Число Воббе нижче			Число Воббе вище			
													ккал/м3	МДж/м3	кВт·год/м3	ккал/м3	МДж/м3	кВт·год/м3	ккал/м3	МДж/м3	кВт·год/м3	ккал/м3	МДж/м3	кВт·год/м3	
698	97.4173	0.0381	0.0002	0.0050	0.0001	0.0002	0.0000	0.0009	0.0001	0.0138	2.4704	0.0539	0.6815	7 785	32.59	9.05	$\frac{8}{639}$	36.17	10.05	10 349	43.33	12.04	11 484	48.08	13.36
699	97.4122	0.0391	0.0005	0.0050	0.0002	0.0002	0.0001	0.0010	0.0002	0.0153	2.4731	0.0532	0.6816	7 785	32.59	9.05	$\frac{8}{638}$	36.17	10.05	10 349	43.33	12.04	11 483	48.08	13.36
700	97.3972	0.0401	0.0009	0.0050	0.0003	0.0002	0.0001	0.0010	0.0001	0.0173	2.4841	0.0538	0.6817	7 784	32.59	9.05	$\frac{8}{637}$	36.16	10.05	10 347	43.32	12.03	11 481	48.07	13.35

ДОДАТОК К

Код розробленої штучної нейронної мережі для розрахунку теплотворної здатності в розгалуженій газовій мережі

```

function [y1] = myNeuralNetworkFunction(x1)
%MYNEURALNETWORKFUNCTION neural network simulation function.
%
% Auto-generated by MATLAB, 03-Dec-2024 11:30:47.
%
% [y1] = myNeuralNetworkFunction(x1) takes these arguments:
%   x = 19xQ matrix, input #1
% and returns:
%   y = 1xQ matrix, output #1
% where Q is the number of samples.

%#ok<*RPMT0>

% ===== NEURAL NETWORK CONSTANTS =====

% Input 1
x1_step1.xoffset =
[0.0788;363.0645527;50;0.0133;384.669171;30.74325942;3.94;0.00315988;33.39373395
;0.788;18153.22763;4.828758551;143361.6388;3630.645527;0.665;19233.45855;5.63763
1345;0.133;3846.69171];
x1_step1.gain =
[0.479478327579593;0.0382503545028511;0.05;0.415567145261496;0.0488551285511196;
0.00132250546130644;0.00528317836010144;0.112556530053985;0.00113115453857029;0.
00944679564691657;0.000104012701540172;0.00103745476057739;6.60836328023293e-
05;0.000116706970698332;0.00461174842912319;0.000104870559665605;0.0010758269761
0471;0.00829300857911737;0.000114720769137412];
x1_step1.ymin = -1;

% Layer 1
b1 = [-
1.2986032046432822717;2.0310107301363893306;0.40153153453627771219;2.31306328456
84155896;-1.6051504215728962244;-1.4697203261616891279;-
0.033571296561658414692;-
2.5013158632640970502;0.6207123073784532874;1.9583807072049810305;-
0.070212659109588737572;0.2351896577774097441;0.74102684455853773393;0.457389492
77721308029;0.0012195316798435749256;-
0.97642489089732320551;0.94354532867751683689;1.1992613177038999872;0.3022776351
9497241607;-1.6759952657870671455];
IW1_1 = [0.55265847284205682488 -1.0865208900711063045 0.33358947046487374966 -
1.0490035728126867465 0.13364043623625551649 -0.40443664745935237192 -
0.19607616791319879002 2.3589480272565985786 -0.3664959145522863615 -
0.3976583724902885697 0.15593138096673883619 0.059824945235434794089
0.098991088366657528641 -0.86107896922159887776 -0.92819706619799746683 -
1.3320155433510898479 -1.6112045964173371537 -0.27633166510083295719
0.26211603565442165298;-0.61894356884880241676 -0.50982183702079186816 -
0.10666710378316916763 0.97355454389448670138 0.060182441660255367455 -
0.57378318705451547554 -1.2545946613482290566 -0.18976172520053305459
0.42578777609697643358 0.0045517285263578519464 -0.66224469796207163785 -
0.072741091341345737176 -0.28424616306709199476 1.2646170276074746308
1.060485304516355809 0.85107587098623627142 0.6806577309862816838 -

```

0.11532936036857109607 -1.5216997061856676332;1.2246369242290868762
2.0589314716855184884 -0.92625494963602972298 1.016547914502970551 -
1.5193154277606315539 -0.1198588791533934661 -0.016260034838394707424 -
1.1144187871043622629 3.1407190162191254146 0.094490104826270210348
0.94794061922946559751 -3.4261249859018376718 2.2685751959537725497 -
0.8719269735672944277 0.52392599692095520592 -1.053302328592535142
2.1481293065057167624 0.37998180119355184914 -0.257495733770405133;-
0.040716550744192017697 -2.9732383666607775652 0.17852901548569113932 -
0.31887723351938090932 0.96304096978768793935 0.028331833731948925792 -
0.015657592139100277862 3.9039553129459894087 -2.2876189349318423183
0.053000180378144502724 -1.1304116606757881325 -0.73845388941031087082 -
2.0789923962146072967 -0.23254873256547700655 -0.50970198689106582801
0.24718112973233846708 -0.47588585331918686894 -0.51613040956903277756 -
0.32166203377975838285;-0.15851862264719113194 0.03652156107622739345
0.75850165027054317068 -0.31351895698963228032 -0.043270156832729549101 -
0.71864829199308644103 0.093900387982185529179 0.2975903735181349985
1.7011838525762075225 -0.085013352692101057384 0.014584852925655013289 -
2.3470687280160023036 0.51320333975904008916 0.26692910138299724698 -
0.21519846620206536936 -0.4583118904829790452 0.91840351726008928601
0.08812916207164470106 0.28940068008148273071;-1.272323047896573911 -
2.2881182400449158187 1.7726691516927952641 -0.76583771222879915008
1.4795325338195703946 0.9461348749995011076 -1.5212682186553687647 -
1.2275008162868550343 2.5521074371743028841 -0.88085704263895947541 -
2.4792575281128024223 0.1300174256830822217 -2.383450875505932931
2.0062421496485765005 -0.2347767602963136413 1.6710759536719477225
0.41375783539469268568 -0.30247610214598413814 -0.65770415011663196925;-
1.4212434313349280313 -0.072253030411200236394 -3.2239783347059067786
1.0916959136820418852 0.96933407879012045694 0.89507349339442388025 -
0.96785989908026381912 1.3918718396623102063 0.15824946976827145018 -
0.87145208303665899763 1.524215087814731806 1.0044681113635671732 -
1.2574222319773100676 -1.3073973886113874343 0.32519870627970659527
0.67043040092415373543 -2.3709628168778027479 0.26611996548000682594 -
0.048363184474381003264;-1.1467989963263074404 -7.3810266067983514304
0.74642591581263473266 -2.2483412612049558099 -0.63844733391150998436 -
3.4994235148377499378 -1.2991466850779007647 1.3966415394597673227 -
0.57270351527566398797 -0.81106045374096713552 -0.55511871277688262794 -
1.8494188361074315186 -4.5030951916801846835 -0.76585448722206239669 -
0.83250201619186203761 -0.049596709450058354407 -0.21841373713219128239
0.061688235824540929575 0.89377476705521519129;1.1858118181711014838
3.9320890547414486527 -3.1930137728291687615 -0.82857944217690038258 -
0.51163197208576394193 1.2960240646727769764 1.4433940875667714554 -
0.83542845853544034362 0.90047667543560294678 0.6004222309088446119
2.5255894732608683562 3.5064425407524546507 0.076694542895723333276 -
1.7374577901246235356 -0.79239936307506164681 -0.26195070672445397442 -
1.3711528230024383479 -0.34709846464837201818
0.37604831949824796267;0.33618910620020536761 -1.4113281462049906967
1.3721752017144428493 0.081103546677753796112 1.2730885615225624452 -
1.183898727553203134 -0.55846348874489226688 2.7814837901479672055
0.50079010009009861104 -0.14094838461177611189 -0.81830399235878603648 -
0.55660316726509651009 0.018621297752596202568 0.52935594024782983702 -
0.6878560517695920613 0.41156052166049039709 -0.20040856697464423664 -
0.8523488943198982426 0.80995623361829394149;0.068274549358560088219 -
0.17965849241351203314 0.76849395027162115124 -1.6925800857581452252 -
0.18369141196496813206 -1.9266455663278692079 -0.42758721526893134213
0.18409444086765044957 -2.5145303639895333347 0.62608293359350974949 -
0.39254228259103202126 -1.6330276753422665603 -1.4092804690317879412
0.49700931110764434706 -2.057319414654598333 0.35661136513512842194
1.0154305382558586057 -0.5108338254574951165 -0.30374188759105363866;-
1.2118088467267680297 -0.22579256976190678619 0.42809014876020884399 -

0.79577692399269828183 -0.65820335382727368501 -1.2187270052815302179 -
 1.5254524839383194479 1.0207338135877828122 -0.4922680801192358957
 0.0010892021408956151056 -0.020322894371277596542 -0.58726574322196090083 -
 1.0515715735645505546 -0.3527782060526656327 -0.42050537502603868578 -
 0.599914815808824331 -2.7209157087140223297 0.39648223363220619353 -
 0.3045450186043995866;1.4773260338636799993 -3.150023371142053108
 0.51352875706849832049 0.69726149137084147966 0.86653160681395224874 -
 0.14950624939690296267 1.2205625188915079082 -1.2549647559499208516 -
 1.9186122423229665657 0.57127747876195289489 -2.3253095497879781028
 0.14300184573200136473 0.10882916367311006034 1.61806199060744893
 0.15327132090695838595 1.2327524179086641887 0.11495922526811676312 -
 0.15998360239288272888 -1.8286896500569183033;1.6476675442912838143
 0.16207589696107468913 0.16792260584614451813 0.084992130338557736469
 2.592420088174876458 3.3555935928202189622 1.7498682023553830955 -
 3.5142969245428656855 2.509421074797936857 -0.74239895543566236658 -
 0.31383084412493528204 -0.021807006713496113193 0.16526592061058337224 -
 0.31320739855906876148 -0.67797526511675043626 -0.51141260507313968109
 0.60652754034630207425 -0.12250207639523133518
 0.082294677254980533321;0.19517003337802449336 -0.11074619218122067066 -
 1.0775970606268621133 0.20711384807003888064 -0.87434798795780954705
 0.60699449939665828246 -0.23197317704923736681 -2.5098705083748824585 -
 0.71863118570129336238 -0.35875698755500468051 1.0105163196465043463
 0.51311722164859696615 -0.51960504866569201532 -1.6491462255970752437 -
 0.16890830994548011734 -1.248332286999014995 1.4658131023920124569
 0.063548478303482716645 0.086606242916323281089;-1.7877657417914647464 -
 3.3026968301637800174 -1.6941923555328877171 0.051302348884158535669
 0.49016080396486017001 1.1339363447286825437 -0.62504464713861596081 -
 0.83186906197409671293 -0.43117757265135370215 -0.31989082346606034779
 0.21900558125678057375 0.52221639972064615165 -2.1237434557077543573 -
 0.56181908760439136508 0.33233861297864292217 0.57774859211770512868 -
 2.111305127595734632 -0.095900291779914367818 -
 0.48422123377099357544;1.936781964461465666 -0.77384641352030969497 -
 0.28345231623000960441 -0.61293399238415824382 -0.41153740289226159454
 1.8990446236939226843 2.7620062439701724699 -5.0421405576321509656
 1.8645394008666369423 -1.6509454267488423707 -0.39000089265836423991
 0.67299699732096940341 -1.616716299774544563 -0.016282442810251401832 -
 0.37310209067372529512 -0.20141964483406452069 0.22218207077610413469
 0.0038629832532242058818 -0.4458954607295339545;0.087972525563138739835
 2.4013957865380928247 -0.12781732443543916689 0.56163908578335652866 -
 3.0121738713045465019 0.63544757258164785707 -0.86425904311468448871
 2.449843296812797 0.10325920659572546123 -0.035945015983334230314 -
 1.0838240804169765319 -1.1892183870721579897 0.9841200543493632269
 1.7009072378765677236 -0.13109044854427059912 0.7748801115744577972 -
 0.19462357846239417003 -1.0248343118100424753 -2.0519755599157774029;-
 0.047675128768412643188 -2.3196223803852666911 -0.44039306791162424748
 0.48497829881992726708 1.1848537541164367859 0.097515240831153954248
 0.0041571367065168750299 -4.403873649311966787 -0.75585475445255490001
 0.32963207215244166859 -0.44385515493504296147 0.569179295500371496 -
 1.0894704504639938983 -0.1984859704685163484 1.3915065593066335836
 0.27011084976924287782 -2.4780907052874097118 0.8037102473138445502 -
 0.64576150226504791529;-0.46845221761251754078 0.12694659347740006039
 0.045078328967012359918 0.39943912073059678614 -2.1926889790825927484 -
 0.51004436244783613041 -0.15069425258424140601 -1.5921701258829330516 -
 1.0177629552129507928 -0.51956119293509384072 -1.0338468531730200528 -
 0.42712889360072059386 -0.38502753204496292794 1.4043617683574192156
 0.24426872600670587743 1.1971861841706494811 0.79590193292916500134 -
 0.31595763078628336107 -1.0526033145952167214];

% Layer 2

```

b2 = -2.2041000444351044329;
LW2_1 = [1.8654892236274263073 -2.1475920164623882869 -5.9280654898119466978 -
2.4638469385965673375 -7.5694810551370395046 -2.3816344308401649066 -
2.7843717471785671691 -0.26763173867188583266 4.6131146390717843175
1.0742737242745403758 2.8248891402729006117 -2.1408320563094824784
2.7858171754406315657 0.31557095298423626373 -2.0569199316142561251
2.1553788601029832961 -0.29395285551366590049 0.459005020905795591 -
1.9323175754794159609 0.55604458568996795176];

% Output 1
y1_step1.ymin = -1;
y1_step1.gain = 0.00263096748283101;
y1_step1.xoffset = 8945.63043;

% ===== SIMULATION =====

% Dimensions
Q = size(x1,2); % samples

% Input 1
xp1 = mapminmax_apply(x1,x1_step1);

% Layer 1
a1 = tansig_apply(repmat(b1,1,Q) + IW1_1*xp1);

% Layer 2
a2 = repmat(b2,1,Q) + LW2_1*a1;

% Output 1
y1 = mapminmax_reverse(a2,y1_step1);
end

% ===== MODULE FUNCTIONS =====

% Map Minimum and Maximum Input Processing Function
function y = mapminmax_apply(x,settings)
y = bsxfun(@minus,x,settings.xoffset);
y = bsxfun(@times,y,settings.gain);
y = bsxfun(@plus,y,settings.ymin);
end

% Sigmoid Symmetric Transfer Function
function a = tansig_apply(n,~)
a = 2 ./ (1 + exp(-2*n)) - 1;
end

% Map Minimum and Maximum Output Reverse-Processing Function
function x = mapminmax_reverse(y,settings)
x = bsxfun(@minus,y,settings.ymin);
x = bsxfun(@rdivide,x,settings.gain);
x = bsxfun(@plus,x,settings.xoffset);
end

```

ДОДАТОК Л

Алгоритм оцінки якості природного газу в розгалужених мережах

Основні етапи алгоритму:

Етап 1: Збір вхідних параметрів

1.1. Кожні 3 хвилини системний контролер (програмно-апаратний комплекс, розташований в серверній кімнаті ГРМ або у віддаленому диспетчерському центрі) надсилає команду на опитування підключених приладів.

1.2. Прилади експрес-контролю якості газу повертають значення v_i та CO_2_i . Одночасно витратоміри передають V_i , а температурні сенсори – T_i .

1.3. Усі отримані дані зберігаються у тимчасовому буфері серверного вузла збору інформації, позначаються часовою міткою (формат: дата, години, хвилини, секунди), а також ідентифікатором точки вимірювання (населений пункт) та маршруту газопостачання, де здійснюється вимірвання.

Етап 2: Попередня обробка даних та фільтрація

2.1. Здійснюється перевірка діапазонів, під час якої кожний отриманий параметр порівнюється з встановленими допустимими межами:

- швидкість ультразвуку повинна бути в межах, визначених технічними характеристиками приладу;
- значення CO_2 не повинне перевищувати максимально допустимого рівня за стандартами [23, 24];
- температура має відповідати очікуваному сезонному діапазону.

Якщо параметр виходить за межі, система помічає це як потенційний збій.

2.2. Перевірка узгодженості даних між суміжними вимірами здійснюється за наступним принципом - якщо, наприклад, за інтервал процесу вимірювання (3 хв) швидкість ультразвуку раптово змінюється на аномально велику величину (наприклад, в 1,5 рази більше від попереднього значення), система відносить таке вимірювання до підозрілих.

2.3. Автоматична фільтрація помилок. Підозрілі чи некоректні дані позначаються спеціальними мітками й заносяться у журнал помилок. Дані, що визнані недостовірними, не йдуть безпосередньо в розрахунковий модуль, а проходять додатковий етап обробки. Методика фільтрації:

Для викидів (аномальних значень) застосовується алгоритм з використанням сигма-фільтра або фільтра Хеммінга, який визначає, наскільки значення виходить за 2-3 стандартних відхилення від середнього. Якщо виявлено систематичні помилки (наприклад, постійне завищення CO_2), оператор ГРМ через інтерфейс системи отримує попередження та інструкцію щодо перевірки датчика.

2.4 Дані, що пройшли фільтрацію та верифікацію, маркуються статусом «валідовано» і передаються у наступний етап обчислень.

Етап 3: Розрахунок усередненої теплотворної здатності газу

3.1. Отримані відфільтровані параметри v_i , CO_2_i , V_i та T_i завантажуються у математичний модуль (i – це номер вхідного газопроводу в мережу).

3.2. Застосовується розроблена математична модель, де для кожної 3-хвилинної вибірки обчислюється поточна теплота згорання газу в мережі з урахуванням усіх вхідних параметрів. Формула розміщується в програмному коді модулю розрахунків, а обчислення автоматично виконуються без втручання оператора. Вихідні результати – значення теплотворної здатності для даного часовго інтервалу – прив'язуються до часу вимірювання та входять до історичної бази даних.

Етап 4: Розрахунок енергетичної цінності та комерційне використання даних

4.1. Підсистема реєстрації об'ємів споживання газу у кінцевих споживачів (споживацькі лічильники) працює паралельно, записуючи дані об'єму спожитого газу з часовою прив'язкою.

4.2. В середині ІВС оцінки якості газу формується єдина база даних, до якої по кожному споживачу системи газорозподілу здійснюється записи енергетичних параметрів (теплотворна здатність), що доповнюються мітками часу. Одночасно з цим, у базі зберігаються об'єми споживання природного газу споживачем у відповідності до часових міток.

4.3. Коли оператор або комерційний модуль формує звіт за певний період (наприклад, кінець місяця), спеціальний алгоритм порівнює часові інтервали споживання конкретного абонента з відповідними інтервалами вимірної теплоти згорання.

4.4. Обчислення енергетичної цінності для кожного споживача проводиться за формулою:

$$E_{\text{споживач}} = \sum_{k=1}^K q_k(t) \cdot H(t) \quad (1)$$

де $q_k(t)$ – об'єм спожитого газу споживачем у k -му мінімальному часовому інтервалі, м^3 ; $H(t)$ – відповідне значення теплоти згорання, зафіксоване системою якості газу у той самий момент часу, $\text{ккал}/\text{м}^3$.

При цьому, K – загальна кількість часових відрізків за розрахунковий період.

4.5. Отримане значення енергетичної цінності заноситься до комерційного звіту, який використовується для формування платіжних документів.

Етап 5: Інтеграція з системами диспетчеризації та управління

5.1. Всі оброблені дані (усереднені значення теплотворної здатності, перевірені об'єми споживання, часові мітки) відправляються на сервер ГРМ, де вони доступні для віддаленого перегляду, аналізу та експорту.

5.2. Оператор може в реальному часі стежити за якістю природного газу, оперативно реагувати на аномалії та виконувати необхідні технічні або комерційні операції.

5.3. Система може бути інтегрована з SCADA або іншими диспетчерськими платформами, що дозволяє автоматизувати прийняття рішень при керуванні потужністю, маршрутизацією потоків та оптимізацією використання газу.

Етап 6: Архівування та аналіз даних

6.1. Дані за кожний інтервал (3 хвилини) накопичуються протягом визначеного терміну (місяць, квартал, рік) та архівуються у захищеній базі даних.

6.2. Архівовані дані можуть використовуватися для довгострокового аналізу стабільності якості газу, прогнозування попиту та формування стратегічних рішень щодо модернізації інфраструктури.

6.3. Перед архівуванням виконується резервне копіювання на віддалені сервери чи хмарні сховища, забезпечуючи захист інформації від втрат.

Етап 7: Перевірка метрологічної достовірності

7.1. Періодично, за встановленим регламентом, проводиться контрольна звірка якості даних: оператор перевіряє результати вибіркового вимірювання з еталонними приладами, чи періодично залучає акредитовані лабораторії для незалежної оцінки якості газу. Методику пропонується доповнити розробленням відповідного проекту наказу НКРЕКП для регламентування процесу.

7.2. У разі виявлення розбіжностей проводиться корекція коефіцієнтів калібрування приладів експрес-контролю, внесення поправок у програмне забезпечення фільтрації та параметрів допусків.

Додаткові рекомендації та аспекти реалізації:

Протоколювання: кожна операція (вимірювання, фільтрація даних, розрахунок параметрів, комерційний розрахунок) супроводжується записом у лог-файл. Це полегшує аудит та діагностику помилок.

Безпека доступу: забезпечення авторизованого доступу до системи. Інженер чи оператор повинен вводити персональні облікові дані. Запис усіх дій користувачів.

Модуль розширення: можливість підключення додаткових датчиків або додаткових входів мережі без суттєвої перебудови алгоритму.

Адаптивність під умови експлуатації: за необхідності частота вимірювань може бути змінена (наприклад, з 3 до 5 хвилин), алгоритм при цьому не змінюється, лише коригуються інтервали збору й обробки.

ДОДАТОК М

Результат моделювання мережі з низьким рівнем розгалуження з висококалорійним газом на базі програмного забезпечення SIMONE 6.1 відображено на рисунку 4. Тиск на ГРС (вхідній точці мережі) рівний 2,8 кПа. За умов, в яких моделюється мережа, тиск у кінцевого споживача становить 2,52 кПа.

Результат моделювання мережі з високим рівнем розгалуження з висококалорійним газом на базі програмного забезпечення SIMONE 6.1 відображено на рисунку 6. Тиск на вхідних точках мережі рівний 3 кПа. За умов, в яких моделюється мережа, тиск у кінцевого споживача 1,99 кПа.

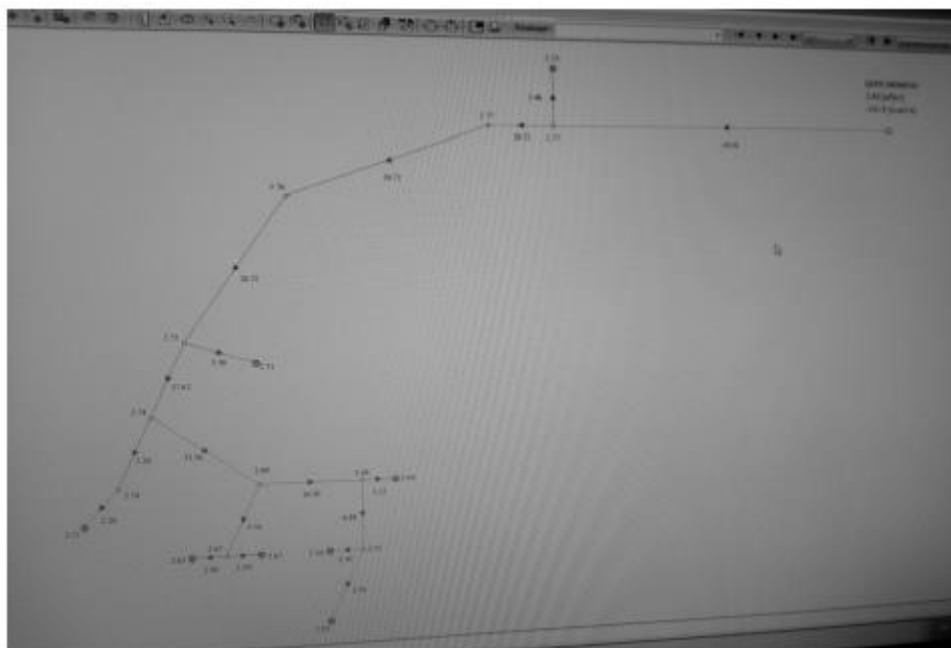


Рисунок 4 - Параметри мережі з низьким рівнем розгалуження при моделюванні з використанням висококалорійного газу

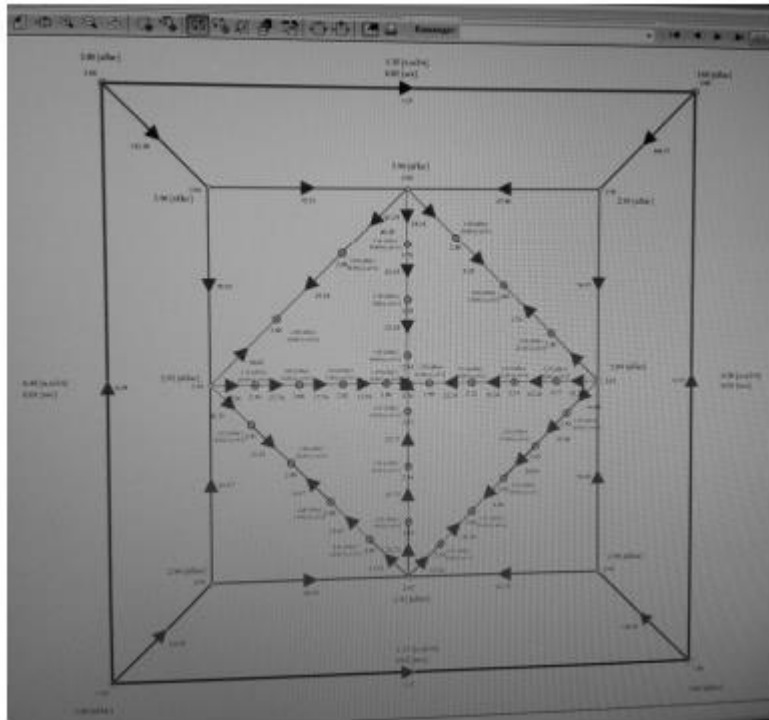


Рисунок 6 - Параметри мережі з високим рівнем розгалуження при моделюванні з використанням висококалорійного газу

ДОДАТОК Н
Дослідження залежності технічного стану газопроводу від якості
енергоресурсу в мережі



Рисунок Н.1 – Дослідження в точці замірів №1

Рисунок Н.2 – Дослідження в точці замірів №2

ДОДАТОК П

Код розробленої штучної нейронної мережі для розрахунку теплотворної здатності в розгалуженій газовій мережі з врахуванням наявності в мережі закачених водню та біометану

```

function [Y,Xf,Af] = myNeuralNetworkFunction(X,~,~)
%MYNEURALNETWORKFUNCTION neural network simulation function.
%
% Auto-generated by MATLAB, 15-Dec-2024 20:01:31.
%
% [Y] = myNeuralNetworkFunction(X,~,~) takes these arguments:
%
% X = 1xTS cell, 1 inputs over TS timesteps
% Each X{1,ts} = 19xQ matrix, input #1 at timestep ts.
%
% and returns:
% Y = 1xTS cell of 1 outputs over TS timesteps.
% Each Y{1,ts} = 1xQ matrix, output #1 at timestep ts.
%
% where Q is number of samples (or series) and TS is the number of timesteps.

%#ok<*RPMT0>

% ===== NEURAL NETWORK CONSTANTS =====

% Input 1
x1_step1.xoffset =
[0.06304;363.0645527;50;0.010640001;384.669171;30.74325942;3.152;0.002022324;33.
39373395;0.6304;18153.22763;4.828758551;143361.6388;3630.645527;0.532000066;1923
3.45855;5.637631345;0.106400013;3846.69171];
x1_step1.gain =
[0.477673538796645;0.0101431234685316;0.05;0.415337586476471;0.0106760139125714;
0.00118296984923451;0.00527220388666871;0.112549324682454;0.000984399812542112;0
.00943976861239177;6.19797669765419e-05;0.000900829029575963;1.16273554142119e-
05;8.20294809776872e-05;0.00461033452657462;6.20212883947999e-
05;0.000969391472188015;0.00829209398635701;8.07964634844981e-05];
x1_step1.ymin = -1;

% Layer 1
b1 = [4.1592727996954002023;5.142396617774593004;-0.50833033462054688645;-
0.59680807553914760888;2.7973599980497301232;8.4247367843933780307;1.55188193177
18639539;-0.39209554336920704465;-
4.2902962450931978466;1.0280586013139867418;0.018922876445297054371;8.2852664859
834881383;-
0.63753935920231452616;0.48951208948156271772;1.3279627489710974508;1.7890553559
358211011;0.25028123203075386405;-
0.38872636072919913852;0.47328313567345370316;-4.7085873427354192344];
IW1_1 = [-0.27301817630571345585 -1.6873719863111729111 1.4028079515977918135
3.4325779961899227644 2.682122120527183462 -2.0699558628155498852 -
1.2566159544540806969 3.4220615886456213772 -0.5966140291752153324 -
0.42020110557030315723 -2.6253295552448556727 -4.3876045495436555299 -
0.74078525488707214208 1.7195778167453226182 2.5973958461658335217
1.2734848905102724714 -3.0291151483840752512 1.0366171090139340016 -

```

0.83343180054535004331;2.9731203105842203271 2.7375488937782361809 -
 1.7747189585814608925 -1.764616382507615544 1.5816508056044256136
 5.4531439306888689345 2.0194834991602048646 -2.6224921309644946277 -
 8.233055167904144156 1.0117861740237277246 4.4372870785146760753
 3.7338943542573046486 2.2045310144083822834 -3.0673520649283494421 -
 3.1036542964487483509 -2.2303847691174172319 2.6997586182659198961 -
 1.7188509801714024761 2.5568011598965614262;-1.1452224566938291606
 0.67380302823121152045 0.47763064050154813156 -0.14345221513524086809 -
 0.85633446880360930553 2.247563902107941658 -0.10580775554207766387 -
 0.74092076499942194356 -1.0968338931487391363 0.31221201286179550705 -
 0.39140059648418157323 -3.2978379218228615066 -0.71695173974918069426
 2.0706911848114457619 0.065358909646825544271 0.28554048386631897261
 2.3462781628864020078 0.04279068826292638239 -
 1.656540277629961871113;2.9956572661302747207 -3.7763677112498026389
 0.4349117592998602582 2.0715925722456218772 -5.0063340603144421692 -
 4.2381112557805993291 2.8586043434438934696 -3.7574359147139082538 -
 2.6335396669720219087 3.0326445820367178285 -6.1162426322744316565 -
 6.3492038598692417395 6.0164394039381683399 5.8030282271827271501
 2.6571270855904915997 3.5918766970235558311 2.8094019203567999199 -
 0.36715275641402678186 -7.1265968732345106318;-2.6485337353500741919
 0.50985570667555613067 4.5029198574243984865 -1.0311473783367748336
 5.4418513784077529039 -1.8557616952073865413 -5.0557463451452635539
 4.0466682767153345779 0.090786688698425765942 1.1835869849690294764 -
 1.8804100496647855323 -2.134299913904592394 -7.6258019429715071524
 2.0514825761772250701 -0.83096148740953834633 1.2936462199784852789
 2.2168205966722882572 -0.68181105628684712805
 1.0034136937818680657;0.33582315185136724089 10.891201381833209183
 2.5535628053465728726 4.3251311065537718648 8.5105709132522502358 -
 0.24895155653400682927 -1.6788102900518522276 1.8830489951746698374
 2.9947934129965996242 -0.4691781701439347585 0.13000216808500542065 -
 10.652030439619782243 -0.63979787288835943126 5.4279106446407601183
 1.4411711201647485758 2.9596659990004723362 8.2131891385896746982 -
 0.035397274182067228754 0.40296883351130019513;0.38249322198373209014
 5.5468060760382718044 -0.87527012992859309914 -0.40734683935256443821 -
 1.6444790507290578674 1.8555615133733738276 0.25290746932652974355
 0.6191367833979533053 -0.75800722980863644018 -1.2361196747977789556
 1.7913788101630239158 0.34727943455736426381 1.2009242510076856281
 0.61034772386314084525 -0.32265374428511217619 -0.018312857425090464658
 0.68324532254766767725 -1.1917267865962104523 -
 1.8334107194734647894;0.78706267556753428671 2.2980507592447212417 -
 0.20220470085394870452 1.9835459013169816078 -2.910179761278027577 -
 2.7594289300286094502 0.74399814716813528204 -3.9758604255580500819
 1.3972595318587321955 1.1239964883777626703 -2.7455047048456830971 -
 3.3919388635962399725 -4.4581282406350473124 5.5391805964483085134
 2.4073202016153167904 2.9328747439433211497 1.8188749562516246527
 1.0840468507013336641 -5.9210273802662944931;-0.31213754875713606296 -
 9.6537335130355863555 -1.6437015489322963635 -4.1270825625992131336
 1.297116259842640007 -3.8761338633174950985 0.98922798350962226621 -
 2.6953852602589067899 0.92987959144950926849 1.2011262658061976349 -
 5.7314230058319814987 -6.9804057168846505022 1.0041292652594606682 -
 0.42777199610925520368 2.8315428984848245442 1.2012055583889440502 -
 5.5113489579371535143 -9.4274469448458795284
 0.4142018399596495426;0.30375906923566592388 0.36897431194086560691
 1.5307035121262380084 -1.5432904371702371726 4.4634395840727894011
 2.7150455343549473319 0.35307936107216103538 3.7227119216802311286 -
 4.0110159815831387675 -0.021109271893895942274 2.4123141453973935278 -
 0.25130312546446065269 -0.71923677399524321707 -2.6968968226948613065 -
 1.7358005973934516053 -2.0549410549738040821 0.93856281575236555348 -
 1.2813864847712437278 5.3561089967549806445;2.7309901973341306203

2.3468256196467214281 -0.015203055687535466101 2.5694287451929298527
2.1070440240737084991 3.6581308722936354272 2.393862261463597374 -
5.483039468432959751 -7.8646910117697066411 1.5501910231040163524
1.6428191167619201618 -2.5530338993594545727 -3.2367444786409227397 -
0.15137800391766909058 2.8873187309669021694 -0.44789781187217342362 -
2.9302150484943534359 1.496340378780913527 1.1604065986920477638;-
0.23633618417773349929 3.8973250063744186988 3.2135244269833238562
3.0439006446840131126 2.0592549999322389276 -0.32968974536774564577 -
3.1582776835104326985 2.2255396886254019684 5.2875301285208848867 -
1.2561429774084373889 -2.1071848403358268698 -7.417671003859891421
14.314627172856162929 4.3030892195760532815 0.40570361707939406326
0.82206958748814662474 7.3739495744803367216 -0.58713033796927693864 -
0.93090403489609363508;-4.1472010919007011864 13.149009125101823514
0.2994420842490231327 1.1918591645471852125 -14.135007214573519718 -
4.2047798533006641719 -3.8115755297744247088 0.38328262092518994297
16.414753435389187075 -1.4824530362076084877 7.8280898601498956069 -
3.885411370777140494 1.048414038412575966 0.81402975417160883254
0.81085056088360862869 -6.8334086837304797157 -5.2727899149229910947
1.5856731294326118498 -0.19330504896092570721;-0.22204931313388323599 -
0.96384091395524618129 0.86967140507031026608 -1.5818926917011928435
2.7628873931309887446 3.2056090774926300213 -0.34017802308779943044
3.6656466233386622022 -3.175020588705376845 -0.50665358545317695782
1.312878814111499759 0.73442035170496433594 2.8723631075564233228 -
3.9071367949747206616 -1.9401277772610221461 -1.9713908563769007021
0.20435047496193040062 -1.2486491316756087588
4.8912289491651730344;1.5078165811826833576 -1.4506678169810396373
0.10297855276423165116 -0.78519036944868292327 2.5440496237518614997
0.66551677718499380187 0.60047971262815569293 1.1792395812352363116 -
3.3016733919741416692 -0.12359373602692855232 -0.26105051313042426653
5.6335087723462375919 -1.1985881277521186483 -2.3325623267432638031 -
0.99751243650800280882 -0.6387659147904019008 -3.5035781056423820345 -
0.56469404427928171497 1.8456607756377083618;-0.34006299270029866078
3.5911843947767856378 -1.1127921316383195816 0.3244964935959961938
0.028671143701030882278 -5.0836485524036651995 -0.44069277029528464151
1.084198119992722642 7.3278954313893969186 -0.7664710439778051887
2.9186202421771656468 -0.63913555227237617284 -3.6960290570653255848 -
1.2042732786951590995 0.74814311918684783809 -1.3381509075990334345 -
4.8167489355688228869 -0.18796476062953407227
1.6727875931132387688;0.59771793718961740982 -4.4666320040808837888
1.3496687595364154078 -0.61392081040917789725 1.6476569422256488462
1.9895208607965719771 0.65811273389403024403 -0.84662255895226345981 -
4.2803948475798243578 1.0224709769009954208 -3.8318324449664253883
8.1995223983914922172 2.6806451736005296738 1.4241767126329094584 -
0.55651820343971358795 2.7118692652214164696 -2.2261659033448419898
0.51527414682313876781 -1.4503212306303416845;-0.31450385567973998535
1.4175367361803687949 -0.64551508034314319939 0.59526003160521145929
0.53537991354828295965 -0.45635762581040395514 -0.0040952131115350245971
1.4075214989184019476 0.0079671219831149719948 -0.097091929028084347775
0.074293027256369117972 0.98382802113278633449 -1.454679664683160123
0.26724726915737556654 -0.11965050610554522903 0.28561892704758568007 -
0.7558665503289481169 -0.20032216632191629513 -0.77380161938425640056;-
1.5565867753950826113 -3.9705027714351692758 1.5361278919200316295 -
0.009175314009564674092 -2.5263250663491350068 3.8788741502003807327 -
1.7199612981529872613 1.2940581152387209407 -1.4548566963118458872 -
0.10102744407832520146 -2.5355552865129675766 -1.1461182146423090078
3.9601557057213088164 1.2893720869318898714 0.72659987363035938301 -
0.0048167077400026736544 -0.94633062400807466119 0.71696208782934223169 -
1.5204643617961028923;-3.0278063041107983189 1.5756482897845291991
1.1291344058683223661 -1.7839677720097688596 0.32808037929775990538

```

3.7565198180090493274 -0.57704552261330110952 1.2974655031291955076 -
0.21236498297373229693 -0.2215762475149982702 0.71712224437875460303
0.43469884279405701655 1.2115794764344665069 2.447379607693731085 -
0.83734514917745062057 1.2258180981904853724 1.9601290545045828573 -
0.060879953246887955065 0.25110809491542451788];

% Layer 2
b2 = 1.116082249553339123;
LW2_1 = [0.1987277142204555147 -0.28458546638692755471 1.3873163839398447994
0.17905656900825961397 -0.15301930203896335625 8.9685094887809437836 -
0.019519245521969066232 -0.74063260108060824383 0.051300224543316057246
2.3549376834937705283 0.58059627505811450821 -8.8111396957785004247 -
0.14010448751626874975 -3.048700207984035071 1.11014037449218117
2.7393613326669741248 2.4905270566856887449 1.933207827474957119
0.15524906969149179781 1.7430407354657662111];

% Output 1
y1_step1.ymin = -1;
y1_step1.gain = 0.00100943661166862;
y1_step1.xoffset = 7724.503851;

% ===== SIMULATION =====

% Format Input Arguments
isCellX = iscell(X);
if ~isCellX
    X = {X};
end

% Dimensions
TS = size(X,2); % timesteps
if ~isempty(X)
    Q = size(X{1},2); % samples/series
else
    Q = 0;
end

% Allocate Outputs
Y = cell(1,TS);

% Time loop
for ts=1:TS

    % Input 1
    Xp1 = mapminmax_apply(X{1,ts},x1_step1);

    % Layer 1
    a1 = tansig_apply(repmat(b1,1,Q) + IW1_1*Xp1);

    % Layer 2
    a2 = repmat(b2,1,Q) + LW2_1*a1;

    % Output 1
    Y{1,ts} = mapminmax_reverse(a2,y1_step1);
end

% Final Delay States

```

```
Xf = cell(1,0);
Af = cell(2,0);

% Format Output Arguments
if ~isCellX
    Y = cell2mat(Y);
end
end

% ===== MODULE FUNCTIONS =====

% Map Minimum and Maximum Input Processing Function
function y = mapminmax_apply(x,settings)
y = bsxfun(@minus,x,settings.xoffset);
y = bsxfun(@times,y,settings.gain);
y = bsxfun(@plus,y,settings.ymin);
end

% Sigmoid Symmetric Transfer Function
function a = tansig_apply(n,~)
a = 2 ./ (1 + exp(-2*n)) - 1;
end

% Map Minimum and Maximum Output Reverse-Processing Function
function x = mapminmax_reverse(y,settings)
x = bsxfun(@minus,y,settings.ymin);
x = bsxfun(@rdivide,x,settings.gain);
x = bsxfun(@plus,x,settings.xoffset);
end
```

ДОДАТОК Р
Проект розробленого ДСТУ EN 16723-1:2023



ДСТУ EN 16723-1:20__

НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ

ДСТУ EN 16723-1:20__
(EN 16723-1:2016, IDT)

**Природний газ і біометан для використання в транспорті та
біометан для закачування в мережу природного газу.
Частина 1. Технічні характеристики біометану для
закачування в мережу природного газу**

Видання офіційне

(проект, остаточна редакція)

Київ
ДП «УкрНДНЦ»
20__

ПЕРЕДМОВА

ДСТУ EN 16723-1:20__

1 РОЗРОБЛЕНО: Технічний комітет стандартизації «Матеріали, обладнання, технології і споруди для нафтогазової промисловості» (ТК 146), Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

2 ПРИЙНЯТО ТА НАДАНО ЧИННОСТІ: наказ Державного підприємства «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ») від _____ № _____ з 202__ - __ - __

3 Національний стандарт відповідає EN 16723-1:2016 Natural gas and biomethane for use in transport and biomethane for injection in the natural gas network - Part 1: Specifications for biomethane for injection in the natural gas network (Природний газ і біометан для використання в транспорті та біометан для закачування в мережу природного газу. Частина 1. Технічні характеристики біометану для закачування в мережу природного газу) і внесений з дозволу CEN-CENELEC, Rue de la Science 23, B-1040 Brussels, Belgium. Усі права щодо використання європейських стандартів у будь-якій формі й будь-яким способом залишаються за CEN-CENELEC

Ступінь відповідності – ідентичний (IDT)

Переклад з англійської (en)

4 Цей стандарт оформлено згідно з правилами, установленими в національній стандартизації України

5 УВЕДЕНО ВПЕРШЕ

Право власності на цей національний стандарт належить державі.
Заборонено повністю чи частково видавати, відтворювати
задля розповсюдження і розповсюджувати як офіційне видання
цей національний стандарт або його частини на будь-яких носіях інформації
без дозволу ДП «УкрНДНЦ» чи уповноваженої ним особи.

ДП «УкрНДНЦ», 20__

НАЦІОНАЛЬНИЙ ВСТУП

Цей національний стандарт ДСТУ EN 16723-1 (EN 16723, IDT) «Природний газ і біометан для використання в транспорті та біометан для закачування в мережу природного газу. Частина 1. Технічні характеристики біометану для закачування в мережу природного газу», прийнятий методом перекладу, — ідентичний щодо EN 16723-1:2016 (версія en) «Natural gas and biomethane for use in transport and biomethane for injection in the natural gas network - Part 1: Specifications for biomethane for injection in the natural gas network».

Технічний комітет стандартизації, відповідальний за цей стандарт в Україні — ТК 146 «Матеріали, обладнання, технології і споруди для нафтогазової промисловості».

У цьому національному стандарті зазначено вимоги, які відповідають законодавству України.

EN 16723 складається з таких частин із загальною назвою «Природний газ та біометан для використання в транспорті та біометан для закачування в мережу природного газу»:

— Частина 1: Технічні характеристики біометану для закачування в мережу природного газу

— Частина 2: Технічні характеристики автомобільного палива

До стандарту внесено такі редакційні зміни:

— слова «цей міжнародний стандарт», «цей документ» і «ця частина стандарту» замінено на «цей стандарт»;

— структурні елементи стандарту: «Титульний аркуш», «Передмову», «Національний вступ», першу сторінку, «Терміни та визначення понять» і «Бібліографічні дані» - оформлено згідно з вимогами національної стандартизації України;

— у розділі «Нормативні посилання» наведено «Національне пояснення», виділене рамкою;

— з «Європейської передмови» та «Вступу» до EN 16723-1:2016 у цей «Національний вступ» внесено все, що безпосередньо стосується цього стандарту;

— позначки одиниць фізичних величин відповідають вимогам серії стандартів ДСТУ ISO 80000;

— замінено крапку на кому як вказівник десяткових знаків;

— долучено довідковий додаток НА (Перелік національних стандартів України, згармонізованих із європейськими та/чи

ДСТУ EN 16723-1:20__

ЗМІСТ

1 СФЕРА ЗАСТОСУВАННЯ.....	6
2 НОРМАТИВНІ ПОСИЛАННЯ.....	6
3 ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПОНЯТЬ.....	7
4 ПАРАМЕТРИ ТА МЕТОДИ ВИПРОБУВАНЬ.....	9
4.1 Загальні положення	9
4.2 Стандартні умови	9
4.3 Вимоги до застосування та методи випробувань біометану для закачування в мережу природного газу.....	9
5 ВІДБИРАННЯ ПРОБ	12
Додаток А (довідковий) Параметри.....	13
А.1 Загальний вміст кремнію.....	13
А.2. Водень	14
А.3. Компресорне мастило, домішки пилу та біогенні матеріали.....	14
А.4 Температура точки роси води та вуглеводнів.....	14
Додаток В (довідковий) Одоризація та сірка	15
В.1 Підхід CEN/TC 408.....	15
В.2 Загальні положення.....	15
В.3 Загальна кількість сірки з одорантів	15
Додаток С (довідковий) Приклади різних схем відповідності.....	16
С.1 Загальні положення.....	16
С.2 Загальні призначення.....	16
С.2.1 Умови надання дозволів	16
С.2.2 Модернізація заводів.....	16
С.2.3 Контроль і моніторинг.....	17
С.2.4 Вимірювання	17
С.2.5 Оцінювання ризиків	18
С.3 Поширені практики	18
Додаток D (довідковий) А-відхилення	20
БІБЛІОГРАФІЯ.....	21
Додаток НА (довідковий) Перелік національних стандартів України, згармонізованих із європейськими та/чи міжнародними нормативними документами, посилання на які є в цьому стандарті.....	23

НАЦІОНАЛЬНИЙ ВСТУП

Цей національний стандарт ДСТУ EN 16723-1 (EN 16723, IDT) «Природний газ і біометан для використання в транспорті та біометан для закачування в мережу природного газу. Частина 1. Технічні характеристики біометану для закачування в мережу природного газу», прийнятий методом перекладу, — ідентичний щодо EN 16723-1:2016 (версія en) «Natural gas and biomethane for use in transport and biomethane for injection in the natural gas network - Part 1: Specifications for biomethane for injection in the natural gas network».

Технічний комітет стандартизації, відповідальний за цей стандарт в Україні — ТК 146 «Матеріали, обладнання, технології і споруди для нафтогазової промисловості».

У цьому національному стандарті зазначено вимоги, які відповідають законодавству України.

EN 16723 складається з таких частин із загальною назвою «Природний газ та біометан для використання в транспорті та біометан для закачування в мережу природного газу»:

— Частина 1: Технічні характеристики біометану для закачування в мережу природного газу

— Частина 2: Технічні характеристики автомобільного палива

До стандарту внесено такі редакційні зміни:

— слова «цей міжнародний стандарт», «цей документ» і «ця частина стандарту» замінено на «цей стандарт»;

— структурні елементи стандарту: «Титульний аркуш», «Передмову», «Національний вступ», першу сторінку, «Терміни та визначення понять» і «Бібліографічні дані» - оформлено згідно з вимогами національної стандартизації України;

— у розділі «Нормативні посилання» наведено «Національне пояснення», виділене рамкою;

— з «Європейської передмови» та «Вступу» до EN 16723-1:2016 у цей «Національний вступ» внесено все, що безпосередньо стосується цього стандарту;

— позначки одиниць фізичних величин відповідають вимогам серії стандартів ДСТУ ISO 80000;

— замінено крапку на кому як вказівник десяткових знаків;

— долучено довідковий додаток НА (Перелік національних стандартів України, згармонізованих із європейськими та/чи

ДСТУ EN 16723-1:20__

міжнародними нормативними документами, посилання на які є в цьому стандарті).

Європейський стандарт EN 16723-1:2016 був підготовлений CEN/TC 408 у відповідь на мандат Європейської комісії зі стандартизації M/475.

Підтримуючи політику ЄС і, отже, максимізацію виробництва та використання біометану, враховуючи відсутність стандартів, Генеральний директорат Європейської Комісії ENER включив закачування біометану в трубопроводи природного газу в Мандат M/475. Біометан, у цьому контексті, може бути отриманий шляхом біологічної (ферментація, переварювання...) та термохімічної обробки біомаси, і є доцільно використовувати його як компонент змішування з природним газом. Особлива увага зосереджується на розвитку та використанні енергії з відновлювальних джерел біологічного та небіологічного походження. Можна вводити інші гази, відповідні вимогам цього стандарту.

Рисунок 1 містить наочне представлення певних застосувань біометану.

Мандат M/475 вказує, що вимоги щодо якості природного газу для закачування в мережу природного газу розроблено CEN/TC 234 у відповідь на Мандат M/400 щодо якості природного газу. CEN/TC 408 рекомендовано розглянути роботу мандату M/400 щодо якості газу та посилатися на параметри, визначені та описані в EN 16726. Цей стандарт виключає визначення параметрів або речовин, які розглядаються в EN 16726.

Сфера застосування стандарту була розширена відповідно до рішення ВТ С109/2012, яке змінило сферу застосування CEN/TC 408: "Стандартизація технічних характеристик природного газу та біометану як палива для транспортних засобів та біометану для закачування в газову мережу, включаючи будь-які необхідні відповідні методи аналізу та випробувань. Процес виробництва, джерело та походження джерела виключено".

ДСТУ EN 16723-1:20__

НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ**Природний газ і біометан для використання в транспорті та біометан для закачування в мережу природного газу.****Частина 1. Технічні характеристики біометану для закачування в мережу природного газу****Natural gas and biomethane for use in transport and biomethane for injection in the natural gas network.
Part 1. Specifications for biomethane for injection in the natural gas network**

Чинний від _____

1 СФЕРА ЗАСТОСУВАННЯ

Цей стандарт установлює вимоги та методи випробувань біометану у точці входу в газові мережі.

2 НОРМАТИВНІ ПОСИЛАННЯ

Наведені нижче документи повністю або частково є нормативними посиланнями в цьому стандарті і необхідні для його застосування. У разі датованих посилань застосовують тільки наведені видання. У разі недатованих посилань потрібно користуватись останнім виданням посилкового документа (разом зі змінами).

EN 16726:2015 Gas infrastructure - Quality of gas - Group H

EN ISO 10715:2000 Natural gas - Sampling guidelines
(ISO 10715:1997)

EN ISO 13443:2005 Natural gas - Standard reference conditions (ISO 13443:1996 including Corrigendum 1:1997)

НАЦІОНАЛЬНЕ ПОЯСНЕННЯ

EN 16726:2015 Газова інфраструктура. Якість газу. Група Н
EN ISO 10715:2000 Природний газ. Настанови щодо відбирання проб
(ISO 10715:1997)
EN ISO 13443:2005 Природний газ. Стандартні еталонні умови
(ISO 13443:1996, включно з Поправкою 1:1997)

3 ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПОНЯТЬ

У цьому стандарті застосовано терміни та визначення позначених ними понять, подані в EN 16726:2015, а також такі.

3.1 біогаз (*biogas*)

Газ, що складається головним чином з метану та вуглекислого газу, отриманий в результаті анаеробного розщеплення біомаси

3.2 біомаса (*biomass*)

Біологічний матеріал з живих або нещодавно відмерлих організмів, зазвичай, це можуть бути рослини або матеріали рослинного походження

3.3 біометан (*biomethane*)

Газ, що містить, в основному, метан, отриманий шляхом оновлення біогазу або метанування біосингазу

3.4 біосингаз (*bio-syngas*)

Газ, що містить переважно монооксид вуглецю та водень, отриманий у результаті газифікації біомаси

3.5 газова інфраструктура (*gas infrastructure*)

Трубопровідні системи, в тому числі трубопроводи, підземні сховища газу та пов'язані з ними станції або установки для передавання та розподілу газу

3.6 температура точки роси вуглеводнів (*hydrocarbon dew point temperature*)

Температура, вище якої не відбувається явища конденсації за вуглеводнями за певного тиску

ДСТУ EN 16723-1:20__

3.7 нижча теплота згоряння

Кількість теплоти, що виділяється під час повного згоряння в повітрі заданої кількості газу, за виконання таких умов: реакція протікає за сталого тиску, а всі продукти згоряння повертаються до тієї самої заданої температури, за якої реагенти перебували спочатку, залишаючись у газовому стані.

3.8 метанове число MN

Значення, що характеризує детонаційні характеристики газоподібного палива

Примітка 1. MN має таке саме застосування як і октанове число для бензину.

Примітка 2. MN виражає об'ємний відсоток метану в суміші метан/водень, яка у випробовуваному двигуні за стандартних умов має таку ж тенденцію до детонації як і досліджуване газоподібне паливо.

3.9 природний газ

Складна газова суміш вуглеводнів, переважно метан, яка також зазвичай містить етан, пропан і вищі вуглеводні в значно меншій кількості, а також деякі негорючі гази – наприклад, азот і діоксид вуглецю.

Примітка: Природний газ також може містити компоненти чи домішки, зокрема сірчисті сполуки та/або інші хімічні речовини

3.10 мережа природного газу

Мережа передачі або місцева система розподілу

3.11 природний газ немережевого походження

Природний газ, який не надходить із мережі природного газу

3.12 одоруння

Додавання одорантів у газ (який зазвичай, не має запаху) задля уможливлення розпізнавання витоків газу за запахом на слідових рівнях (від накопичення в повітрі до небезпечних концентрацій)

3.13 синтез-газ

Газ, що складається, головним чином, з монооксиду вуглецю та водню, отриманого в результаті газифікації вихопного палива

3.14 підготовка біогазу

Вилучення двооксиду вуглецю та забруднень з біогазу

3.15 температура точки роси води

Температура, вище якої не відбувається конденсація за водою за певного тиску

3.16 число Воббе

Теплота згоряння у об'ємних одиницях, за заданих стандартних умов, поділена на корінь квадратний з відносної густини за тих самих заданих контрольних умов вимірювання

4 ПАРАМЕТРИ ТА МЕТОДИ ВИПРОБУВАНЬ

4.1 Загальні положення

У цьому розділі розглянуто різні параметри, до яких встановлено вимоги.

Природний газ, біометан та їх суміші, призначені для закачування в газові мережі, не повинні містити жодних інших складників або домішок, крім описаних у цьому стандарті, у обсягах за яких їх не можна було транспортувати, зберігати або використовувати без коригування якості або оброблення. У разі наявності інших складників та/або домішок може знадобитися отримання дозволу від компетентного та уповноваженого органу влади для визначення прийняттого ризику на території розташування точки закачування.

4.2 Стандартні умови

Якщо не зазначено інше, всі об'єми вказують для реального сухого газу за стандартних еталонних умов ISO 15 °C та 101 325 кПа.

Якщо не зазначено інше, всі значення теплоти згоряння та числа Воббе вказані для реального сухого газу за стандартних еталонних умов ISO:

- 15 °C (горіння);
- 15 °C і 101 325 кПа (вимірювання).

В процесі оцінювання відповідності цьому європейському стандарту параметри слід визначати безпосередньо за стандартних еталонних умов ISO. Якщо значення певних властивостей доступні лише за інших еталонних умов, а фактичний склад газу невідомий, то приведення до стандартних умов ISO необхідно виконувати з дотриманням процедури, описаної в EN ISO 12412.

ДСТУ EN 16723-1:20__

4.3 Вимоги до застосування та методи випробування біометану для закачування в мережу природного газу

Біометан повинен відповідати вимогам EN 16726 щодо загальних параметрів і таблиці 1 лише для параметрів, характерних для біометану. Оцінка критеріїв придатності біометанів є складною і залежить від сировини біогазу та процесу його підготовки та очищення. Як наслідок, рекомендується, щоб зазначені забрудники та застосовні граничні значення оцінювалися на національному рівні з використанням відповідної методології. Приклад такої методології наведено в CEN/TR Пропоновані граничні значення для забруднюючих речовин у біометані на підставі критеріїв оцінки стану придатності (WI 00408007)¹⁾.

У таблиці 1 наведено загальні вимоги до закачування в газові системи газів групи H і L.

Для закачування в газові системи газів групи L необхідно застосовувати, якщо це доречно, національні вимоги до числа Воббе, відносної густини та CO₂.

1) Цей CEN/TR наразі перебуває в стані розроблення.

ДСТУ EN 16723-1:20__

Таблиця 1 - Загальні вимоги до застосування та методи випробувань для біометану в точці входу в газові мережі газів групи H i L

Параметр	Одиниця виміру	Граничні значення ^a		Метод випробування (довідковий)
		Мін.	Макс.	
Загальний вміст летких сполук силіцію (у вигляді Si)	мг/м ³		від 0,3 до 1 ^b	EN ISO 16017-1:2000 TDS-GC-MS
Уміст компресорних олив		c		ISO 8573-2:2007
Уміст домішок пилу		c		ISO 8573-4:2001
Уміст хлорвмісних сполук		-	d, e	EN 1911:2010
Умість фторвмісних сполук			d	NF X43-304:2007 ISO 15713:2006
Молярна частка монооксиду вуглецю (CO)	% моль	-	0,1 ^f	EN ISO 6974- series
Масова частка аміаку (NH ₃)	мг/м ³		10	NEN 2826:1999 or VDI 3496 Blatt 1:1982-04 NF X43-303:2011
Уміст амінів	мг/м ³		10	VDI 2467 Blatt 2:1991-08

^a Граничні значення є абсолютними, кількість знаків після коми не накладає вимог щодо точності методів випробувань.

^b Для цього стандарту пропонується діапазон граничних значень силіоксанів. Дослідження показали, що безперервна дія 100% біометану протягом 15 років передбачає встановлення нижнього рівня вмісту летких сполук силіцію 0,1 мг/м³. Однак межа, встановлена на цьому рівні, буде представляти труднощі з поглядом аналітичних вимірювань (поточні межі кількісного визначення силіцію становлять у кращому разі 0,10 мг/м³, що передбачає встановлення межі на рівні 0,30 мг/м³). Крім того, це не враховує пом'якшувальну дію розбавлення біометану, що закачується, природним газом. Тому пропонується, щоб граничне значення, яке буде застосовуватися (в угоді про доступ до мережі), було узгоджено між виробником біометану та транспортувальником газу (оператором мережі) з урахуванням як ефективності існуючих аналітичних методів, так і можливостей розведення, наприклад, шляхом дослідження потужностей. Додаткові вказівки щодо режимів моніторингу див. у Додатку С.

^c Біометан повинен не містити домішок, крім "мінімальних" рівнів домішок компресорної оливи та домішок пилу. У контексті цього європейського стандарту "мінімальних" означає кількість, яка не робить біометан непридатним для транспортування та використання кінцевими користувачами.

ДСТУ EN 16723-1:20__

- | |
|---|
| <p>d Див. CEN/TR, Пропоновані граничні значення для забруднюючих речовин у біометані на підставі критеріїв оцінки придатності (WI 00408007).</p> <p>e Алкілгалогеніди є основними речовинами в тому сенсі, що задане граничне значення для галогенідів автоматично забезпечує задовільне граничне значення фтора хлорвмісних сполук – межа встановлюється за галогенідами.</p> <p>f Межу 0,1 % було взято із CLP-правил (ЄС) № 1272/2008.</p> |
|---|

Можливим є застосування інших методів випробувань, ніж ті, що перераховані в колонці стандартів, у таблиці 1, за умови, що вони відповідають призначенню і це можна продемонструвати та підтвердити.

Деякі методи випробувань не були перевірені для біометану або сумішей з природним газом, однак ведеться подальша робота задля цього.

Додаткову інформацію щодо складників, наведених у таблиці 1, можна знайти в додатках А та В для сірки. Додаткову інформацію про схеми відповідності можна знайти в Додатку С.

5 ВІДБИРАННЯ ПРОБ

Проби необхідно відбирати відповідно до EN ISO 10715 та EN 16726. Цей метод відбору проб не був перевірений для біометану або сумішей з природним газом, однак проводиться подальша робота задля підтвердження.

Інші параметри, такі як загальний леткий кремній, вимагають особливої уваги з приводу вибору методу відбирання проб.

Необхідно вживати заходів, спрямованих на уникнення будь-якого забруднення зразка з моменту відбирання проби до проведення аналізу.

ДОДАТОК С
Проект розробленого ДСТУ EN 12007-4



НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ

ДСТУ EN 12007-4
(EN 12007-4:2012, IDT)

Газова інфраструктура.
Трубопроводи для максимального
робочого тиску до 16 бар включно
Частина 4. Спеціальні функційні вимоги до оновлення

Видання офіційне

(проект, друга редакція)

Київ
ДП «УкрНДНЦ»
2019

ПЕРЕДМОВА

1 1 РОЗРОБЛЕНО: Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, АТ «Дніпрогаз», Технічний комітет стандартизації «Матеріали, обладнання, технології і споруди для нафтогазової промисловості» (ТК 146)

ПЕРЕКЛАД І НАУКОВО-ТЕХНІЧНЕ РЕДАГУВАННЯ: Карпаш М., д-р техн. наук (науковий керівник); Карпаш О., д-р техн. наук; Когут Г., Безпрозваний Ю, Кузик М., Максим'юк С..

2 ПРИЙНЯТО ТА НАДАНО ЧИННОСТІ: наказ ДП «УкрНДНЦ»
від _____ № _____ з _____ 2019 р.

3 Національний стандарт відповідає EN 12007-4:2012 Gas infrastructure. Pipelines for maximum operating pressure up to and including 16 bar. Specific functional requirements for renovation (Газова інфраструктура. Трубопроводи для максимального робочого тиску до 16 бар – Частина 4. Спеціальні функційні вимоги до оновлення) і внесений з дозволу CEN, Avenue Marnix 17, B-1000 Brussel. Усі права щодо використання європейських стандартів у будь-якій формі й будь-яким способом залишаються за CEN.

Ступінь відповідності – ідентичний (IDT)

Переклад з англійської (en)

4 Цей стандарт оформлено згідно з правилами, установленими в національній стандартизації України.

5 ВВЕДЕНИЙ ВПЕРШЕ

Право власності на цей національний стандарт належить державі. Заборонено повністю чи частково видавати, відтворювати задля розповсюдження і розповсюджувати як офіційне видання цей національний стандарт або його частини на будь-яких носіях інформації без дозволу ДП «УкрНДНЦ» чи уповноваженої ним особи.

ДП «УкрНДНЦ», 2019

ЗМІСТ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ВСТУП.....	286
1 СФЕРА ЗАСТОСУВАННЯ.....	287
2 НОРМАТИВНІ ПОСИЛАННЯ.....	287
3 ТЕРМІНИ, ВИЗНАЧЕННЯ ПОНЯТЬ ТА ПОЗНАКИ	288
4. Проектування	289
4.1 Загальні вимоги.....	289
4.2 Підвищення рівня тиску.....	289
4.3 Вибір технології оновлювання	289
4.4 Консультації з третіми сторонами.....	289
5 Будування	289
5.1 Загальні положення	289
5.2 Відключення/переключення ділянок газової інфраструктури	290
5.3 Методи розкопування та безтраншейний.....	290
5.4 Прокладання	290
5.4.1 Прокладання трубопроводу	290
5.4.2 Очищення несучої труби.....	290
5.4.3 Обстеження трубопроводу, що підлягає оновлюванню.....	290
6 Випробовування тиском.....	291
7 Перемикання трубопроводів-приєднання	291
8 ВВЕДЕННЯ ТА ВИВЕДЕННЯ З ЕКСПЛУАТАЦІЇ.....	291
9 СИСТЕМА ДОКУМЕНТУВАННЯ.....	291
Додаток А (довідковий) Схема технологій оновлювання	Помилка! Закладку не визначено.
Додаток В (довідковий) Переваги та недоліки технологій оновлювання	Помилка! Закладку не визначено.
Додаток С (довідковий) Оновлювання суцільною трубою або трубою, зібраною з прямих відрізків.....	Помилка! Закладку не визначено.
С.1 Визначення.....	Помилка! Закладку не визначено.
С.2 Опис	Помилка! Закладку не визначено.
С.3 Умови застосування.....	Помилка! Закладку не визначено.
С.4 Виконання	Помилка! Закладку не визначено.
С.4.1 Підготовлення.....	Помилка! Закладку не визначено.
С.4.2 Виконання	Помилка! Закладку не визначено.
Додаток Д (довідковий) Прокладання трубопроводу трубою зі щільним приляганням	Помилка!

D.1	Визначення	Помилка! Закладку не визначено.
D.2	Опис	Помилка! Закладку не визначено.
D.3	Умови використання.....	Помилка! Закладку не визначено.
D.4	Виконання	Помилка! Закладку не визначено.
D.4.1	Матеріали.....	Помилка! Закладку не визначено.
D.4.2	Підготовки.....	Помилка! Закладку не визначено.
D.4.3	Виконання.....	Помилка! Закладку не визначено.
Додаток Е (довідковий) Укладання методом «панчоха»		
E.1	Визначення.....	Помилка! Закладку не визначено.
E.2	Опис	Помилка! Закладку не визначено.
E.3	Умови використання	Помилка! Закладку не визначено.
E.4	Виконання	Помилка! Закладку не визначено.
E.4.1	Підготовки.....	Помилка! Закладку не визначено.
E.4.2	Виконання	Помилка! Закладку не визначено.
Додаток F (довідковий) Оновлювання методом розривання або розрізання існуючої труби		
F.1	Визначення F.2	Опис
		Помилка! Закладку не визначено.
F.3	Умови застосування.....	Помилка! Закладку не визначено.
F.4	Виконання.....	Помилка! Закладку не визначено.
F.4.1	Підготовки.....	Помилка! Закладку не визначено.
F.4.2	Виконання.....	Помилка! Закладку не визначено.
Додаток G (довідковий) Оновлювання методом протягування або продавлювання діючої труби.....		
G.1	Визначення	Помилка! Закладку не визначено.
G.2	Опис.....	Помилка! Закладку не визначено.
G.3	Умови застосування.....	Помилка! Закладку не визначено.
G.4	Виконання.....	Помилка! Закладку не визначено.
G.4.1	Підготовки.....	Помилка! Закладку не визначено.
G.4.2	Виконання.....	Помилка! Закладку не визначено.
Додаток H (довідковий) Ремонт з'єднань.....		
H.1	Визначення	Помилка! Закладку не визначено.
H.2	Опис.....	Помилка! Закладку не визначено.
H.3	Умови застосування.....	Помилка! Закладку не визначено.
H.3.1	Загальні положення.....	Помилка! Закладку не визначено.
H.3.2	Внутрішні методи	Помилка! Закладку не визначено.

Н.3.3 Зовнішні методи — Введений в експлуатацію трубопровід	Помилка! Закладку не визначено.
Н.4 Виконання	Помилка! Закладку не визначено.
Н.4.1 Внутрішні ремонтні роботи	Помилка! Закладку не визначено.
Н.4.2 Зовнішні ремонтні роботи - Введений в експлуатацію трубопровід	Помилка! Закладку не визначено.
Н.5 Випробовування	Помилка! Закладку не визначено.
Н.6 Введення в експлуатацію	Помилка! Закладку не визначено.
Додаток І (довідковий) Футерування смолою	Помилка! Закладку не визначено.
І.1 Визначення	Помилка! Закладку не визначено.
І.2 Опис	Помилка! Закладку не визначено.
І.3 Умови застосування	Помилка! Закладку не визначено.
І.4 Виконання	Помилка! Закладку не визначено.
І.4.1 Підготовлення	Помилка! Закладку не визначено.
І.4.2 Виконання	Помилка! Закладку не визначено.
І.4.3 Випробування	Помилка! Закладку не визначено.
І.4.4 Введення в експлуатацію	Помилка! Закладку не визначено.
Додаток J (довідковий) Технічні відмінності між цим стандартом та стандартом EN 12007-4: 2000	Помилка! Закладку не визначено.
Додаток К (довідковий) Бібліографія	Помилка! Закладку не визначено.
Додаток NA (довідковий) Перелік національних стандартів України, гармонізованих з міжнародними стандартами, на які є посилання у цьому стандарті	Помилка! Закладку не визначено.

НАЦІОНАЛЬНИЙ ВСТУП

Цей національний стандарт ДСТУ EN 12007-4 (EN 12007-4:2012, IDT) «Газова інфраструктура. Трубопроводи для максимального робочого тиску до 16 бар включно – Частина 4. Спеціальні функційні вимоги до оновлення», прийнятий методом перекладу, - ідентичний щодо EN 12007-4:2012 (версія en) «Gas infrastructure. Pipelines for maximum operating pressure up to and including 16 bar. Specific functional requirements for renovation».

Технічний комітет стандартизації, відповідальний за цей стандарт в Україні, - ТК 146 «Матеріали, обладнання, технології і споруди для нафтогазової промисловості».

Цей стандарт введено вперше.

У цьому національному стандарті зазначено вимоги, які відповідають законодавству України.

До стандарту внесено такі редакційні зміни:

- слова «цей європейський стандарт», «цей документ» і «ця частина стандарту» замінено на «цей стандарт»;
- структурні елементи стандарту: «Титульний аркуш», «Передмову», «Національний вступ», першу сторінку, «Терміни та визначення понять» і «Бібліографічні дані» - оформлено згідно з вимогами національної стандартизації України;
- у розділі «Нормативні посилання» наведено «Національне пояснення», виділене рамкою;
- з «Передмови» до EN 12007-4 у цей «Національний вступ» внесено все, що безпосередньо стосується цього стандарту;
- позначки одиниць фізичних величин відповідають вимогам комплексу стандартів ДСТУ ISO 80000;
- замінено крапку на кому як вказівник десяткових знаків;
- долучено довідковий додаток НА (Перелік національних стандартів України, згармонізованих з європейськими та міжнародними нормативними документами, посилання на які є в цьому стандарті).

Європейський стандарт EN 12007 складається з п'яти частин під загальною назвою «Трубопроводи для максимального робочого тиску до 16 бар включно»:

- Частина 1. Загальні функційні вимоги.
- Частина 2. Спеціальні функційні вимоги до поліетиленових газопроводів (MOP до 10 бар).
- Частина 3. Спеціальні функційні вимоги до сталевих газопроводів.
- Частина 4. Спеціальні функційні вимоги до оновлення.
- Частина 5 Спеціальні функційні вимоги для трубопроводів-приєднання.

У цьому стандарті містяться посилання на міжнародні та європейські стандарти EN 12007-1, EN 12007-2, EN 12007-3, які не впроваджені в Україні як національні, чинних замість них документів немає.

Копії нормативних документів, на які є посилання в цьому стандарті, можна отримати в Національному фонді нормативних документів.

**Газова інфраструктура.
Трубопроводи для максимального
робочого тиску до 16 бар.
Частина 4. Спеціальні функційні вимоги до оновлення**

**Gas infrastructure.
Pipelines for maximum operating pressure
up to and including 16 bar.
Part 4. Specific functional requirements for renovation**

Чинний від _____

1 СФЕРА ЗАСТОСУВАННЯ

Цей стандарт установлює особливі функційні вимоги до оновлення газопроводів діючої газової інфраструктури. Цей стандарт призначений для застосування разом із вимогами EN 12007-1.

Цей стандарт не застосовний для трубопровідної обв'язки, що встановлена надземно.

Цей стандарт охоплює різні технології оновлювання газових мереж різних розмірів включно з газовими магістралями та лініями обслуговування, які призначені для застосування відповідно до ДСТУ EN 12007-1. Певні газові мережі первинно призначені для інших цілей можуть вважатись придатними для технологій оновлювання задля уможливлення їх використання для газової інфраструктури.

Цей стандарт установлює загальні базові принципи газової інфраструктури. Користувачам цього стандарту рекомендовано враховувати, що у країнах-членах ЄС можуть діяти інші, більш детальні національні стандарти чи кодекси усталеної практики.

Цей стандарт призначений для застосування разом із національними стандартами та/або кодексами усталеної практики, що установлюють вищезгадані базові принципи.

У випадку конфлікту положень із більш суворими вимогами, що визначені національними законодавчими актами/правилами, порівняно із зазначеними у цьому стандарті, пріоритет надається вимогами національних законодавчих актів/правил, у порядку, що наведено у CEN/TR 13737 (усі частини).

У CEN/TR 13737 (усі частини) наведено:

визначення усіх законодавчих актів/правил, застосовних у країнах-членах;

якщо це доречно – застосування більш суворіших національні вимоги;

назва національного органу зі стандартизації, для отримання інформації.

2 НОРМАТИВНІ ПОСИЛАННЯ

Наведені нижче нормативні документи необхідні для застосування цього стандарту. У разі датованих посилань застосовують тільки наведено видання. У разі недатованих посилань потрібно користуватись останнім виданням нормативних документів (разом зі змінами).

EN 12007-1, Gas infrastructure — Pipelines for maximum operating pressure up to and including 16 bar — Part 1: General functional recommendations

EN 12007-2, Gas infrastructure — Pipelines for maximum operating pressure up to and including 16 bar — Part 2: Specific functional recommendations for polyethylene (MOP up to and including 10 bar)

EN 12007-3, Gas supply systems — Pipelines for maximum operating pressure up to and including 16 bar — Part 3: Specific functional recommendations for steel

EN 12327, Gas infrastructure — Pressure testing, commissioning and decommissioning procedures — Functional requirements

НАЦІОНАЛЬНЕ ПОЯСНЕННЯ

EN 12007-1 Газова інфраструктура. Трубопроводи для максимального робочого тиску до 16 бар включно – Частина 1. Загальні функціональні вимоги.

EN 12007-2 Газова інфраструктура. Трубопроводи для максимального робочого тиску до 16 бар включно – Частина 2. Спеціальні функціональні вимоги для поліетиленових трубопроводів (МОР аж до 10 бар).

EN 12007-3 Газова інфраструктура. Трубопроводи для максимального робочого тиску до 16 бар включно – Частина 3. Спеціальні функціональні рекомендації для сталевих трубопроводів.

EN 12327 Газова інфраструктура. Випробовування тиском, введення та виведення з експлуатації. Функційні вимоги

3 ТЕРМІНИ, ВИЗНАЧЕННЯ ПОНЯТЬ ТА ПОЗНАКИ

Для цілей цього стандарту застосовано такі терміни та визначення.

3.1 газова інфраструктура (*gas infrastructure*)

трубопровідні системи, до яких відносяться власне трубопроводи та пов'язані із ними станції чи установки для транспортування чи розподілу газу.

3.2 оператор трубопроводу (*pipeline operator*)

приватна чи державна організація, що уповноважена проводити проектування, будівництво та/або експлуатування та обслуговування газової інфраструктури.

3.3 компетентна особа (*competent person*)

особа, яка пройшла навчання, має досвід та уповноважена проводити роботи, що пов'язані із газовою інфраструктурою.

Примітка 1 – Порядок уповноваження щодо виконання робіт визначається у кожній державі окремо (якщо такий існує)

3.4 газова магістраль (*gas main*)

трубопровід газової інфраструктури, до якого приєднують трубопроводи-приєднання.

3.5 трубопровід (*pipework*)

труби та фітинги у зборі

3.6 станція (*station*)

установка чи устаткування для експлуатації та/або виконання технологічних процесів газової інфраструктури.

3.7 переключення трубопроводів-приєднання (*service line transfer*)

процес зміни з'єднання трубопроводів-приєднання зі старої трубою на нову

3.8 підвищення класу (рівня) тиску (*pressure uprating*)

заходи, пов'язані зі збільшенням робочого тиску, що перевищують межі діючого максимального робочого тиску для газової інфраструктури

3.9 введення в експлуатацію (*commissioning*)

заходи, що пов'язані із герметизацією трубопроводів, станцій, обладнання та вузлів, заповнених газом, для їх введення в експлуатацію

3.10 виведення з експлуатації (*decommissioning*)

заходи, що пов'язані із виведенням із експлуатації будь-яких трубопроводів, станцій, обладнання та вузлів з газом для їх від'єднання від системи.

3.11 оновлення (*renovation*)

метод, яким покращують характеристики газової інфраструктури через повторне використання діючої споруди чи монтування нових споруд на її місці.

3.12 несуча труба (*carrier pipe*)

діючий трубопровід, де встановлюється оновлена система

Примітка 1 – Несуча труба може бути або діючою, або опорною трубою.

3.13 опорна труба (*support pipe*)

діюча труба, яка залишається газотранспортною трубою і залишається структурною складовою частиною системи з надлишковим тиском після прокладання лінії трубопроводу

3.14 футляр (*sleeve*)

спеціально встановлена захисна труба, крізь яку проходить газопровід

3.15 пропускна труба (*conduit pipe*)

труба, через яку пропускається газопровід, не обов'язково потребуючи встановлення опори

3.16 міжтрубний простір (*annular space*)

простір, розташований між несучою і новою трубою, коли останню розташовують всередині.

3.17 щільне прилягання (*close fit*)

після відновлення первинної форми та вирівнювання зовнішня поверхня вставленої труби перебуває в тісному контакті з внутрішньою поверхнею старої труби

4 Проектування

4.1 Загальні вимоги

Технології оновлювання, які будуть використовуватися на трубопроводі до 16 бар включно, повинні виконуватись компетентними особами. За вибір матеріалів, розмірів і технологій монтажу відповідає оператор трубопроводу і повинні відповідати EN 12007-1.

Подальші настанови щодо проектування поліетиленових (ПЕ) трубопроводів газової інфраструктури наведені в EN 12007-2.

Подальші настанови щодо проектування сталевих трубопроводів газової інфраструктури наведені в EN 12007-3.

Покращення оновлюваних систем є обов'язком оператора трубопроводу і повинне узгоджуватись з відповідними методиками. Максимальний робочий тиск (МРТ) оновленої системи повинен визначатись допустимим тиском для найслабшого компоненту системи.

4.2 Підвищення класу (рівня) тиску

Оновлювання газової інфраструктури може бути частиною стратегічного плану підвищення максимального робочого тиску. Деякі технології оновлювання призводять до зменшення діаметра труби, тому для підтримки пропускної здатності системи потрібне підвищення тиску. Підвищення рівня МРТ є обов'язком оператора трубопроводу. Оператор трубопроводу повинен забезпечити, щоб всі компоненти газопроводу могли витримувати новий рівень тиску за міцністю та герметичністю.

4.3 Вибір технології оновлювання

Для вибору технології оновлювання потрібно враховувати наступні чинники. Вони включають, проте не обмежуються наступними:

- майбутню структуру розподільної мережі;
- рівень тиску, за якого трубопровід буде функціонувати після оновлення;
- необхідну пропускну здатність трубопроводу;
- кількість газопроводів-приєднання, з'єднаних до ділянки трубопроводу;
- наявність і кількість розгалужень, колін, арматури;
- поточний стан трубопроводу, який потрібно відновити;
- розташування трубопроводу;

Приклад 1 Глибина укладання трубопроводу.

Приклад 2 Перешкоди для транспорту та пішоходів.

Приклад 3 Розташування суміжних комунікацій.

Приклад 4 Ділянки, чутливі до руйнування.

кількість, тип і стан з'єднань труб на ділянці трубопроводу;

будь-які зобов'язання постачальників під час і після проведення робіт з оновлення.

Примітка 1. Існує цілий ряд технологій оновлювання. Вони описані, в основному, у Додатку А. Додаток А не містить вичерпний перелік доступних технологій.

Примітка 2. Переваги та недоліки технологій, описаних у Додатку А, викладені у Додатку В. Додаткова інформація щодо різних технологій наведена у Додатках С - І.

4.4 Консультації з третіми сторонами

Під час планування робіт на об'єктах газової інфраструктури має відбуватися зв'язок з власниками суміжних комунікацій та споруд, що розташовані біля газової інфраструктури. На етапі планування робіт потрібно отримати від цих сторін відповідну інформацію про наявність будь-яких суміжних комунікацій.

Подальші настанови наведені в EN 12007-1.

5 Будівництво

5.1 Загальні положення

Прокладати чи проводити оновлювання трубопроводу, повинні тільки компетентні особи, які виконують роботи згідно з технічними вимогами (умовами), наданими оператором газопроводу та/або виробником його складових. Загальні настанови (інструкції, методики тощо) зі будівництва газової інфраструктури до 16 бар включно подано в EN 12007-1. Окремі настанови наведено в EN 12007-2 для поліетиленових трубопроводів і в EN 12007-3 для сталевих трубопроводів.

Рекомендовано розробити детальну послідовність етапів робіт. Кожна технологія має свої особливості, про що зазначено у Додатках С-І.

Якщо, згідно з вимогами технології оновлювання, необхідно підвищити температуру поліетиленової труби, то температура труби не повинна перевищувати гранично допустиму, зазначену виробником труб.

Протягом усього періоду робіт потрібно забезпечити персонал, що виконує роботи на об'єктах газопостачання, і представників громадськості. Потрібно враховувати потреби літніх людей або людей з особливими потребами.

Перед монтуванням та прокладанням компонентів газової інфраструктури потрібно перевірити стан всіх труб і фітінгів на належність. Існуючі трубопроводи потрібно перевірити на наявність небажаних перешкод або засмічень.

Будівництво газової інфраструктури рекомендовано організувати таким чином, щоб вплив на довкілля під час будівництва був зведений до мінімально можливого рівня. Подальші настанови щодо екологічних міркувань наведено в EN 12007-1.

Мастильні матеріали, які використовують для полегшення оновлювання шляхом вставлення труби, не повинні завдавати шкоди існуючій або вставленій трубі.

5.2 Відключення/переключення ділянок газової інфраструктури

Там, де необхідно від'єднати частину газової інфраструктури для проведення робіт з оновлювання, потрібно дотримуватися заходів для забезпечення того, щоб постачання газу в інших частинах існуючої газової інфраструктури не зазнало негативного впливу.

Потрібно ретельно визначити всі трубопроводи-вводи, що підключені до ділянки газової магістралі, та підлягають відключенню, а також цю інформацію потрібно враховувати під час оновлювання зазначених трубопроводів-приєднання.

Труби та фітінги потрібно належно зберігати, переміщувати та транспортувати задля забезпечення постійної придатності до використання відповідно до вимог EN 12007-1, EN 12007-2 і EN 12007-3.

5.3 Розкопування і безтраншейний методи

Положення і розмір котлованів потрібно визначити з урахуванням глибини залягання трубопроводу, який підлягає оновленню, діаметра нової труби та інших чинників, які можуть вплинути на процес протягування.

Приклад 1 Близькість до суміжної комунікації.

Приклад 2 Довжина нової ділянки труби.

Приклад 3 Положення трубопроводів-приєднання, які підлягають переключенню.

Перед початком земляних робіт рекомендовано проводити консультації з іншими комунальними службами для узгодження відповідних заходів із захисту іншого трубопроводу, кабелів і підземних конструкцій.

Компетентна особа повинна забезпечити, щоб на будівельному майданчику була доступна найбільш потрібна інформація про місцезнаходження існуючих газопроводів та інших інженерних мереж. Компетентна особа повинна забезпечити постійне дотримання правил безпечного розкопування.

Рекомендовано передбачити адекватні заходи для ефективної тимчасової підтримки трубопроводу, кабелів та інших пристроїв під час виконання робіт, а також для їх постійної підтримки в місцях, де земля порушена.

Подальші настанови (інструкції, методики тощо) щодо запобіжних заходів, яких належить дотримуватись під час проведення земляних робіт, наведено в EN 12007-1.

Котловани, створені в процесі оновлювання газової інфраструктури, потрібно належним чином засипати, а поверхневі об'єкти, такі як дороги і пішохідні доріжки, потрібно відновити відповідно до стандартів, узгоджених в країнах-членах ЄС.

5.4 Прокладання

5.4.1 Прокладання трубопроводу

Будь-яку нову трубу потрібно прокласти відповідно до спеціальних інструкцій, якщо це доречно, наведених у EN 12007-2 для поліетиленових трубопроводів та в EN 12007-3 для сталевих трубопроводів. Подальші загальні настанови наведено в EN 12007-1.

5.4.2 Очищення несучої труби

Якщо несуча труба містить пил, смоли або інші забруднення, які можуть вплинути на процес оновлювання, рекомендовано виконувати очищення труб. Очищення труб можна досягнути механічними, гідравлічними або пневматичними засобами.

Примітка: У деяких технологіях оновлювання стан внутрішньої поверхні несучої труби є основним визначальним чинником щодо того чи можна дану технологію успішно застосовувати.

Приклад: Укладання зі щільним приляганням.

Під час будь якого очищення труби рекомендовано дотримуватись таких вимог:

мінімізувати будь-яку шкоду довкіллю;

врахувати наявність пірофорних відкладень;

утилізувати відходи відповідно до національного або місцевого законодавства.

5.4.3 Обстеження трубопроводу, що підлягає оновлюванню.

Якщо згідно з технологією оновлювання використовують трубу як несучу, її рекомендовано обстежити зсередини перед протягуванням нової труби для виявлення можливих перешкод чи недоліків, які можуть пошкодити або мати інший шкідливий вплив на нову трубу або заблокувати прохід.

Обстеження дозволено проводити за допомогою камери.

6 Випробовування тиском

Методики випробовування тиском для підтвердження цілісності газопроводів та трубопроводів-приєднання після оновлювання потрібно обирати відповідно до EN 12327.

Випробування тиском потрібно здійснювати відповідно до мінімальних рівнів випробувального тиску, наведених у EN 12007-1.

Загальні настанови наведено в EN 12007-1. Подальші настанови для поліетиленових трубопроводів наведено в EN 12007-2.

Якщо неможливо виконати випробування на герметичність, наприклад, спільні відновлювальні роботи, які проводять в реальних умовах за робочого тиску, оператор трубопроводу повинен визначити метод випробування.

7 Перемикання трубопроводів-приєднання

Перемикання трубопроводів-приєднання потрібно здійснювати відповідно до технічних вимог оператора трубопроводу та технічних вимог технології оновлювання. Випробування на міцність, герметичність або комбіновані випробування потрібно проводити на оновленому трубопроводі-приєднання та/або з'єднанні між трубопроводом-приєднання та магістральним газопроводом до введення в експлуатацію трубопроводу-приєднання. Ці випробування повинні відповідати EN 12327.

Якщо з технічних причин випробовування трубопроводу-вводу не завершено до підключення нової ділянки трубопроводу, то його потрібно випробувати одночасно з новою ділянкою трубопроводу.

8 ВВЕДЕННЯ ТА ВИВЕДЕННЯ З ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Введення та виведення з експлуатації потрібно здійснювати відповідно до EN 12327. Загальні вказівки наведено в EN 12007-1.

9 СИСТЕМА ДОКУМЕНТУВАННЯ

Вимоги до створення й обслуговування системи документування газової інфраструктури наведено в EN 12007-1. Оператор трубопроводу повинен переконатися, що відповідні деталі оновленого трубопроводу включені в цю систему документування. У цій системі повинні, щонайменше, бути наведені наступні дані:

тип труб, діаметри та довжини;

дата виконання оновлення;

метод, який використовується для оновлювання; а також наявність і тип несучої труби.

ДОДАТОК Т

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

УДК 622.692 КП № держреєстрації 0117U007107 Інв. №	Міністерство освіти і науки України Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019 тел. (0342) 54-51-14, факс (0342) 54-21-39	
	ЗАТВЕРДЖУЮ Ректор ІФНТУНГ, д-р техн. наук, проф.	
	_____ Є. І. Крижанівський	
ЗВІТ ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ «РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДОЛОГІЇ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХОДУ РОЗРАХУНКІВ ЗА ПРИРОДНИЙ ГАЗ ПО ЙОГО ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРАХ ЗА ДОГОВОРОМ» ДМ-1-17-П (заключний)		
Директор НДІНГЕіЕ, канд техн. наук, доц.	_____	Б.А. Тершак
Керівник НДР проректор з НІР, д-р техн. наук, проф.	_____	М.О. Карпаш
2019 р. Рукопис закінчено 22 листопада 2019 р Результати роботи розглянуто Науковою Радою ІФНТУНГ протокол № 6/135 від 26 листопада_2019р.		

Рисунок Т.1 Звіт з науково-дослідної теми «Розроблення методології та моделювання переходу розрахунків за природний газ за його енергетичними параметрами» (номер державної реєстрації 0117U007107, з 01.10.2017-2019 рік)



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

НАКАЗ

м. Івано-Франківськ

12 листопада 2019р.

№ 296

*Щодо створення групи
виконання проекту*

З метою належної організації виконання проекту проекту технічної допомоги Європейського Союзу «Відновлення енергії з твердих побутових відходів з використанням технологій теплового перетворення в транскордонному регіоні – ЕпуMSW» №HUSKROUA/1702/ 6.1/0015, де партнером є університет,

НАКАЗУЮ:

1. Утворити робочу групу з виконання даного проекту на період з 1.11.2019 по 31.10.2020 у складі :
 - 1.1. Керівник проекту від ІФНТУНГ – проректор з НІР, проф. Карпаш Максим Олександрович
 - 1.2. Лідер проектної групи – доц. каф. КСМ, директор ЦМС, доц. Воронич Артур Романович
 - 1.3. Менеджер з комунікацій – провідний фахівець із забезпечення зв'язків зі ЗМІ ВІЗГ, Вархов Галина Василівна
 - 1.4. Фінансовий менеджер - провідний фахівець НДІНГЕіЕ(сумісник), Прусак Лілія Ігорівна
 - 1.5. Експерт проекту - зав. каф. ЕМТД, проф. Райтер Петро Миколайович
 - 1.6. Експерт проекту – доц. каф. ЕМТД, доц. Яворський Андрій Вікторович
 - 1.7. Експерт проекту - доц. каф. екології, доц. Яцишин Теодозія Михайлівна
 - 1.8. Експерт з якості проекту - завідувач лабораторіями кафедри ЕМТД, Жовтуля Любомир Ярославович.
 - 1.9. Лаборант проекту - асп. каф. ЕМТД, Максим'юк Сергій Орестович
2. Контроль за виконанням наказу залишаю за собою.

Ректор

Крижанівський С. І.

Рисунок Т.2 – Склад робочої групи міжнародного проекту «Відновлення енергії з використанням теплового перетворення в транскордонному регіоні ЕпуMSW»

(№HUSKROUA/1702/6.1/0015)



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

НАКАЗ

м. Івано-Франківськ

31 лютого 2019р.

№ 283

*Щодо створення групи
виконання проекту*

З метою належної організації виконання проекту проекту технічної допомоги Європейського Союзу «Транскордонна мережа енергетично сталих університетів (Cross-border Network of Energy Sustainable Universities (Net4SEnergy)) № HUSKROUA 1702/6.1/0075, де головним виконавцем є університет.

НАКАЗУЮ:

1. Утворити робочу групу з виконання даного проекту на період з 1.10.2019 по 30.09.2021 у складі :

- 1.1. Керівник проекту від ІФНТУНГ – проректор з НПР, проф. Карпаш Максим Олегович
- 1.2. Лідер проектної групи – доц. каф. КСМ, директор ЦМС, доц. Воронич Артур Романович
- 1.3. Менеджер з комунікацій – провідний фахівець із забезпечення зв'язків зі ЗМІ ВІЗГ, Вархов Галина Василівна
- 1.4. Фінансовий менеджер - провідний фахівець НДНГЕіЕ(сумісник), Прусак Лілія Ігорівна
- 1.5. Експерт проекту – доц. каф. ЕМТД, доц. Яворський Андрій Вікторович
- 1.6. Експерт проекту - доц. каф. ЕМТД, доц. Цих Віталій Сергійович
- 1.7. Експерт проекту - доц. каф. ЕМТД, доц. Рибіцький Ігор Володимирович
- 1.8. Експерт проекту - завідувач лабораторіями кафедри ЕМТД, Жовтуля Любомир Ярославович.
- 1.9. Експерт проекту - асп. каф. ЕМТД, Кузик Михайло Богданович
- 1.10. Експерт проекту - асп. каф. ЕМТД, Максим'юк Сергій Орестович
- 1.11. Короткотерміновий експерт – на посаду призначатимуться особи залежно від завдань проекту.
2. Контроль за виконанням наказу залишаю за собою.

Ректор

Крижанівський С. І.

Рисунок Т.3 – Склад робочої групи міжнародного проекту «Транскордонна мережа енергетично сталих університетів Cross-border Network of Energy Sustainable Universities (Net4Energy)) №HUSKROUA1702/6.1/0075