

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ФРАНЧУК ЮРІЙ ЙОСИПОВИЧ

УДК 533.1:620.93:658.56:696.2

ДИСЕРТАЦІЯ

**КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ЯКОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ ДЛЯ
ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ЙОГО ОБЛІКУ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ
НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ ГАЗОПОСТАЧАННЯ**

спеціальність 05.23.03 - вентиляція освітлення та теплогазопостачання

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Ідентичність усіх примірників дисертації

ЗАСВІДЧУЮ:

*Учений секретар спеціалізованої
вченої ради* *Т.М.Ткаченко*

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ / Ю.Й.Франчук /

Науковий керівник: Предун Костянтин Миронович, доктор економічних наук,
доцент

Київ – 2021

АНОТАЦІЯ

Франчук Ю.Й. Кількісна оцінка якості природного газу для підвищення точності його обліку та експлуатаційної надійності систем газопостачання. – *Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.*

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.03 «Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання». – Київський національний університет будівництва і архітектури, МОН України. – Київ, 2021.

Дисертаційна робота присвячена розробці комплексної оцінки якості природного газу з урахуванням трансформацій його властивостей на етапах «видобування – підготовка до транспортування – транспортування – розподіл – використання кінцевим споживачем» та наукове обґрунтування підвищення ефективності його використання шляхом визначення пріоритетності кроків щодо покращення окремих фізико-хімічних показників для отримання показів засобів обліку кількості спожитого палива в одиницях енергії в режимі реального часу.

Провідною передумовою дослідження є висновок про те, що згідно з Енергетичною стратегією України на період до 2035 р. «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» природний газ залишається основним енергоносієм у порівнянні з іншими видами традиційних палив для житлово-комунального господарства держави. Водночас він є найбільш екологічним паливом, що характеризується найменшими викидами забруднювальних речовин і парникових газів в атмосферне повітря. Об'єктом дослідження є технологічні процеси підготовки природного газу до транспортування, безпосереднього транспортування та наступного використання кінцевим споживачем включно з обліком. Предметом дослідження є газотранспортна та газорозподільні мережі населених пунктів й окремих об'єктів, а також споруди на них.

Робота виконана згідно з «Державною програмою підтримки енергоефективних проєктів», безпосередньо пов'язана з планами держбюджетної тематики Київського національного університету будівництва і архітектури, які виконувалися на замовлення Міністерства освіти і науки України (№ держреєстрації 0102U000932, 0108U010643).

Протягом усього часу існування людства його взаємодія з навколишнім середовищем характеризується використанням природних ресурсів і, відповідно, як наслідок, забрудненням довкілля. Відносини суспільства і природи – це постійний процес вирішення дилеми щодо необхідності зберігати природні ресурси та їх споживати задля продовження свого існування. Рациональне природокористування покликано забезпечити розвиток сучасного суспільства за умови збереження високої якості середовища проживання людини.

Теорія «сталого розвитку» вважається однією з найперспективніших ідеологій XXI століття, яка, з поглибленням наукової обґрунтованості, може витіснити усі наявні світоглядні ідеології, як такі, що є фрагментарними, неспроможними забезпечити збалансований розвиток цивілізації.

Ідеї сталого розвитку були офіційно проголошені на Міжнародній конференції з довкілля і розвитку в Ріо-де-Жанейро (Самміт Землі) у 1992 р. На ній вперше навколишнє середовище і соціально-економічний розвиток були розглянуті як взаємопов'язані та взаємозалежні області. Варто відзначити, що досягнення оптимального варіанту розвитку декларують багато країн, проте у кожній з них свій шлях. В одних він «тільки починається, у інших вже розпочався, треті вже стали на шлях сталого економічного розвитку».

В Україні, наприклад, термін «сталий розвиток» ще нещодавно вживали та інколи продовжують це робити і зараз, для означення, як правило, лише неухильного зростання економічних показників країни, її регіонів, окремих населених пунктів і галузей економіки. Інколи до цього додають ще й

здійснення безсистемних заходів щодо збереження довкілля та поліпшення санітарно-гігієнічних умов проживання й праці людей.

Україна, уклавши Угоду про асоціацію з Європейським Союзом, прийняла історичне рішення щодо пріоритетів свого розвитку. Дане рішення зумовлює не тільки появу низки зобов'язань, які мають бути у повній мірі відображені у пріоритетах соціально-економічного розвитку країни та енергетики зокрема, а зумовлює необхідність зміни підходів до формування нашою державою своєї енергетичної політики, яка покликана забезпечити потреби суспільства та економіки в паливно-енергетичних ресурсах у технічно надійний та безпечний, економічно ефективний, екологічно прийнятний спосіб для гарантування поліпшення умов життєдіяльності своїх громадян.

Концепція сталого розвитку нараховує 17 Глобальних цілей, затверджених на Саміті ООН зі сталого розвитку, який відбувся у рамках 70-ї сесії ООН у Нью-Йорку в 2015 р. Серед них можна відмітити зьому – «Доступна та чиста енергія», мета якої полягає у забезпеченні доступу людства до прийнятних за ціною, надійних, сталих і сучасних, екологічно чистих, джерел енергії. Розширення інфраструктури та технологічна модернізація з метою забезпечення екологічно чистої енергії в усіх країнах є найважливішим завданням, яке може як стимулювати зростання, так і сприяти збереженню навколишнього середовища.

Національна доповідь «Цілі Сталого Розвитку: Україна» надає власне бачення державою орієнтирів досягнення Цілей Сталого Розвитку (ЦСР). Сформовано 86 завдань національного розвитку та визначено 172 показники для їх моніторингу.

Для реалізації поставлених завдань у сфері енергозабезпечення ухвалено Енергетичну стратегію України на період до 2035 р. «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». Її вимоги передбачають підготовку та формування заходів з ефективного виробництва, трансформації,

транспортування, переробки та споживання енергії, створення конкурентних та прозорих ринків електричної, теплової енергії, природного газу тощо.

Наразі сучасна економіка України характеризується невинувато високою інтенсивністю енергоспоживання, що є наслідком особливостей її структури, яка зміщена в сторону більш енергоємних галузей. Економіка України сьогодні – це:

- високий ступінь фізичного зносу основних фондів і технологічне відставання в найбільш енергоємних галузях промисловості й житлово-комунальному господарстві у порівнянні з провідними державами;

- невідповідність тарифів і цін на енергоресурси до видатків на їх видобування/виробництво, трансформацію, транспортування, використання тощо, які спричинили кризу взаємних неплатежів і, відповідно, унеможливили технологічну модернізацію як енергетичних об'єктів, так і кінцевих споживачів;

- природні монополії з їх неефективним функціонуванням і відсутністю перспектив розвитку;

- високий рівень втрат традиційних палив, енергоносіїв при їх видобуванні, трансформації, передачі та споживанні тощо;

- практична відсутність дієвих стимулів до енергозбереження і підвищення енергоефективності в технологічних ланцюгах енергосистем «виробництво – транспортування – розподіл – споживання», а також впровадження достовірних, у т.ч. інтелектуальних систем обліку;

- низький рівень використання сучасних енергоефективних технологій та устаткування з мінімальним шкідливим впливом (або навіть його цілковитою відсутністю) на довкілля як у промисловості, так і у житлово-комунальному господарстві.

Системи газопостачання є одним з елементів інженерної інфраструктури населених пунктів України, які в основному склались у 60-80-і роки минулого століття. Соціальна спрямованість державної політики країни у ті часи

забезпечувала низьку вартість усіх енергоносіїв, у т.ч. і природного газу. З набуттям незалежності, переходом на ринкові умови господарювання ціна природного газу стрімко зростає. Водночас, технологічно структура видобутку, транспорту та розподілу і споживання залишилась практично незмінною. З підписанням Угоди про асоціацію з ЄС Україна прийняла на себе ряд зобов'язань. Так, наприклад, отримуючи природний газ з Європи, взаєморозрахунки виконують в одиницях енергії (як добуток кількості і теплотворної здатності газу).

З виміром і подальшим моніторингом (добовим балансуванням) вказаних величин сьогодні існують певні проблеми. Лічильники газу – це у переважній більшості прилади об'ємного типу з показами у м³, як правило, без необхідної їх корекції. Фізико-хімічні властивості палив визначають лише на основних маршрутах магістральних газопроводів і доводять до відома споживачів. Тобто, кінцеві споживачі, у т.ч. населення, підприємства комунальної теплоенергетики, які використовують наразі найбільші обсяги природного газу в державі, сьогодні не в змозі забезпечити достовірність розрахунків з постачальниками палива.

Вітчизняні та іноземні науковці основну увагу приділяють визначенню фізико-хімічних властивостей природного газу та їх покращенню (при необхідності) безпосередньо на газових родовищах перед магістральним транспортуванням. Водночас практично відсутні напрацювання за контролем цих показників безпосередньо у кінцевих споживачів, які продовжують обліковувати паливо, як правило, традиційними механічними лічильниками, а фізико-хімічні властивості спожитого газу лише доводять до їх відома без забезпечення можливості щодо їх перевірки.

Наукові та системні підходи щодо вирішення проблеми якості природного газу на усіх етапах: від видобутку і транспортування до використання кінцевими споживачами, диференційованої оцінки вартості палива в залежності від його якості розроблено недостатньо. Пошук шляхів

вирішення вказаних проблем визначає актуальність обраної теми, предмету, мети і завдань досліджень.

Основні результати дисертаційної роботи полягають в наступному:

- удосконалено математичну модель багатofакторного аналізу чинників, які впливають на якість природного газу та є визначальними при оцінці достовірності показів засобів обліку та забезпечення експлуатаційної надійності газотранспортної й газорозподільних систем, що на відміну від існуючих підходів, ґрунтується на поєднанні окремих властивостей палива та дозволяє варіювати його вартість в залежності від енергетичної цінності;

- розроблено технологічну схему інформаційної системи обліку природного газу, яка сприятиме підвищенню достовірності при запровадженні добового балансування палива, вирішенню проблем при узгодженні фактичних витрат між суб'єктами господарювання при транспортуванні, розподілі, постачанні та використанні газу;

- обґрунтовано пріоритетність заходів для покращення окремих фізико-хімічних властивостей природного газу.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що:

- розроблена енергоефективна система осушки природного газу за рахунок використання ефекту Ранка, що запобігає утворенню кристалогідратів і, відповідно, підвищує експлуатаційну надійність та безаварійну роботоздатність багатоступеневих газорозподільних систем;

- запропоновані та обґрунтовані рекомендації щодо принципової модернізації змісту та методології організаційно-технічного проектування та регламентування експлуатації газорозподільних систем населених пунктів в частинах підвищення точності обліку та балансування природного газу в одиницях енергії, а також безаварійної (безвідмовної) роботоздатності цих систем;

- розроблено інженерну методику оцінки якості природного газу у кінцевого споживача без використання додаткових експериментальних досліджень з

врахуванням низки кількісних та якісних факторів впливу на лінгвістичні змінні.

Науково-прикладні результати досліджень впроваджено в практику діяльності підприємств, які надають послуги з газопостачання в Україні (акт від 28.03.2018 р.).

Ключові слова: природний газ, фізико-хімічні властивості, якість, система газопостачання, експлуатаційна надійність, фактори впливу на технічний стан, функції належності, лінгвістична змінна, вологість, осушення, облік, інтелектуальний лічильник газу, точність вимірювання.

ANNOTATION

Franchuk Yu.Y. Quantitative assessment of natural gas quality to increase the accuracy of its accounting and operational reliability of gas supply systems. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.23.03 "Ventilation, lighting and heat and gas supply". - Kyiv National University of Construction and Architecture, Ministry of Education and Science of Ukraine. - Kyiv, 2021.

The dissertation is devoted to the development of a comprehensive assessment of natural gas quality taking into account the transformations of its properties at the stages of "extraction - preparation for transportation - transportation - distribution - use by the end user" and scientific substantiation of increasing its efficiency by prioritizing steps to improve individual physicochemical obtaining readings of means of accounting for the amount of fuel consumed in units of energy in real time.

The main premise of the study is the conclusion that according to the Energy Strategy of Ukraine for the period up to 2035 "Safety, energy efficiency, competitiveness" natural gas remains the main energy source compared to other types of traditional fuels for housing and communal services. At the same time, it is the most environmentally friendly fuel, characterized by the lowest emissions of pollutants and greenhouse gases into the atmosphere. The object of research is the

technological processes of preparation of natural gas for transportation, direct transportation and subsequent use by the end user, including accounting. The subject of the study is the gas transmission and gas distribution networks of settlements and individual objects, as well as structures on them.

The work was performed in accordance with the "State Program for Support of Energy Efficient Projects", directly related to the state budget plans of the Kyiv National University of Construction and Architecture, which were commissioned by the Ministry of Education and Science of Ukraine (state registration 0102U000932, 0108U010643).

Throughout the existence of mankind, its interaction with the environment is characterized by the use of natural resources and, consequently, as a consequence, environmental pollution. The relationship between society and nature is a constant process of resolving the dilemma of the need to preserve natural resources and consume them in order to continue their existence. Rational use of nature is designed to ensure the development of modern society while maintaining the high quality of human habitat.

The theory of "sustainable development" is considered one of the most promising ideologies of the XXI century, which, with the deepening of scientific validity, can displace all existing worldview ideologies as fragmented, unable to ensure the balanced development of civilization.

The idea of sustainable development was formally proclaimed at the International Conference on Environment and Development in Rio de Janeiro (Earth Summit) in 1992. It was the first time that the environment and socio-economic development were considered as interconnected and interdependent areas. It is worth noting that the achievement of the optimal development option is declared by many countries, but each of them has its own way. In some it "is just beginning, in others it has already begun, others have already embarked on the path of sustainable economic development."

In Ukraine, for example, the term "sustainable development" has only recently been used and sometimes continues to be used today, to denote, as a rule, only the steady growth of economic indicators of the country, its regions, individual settlements and sectors of the economy. Sometimes this is compounded by the implementation of unsystematic measures to preserve the environment and improve the sanitary and hygienic living and working conditions of people.

By concluding an Association Agreement with the European Union, Ukraine has made a historic decision on its development priorities. This decision entails not only the emergence of a number of commitments that should be fully reflected in the priorities of socio-economic development of the country and energy in particular, but also necessitates a change in approaches to shaping our energy policy, which aims to meet the needs of society and economy. fuel and energy resources in a technically reliable and safe, cost-effective, environmentally friendly way to ensure the improvement of living conditions of its citizens.

The concept of sustainable development includes 17 Global Goals approved by the UN Summit on Sustainable Development, which took place during the 70th session of the UN in New York in 2015. Among them is the seventh - "Affordable and Clean Energy", which aims to ensuring human access to affordable, reliable, sustainable and modern, environmentally friendly, energy sources. Expanding infrastructure and technological modernization to ensure clean energy in all countries is a critical challenge that can both stimulate growth and help preserve the environment.

The National Report "Sustainable Development Goals: Ukraine" provides the state's own vision of the guidelines for achieving the Sustainable Development Goals (SDGs). 86 national development tasks have been formed and 172 indicators have been identified for their monitoring.

To implement the set tasks in the field of energy supply, the Energy Strategy of Ukraine for the period up to 2035 "Security, energy efficiency, competitiveness" was adopted. Its requirements include the preparation and formation of measures for

efficient production, transformation, transportation, processing and consumption of energy, the creation of competitive and transparent markets for electricity, heat, natural gas and more.

Currently, the modern economy of Ukraine is characterized by unreasonably high intensity of energy consumption, which is a consequence of the peculiarities of its structure, which is shifted towards more energy-intensive industries. Ukraine's economy today is:

- a high degree of physical depreciation of fixed assets and technological backwardness in the most energy-intensive industries and housing and communal services in comparison with the leading countries;
- inconsistency of tariffs and prices for energy resources with the costs of their extraction / production, transformation, transportation, use, etc., which caused a crisis of mutual defaults and, accordingly, made it impossible to technological modernization of both energy facilities and end users;
- the natural monopolies with their inefficient functioning and lack of prospects for development;
- a high level of losses of traditional fuels, energy sources during their extraction, transformation, transmission and consumption, etc .;
- the practical lack of effective incentives to save energy and increase energy efficiency in the technological chains of energy systems "production - transportation - distribution - consumption", as well as the introduction of reliable, including intelligent accounting systems;
- low level of use of modern energy efficient technologies and equipment with minimal harmful impact (or even its complete absence) on the environment both in industry and in housing and communal services.

Gas supply systems are one of the elements of the engineering infrastructure of the settlements of Ukraine, which were mainly formed in the 60-80s of the last century. The social orientation of the state policy of the country at that time ensured the low cost of all energy sources, including and natural gas. With the acquisition of

independence, the transition to market conditions, the price of natural gas has risen sharply. At the same time, the technological structure of production, transport and distribution and consumption has remained virtually unchanged. With the signing of the Association Agreement with the EU, Ukraine has undertaken a number of commitments. For example, when receiving natural gas from Europe, mutual settlements are performed in units of energy (as the product of the quantity and calorific value of gas).

Today there are certain problems with the measurement and subsequent monitoring (daily balancing) of these values. Gas meters are in the vast majority of volumetric devices with readings in m³, usually without the necessary correction. Physico-chemical properties of fuels are determined only on the main routes of main gas pipelines and brought to the notice of consumers. That is, end users, including population, municipal heat companies, which currently use the largest volumes of natural gas in the country, today are unable to ensure the reliability of settlements with fuel suppliers.

Domestic and foreign scientists focus on determining the physicochemical properties of natural gas and their improvement (if necessary) directly at gas fields before the main transportation. At the same time, there are almost no developments in the control of these indicators directly by end users, who continue to account for fuel, usually with traditional mechanical meters, and physicochemical properties of gas consumed only bring them to light without providing the ability to verify them. Scientific and systematic approaches to solving the problem of natural gas quality at all stages: from production and transportation to use by end users, differentiated assessment of the cost of fuel depending on its quality are insufficiently developed. Finding ways to solve these problems determines the relevance of the chosen topic, subject, purpose and objectives of research.

The main results of the dissertation are as follows:

- improved mathematical model of multifactor analysis of factors that affect the quality of natural gas and are crucial in assessing the reliability of metering and

operational reliability of gas transmission and distribution systems, which, unlike existing approaches, is based on a combination of individual fuel properties and allows to vary its cost depending on the energy value;

- the technological scheme of the information system of the account of natural gas which will promote increase of reliability at introduction of daily balancing of fuel, the decision of problems at coordination of actual expenses between subjects of managing at transportation, distribution, supply and use of gas is developed;

- the priority of measures to improve certain physical and chemical properties of natural gas is substantiated.

The practical significance of the obtained results is that:

- developed an energy-efficient system for drying natural gas through the use of the Rank effect, which prevents the formation of crystal hydrates and, accordingly, increases the operational reliability and trouble-free operation of multistage gas distribution systems;

- proposed and substantiated recommendations for fundamental modernization of the content and methodology of organizational and technical design and regulation of operation of gas distribution systems of settlements in terms of improving the accuracy of accounting and balancing of natural gas in energy units, as well as trouble-free (trouble-free) operation of these systems;

- developed an engineering method for assessing the quality of natural gas in the final consumer without the use of additional experimental studies, taking into account a number of quantitative and qualitative factors influencing linguistic variables.

Scientific and applied research results have been implemented in the practice of enterprises that provide gas supply services in Ukraine (act of March 28, 2018).

Keywords: natural gas, physicochemical properties, quality, gas supply system, operational reliability, factors influencing the technical condition, membership functions, linguistic variable, humidity, dehumidification, accounting, intelligent gas meter, measurement accuracy.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у фахових виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз:

1. Франчук Ю.Й. Аналіз та оцінка заходів щодо підвищення енергоефективності систем централізованого теплопостачання / К.М.Предун, Ю.Й.Франчук // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: наук.-техн. збірник. – Вип. 23. – К.: КНУБА, 2017. – с.31-35. *Особистий внесок здобувача: за результатами аналізу виконаних розрахунків підтверджено можливість використання природного газу як основного енергоносія для систем теплопостачання населених пунктів України.*

2. Франчук Ю.Й. Оцінка якості природного газу як енергоносія на основі лінгвістичної інформації / Ю.Й.Франчук, О.І.Ободянська, К.М.Предун // Управління розвитком складних систем: наук.-техн. збірник. – К.: КНУБА, 2019. – Вип.38. – с. 143-150. *(Збірник входить до міжнародних наукометричних баз: Ulrichsweb, BASE, Index Copernicus). Особистий внесок здобувача: запропонована ієрархічна класифікація факторів, що впливають на якість природного газу на стадіях: видобування з родовища, підготовки (очищення) газу для транспортування, розподілу на території населеного пункту та споживання.*

3. Франчук Ю.Й. Модель багатофакторної оцінки якості природного газу / К.М.Предун, Ю.Й.Франчук, О.І.Ободянська // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: наук.-техн. збірник. – К.: КНУБА, 2019. – Вип.30. – с.20-28. *(Збірник входить до міжнародної наукометричної бази: Index Copernicus). Особистий внесок здобувача: отримано аналітичні моделі функцій належності експертних нечітких баз знань, що впливають на оцінювання і прогнозування якості природного газу.*

4. Франчук Ю.Й. Моделювання інтелектуальної підтримки прийняття рішення щодо оцінки якості природного газу методом парних порівнянь /

К.М.Предун, Ю.Й.Франчук, О.І.Ободянська // Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І.Вернадського. Серія: Технічні науки. – К.:ТНУ, 2019. – Том 30 (69). – №6. – Част.2. – с.195-201. *(Журнал входить до міжнародної наукометричної бази: Index Copernicus). Особистий внесок здобувача: запропонована математична модель підтримки прийняття рішення щодо оцінки якості природного газу, яка дає змогу оцінити доцільність та достовірність експертно-моделюючої системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень на базі нечіткої логіки.*

5. Франчук Ю.Й. Створення експертно-моделювальної системи для аналізу факторів, які впливають на якість природного газу / Ю.Й.Франчук // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: наук.-техн. збірник. – К.: КНУБА, 2019. – Вип. 31. – с.33-41. *(Збірник входить до міжнародної наукометричної бази: Index Copernicus).*

6. Франчук Ю.Й. Моделювання оцінки якості природного газу з використанням нечітких баз знань / К.М.Предун, Ю.Й.Франчук, О.І.Ободянська // Сучасні технології, матеріали і конструкції у будівництві: наук.-техн. журнал. – Т.27, №2. – Вінниця: ВНТУ, 2019. – с.114-122. *(Журнал входить до міжнародної наукометричної бази: Index Copernicus). Особистий внесок здобувача: отримана модель нечіткого логічного висновку, яка разом з процедурою дефазифікації забезпечує можливість спостереження за змінами вихідного показника (якість природного газу) при варіації факторів впливу та дозволяє прогнозувати склад та якість природного газу з використанням експертних та експериментальних даних, що характеризують умови експлуатації.*

7. Франчук Ю. Й. Дослідження проблеми забезпечення оптимального тиску в розподільчих мережах газопостачання перед побутовими газовими приладами / Ю.Й.Франчук, В.А. Коновалюк // Вентиляція, освітлення і теплогазопостачання: наук. техн. збірник. – Вип. 33. – К. КНУБА, 2020. – с. 32-38. *(Збірник входить до міжнародних наукометричних баз: Index Copernicus,*

Googl scholar). Особистий внесок здобувача: запропоновані рекомендації щодо реконструкції існуючих газорозподільних систем та їх подальшої експлуатації з метою підтримання рекомендованих значень тисків газу у кінцевих споживачів.

8. Франчук Ю. Й. Дослідження впливу температури на параметри природного паливного газу / Ю.Й.Франчук, В.А. Коновалюк // Вентиляція, освітлення і теплогазопостачання: наук. техн. збірник. – Вип. 36. – К.: КНУБА, 2021. – с. 48-56. (Збірник входить до міжнародних наукометричних баз: *Index Copernicus, Googl scholar*). Особистий внесок здобувача: отримані залежності параметрів природного газу від його температури дозволили розробити рекомендації щодо підвищення достовірності його обліку.

9. Франчук Ю.Й. Моделювання управління якістю природного газу з використанням функцій належності лінгвістичних змінних методом Парето /К.М.Предун, Ю.Й.Франчук, О.І.Ободянська // Містобудування та територіальне планування : наук.-техн. збірник. – К.: КНУБА, 2021. – Вип.76. – с. 235-249. (Збірник входить до міжнародної наукометричної бази: *Index Copernicus*). Особистий внесок здобувача: запропонував використати методи Парето та АВС-аналізу при моделюванні управління якістю природного газу, що дозволило встановити пріоритетність факторів та виявити, з яких із них необхідно починати діяти з метою постачання газу до споживачів з параметрами, обумовленими вимогами чинних нормативно-правових актів. DOI: 10.32347/2076-815x.2021.76.235-249.

10. Франчук Ю. Й. Удосконалення системи обліку природного газу в одиницях енергії / К.М.Предун, В.А. Коновалюк, Ю.Й.Франчук // Вентиляція, освітлення і теплогазопостачання: наук. техн. збірник. – Вип.37. – К.: КНУБА, 2021. – с. 62-66. (Збірник входить до міжнародних наукометричних баз: *Index Copernicus, Googl scholar*). Особистий внесок здобувача: виконав дослідження фізико-хімічних властивостей природного газу, відібраного в газорозподільній

мережі населеного пункту, з наступним порівнянням з вимогами нормативно-правових актів.

**Статті у наукових виданнях інших держав із напрямку,
з якого підготовлено дисертацію:**

11. Y. Franchuk. Modernization of organizational and technological solutions in design and use of modern heating systems / K. Predun, O. Shevchuk, Y. Franchuk // Scientific journal innovative solutions in modern science, № 2(29), 2019, p.62-77. Dubai, United Arab Emirates. *(Збірник входить до міжнародних наукометричних баз: Crossref, WorldCat, Scientific Indexing Services; CORE, Bielefeld Academic Search Engine (BASE), ResearchBib, Citefactor, Google Scholar (Search)).* Особистий внесок здобувача: виконав порівняння викидів забруднювальних речовин і парникових газів в атмосферне повітря при спалюванні природного газу і альтернативних палив. DOI 10.26886/2414-634 X.2 (29)2019.4.

12. U. Franchuk. Principal content and methodology modernization of organizational and engineering design and exploitation regulations for locality GDS [Текст] / Predun K., O. Obodyanska, U. Franchuk // Paradigm of Knowledge. Multidisciplinary Scientific Journal. – No. 2 (34), 2019. – p. 74-92. *(Збірник входить до міжнародних наукометричних баз: CORE, Bielefeld Academic Search Engine (BASE), Citefactor, Google Scholar, WorldCat, ResearchBib та інші).* Особистий внесок здобувача: запропонував шляхи удосконалення чинних технологічних схем систем інтелектуального обліку природного газу. DOI 10.26886/2520-7474.2 (34)2019.5.

13. U. Franchuk. Using fuzzy logic elements to assess the quality of natural gas / K. Predun, U. Franchuk, O. Obodyanska / The scientific heritage. – Vol.1, №73, 2021. – p. 45-52. *(Збірник входить до міжнародних наукометричних баз: Index Copernicus та інші).* Особистий внесок здобувача: створив робочий інтерфейс експертно-моделюючої системи оцінки якості природного газу. DOI: 10.24412/9215-0365-2021-73-1-45-52.

***Матеріали конференцій, семінарів та міжнародних форумів,
де здійснено апробацію роботи:***

14. Франчук Ю.Й. Деякі аспекти щодо достовірності обліку природного газу та показників його якості / К.М.Предун, Ю.Й.Франчук // International research and practical conference «Modern methods, innovation and experience of practical application in the field of technical science: Conference Proceedings», December 27-28, 2017. – Radom, Republic of Poland. – p. 151-153. *Особистий внесок здобувача: проаналізував вимоги чинних нормативно-правових актів щодо якості природного газу та його обліку кінцевими споживачами.*

15. Франчук Ю.Й. Нормативно-правове забезпечення обліку природного газу побутовими споживачами / К.М.Предун, Ю.Й.Франчук // The international research and practical conference «The development of technical sciences: problems and solutions», April 27-28, 2018. – Brno, the Czech Republic, – p. 81-84. Програма та тези доповіді. *Особистий внесок здобувача: оцінив ризики, які виникають під час обліку природного газу при виконанні розрахунків між постачальником і споживачами у зв'язку з розбіжностями чинних нормативно-правових актів.*

16. Франчук Ю.Й. Достовірність обліку природного газу абонентами житлових будинків / К.М.Предун, Ю.Й.Франчук // XLVII науково-технічної конференції ФБ ТУГП. – Вінниця, 2018. – Тези доповідей. *Особистий внесок здобувача: оцінив сучасний стан метрологічного забезпечення обліку природного газу абонентами житлових будинків та запропонував заходи щодо підвищення його достовірності.*

17. Франчук Ю.Й. Використання енергії природного газу в багатоступеневих газорозподільних системах населених пунктів / К.М.Предун, Ю.Й.Франчук // Інноваційні технології в будівництві. Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції 13-15 листопада 2018 р. – Вінниця: ВНТУ, 2019. – с.290-291. *Особистий внесок здобувача: виконав розрахунки потенціалу енергозбереження при утилізації перепадів тиску газу ГРС.*

18. Франчук Ю.Й. Аналіз факторів, які впливають на якість природного газу / Ю.Й.Франчук // Міжнародна науково-практична конференція «Технічні науки, історія, сучасність, майбутнє, досвід ЄС». – Влоцлавек, Республіка Польща. 27–28 вересня 2019 року. – Wloclavec: Izdevnieciba “Baltija Publishing”, 2019. – p.66-69.

19. Франчук Ю.Й. Модель багатofакторної оцінки якості природного газу / Ю.Й.Франчук // Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика формування мікроклімату та енергопостачання будівель та споруд» (м. Київ, КНУБА, 17-18 жовтня 2019 р.). – К.: КНУБА, 2019.

20. Франчук Ю.И. Анализ факторов, влияющих на качество природного газа / Ю.И.Франчук // Международная научно-практическая конференция «Экологические вопросы в инженерных системах и сооружениях». – Баку, Республика Азербайджан. 10-11 декабря 2019 г. – Баку, 2019. – с. 15-18.

21. Франчук Ю.Й. Дослідження проблеми забезпечення оптимального тиску в розподільних мережах газопостачання перед побутовими газовими приладами / Ю.Й.Франчук // Робоча програма та тези доповідей на міжнародній науково-практичній конференції «Екологія. Ресурси. Енергія. Багатофункціональні еко- та енергоефективні ресурсозберігаючі технології в архітектурі, будівництві та суміжних галузях» (м. Київ, КНУБА, 25-26 листопада 2020 р.). – Київ: КНУБА, 2020. – с.20-21.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	22
РОЗДІЛ 1. ГАЗОРОЗПОДІЛЬНІ СИСТЕМИ НАСЕЛЕНИХ ПУНКТИВ УКРАЇНИ.....	
1.1. Сучасне становище і перспективи розвитку газопостачання.....	29
1.2. Фізико-хімічні властивості (якість) природних газів.....	38
1.3. Аналіз способів і засобів очищення природних газів.....	45
1.4. Облік природних газів.....	50
1.5. Висновки за розділом 1.....	57
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ.....	
2.1. Формалізація, ієрархічна класифікація та функції належності нечітких оцінок впливу параметрів на якість природного газу.....	58
2.2. Моделювання інтелектуальної підтримки оцінювання якості природного газу.....	78
2.3. Аналітичні моделі функцій належності експертних нечітких баз знань, що впливають на організаційно-технологічний механізм управління проектами щодо якості природного газу.....	94
2.4. Оцінка адекватності моделі підтримки прийняття організаційно-технологічних управлінських рішень в проектах оцінювання якості природного газу.....	112
2.5. Визначення пріоритету факторів впливу фізико-хімічних властивостей газу на його якість.....	120
2.6. Висновки за розділом 2.....	126
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ, ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА ЯКІСТЬ ПРИРОДНОГО ГАЗУ.....	
3.1. Завдання досліджень.....	128
3.2. Методика визначення вологості (точки роси) природного газу.....	130
3.3. Результати експериментальних досліджень щодо визначення	

температури точки роси	136
3.4. Висновки за розділом 3.....	138
РОЗДІЛ 4. ІНЖЕНЕРНА МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЯКОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ.....	140
РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ.....	149
5.1. Сучасні тенденції розвитку енергопостачання.....	149
5.2. Економічна ефективність підвищення якості природного газу для використання в житлово-комунальному господарстві.....	155
5.3. Висновки за розділом 5.....	158
ВИСНОВКИ.....	160
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	162
ДОДАТКИ.....	182

ВСТУП

Актуальність роботи. Системи газопостачання є одним з елементів інженерної інфраструктури населених пунктів України. Згідно з Енергетичною стратегією України на період до 2035 р. природний газ залишається основним енергоносієм в порівнянні з іншими видами традиційних палив. Його розвідані запаси становлять приблизно 1 трлн. м³, що гарантовано забезпечує потребу держави на період до 50 років. Поки що власного видобутку достатньо лише для задоволення господарсько-побутових потреб мешканців та частково потреб у теплопостачанні. Значний ресурс біогазів (до 2 млрд. м³ на рік) не в змозі використовуватись існуючими системами транспорту й розподілу без приведення його характеристик до показників якості природного газу.

Системи газопостачання в основному склались у 60-80-і роки минулого століття. Соціальна спрямованість державної політики країни у ті часи забезпечувала низьку вартість усіх енергоносіїв, у т.ч. і природного газу. З набуттям незалежності, переходом на ринкові умови господарювання ціна природного газу стрімко зростає. Водночас, технологічно структура видобутку, транспорту та розподілу і споживання залишилась практично незмінною. З підписанням Угоди про асоціацію з ЄС Україна прийняла на себе ряд зобов'язань. Так, наприклад, отримуючи природний газ з Європи, взаєморозрахунки виконують в одиницях енергії (як добуток кількості і теплотворної здатності газу).

З виміром і подальшим моніторингом (добовим балансуванням) вказаних величин сьогодні існують певні проблеми. Лічильники газу – це у переважній більшості прилади об'ємного типу з показами у м³, як правило, без необхідної їх корекції. Фізико-хімічні властивості палив визначають лише на основних маршрутах магістральних газопроводів і доводять до відома споживачів. Тобто, кінцеві споживачі, у т.ч. населення, підприємства комунальної теплоенергетики, які використовують наразі найбільші обсяги природного газу

в державі, сьогодні не в змозі забезпечити достовірність розрахунків з постачальниками палива.

Значний внесок у розвиток теоретичної бази та розроблення прикладних аспектів щодо обліку природного газу, підвищення експлуатаційної надійності систем газопостачання населених пунктів, окремих об'єктів тощо зробили Д. Б. Баясанов, Й. Й. Білинський, Я. М. Власюк, П. М. Гофман, Г. В. Жук, П. М. Єнін, О. О. Іонін, Ф. Калео, І. І. Капцов, М. С. Купріянов, З. Г. Любанська, А. Ю. Ляконіс, Ф. Д. Матіко, М. В. Мелець, Є. П. Пістун, К. М. Предун, Г. С. Ратушняк, О. Ф. Редько, О. Є. Середюк, В. А. Смірнов, Дж. Томпсон, Я. М. Торчинський, В. О. Осієвський, С. Чан, Г. Г. Шишко та інші.

Вітчизняні та іноземні науковці основну увагу приділяють визначенню фізико-хімічних властивостей природного газу та їх покращенню (при необхідності) безпосередньо на газових родовищах перед магістральним транспортуванням. Водночас практично відсутні напрацювання за контролем цих показників безпосередньо у кінцевих споживачів, які продовжують обліковувати паливо, як правило, традиційними механічними лічильниками, а фізико-хімічні властивості спожитого газу лише доводять до їх відома без забезпечення можливості щодо їх перевірки.

Наукові та системні підходи щодо вирішення проблеми якості природного газу на усіх етапах: від видобутку і транспортування до використання кінцевими споживачами, диференційованої оцінки вартості палива в залежності від його якості розроблено недостатньо. Пошук шляхів вирішення вказаних проблем визначає актуальність обраної теми.

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

Робота виконана згідно з «Державною програмою створення систем енергозбереження України» і безпосередньо пов'язана з планами держбюджетної тематики Київського національного університету будівництва і

архітектури, які виконувалися на замовлення Міністерства освіти і науки України (№№ держреєстрації 0102U000932,0108U010643).

Метою дисертаційної роботи є розробка комплексної оцінки якості природного газу та наукове обґрунтування підвищення ефективності його використання шляхом визначення пріоритетності кроків щодо покращення окремих фізико-хімічних властивостей для отримання показів засобів обліку кількості спожитого палива в одиницях енергії в режимі реального часу.

Визначена мета дослідження обумовила потребу вирішення таких **завдань**:

- провести аналіз існуючих наукових та інженерно-технічних розробок і практичного досвіду для забезпечення нормативних вимог щодо фізико-хімічних властивостей природного газу на етапах «видобування – підготовка до транспорту – транспортування – використання кінцевим споживачем»;

- відслідкувати процесно-контентну еволюцію поняття «якість природного газу» в аспекті подальшого застосування при визначенні кількості спожитої енергії;

- побудувати математичну модель для оцінки якості природного газу перед використанням кінцевим споживачем, а також визначення впливу виявлених факторів, що характеризують фізико-хімічні властивості палива, на експлуатаційну надійність газорозподільних систем населених пунктів, окремих об'єктів, а також на достовірність показів засобів обліку природного газу в одиницях енергії;

- розробити технологічну схему функціонування системи інтелектуального обліку природного газу в населеному пункті в одиницях енергії;

- обґрунтувати економічні переваги пропонованих заходів щодо принципової модернізації змісту та методології організаційно-технічного проектування та регламентування експлуатації газорозподільних систем населених пунктів.

Об'єктом дослідження є технологічні процеси підготовки природного газу до транспортування, безпосереднього транспортування та наступного використання кінцевим споживачем включно з обліком.

Предметом дослідження є газотранспортна та газорозподільні мережі населених пунктів й окремих об'єктів, а також споруди на них

Методи дослідження. Вирішення поставлених завдань здійснювалось сучасними методами системного аналізу, аналітичного, математичного і комп'ютерного моделювання. Використовувались також експериментальні методи досліджень щодо очистки природного газу від шкідливих домішок, його осушки та боротьби з утворенням кристалогідратів. Для забезпечення достовірності аналітичних і експериментальних досліджень застосовувались методи планування експерименту та статистичної обробки отриманих результатів.

Наукова новизна роботи. Зокрема, у дисертації:

вперше:

- розроблена методика та програмне забезпечення для комплексної оцінки якості (бальної оцінки) природного газу, які враховують зміни фізико-хімічних властивостей палива в технологічному ланцюгу від видобування до використання кінцевим споживачем, а також при необхідності встановлюють пріоритетність кроків для покращення окремих властивостей газу, сприяють підвищенню точності засобів обліку кількості спожитого палива в одиницях енергії в режимі реального часу;

удосконалено:

- математичну модель багатofакторного аналізу чинників, які впливають на якість природного газу та є визначальними при оцінці достовірності показів засобів обліку та забезпечення експлуатаційної надійності газотранспортної й газорозподільних систем, що на відміну від існуючих підходів, ґрунтується на поєднанні окремих властивостей палива та дозволяє варіювати його вартість в залежності від енергетичної цінності;

- технологічну схему інформаційної системи обліку природного газу, яка сприятиме підвищенню достовірності при запровадженні добового балансування палива, вирішенню проблем при узгодженні фактичних витрат між суб'єктами господарювання при транспортуванні, розподілі, постачанні та використанні газу;

дістали подальший розвиток:

- методологія створення й функціонування інтелектуальних інформаційних систем обліку природного газу як усіма його споживачами в населених пунктах, так і при взаємних розрахунках між газотранспортним підприємством і газорозподільною організацією, постачальником і споживачем тощо;

- організаційно-методичні рекомендації щодо складання балансів природного газу як для окремих кінцевих споживачів, так і населених пунктів загалом, оскільки у схему механізму закладені система постійного контролю властивостей палива;

- рекомендації для забезпечення постачання природного газу на тривалу перспективу, що ґрунтується на достовірних прогнозах, реальних показах лічильників газу тощо та реалізується завдяки диференціації вартості палива.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що:

- розроблена енергоефективна система осушки природного газу за рахунок використання ефекту Ранка, що запобігає утворенню гідратів і, відповідно, підвищує експлуатаційну надійність та безаварійну роботоздатність багатоступеневих газорозподільних систем;

- запропоновані та обґрунтовані рекомендації щодо принципової модернізації змісту та методології організаційно-технічного проектування та регламентування експлуатації газорозподільних систем населених пунктів в частинах підвищення точності обліку та балансування природного газу в одиницях енергії, а також безаварійної (безвідмовної) роботоздатності цих систем;

- розроблено інженерну методику оцінки якості природного газу у кінцевого споживача без використання додаткових експериментальних досліджень з врахуванням низки кількісних та якісних факторів впливу на лінгвістичні змінні.

Науково-прикладні результати досліджень впроваджено в практику діяльності газових господарств України (акт від 28.03.2018 р.)

Особистий внесок здобувача. Автором дисертації здійснено аналіз літературних джерел, інженерно-технічної документації, що стосуються питань чинного стану систем газопостачання України, напрямків модернізації, підвищення точності обліку природного газу та забезпечення безаварійної експлуатації тощо. Проаналізовано вимоги чинних нормативно-правових актів щодо якості природного газу та його обліку кінцевими споживачами. Запропонована ієрархічна класифікація факторів, що впливають на якість природного газу на стадіях: видобування з родовища, підготовки (очищення) газу для транспортування, розподілу на території населеного пункту та споживання та визначена пріоритетність їх впливу. Отримано аналітичні моделі функцій належності експертних нечітких баз знань, що впливають на оцінювання і прогнозування якості природного газу. Запропонована математична модель щодо оцінки якості природного газу на базі нечіткої логіки. Отримані залежності параметрів природного газу від його температури дозволили розробити рекомендації щодо підвищення достовірності його обліку. Виконано дослідження фізико-хімічних властивостей природного газу, відібраного в газорозподільній мережі населеного пункту, з наступним порівнянням з вимогами нормативно-правових актів і перевіркою адекватності пропонованої методики оцінки якості природного газу. Розроблена енергоефективна система осушки природного газу за рахунок використання ефекту Ранка та виконано техніко-економічне обґрунтування у порівнянні з традиційними абсорбційними методами.

Апробація роботи. Основні науково-теоретичні, методичні та практичні результати дисертаційної роботи доповідались на науково-практичних конференціях Київського національного університету будівництва і архітектури (м. Київ, 2019, 2020), Вінницького національного технічного університету (м. Вінниця, 2018, 2019), Міжнародних науково-практичних конференціях «Modern methods, innovation and experience of practical application in the field of technical science: Conference Proceedings» (Радом, Республіка Польща, 2017), «The development of technical sciences: problems and solutions» (Брно, Чеська Республіка, 2018 р.), «Технічні науки, історія, сучасність, майбутнє, досвід ЄС» (Влоцлавек, Республіка Польща, 2019), «Экологические вопросы в инженерных системах и сооружениях» (Баку, Республика Азербайджан, 2019).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковані 13 друкованих праць, у т.ч. 10 статей у фахових виданнях, 3 – у міжнародних виданнях.

Структура та обсяг дисертації. Структура дисертаційної роботи підпорядкована змісту та порядку вирішування завдань дослідження. Дисертація містить: анотації (українською та англійською мовами), список праць за темою дисертації, вступ, основну частину в складі п'яти розділів та висновків, список використаної літератури (зі 171 джерела) та 3 додатків. Обсяг основного місту складає 153 сторінок друкованого тексту, у т.ч. 27 таблиць та 39 рисунків.

РОЗДІЛ 1. ГАЗОРОЗПОДІЛЬНІ СИСТЕМИ НАСЕЛЕНИХ ПУНКТИВ УКРАЇНИ

1.1. Сучасне становище і перспективи розвитку газопостачання в Україні

Газова промисловість України зародилась ще на початку ХХ століття на Прикарпатті – одному з найстаріших районів нафтогазовидобутку Європи. Інтенсивний розвиток галузі відбувся у післявоєнний (другої світової війни) період. Сьогодні на території сучасної України нараховується три основні регіони видобутку традиційного природного газу – Прикарпатський, Дніпровсько-Донецький і Причорноморсько-Кримський.

Природний газ використовується безпосередньо у технологічних процесах промисловості, для теплопостачання та задоволення комунально-побутових потреб населення, інших потреб економіки держави, у т.ч. для потреб магістрального транспорту і газорозподільних підприємств.

Максимального видобутку природного газу – 68,7 млрд.м³ – досягнуто у 1975 р. [1] . У цей час Україна не тільки повністю забезпечувала свої потреби природним газом власного видобутку, а й експортувала його надлишки до республік колишн. СРСР та Чехословаччини. Всього за період 1945-1977 р. було експортовано близько 135 млрд.м³. У зв'язку з поступовим виснаженням основних газових родовищ, відставанням геологорозвідувальних робіт і приросту запасів від темпів видобутку з другої половини 70-х років минулого століття розпочинається зниження видобутку природного газу. Водночас збільшується його використання. Максимальну величину – 118,8 млрд.м³ – економіка України споживає у 1990 р. Надалі обсяги зменшуються.

На початку 90-х років власний видобуток стабілізувався на рівні приблизно 20 млрд.м³ і досі знаходиться у цих межах. Загалом балансові запаси газу в Україні становлять за різними оцінками від 1080 до 1800 млрд.м³ [1].

Таблиця 1.1

Видобуток і використання природного газу в Україні, млрд.м³ [2]

Показник	Рік				
	1990	2000	2010	2014	2017
1. Власний видобуток	25,4	18,1	19,1	20,5	20,5
2. Споживання	118,8	73,4	57,6	42,6	31,9
3. Імпорт	90,7	59,3	36,6	24,2	14,1

Примітка. Невідповідність величин споживання з сумарним імпортом і власним видобутком пов'язана з закачуванням природного газу до підземних сховищ для регулювання сезонної нерівномірності газоспоживання.

Ще до недавнього практично весь імпортований газ в Україну надходив з Російської Федерації, Туркменістану. Протягом 3-х останніх років держава задовольняє свій попит виключно за рахунок поставок з країн Східної і Центральної Європи.

В структурі газоспоживання також відбулися суттєві зміни. В колишній СРСР частка населення не перевищувала 10 %. Сьогодні разом бюджетними організаціями, теплогенеруючими підприємствами – це основний споживач традиційного природного газу в Україні.

Таблиця 1.2

Структура газоспоживання в Україні, % [3, 4]

Споживач	Рік						
	2000	2005	2008	2010	2014	2015	2017
1. Промисловість	51,2	44,0	44,5	39,9	33,8	34,9	28,5
2. Населення, бюджет, теплокомуненерго	37,5	44,6	44,6	50,7	56,8	56,9	54,2
3. Виробничо-технологічні витрати газорозподільних підприємств	0,7	1,6	1,5	1,9	2,1	3,0	3,4

В енергетичній стратегії України (ЕСУ) на період до 2030 р. [5], чи не вперше проаналізовано сучасний стан енергозабезпечення нашої держави, а також наведено прогнози щодо подальшого розвитку. Прогнозованим розвитком економіки держави до 2030 р. було визначено три періоди: перший – до 2010 р. – період структурної перебудови інноваційного напрямку; другий –

2011-2020 рр. – період випереджального розвитку традиційних галузей сфери послуг в економіці України. У ці періоди повинні бути сформовані підвалини постіндустріального способу виробництва. У третьому – 2021-2030 рр. – прогнозується завершення переходу до постіндустріального суспільства з характерною зміною структури економіки.

Загалом Україна належить до країн, частково забезпечених традиційними видами первинної енергії, а отже змушена вдаватися до їх імпорту. Енергетична залежність України від поставок органічного палива, з урахуванням умовно-первинної ядерної енергії, у 2000 та 2005 роках становила 60,7 %, країн ЄС – 51 %. Подібною або близькою до української є енергозалежність таких розвинутих країн Європи, як Німеччина – 61,4 %, Франція – 50 %, Австрія – 64,7 %. Багато країн світу мають значно нижчі показники забезпечення власними первинними ПЕР, зокрема Японія використовує їх близько 7 %, Італія – близько 18 %.

Рівень енергозалежності України є середньоєвропейським і має тенденцію до зменшення (з 60,7 % у 2004 р. до 54,8 % у 2005 р.), але він характеризується відсутністю диверсифікації джерел постачання енергоносіїв, насамперед нафти, природного газу та ядерного палива.

У структурі споживання первинної енергії в Україні на початку XXI століття найбільший обсяг припадав на природний газ – 41 %, використання нафти становило 19 %, вугілля – 19 %, урану – 17 %, гідроресурсів та інших відновлювальних джерел – 4 %.

Таблиця 1.3

Структура споживання первинної енергії в Україні,
країнах ЄС-15, США та у світі [5], %

Ресурс	Світ	Україна	Країни ЄС-15	США
1. Природний газ	21	41	22	24
2. Нафта	35	19	41	38
3. Вугілля	23	19	16	23
4. Уран	7	17	15	8
5. Гідроресурси та інші відновлювальні джерела	14	4	6	7
Всього	100	100	100	100

Аналіз даних, наведених у табл.1.3, свідчить про практичну залежність кожної із держав від того чи іншого виду енергоносія. У країнах ЄС та США – це нафта, в Україні – природний газ. В той же час, ринкова ціна природного газу формується на основі нафтового еквіваленту.

Прогнозування розвитку [5] української економіки провадилось в умовах значної невизначеності основних чинників, тому було розраховано цілий сектор можливих траєкторій її розвитку. Цей сектор обмежено найбільш сприятливими (оптимістичний сценарій) та найменш сприятливими (песимістичний сценарій) умовами розвитку економіки України. Між ними виділено сектор найбільш вірогідного (базового) сценарію.

Стосовно природного газу результати досліджень представлені на рис.1.1.

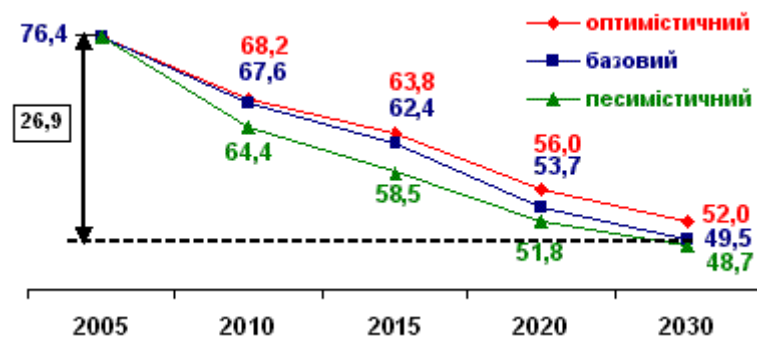


Рис.1.1. Споживання природного газу в Україні [5]

За базовим сценарієм споживання природного газу повинно зменшитись майже на 36 % – до 49,5 млрд. м³. Його частка в паливно-енергетичному балансі України становитиме 16,7 %. А загальний рівень енергетичної залежності України мав би зменшитись з 54,5 (2005 р.) до 11,7 % (2030 р.) за базовим сценарієм.

Світова економічна криза 2008 р., окупація Криму у 2014 р., воєнні дії на Донбасі внесли корективи в дану Стратегію. Окрім того, світові тенденції щодо зменшення споживання органічних палив та захисту довкілля викликали необхідність уточнення деяких положень та призвели в кінцевому випадку до розробки і прийняття нового документу, а саме – Енергетичної стратегії України на період до 2035 р. «Безпека, енергоефективність,

конкурентоспроможність», схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18.08.2017 р. №605-р [6].

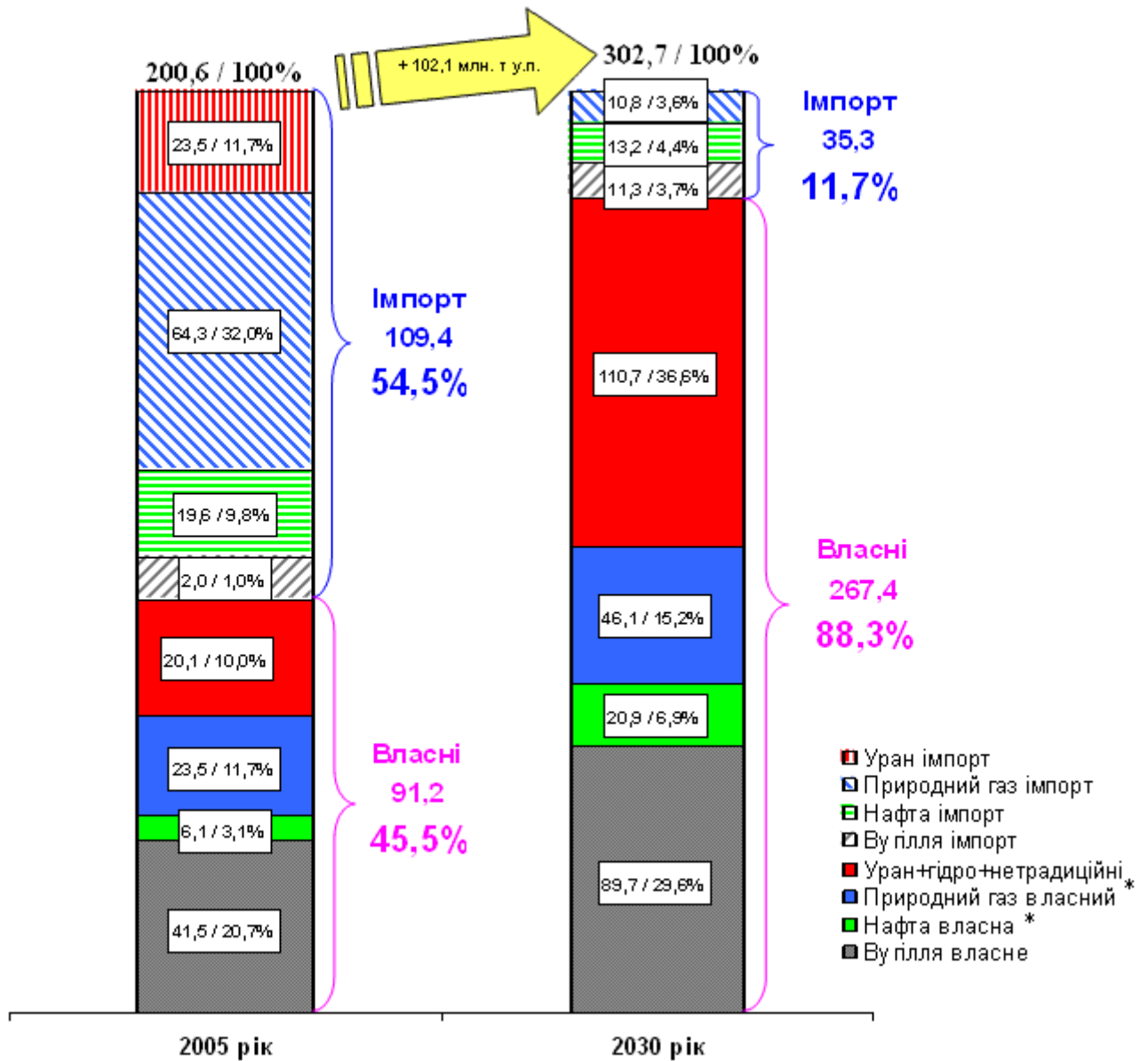


Рис.1.2. Споживання власних та імпортованих ресурсів, млн. т у.п./% [5]

Він відображає сучасні аспекти щодо змін у підходах до формування енергетичної політики держав: здійснюється перехід від застарілої моделі функціонування енергетичного сектору, в якому домінували великі виробники, викопне паливо, неефективні мережі, недосконала конкуренція на ринках природного газу, електроенергії, вугілля тощо – до нової моделі, в якій створюється більш конкурентне середовище, вирівнюються можливості для розвитку й мінімізується домінування одного з видів виробництва енергії або

джерел та/або шляхів постачання палива. Разом з цим віддається перевага підвищенню енергоефективності й використанню енергії із відновлюваних та альтернативних джерел (у 2035 р. частка відновлюваної енергетики повинна становити не менше 20 % в структурі енергетичного балансу держави). Впровадження заходів із запобігання та адаптації до зміни клімату також є одним із пріоритетів глобального розвитку енергетики.

Таблиця 1.4

Прогнозний баланс первинного постачання енергії
в Україні на період до 2035 р. [6]

Енергоресурс	Один. виміру	Рік				
		2015	2020	2025	2030	2035
1. Всього, у т.ч.:	млн.т н.е.	90,1	82,3	87,0	91,0	96,0
- вугілля	млн.т н.е.	27,3	18,0	14,0	13,0	12,0
- природний газ	млн.т н.е.	26,1	24,3	27,0	28,0	29,0
- нафтопродукти	млн.т н.е.	10,5	9,5	8,0	7,5	7,0
- атомна енергія	млн.т н.е.	23,0	24,0	28,0	27,0	24,0
- біомаса, біопаливо та відходи	млн.т н.е.	2,1	4,0	6,0	8,0	11,0
- сонячна та вітрова енергія	млн.т н.е.	0,1	1,0	2,0	5,0	10,0
2. Частка у постачанні ПЕР, у т.ч.:	%	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
- відновлювані джерела енергії	%	4,0	8,0	12,0	17,0	25,0
- викопні палива, у т.ч.:	%	96,0	92,0	88,0	83,0	75,0
- природний газ (в частці від ПЕР)	%	28,9	29,3	31,0	30,8	30,2

Примітка. Т н.е. – тонна нафтового еквівалента – стандартизована одиниця вимірювання енергії, еквівалентна кількості енергії, що виділяється при спалюванні однієї тонни сирової нафти, близько 41,868 ГДж/т або 11,63 МВт-год./т енергії.

Аналіз даних, наведених у табл.1.4, показує, що суттєво збільшується частка первинної енергії за рахунок відновлюваних джерел. Водночас природний газ як був, так і залишається основним екологічно чистим енергоносієм в Україні. Тим більш, що в державі присутній достатній його ресурс.

Відповідно до рекомендацій ЕСУ для систем газопостачання визначаються такі головні завдання: оптимізація балансу споживання та нарощення видобутку природного газу з власних (на території України) джерел

(за рахунок газу з нетрадиційних покладів вуглеводнів) до 30-35 млрд. м³/рік, підвищення ефективності експлуатації газорозподільних мереж населених пунктів тиском до 1,2 МПа (ГРС), магістральних трубопроводів газотранспортної системи (ГТС) тиском до 7,5 МПа, інфраструктури підземних сховищ газу (ПСГ) та ін.

Поряд із цим, лібералізація ринку природного газу, його інтеграція до європейського газового ринку створить надійний механізм забезпечення постачання газу, на випадок надзвичайних ситуацій, за будь-яким напрямом здійснення експортно-імпортних операцій. Умовою досягнення такого стану є розширення системи інтерконекторів між українською та європейською системами та формування віртуальної торгової точки торгівлі природним газом на базі західноукраїнських підземних сховищ природного газу.

З точки зору споживання традиційного природного газу заходи з підвищення енергоефективності використання теплової енергії та газу – як населенням, так і промисловими споживачами – призведуть до зниження обсягів споживання газу в середньостроковій перспективі та оптимізації обсягів споживання у майбутньому, з можливістю його нарощення за підсумком економічного зростання країни. План дій, наведений у розділах з енергоефективності [6, 7], передбачає зменшення питомих показників споживання природного газу до рівня країн Центрально-Східної Європи. Передбачається зниження до 2035 р. енергоємності валового внутрішнього продукту до рівня 0,17 кг н.е. на 1 дол. США ВВП України (ПКС) проти сьогоднішніх 0,28 та наближення за цим показником до країн зі схожими кліматичними, географічними та економічними параметрами.

Першочерговим завданням з точки зору мінімізації імпорту газу є розвиток власної ресурсної бази і нарощення видобутку з власних джерел.

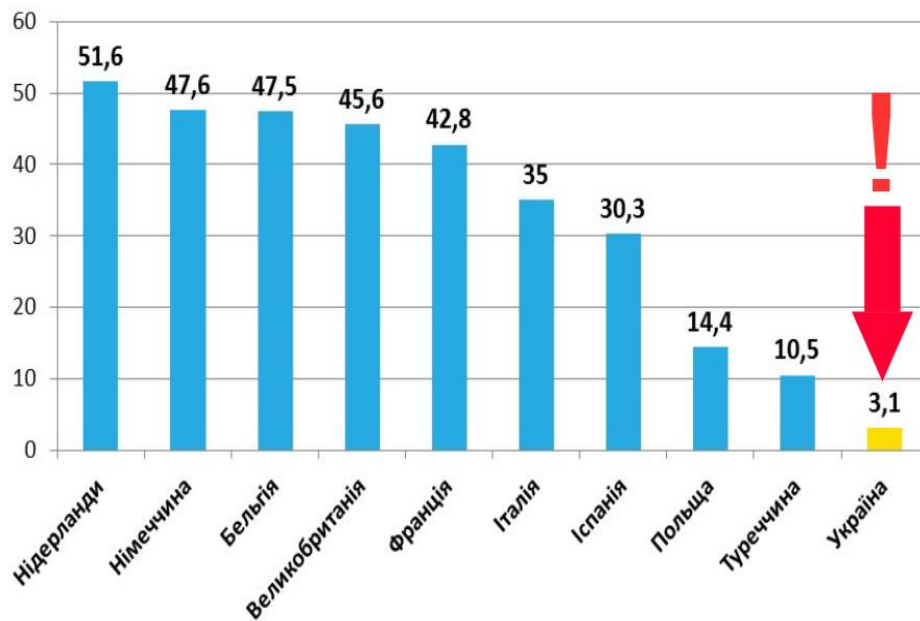
Водночас ЕСУ ставить завдання щодо сталої диверсифікації поставок газу з мінімізацією залежності від будь-якого окремо взятого постачальника або маршруту (до 2020 року рівень залежності від постачання енергоресурсів з

однієї країни (компанії) не повинен перевищувати 30 % від загального обсягу імпорту). Це ж саме стосується і будь-якого іншого енергоресурсу.

Через незадовільний стан газорозподільних систем населених пунктів та неоптимальну структуру ГРС існує ризик підвищення аварійності та втрат природного газу у розподільчих мережах.

Україна бідніша за інші країни, що споживають стільки ж газу

ВВП на душу населення, тисяч доларів США, 2014 рік



Source: World Bank

BusinessViews

Рис. 1.3. Внутрішній валовий продукт України на душу населення у 2014 р., тис. \$US [8]

Загалом в Україні постачання традиційного природного газу споживачам здійснюється газовими мережами тиском до 1,2 МПа, довжина яких становить близько 287 тис. км та які мають значний ступінь зносу і, окрім того, експлуатуються в складних умовах інженерної інфраструктури населених пунктів. Необхідний режим газопостачання в цих мережах забезпечують близько 51 тис. газорегуляторних пунктів (ГРП).

Понад 11,6 тис. км розподільчих газопроводів (або близько 7 %) та 4,9 тис. газорегуляторних пунктів (або близько 14%) вже відпрацювали свій амортизаційний термін.

При суттєвому загальнодержавному скороченні споживання газу виробничо-технологічні витрати газорозподільними підприємствами не тільки не скоротились (в абсолютному обрахуванні), а значно збільшилися (в процентному). Це можна пояснити не в останню чергу і відсутністю достовірного обліку, в першу чергу у населення.

Таблиця 1.5

Виробничо-технологічні втрати природного газу
газорозподільними підприємствами [3, 4]

Показник	Один. виміру	Рік						
		2000	2005	2008	2010	2014	2015	2017
1. Споживання	млрд.м ³	73,4	76,4	66,3	56,7	42,6	33,2	31,9
2. Втрати	млрд.м ³	0,6	1,2	1,0	1,1	0,9	1,0	1,1
	%	0,7	1,6	1,5	1,9	2,1	3,0	3,4

Відповідно, основними завданнями є [6]:

- 1) вирішення проблеми власності – вирішення проблеми відсутності стимулів до інвестування в реконструкцію і розвиток газорозподільних систем, зокрема, проведення незалежної оцінки вартості активів;
- 2) прозорість та контроль – стимулювання встановлення 100 % лічильників для всіх абонентів, у т.ч. і населенню;
- 3) оновлення застарілих лічильників;
- 4) встановлення систем дистанційного обліку та автоматизації балансування, запровадження інтелектуальних систем обліку тощо;
- 5) стимулювання заходів щодо підвищення ефективності газорозподільних систем (ГРС) населених пунктів, окремих об'єктів;
- 6) формування та виконання конкретних економічно доцільних проектів для оптимізації та модернізації ГРС населених пунктів;
- 7) запровадження стимулюючого тарифоутворення.

1.2. Фізико-хімічні властивості (якість) природних газів

Традиційні горючі природні гази утворювались протягом геологічних епох в результаті розкладу речовин рослинного і тваринного походжень і накопичувались в підземних куполах, створених зігнутими пластами порід (у тріщинах і у поровому (наприклад, так звані сланцеві гази) об'ємі порід). Вони являють собою суміш різних вуглеводнів з панівним вмістом метану, до складу якої також входять у невеликій кількості вуглекислий газ, азот, інші гази. Ця суміш може знаходитись як у вигляді виключно газових накопичень (чисто газові родовища), так і бути розчиненою у нафті (у цьому випадку природні гази добувають разом з нею, це так звані попутні нафтові гази). Горючі гази також зустрічаються у вугільних пластах (шахтний метан) і можуть бути використані шляхом дегазації цих пластів, що значно підвищує безпечність підземного вуглевидобування.

У переважній більшості випадків газ видобувають через свердловини, глибина яких визначається глибиною залягання газових пластів і може сягати 5000 м і більше. Тиск у газових пластах перебуває в межах 7,0-40,0 МПа. Відповідно, газ зі свердловини на поверхню виходить під дією пластового тиску. Далі його направляють на очистку від піску, пилу та інших речовин у відцентрові сепаратори. Також газ осушують, оскільки в холодний період року при транспортуванні вологих газів утворюються кристалогідрати, котрі намерзають на стінках газопроводів, арматури і можуть суттєво зменшувати їх переріз. У попутних нафтових газах є певна кількість газового бензину (газового конденсату), що використовують як моторне паливо, і тому його доцільно видаляти. Якщо до складу природного газу входять сірководень, вуглекислий газ, то газ також очищують від цих домішок. Всі вказані вище процеси відбуваються в установках комплексної підготовки газів (УКПГ), які знаходяться безпосередньо на газових родовищах. У випадку виснажених родовищ (що частково має місце в Україні) природний газ спочатку надходить до дожимних компресорних станцій (ДКС), а вже потім – безпосередньо у

систему магістрального транспорту. Очищений газ з початковим тиском не менше 5,5-7,5 МПа (в залежності від категорії магістрального газопроводу (МГ)) рухається від місць видобування до кінцевих споживачів, наприклад, газорозподільних станцій населених пунктів (ГРС НП). Внаслідок втрат тиску при транспортуванні газу приблизно через кожні 100-150 км траси в залежності від рельєфу місцевості встановлюють компресорні станції (КС), за допомогою яких тиск знову підвищується до 5,5 чи 7,5 МПа (дані значення прийняті у практиці проектування та експлуатації магістральних газопроводів як в Україні, так і поза її межами).

Природні гази з різних родовищ відрізняються за компонентним складом і, відповідно, своїми властивостями. До складу газів входять вуглеводні класу C_nH_{2n+2} (у практиці газопостачання показник n не перевищує 5). Саме вони в переважній більшості впливають на енергетичну цінність палива. Окрім вуглеводнів природні гази можуть містити і ряд інших компонентів, частина яких є шкідливими, наприклад, вологу, механічні домішки.

У табл.1.6 наведено склад природних газів деяких родовищ, що знаходяться як на території України, так і в Російській Федерації та Туркменістані.

Таблиця 1.6

Середній склад природних газів родовищ СНГ [9]

Родовище газу	Склад газів, % об'ємні							
	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	CO ₂	N ₂	H ₂ S
1. Уренгойське	97,6	0,1	0,01	-	-	0,3	1,9	-
2. Медвеже	99,0	0,1	0,005	-	-	0,095	0,8	-
3. Ямбурзьке	98,6	0,1	-	-	-	0,1	1,2	-
4. Оренбурзьке	85,0	4,9	1,6	0,75	0,55	0,6	5,0	1,3
5. Газлінське	93,0	3,1	0,7	0,6	-	0,1	2,5	-
6. Дашавське	98,3	0,33	0,12	0,115	-	0,1	1,0	-
7. Шебелинське	93,3	4,0	0,6	0,4	0,3	0,1	1,3	-
8. Гадяцьке	85,15	5,9	2,66	0,91	0,57	3,31	1,5	-
9. Джанкойське	95,9	0,7	0,2	0,03	0,01	0,1	3,0	-
10. Степановське	95,1	2,3	0,7	0,4	0,8	0,2	0,5	-

Основним показником якості газу, який визначає його енергетичну цінність, є питома об'ємна теплота згоряння або теплотворна здатність газу H . Її визначають як кількість тепла, яке виділяється під час повного згоряння газу в повітрі при сталому тиску $p_{зг}$ і сталій температурі $T_{зг}$, віднесеного до об'єму сухого газу, визначеного за стандартних умов, тобто при тиску $p_c = 0,101325$ МПа і температурі $T_c = 293,15$ К (20 °С) [10]. Загалом, в колишн. СРСР, а до недавніх пір і в Україні, окрім т.зв. стандартних умов, у техніці газопостачання застосовувались і нормальні умови вимірювань параметрів середовищ: барометричний тиск – $p_n = 0,101325$ МПа і температура $T_n = 273,15$ К (0 °С) [11]. Розрізняють нижчу та вищу питомі об'ємні теплоти згоряння. Нижчу питому об'ємну теплоту згоряння H_H визначають за наявності водяної пари у продуктах згоряння газу за температури $T_{зг}$, а вищу H_B – після повної конденсації водяної пари, яка міститься в продуктах згоряння газу за температури $T_{зг}$.

До основних характеристик природного газу відносяться:

- 1) молекулярна маса M ;
- 2) густина ρ , кг/м³ сухого або вологого за нормальних або стандартних (температура 20 °С і барометричний тиск $101,325$ кПа) умов;
- 3) коефіцієнт стиснення z ;
- 4) масові ізобарна c_p , кДж/кг·К та ізохорна c_v , кДж/кг·К теплоємності;
- 5) показник адіабати k ;
- 6) теплота згоряння (нижча Q_p^H , МДж/м³ і вища Q_p^B , МДж/м³);
- 7) коефіцієнти кінематичної ν , м²/с і динамічної μ , Н·с/м² в'язкостей;
- 8) межі займистості у суміші з повітрям, % об'ємні: нижня L_H і верхня L_B .

Серед основних фізико-хімічних властивостей газів, що входять до складу природного, можна виділити такі (див. табл.1.7).

Якість природного газу регламентуються як чинним в Україні стандартом колиш. Радянського Союзу [11], так нещодавно прийнятим Кодексом [14].

Таблиця 1.7

Фізико-хімічні властивості газів [12, 13]

Газ	Молек. маса, M	Густина ρ , кг/м ³	Теплота згоряння, МДж/м ³		Межа займистості, % об'ємні		Темп.-ра займистості t , °С
			H_p^H	H_p^B	L_H	L_B	
1. Метан CH ₄	16,042	0,717	35,845	39,792	5,0	15,0	650
2. Етан C ₂ H ₆	30,068	1,356	63,797	69,713	3,2	12,5	510
3. Пропан C ₃ H ₈	44,094	2,004	91,321	99,219	2,4	9,5	500
4. Бутан C ₄ H ₁₀	58,120	2,703	113,595	121,48	1,8	8,4	475
5. Пентан C ₅ H ₁₂	72,151	3,457	146,202	158,77	1,4	7,8	475
6. Вуглекислий газ CO ₂	44,010	1,977	-	-	-	-	-
7. Азот N ₂	28,016	1,25	-	-	-	-	-
8. Сірководень H ₂ S	34,082	1,539	23,401	25,425	-	-	-

Примітка. У таблиці значення фізичних величин вказано за нормальних умов – температури 0 °С і барометричному тиску 101,325 кПа (760 мм рт. ст.).

Таблиця 1.8

Якість природного газу [15]

Показники	Країна				
	Норвегія	Велика Британія*	Велика Британія**	Євро-союз***	Україна [11]
1. Вища теплота згоряння, МДж/м ³	38,1-43,7	36,9-42,3	38,9-44,6	35,0-45,2	-
2. Те ж, нижча	-	-	-	-	від 31,8
3. Число Воббе, МДж/м ³	48,3-52,8	48,1-51,4	48,2-51,2	47,0-54,0	41,2-54,5
4. Вміст кисню, моль %	0,1	0,1	0,1	0,1-1,0	≤1,0
5. Те ж, діоксиду вуглецю	2,5	2,0	2,0	2,5	-
6. Те ж, азоту	-	≤5	-	-	-
7. Те ж, сірководню	5мг/м ³	≤0,33%	≤0,3 %	-	-
8. Загальний вміст сірки	0,15 %	0,15 %	0,15 %	≤50 мг/м ³	-
9. Точка роси вологи, °С	-18 за $p = 69$ атм	-10 за $p =$ подачі	-10 за $p = 69$ атм	-8 за $p = 69$ атм	не нижче t газу
10. Те ж, вуглеводнів	-10 за $p = 50$ атм	-2 за $p = 75$ атм	-2 за $p = 69$ атм	-2 за $p = 69$ атм	-
11. Вміст водню, моль %	-	0,1	-	0,1	не допускається
12. Індекс неповного згоряння	-	<0,48	-	-	-
13. Індекс сажоутворення	-	<0.60	-	0,5548-0,7000	-

Примітки: *National Transmission System – Національна система магістральних ліній транспортування газу.

** Interconnector United Kingdom – Інтерконектор Юнайтед Кінгдом

*** European Association for the Streamlining of Energy Exchange – Європейська асоціація оптимізації забезпечення енергією

Вимогами нормативного документу [14] для традиційних природних газів встановлені такі обов'язкові показники:

- 1) компонентний склад;
- 2) нижча та вища теплота згоряння;
- 3) густина газу;
- 4) вміст сірководню та меркаптанової сірки;
- 5) вміст механічних домішок;
- 6) число Воббе;
- 7) температура точки роси за вологою;
- 8) температура точки роси за вуглеводнями.

Визначення фізико-хімічних властивостей природного газу та відбір проб газу проводиться згідно з вимогами чинних нормативно-технічних документів [10, 15-17]. При цьому уповноважені представники оператора суміжних систем мають право бути присутніми під час відбору проб газу та/або при проведенні його аналізу з визначення його показників.

Загалом природний газ, що подається в газотранспортну систему, повинен відповідати таким вимогам [14]:

- 1) вміст метану CH_4 , мол. % – мінімум 90;
- 2) те ж, етану C_2H_6 , мол. % – максимум 7;
- 3) те ж, пропану C_3H_8 , мол. % – максимум 3;
- 4) те ж, бутану C_4H_{10} , мол. % – максимум 2;
- 5) те ж, пентану та інших більш важких вуглеводнів C_5H_{12} , мол.% – максимум 1;
- 6) те ж, азоту N_2 , мол. % – максимум 5;
- 7) те ж, вуглецю CO_2 , мол. % – максимум 2;
- 8) те ж, кисню O_2 , мол. % – максимум 0,02;

9) вища теплота згоряння (температура згоряння 25 °С/ те ж, вимірювання 20 °С): мінімум 36,20 МДж/м³ (10,06 кВт·год/м³), максимум 38,30 МДж/м³ (10,64 кВт·год/м³);

10) вища теплота згоряння (температура згоряння 25 °С/ те ж, вимірювання 0 °С): мінімум 38,85 МДж/м³ (10,80 кВт·год/м³), максимум 41,10 МДж/м³ (11,42 кВт·год/м³);

11) нижча теплота згоряння (температура згоряння 25 °С/те ж, вимірювання 20 °С): мінімум 32,66 МДж/м³ (9,07 кВт·год/м³), максимум 34,54 МДж/м³ (9,59 кВт·год/м³);

12) температура точки роси за вологою °С: при абсолютному тиску газу 3,92 МПа – не перевищує мінус 8;

13) температура точки роси за вуглеводнями: при температурі газу не нижче 0 °С – не перевищує 0°С;

14) вміст механічних домішок: відсутні;

15) вміст сірководню H₂S, г/м³ – максимум 0,006;

16) вміст меркаптанової сірки RSH, г/м³ – максимум 0,02.

Оператор газотранспортної системи надає операторам суміжних (газорозподільних, наприклад) систем або іншим суб'єктам газового ринку, безпосередньо підключеним до газотранспортної системи, оперативні дані щодо якості природного газу за всіма узгодженими точками його визначення, який має містити такі чисельні значення:

1) густина газу;

2) вміст азоту;

3) вміст вуглекислого газу;

4) температура точки роси за вологою;

5) температура точки роси за вуглеводнями;

6) число Воббе;

7) середньозважена вища теплота згоряння за минулу добу.

Прийнявши Закон «Про ринок природного газу» [19], гармонізований з

відповідним європейським законодавством [20], держава не у повній мірі розробила нормативно-правове забезпечення щодо вимог до якості природного газу. Незважаючи на високу енергетичну і хімічну цінність природного газу, екологічність та відносну дешевизну у порівнянні з іншими видами палива в Україні до сих пір відсутній систематизований підхід до оцінювання його якості з врахуванням усіх технологічних процесів в ланцюгу «видобування – транспортування - використання» цього палива.

Існує суттєвий дуалізм власних вимог щодо фізико-хімічних властивостей газу, наведених у Кодексі газотранспортної системи [14] і Проекті технічного регламенту природного газу [21] (причому, значення деяких параметрів останнього документу виходять за межі чинного), а саме:

- 1) різний діапазон теплоти згоряння, а особливо – його верхньої межі;
- 2) максимальні значення щодо вмісту деяких компонентів, вказаних у Проекті [21], у т.ч. і у порівнянні як з європейськими стандартами [15], так російськими: діоксиду вуглецю, меркаптанової сірки, механічних домішок.

Наприклад, природний газ Гадяцького родовища [9] з достатньо великим вмістом важких вуглеводнів характеризується вищою теплотою згоряння $H_5^\circ(25/0\text{ }^\circ\text{C}) = 42,64$ і $H_5^\circ(25/20\text{ }^\circ\text{C}) = 39,73$ МДж/м³, значення якої є меншими за максимальні нормативні величини, відповідно, $H_5^\circ(25/0\text{ }^\circ\text{C}) = 48,38$ і $H_5^\circ(25/20\text{ }^\circ\text{C}) = 44,94$ МДж/м³ згідно з Проектом регламенту [21]. Проте, вони є дещо вищими за значення, вказані у Кодексі [14]: $H_5^\circ(25/0\text{ }^\circ\text{C}) = 41,1$ і $H_5^\circ(25/20\text{ }^\circ\text{C}) = 38,3$ МДж/м³.

Окрім того, значно збільшено молярну частку діоксиду вуглецю: з існуючих 2,0 % [14] (також 2,0 % – у ГОСТ колиш. СРСР [11] чи 2,5 % у стандарті РФ [17]) до 6 % у Проекті технічного регламенту [21]. Це означає, що майже 10 % у складі природного газу можуть займати негорючі компоненти – сполуки азоту (до 5 % згідно з вимогами [14]) і вуглецю, які зазвичай слід попередньо виділити з метою зменшення витрат на транспортування мережею магістральних газопроводів.

У дослідженнях [22] автором встановлено, що внаслідок недостатньої підготовки природного газу до транспортування магістральними газопроводами та незадовільного стану газорозподільних мереж газ, що надходить в міські і розподільні мережі міста Харкова та Харківської області по газопроводу Шебелинка-Харків, містить вуглеводного конденсату 30-50 %, пластової води 40-70 %, механічних домішок 5-15 %, мінеральних солей 3-6 %, продуктів корозії 0,5-1,2 %. Тобто, його якість є далекою від задекларованих вимог [14, 21].

Таким чином, внаслідок невизначеності державних нормативно-правових актів та дієвого контролю за їх дотриманням наразі існує конфліктна ситуація між газотранспортним та газозбутовими/газорозподільними підприємствами, постачальниками і кінцевими споживачами стосовно обсягів реалізованого палива, особливо при виконанні розрахунків в одиницях енергії. Причому, вирішення конфліктних ситуацій відбувається суб'єктивним чином, у той час як у європейських країнах вже успішно працюють системи об'єктивного контролю, а саме інтелектуального обліку енергоносіїв.

1.3. Аналіз способів і засобів очищення природних газів

Окрім горючих компонентів зазвичай традиційний природний газ містить у своєму складі різноманітні як негорючі, так і просто шкідливі для подальших транспортування і використання компоненти. Окрім того, на шляху від родовища до кінцевого споживача існує велика ймовірність його додаткового «забруднення». Аналіз забруднень внутрішньої порожнини газопроводів показав, що вони являють собою багатокomпонентні суміші, які складаються з пластової, конденсаційної та поверхневої вод, вуглеводного конденсату, емульсій, механічних домішок, мінеральних масел, органічних кислот, солей дво- і тривалентного заліза, метанолу і гліколей.

Відповідно, очищення природного газу відбувається у декілька етапів: безпосередньо на промислі (як в привибійній зоні кожної свердловини, так і в

установках комплексної підготовки газу до транспорту (УКПГ) родовища), при транспортуванні магістральними газопроводами (на кожній з компресорних станцій (КС)), в газорозподільних системах населених пунктів (на газорозподільних станціях (ГРС) – безпосередньо перед подачею у систему, на мережних газорегуляторних пунктах (ГРП) багатоступеневих систем, перед використанням у кінцевого споживача (при необхідності)).

Наявність у газі механічних домішок (піску, пилу тощо) викликає ерозію металу стінки труби і, відповідно, зношення газопроводів, устаткування тощо, призводить до засмічення контрольно-вимірювальних приладів. Таким чином, збільшується вірогідність виникнення аварійних ситуацій як при транспортуванні, так і при використанні палива.

Волога сприяє процесу корозії трубопроводів і устаткування, утворенню кристалогідратів, які своїм зовнішнім виглядом нагадують сніг або лід. Наявність вуглеводнів, які конденсуються, спричиняє при певних термодинамічних умовах, виділення конденсату і, як наслідок, можливе утворення у подальшому кристалогідратів. Це знижує пропускну здатність газотранспортної і газорозподільної систем. А по-друге, також збільшує можливість виникнення аварійних ситуацій.

Сірководень спричиняє корозію внутрішньої поверхні трубопроводів і устаткування, а також має негативний вплив на довкілля. Вуглекислий газ утворює баластну суміш, яка знижує калорійність газу. Кисень, який зазвичай відсутній у складі природного газу, може бути внесений разом з повітрям у систему при недостатній якості продувки газопроводів. Тоді утворюється вибухонебезпечна суміш, яка при певних умовах викликає знову ж таки аварійні ситуації.

Джерелом накопичення рідини може бути краплинна рідина (вода та конденсат), що надходить із свердловини разом із газом, конденсат води та важких вуглеводнів, які утворюються при зниженні температури газу при його

русі промисловим газопроводом, а також рідина, яка виноситься потоком газу з сепараторів.

Встановлено [23-26], що інтенсивність накопичення рідини залежить від швидкості руху газу й профілю траси газопроводу. На горизонтальних та низхідних ділянках траси рідина рухається у вигляді плівки внутрішніми стінками труби. Найбільша кількість рідини накопичується на висхідних ділянках трубопроводу, утворюючи гідравлічний затвор, який частково або повністю перекриває переріз труби. Наявність у газі рідини, механічних домішок значно збільшує гідравлічний опір газовому потоку.

Оскільки в магістральні газопроводи надходить газ після обробки на промислах, від чіткої роботи останніх залежить ефективність системи роботи транспорту газу. Аналітичні дослідження впливу суспензії на пропускну здатність газопроводів були проведені І. Є. Ходановичем, В. О. Мамаєвим, О. Ф. Редько, а також зарубіжними дослідниками R. V. Smith, I. S. Miller, I. W. Ferguson [27].

Аналіз наукових праць вітчизняних вчених показав [28-30], що багато газоконденсатних родовищ, що експлуатуються, знаходяться на стадії вичерпування енергії надлишкового перепаду тиску, а підтримка режиму сепарації газу при від'ємних температурах вимагає додаткових витрат. У зв'язку з цим на багатьох родовищах установки комплексної підготовки газу (УКПГ) працюють в режимі, який не забезпечує виключно однофазне (суто газове) транспортування середовища. Під час підготовки природного газу до транспортування по магістральному газопроводу на усіх без виключення родовищах вимагалось забезпечити таку точку роси по вуглеводнях, при якій їх конденсація в магістральному газопроводі виключалася. Новий стандарт на газ, що транспортується по магістральних газопроводах (див. табл. 1.9), розповсюджується тільки на газ, що добувається з родовищ, введених в експлуатацію після 1983 року, регламентується технічними умовами, складеними із урахуванням фактичних можливостей роботи УКПГ. На багатьох

родовищах, що експлуатуються, за низкою причин неможливо забезпечити підготовку газу до точки роси нижчої або такої, що дорівнює температурі в магістральному газопроводі.

Дослідження проб, відібраних з внутрішньої порожнини промислових газопроводів Шебелинського, Крестищенського, Меліховського, Єфремівського та інших родовищ свідчить про наявність в продуктах відкладень вуглеводневого конденсату, води, мінерального шламу (табл.1.10) [31-33].

Вуглеводневий конденсат, який входить до складу відкладень, знаходиться у межах 30–80 % від загального обсягу, містить різну кількість важких вуглеводів метанового, нафтового та ароматичного типів.

Таблиця 1.9

Технічні вимоги на газ горючі природні, що подаються
в магістральні газопроводи [34-36]

Найменування показників	Норми			
	Мікрокліматичні райони			
	Помірний		Холодний	
	I.V-30.IX	I.X-30.I.V	I.V-30.IX	I.X-30.I.V
Точка роси газу за вологою, °С, не вище	0	-5	-10	-20
Точка роси газу за вуглеводнями, °С, не вище	0	0	-5	-10
Маса механічних домішок в 1 м ³ , г, не більше	0,003	0,003	0,003	0,003
Маса сірководню в 1 м ² , г, не більше	0,02	0,02	0,02	0,02
Маса меркаптанової сірки в 1 м ³ , г, не більше	0,036	0,036	0,036	0,036
Обсягова для кисню, % об., не більше	1,0	1,0	1,0	1,0

Аналіз води, що входить до складу продуктів відкладень, показує, що вона хлориднокальцієвого типу, ступінь мінералізації якої знаходиться в межах 0,25–3,1 г/літр та усі водорозчинні домішки: солі, кислоти, одноатомні та двоатомні спирти та інші компоненти у менших кількостях [37, 38].

Механічні домішки в досліджуваних газозбірних мережах складають 2–2,5 % та є мінеральним шламом, який складається з дрібних уламків пласту-колектора, продуктів корозії, різних часточок піску, глини, мінеральних солей.

Аналіз механічних домішок рідких забруднень конденсато-водяної суміші показує, що вони в основному складаються з глиняних часток з лінійними розмірами 0,005 мм та менше, 50 % який мають карбонатне походження. Окрім глиняних часток є частки кварцу, гематита, магнетита та інших мінералів з лінійними розмірами до 0,01 мм, зустрічалися більш тонкі пластинки окислів заліза [31, 39-41].

Таблиця 1.10

Структура продуктів відкладень в газозбірних трубопроводах родовищ

№ з/п	Компоненти продуктів відкладення	Родовище		
		Шебелинське	Крестищенське	Єфремовське
1	Вуглеводневий конденсат	30–50	45–80	40–60
2	Пластова вода	40–70	25–40	35–55
3	Механічні домішки	5–15	6–18	7–19
4	Мінеральні солі	3–6	1–3	0,5–1,5
5	Продукти корозії	0,5–1,2	0,5–1,5	0,7–1,5

Мінеральні солі містяться як в пластовій воді, так і в конденсаті, при цьому розчинність солей в конденсаті складає усього декілька міліграмів на літр. У процесі видобутку газу та конденсату останній контактує з мінералізованою водою, яка виноситься з пласту, та іншими домішками, що призводить до утворення стійких емульсій мінералізованої води з газовим конденсатом. У результаті з газовим конденсатом вносяться в газозбірні мережі солі в диспергированому вигляді в кількостях, які перевищують їх розчинність, що призводить до випадіння солей на внутрішній поверхні труб в установці комплексної підготовки газу. Відкладення солей значно підвищує гідравлічний опір газозбірних трубопроводів та впливає на температурний режим технологічного процесу. Аналогічні відкладення визначені і у внутрішній порожнині між промислових газопроводів.

Зниження температури газу, що транспортується, нижче рівня температури точки роси і температури сепарації на УКПГ сприяє процесу конденсації вологи та вуглеводів у внутрішній порожнині промислових та магістральних газопроводів. У зв'язку з цим визначення зон конденсації, контроль над температурою точки роси газу необхідно здійснювати в декількох місцях по довжині газопроводу. Тиск, при якому відбувається максимальна конденсація, знаходиться в діапазоні 4,5–5,5 МПа [32, 41-43]. При зниженні тиску газу, що транспортується, нижче тиску максимальної конденсації температура точки роси газу за вуглеводнями знижується.

Для забезпечення нормальної роботи трубопроводів при наявності в газі крапельної рідини необхідно проводити заходи, направлені на попередження накопичення рідини або передбачати періодичне видалення скупченої рідини. Попереджувальні заходи здійснюються шляхом:

- вибір оптимального режиму роботи трубопроводу, який забезпечує необхідну кількість газу;
- вибір траси трубопроводу з найбільш рівним рельєфом;
- автоматичного скидання рідини в конденсатопровід або конденсатозбірник.

Періодичне видалення рідини проводиться за рахунок:

- продування газу в атмосферу;
- пропускання очищувальних пристроїв типу механічних роздільників.

Дослідження хімічного аналізу зарубіжних авторів Day, Stepanek [44] підтверджують наявність продуктів внутрішньої корозії в газопроводах.

1.4. Облік природних газів

В умовах трансформації економічних відносин і реформування енергетичної та житлово-комунальної галузей ефективного використання паливно-енергетичних ресурсів стає вирішальним фактором регіонального розвитку, оскільки зниження витрат на виробництво і надання житлово-комунальних послуг сприяють підвищенню рівня рентабельності галузі,

зменшують кількість збиткових підприємств, що значною мірою впливає на покращення житлових умов та якості життя населення України. Чільне місце в набутті енергонезалежності держави має запровадження достовірного обліку енергоносіїв, у т.ч. і природного газу.

Пріоритетним енергоресурсом для потреб житлово-комунального господарства України наразі є традиційний природний газ. Наприклад, аналіз Енергетичної стратегії України [6] показує, що сьогодні лише у виробництві теплової енергії частка газу як найбільш екологічного палива перевищує 60 %. Загалом в державі у структурі загального первинного постачання енергії становище природного газу навіть дещо посилюється – з 28,9 % у 2015 р. до 30,2 % у 2035 р.

За останній період в державі відбулись значні зміни в структурі споживання природного газу. Сьогодні до 40 % від усієї кількості палива витрачається на потреби населення (в колишн. Радянському Союзі ця частка не перевищувала 10 %). Водночас вартість природного газу для абонентів житлових будинків зросла з 10 крб. (у 1991 р.) до майже 10000 грн. (у 2021 р.) за 1 тис. м³. І якщо раніше можливі збитки газопостачальних підприємств внаслідок відсутності або недостовірності обліку у житлово-комунальному господарстві компенсувались промисловістю (у 1991 р. для цієї категорії споживачів вартість складала 28 крб./1000 м³), то сьогодні – це вже неможливо. По-перше, споживання палива промисловістю різко скоротилось, а, по-друге, підприємства, як правило, оснащені засобами комерційного обліку природного газу і сплачують лише за реально спожите паливо.

В умовах ринкових цін на паливо актуальним постає питання вимірювання кількості спожитого газу та визначення показників його якості. Основним показником будь-якого палива, що визначає його енергетичну цінність, є питома теплота згоряння. В роботі [50] порівняно вимоги нормативних документів деяких країн ЄС з відповідними, що діють в Україні, щодо якості природного газу. Для багатоконпонентних сумішей, а такими є

природний газ, теплоту спалювання розраховують з використанням закону Дальтона [12, 50]. Важливість такого показника підтверджується тим, що в більшості країн світу для здійснення розрахунків між кінцевим споживачем і постачальником газу використовують енергетичні показники – добуток об'єму поставленого газу на його нижчу теплоту згорання. Зазвичай кількість газу визначають прямим вимірюванням за допомогою лічильника, а теплоту згорання – за результатами хроматографічного аналізу палива.

У 1995 р. в Україні була розроблена Багатогалузева програма виробництва приладів обліку природного газу і поетапного оснащення ними житлового фонду [45]. Пріоритет у встановленні лічильників надавався житлу з газовим опаленням і місцевим гарячим водопостачанням. Сьогодні можна відмітити, що фактично встановлено приблизно 10 млн. побутових лічильників газу (близько 75 % від потреби). Це прилади, як правило, об'ємного типу, тобто вони призначені для виміру об'ємних витрат природного газу при фактичних значеннях температур і тисків. Їх конструкцією не передбачено наявність сторонніх джерел живлення, що унеможлиблює застосування в інформаційних системах.

Населення, яке мешкає у багатоквартирних будинках міських населених пунктів, продовжує за спожитий природний газ оплату здійснювати в залежності від кількості мешканців у квартирі і номенклатури встановлених побутових газових приладів. Відповідно, достовірність такої інформації щодо кількості спожитого газу викликає певні сумніви. Окрім того, чинна державна політика надання субсидій певним категоріям мешканців аж ніяк не стимулює до встановлення лічильників газу.

Загалом для взаємних розрахунків при продажі і купівлі природного газу існують т.зв. «стандартні умови» – температура 20 °С, тиск 101,325 кПа (760 мм рт. ст.) і вологість, що дорівнює 0. Проте в реальних умовах у населення, в квартирах (будинках) яких встановлені лічильники, вимірювання кількості газу виконується при реальних тисках, температурах тощо. Таким чином, об'єми

газу, що визначені у вузлах обліку у постачальників і споживачів, одного і того ж газового потоку можуть різнитись на значу (до 20 %) величину. Причому, в залежності від пори року розбіжності можуть мають різний знак.

Природний газ, як і будь-яке газоподібна речовина, при зміні температури змінює свій об'єм і, відповідно, густину. З достатньою точністю в діапазоні температур від мінус 50 до плюс 50 °С цю залежність можна апроксимувати формулою [46]

$$\rho = \frac{A}{273+t}, \text{ кг/м}^3 \quad (1.1)$$

де t – температура газу, °С; ρ – густина газу, кг/м³; A – чисельний коефіцієнт, значення якого залежить від виду середовища, для метану СН₄ – основного компоненту природного газу – $A=196$.

Після нескладних перетворень значення відносної похибки виміру кількості природного газу за допомогою приладів об'ємного типу в залежності від температури вимірюваного середовища можна представити як

$$\delta = -8 + 0,338 \cdot t, \% \quad (1.2)$$

Таким чином, при температурах природного газу, нижчих за 23,6 °С, при реалізації палива населенню газопостачальні організації отримують збитки (сягають до 15 % при температурі мінус 20 °С), а при вищих – мають деякі прибутки (до 10 % при температурі 50 °С).

Для абонентів, які мешкають в багатоквартирних будинках, розрахункова витрата природного газу не перевищує 1,2 (у кухні встановлена лише плита типу ПГ-4) і 3,5 м³/год. (плита ПГ-4 і водонагрівач проточний газовий типу ВПГ-23). У кухнях зазвичай обмежений простір і при встановленні побутових лічильників газу не завжди вдається дотримуватись відстаней, вказаних в нормативних документах [47, 48]. Кухня – це завжди опалюване приміщення. Окрім того, конструктивно прокладання газових стояків внутрішньо будинкової системи газопостачання дозволено безпосередньо у приміщеннях, в яких встановлені побутові газові прилади – кухнях. В холодний період року температура повітря у приміщенні повинна бути не менше 18, а у теплий –

встановлюється в межах 25-30 °С. З урахуванням надлишкової теплоти під час приготування їжі фактична температура сягає 40 °С і більше. Таким чином, додаткова похибка складає не менше 5 % і, відповідно, населення додатково сплачує за неспожитий газ до 3 млрд. грн./рік.

Загалом у вимірювальній техніці розрізняють основну і додаткові похибки засобів вимірювання. Стосовно обліку природного газу основна похибка визначається при «стандартних умовах» і вимірюваному середовищі – повітрі, а додаткові – при відхиленні умов вимірювання від них.

Вимогами ДСТУ 3336-96 [47] регламентуються граничні значення цих похибок. Наприклад, для побутових лічильників, які експлуатуються, допустима основна похибка в діапазоні вимірювань $Q_{min} \leq Q < 0,1Q_{max}$ може сягати 6 %. На підставі аналізу ринку побутових лічильників газу в Україні за інформацією заводів-виробників основна похибка вимірювань в діапазоні витрат $Q_{min} \leq Q < Q_{max}$, як правило, не перевищує ± 1 %. Тобто, у цьому питанні досягнута виробниками точність перевищує вимоги державних стандартів.

Про додаткові похибки згадується лише стосовно відхилень температур газу від стандартних умов.

Проаналізуємо вплив інших чинників на покази приладів обліку.

Побутові газові прилади оснащують атмосферними інжекційними пальниками низького тиску з неповним попереднім змішуванням газу з повітрям. Номінальний тиск природного газу перед приладом становить $P_{ном.} = 1,3$ кПа. Конструкція пальника забезпечує його роботоздатність при зміні тиску в межах $P = (0,5-1,25) P_{ном.}$ В діапазоні робочих тисків 0,75-2,0 кПа додаткова похибка не перевищує 2 % з тенденцією зросту при збільшенні тиску і, відповідно, збільшенням втрат газопостачальних організацій. Проте, за абсолютною величиною дана додаткова похибка практично не виходить за межі похибок вимірювань, регламентованих стандартом [47].

Значно суттєвішою є похибка, викликана змінами барометричного тиску. В діапазоні тисків 93,326-101,325 кПа (700-760 мм рт. ст.) похибка вимірювань апроксимується з достатньою точністю залежністю

$$\delta_1 = -104,7 + 1,046 \cdot B, \% \quad (1.3)$$

де B – барометричний тиск, кПа.

Зі зменшенням барометричного тиску населення переплачує за спожитий газ. Наприклад, в діапазоні барометричних тисків 730-745 мм рт. ст. додаткова похибка знаходиться в межах, відповідно, 3-1 %. З точки зору теорії похибок вона носить системний характер: на основі багаторічних спостережень для кожної місцевості встановлені лише їм властиві значення барометричних тисків. І, відповідно, величина кореляційного коефіцієнта може бути зафіксована, наприклад, в квитанціях до сплати за спожите паливо окремо для кожної газопостачальної організації у тому чи іншому населеному пункті. До речі, економія коштів для населення після врахування фактичного значення барометричного тиску шляхом введення кореляційного коефіцієнта на кожному млрд.м³ спожитого газу може сягати 0,05-0,15 млрд. грн. Це цілком прийнятна ціна, щоб у найкоротший час внести відповідні зміни до чинного законодавства.

Таким чином, найбільш суттєвий вплив на покази об'ємних лічильників газу має додаткова похибка, викликана відмінністю реальних значень температур як природного газу, так і навколишнього середовища від «стандартних умов». Комплектування лічильника власним температурним коректором допоможе вирішити вказану проблему. До речі, в країнах ЄС чинним законодавством заборонено встановлення будь-яких лічильників газу без коректорів об'єму.

В Україні сьогодні з отриманням достовірної інформації щодо теплофізичних характеристик палив існують певні проблеми. Газотранспортна система України забезпечує транзит, як правило, природного газу з Російської Федерації, який частково відбирається споживачами України з наступною

компенсацією так званим «європейським» на західних кордонах держави. Наприклад, у відповідності паспортом якості на товарний газ з Южно-Руського родовища ВАТ «Севернефтегазпром» [17] він має такі характеристики: густина $\rho=0,674 \text{ кг/м}^3$, теплота згоряння: нижча $H_p^H=33,08$ і вища $H_p^B=36,7 \text{ МДж/м}^3$, вміст метану CH_4 – не менше 98 %. Таким чином, якість газу відповідає вимогам чинного стандарту України [11], Кодексу [14].

Природний газ українського походження зараз займає приблизно дві третини в балансі держави. Причому, вміст метану знаходиться в межах від 85 до 99 % і, відповідно, H_p^H – 35,2-35,6 МДж/м³ [46]. Тобто його фізико-хімічні властивості також знаходяться в рекомендованих [11, 14] діапазонах.

Загалом інформація щодо фізико-хімічних властивостей природного газу, який подається до газорозподільних мереж населених пунктів України, доступна в публічних джерелах інформації, наприклад [15]. Контроль якості газу, як правило, виконують хіміко-аналітичні лабораторії газотранспортної компанії ПАТ «Укртрансгаз». А у регіональних підприємств з надання послуг з газопостачання практично відсутні автоматичні потокові хроматографи, що дозволяють визначати показники якості газу в режимі реального часу.

І тому сьогодні за основу розрахунків при передачі природного газу користуються середньозваженими щомісячними значеннями нижчої теплоти згоряння (при стандартних умовах) для кожної з областей. Наприклад, за січень 2018 р. згідно з даними [15] діапазон вимірювань Q_p^H знаходився у межах від мінімального значення – 34,04 (Донецька область) до максимального – 34,66 МДж/м³ (Харківська область), при середній в Україні величині – приблизно 34,33 МДж/м³.

Якщо розглянути спільно карти України з родовищами, об'єктами газотранспортної інфраструктури включно з підземними сховищами газу та щомісячними показниками теплоти згоряння, то можна відмітити певні неузгодженості. Наприклад, величини Q_p^H для російського та переважної більшості українських природних газів, що отримані розрахунковим шляхом, є

меншими за відповідні значення, вказані на картах, до 1 МДж/м³ або до 3 %, однак відповідають вимогам стандарту [11].

Мешканці житлових будинків щомісячно отримують квитанції за спожитий газ, в яких поряд з об'ємним вказується облік в енергетичних показниках – МДж і кВт-год.

Відповідно до п.1 статті 9 Директиви 2012/27/ЄС «Про енергоефективність» [49]: «Держави... повинні забезпечити, наскільки це можливо, фінансово доцільно й пропорційно у відношенні до потенційної економії енергій, усіх кінцевих споживачів електроенергії, природного газу... індивідуальними лічильниками за конкурентними цінами, які точно відображають дійсне споживання енергії кінцевими споживачами і надають інформацію про дійсний час використання». В загальному випадку використання лічильників природного газу дозволяє упорядкувати його облік, а без цього неможлива економія паливно-енергетичних ресурсів.

5. Висновки за розділом 1

Аналіз існуючого стану систем газопостачання населених пунктів України, вимог щодо якості природного газу та їх дотримання в процесі експлуатації вказаних систем, а також обліку блакитного палива та можливого його заміщення (повного або часткового) іншими горючими газами обумовив такі завдання досліджень:

- провести аналіз існуючих наукових та інженерно-технічних розробок і практичного досвіду для забезпечення нормативних вимог щодо фізико-хімічних властивостей природного газу на етапах «видобування – підготовка до транспорту – транспортування – використання кінцевим споживачем»;
- відслідкувати процесно-контентну еволюцію поняття «якість природного газу» в аспекті подальшого застосування при визначенні кількості спожитої енергії;

- побудувати математичну модель для оцінки якості природного газу перед використанням кінцевим споживачем, а також визначення впливу виявлених факторів, що характеризують фізико-хімічні властивості палива, на експлуатаційну надійність газорозподільних систем населених пунктів, окремих об'єктів, а також на достовірність показів засобів обліку природного газу в одиницях енергії;

- розробити технологічну схему функціонування системи інтелектуального обліку природного газу в населеному пункті в одиницях енергії;

- обґрунтувати економічні переваги пропонованих заходів щодо принципової модернізації змісту та методології організаційно-технічного проектування та регламентування експлуатації газорозподільних систем населених пунктів.

РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

2.1. Формалізація, ієрархічна класифікація та функції належності нечітких оцінок впливу параметрів на якість природного газу

2.1.1. Побудова ієрархічних зв'язків факторів, що впливають на якість природного газу

З метою створення експертно-моделювальної системи для багатофакторного аналізу процесу накопичення факторів, що впливають на якість природного газу, був використаний математичний апарат, що базується на теорії нечіткої логіки та лінгвістичної змінної [51–55]. Цей метод як взаємозв'язана сукупність математичних моделей дозволяє застосовувати експертно-лінгвістичну інформацію для оцінки якості природного газу в залежності від факторів, що її обумовлюють. Для встановлення ієрархічних зв'язків факторів, що впливають на якість природного газу, виконано їх класифікацію (рис. 2.1).

Розглядаючи цей процес на системному рівні, лінгвістичну змінну $A_{янг}$, що характеризує якість природного газу, можна представити у вигляді співвідношення

$$A_{янг} = f(X; Y; Z), \quad (2.1)$$

де X – лінгвістична змінна (ЛЗ), що описує фізико-хімічні властивості видуботого з родовища природного газу; Y – ЛЗ, що описує якість підготовки (очищення) природного газу для транспортування; Z – ЛЗ, що описує технічні умови експлуатації газорозподільної системи населеного пункту.

Лінгвістична змінна, що описує фізико-хімічні властивості видуботого з родовища природного газу, може бути представлена виразом

$$X = f_x(x_1; x_2), \quad (2.2)$$

де x_1 – ЛЗ «вміст вуглеводнів у складі природного газу»; x_2 – ЛЗ «вміст шкідливих компонентів у складі газу».

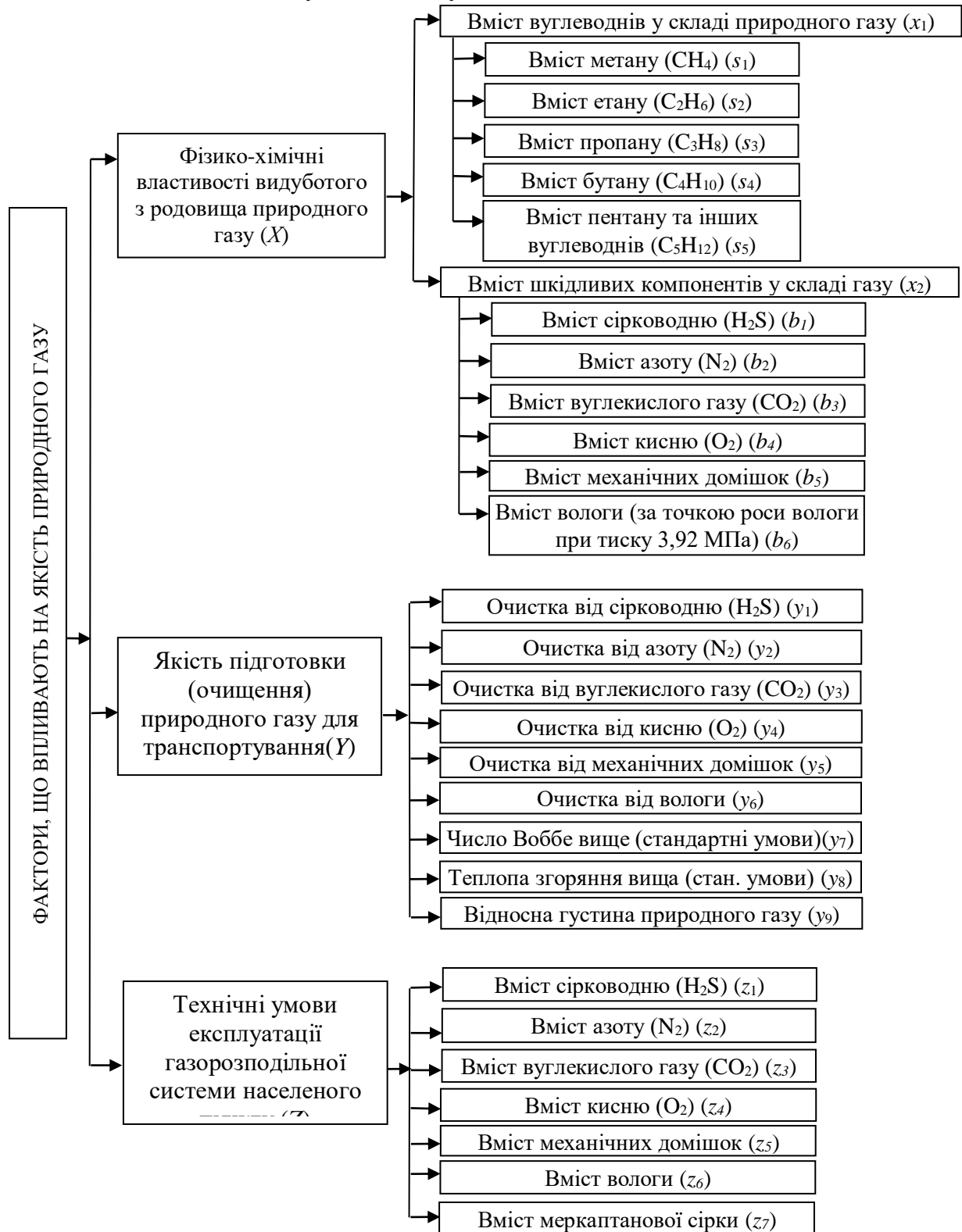


Рис. 2.1. Класифікація факторів, що впливають на якість природного газу

Лінгвістична змінна, що описує якість підготовки (очищення) природного газу для транспортування, може бути представлена виразом

$$Y = f_y(y_1; y_2; y_3; y_4; y_5; y_6; y_7; y_8; y_9), \quad (2.3)$$

де y_1 – ЛЗ «очистка від сірководню (H_2S)»; y_2 – ЛЗ «очистка від азоту (N_2)»; y_3 – ЛЗ «очистка від вуглекислого газу (CO_2)»; y_4 – ЛЗ «очистка від кисню (O_2)»; y_5 – ЛЗ «очистка від механічних домішок»; y_6 – ЛЗ «очистка від вологи»; y_7 – ЛЗ «число Воббе вище (стандартні умови)»; y_8 – ЛЗ «теплота згоряння вища (стандартні умови)»; y_9 – ЛЗ «відносна густина природного газу».

Лінгвістична змінна, що описує технічні умови експлуатації газорозподільної системи населеного пункту, може бути представлена виразом

$$Z = f_z(z_1; z_2; z_3; z_4; z_5; z_6; z_7), \quad (2.4)$$

де z_1 – ЛЗ «вміст сірководню (H_2S)»; z_2 – ЛЗ «вміст азоту (N_2)»; z_3 – ЛЗ «вміст вуглекислого газу (CO_2)»; z_4 – ЛЗ «вміст кисню (O_2)»; z_5 – ЛЗ «вміст механічних домішок»; z_6 – ЛЗ «вміст вологи»; z_7 – ЛЗ «вміст меркаптанової сірки».

В рівняння (2.2) входять змінні x_1 , x_2 , які в свою чергу залежать від інших факторів:

$$x_1 = f_{x_1}(s_1; s_2; s_3; s_4; s_5); \quad (2.5)$$

$$x_2 = f_{x_2}(b_1; b_2; b_3; b_4; b_5; b_6), \quad (2.6)$$

де s_1 – ЛЗ «вміст метану (CH_4)»; s_2 – ЛЗ «вміст етану (C_2H_6)»; s_3 – ЛЗ «вміст пропану (C_3H_8)»; s_4 – ЛЗ «вміст бутану (C_4H_{10})»; s_5 – ЛЗ «вміст пентану та інших вуглеводнів (C_5H_{12})»; b_1 – ЛЗ «вміст сірководню (H_2S)»; b_2 – ЛЗ «вміст азоту (N_2)»; b_3 – ЛЗ «вміст вуглекислого газу (CO_2)»; b_4 – ЛЗ «вміст кисню (O_2)»; b_5 – ЛЗ «вміст механічних домішок»; b_6 – ЛЗ «вміст вологи (за точкою роси вологи при тиску 3,92 МПа)».

Дерево логічного висновку (рис. 2.2), у вузлах якого позначено номери формул (2.1)–(2.6), було побудовано за результатами аналізу ієрархічної сукупності співвідношень (2.1)–(2.6). Значення лінгвістичних змінних, які наведено у співвідношеннях (2.1)–(2.6), оцінюються за допомогою системи якісних термінів, які наведено у табл. 2.1. Значення лінгвістичної змінної «якість природного газу» представлено наступними оціночними термами: Н – низька; нС – нижче середнього; С – середня; вС – вище середнього; В – висока. Кожний з цих термінів представляє собою відповідну нечітку множину, яка є певною властивістю, що розглядається як лінгвістичний терм. Для лінгвістичних змінних оціночні терми наведено в табл. 1.1.

Таблиця 2.1

Фактори впливу як лінгвістичні змінні

Позначення та назва змінної	Універсальна множина	Терми для оцінки
1	2	3
s_1 – вміст метану (CH_4)	80...98 %	низький (Н), нижче середнього (нС), середній (С), вище середнього (вС), високий (В)
s_2 – вміст етану (C_2H_6)	1...7 %	низький (Н), нижче середнього (нС), середній (С), вище середнього (вС), високий (В)
s_3 – вміст пропану (C_3H_8)	0...3 %	низький (Н), середній (С), високий (В)
s_4 – вміст бутану (C_4H_{10})	0...2 %	низький (Н), середній (С), високий (В)
s_5 – вміст пентану та інших вуглеводнів (C_5H_{12})	0...1 %	низький (Н), середній (С), високий (В)
b_1 – вміст сірководню (H_2S)	0...20 мг/м ³	низький (Н), нижче середнього (нС), середній (С), вище середнього (вС), високий (В)
b_2 – вміст азоту (N_2)	1...5 %	низький (Н), нижче середнього (нС), середній (С), вище середнього (вС), високий (В)
b_3 – вміст вуглекислого газу (CO_2)	0...6 %	низький (Н), середній (С), високий (В)
b_4 – вміст кисню (O_2)	0...1 %	низький (Н), нижче середнього (нС), середній (С), вище середнього (вС), високий (В)

Продовження табл. 2.1

1	2	3
b_5 – вміст механічних домішок	1...10 г/м ³	низький (Н), нижче середнього (нС), середній (С), вище середнього (вС), високий (В)
b_6 – вміст вологи (за точкою роси вологи при тиску 3,92 МПа)	-8...0 °С	низький (Н), нижче середнього (нС), середній (С), вище середнього (вС), високий (В)
y_1 – очистка від сірководню (H ₂ S)	0...20 мг/м ³	відсутня (Вд), часткова (Ч), повна (Пв)
y_2 – очистка від азоту (N ₂)	0...5 %	відсутня (Вд), часткова (Ч), повна (Пв)
y_3 – очистка від вуглекислого газу (CO ₂)	0...6 %	відсутня (Вд), часткова (Ч), повна (Пв)
y_4 – очистка від кисню (O ₂)	0...0,02 %	відсутня (Вд), часткова (Ч), повна (Пв)
y_5 – очистка від механічних домішок	0...1 мг/м ³	відсутня (Вд), часткова (Ч), повна (Пв)
y_6 – очистка від вологи	-8...0 °С	відсутня (Вд), часткова (Ч), повна (Пв)
y_7 – число Воббе вище (стандартні умови)	44,9...53,7 МДж/м ³	низьке (Н), нижче середнього (нС), середнє (С), вище середнього (вС), високе (В)
y_8 – теплота згоряння вища (стандартні умови)	35,4...38,3 МДж/м ³	низька (Н), середня (С), висока (В)
y_9 – відносна густина природного газу	0,55...0,75 кг/м ³	низька (Н), середня (С), висока (В)
z_1 – вміст сірководню (H ₂ S)	0...6 мг/м ³	низький (Н), нижче середнього (нС), середній (С), вище середнього (вС), високий (В)
z_2 – вміст азоту (N ₂)	0...5 %	низький (Н), нижче середнього (нС), середній (С), вище середнього (вС), високий (В)
z_3 – вміст вуглекислого газу (CO ₂)	0...6 %	низький (Н), середній (С), високий (В)
z_4 – вміст кисню (O ₂)	0...1 %	низький (Н), середній (С), високий (В)
z_5 – вміст механічних домішок	0...1 мг/м ³	низький (Н), середній (С), високий (В)
z_6 – вміст вологи	-8...0 °С	низький (Н), нижче середнього (нС), середній (С), вище середнього (вС), високий (В)
z_7 – вміст меркаптанової сірки	0...20 мг/м ³	низький (Н), середній (С), високий (В)

Побудоване за класифікованими факторами впливу на якість природного газу (див. рис. 2.1) дерево логічного висновку (див. рис. 2.2) представляє систему вкладених одне в одного висловлювань, тобто їх ієрархічний зв'язок. Прогнозованій якості природного газу відповідає корінь дерева логічного висновку, а факторам, що впливають його якість, висячі вершини.

2.1.2. Побудова функцій належності нечітких оцінок впливу факторів на якість природного газу

Джерелом інформації є експертні оцінки, які мають якісний та кількісний характер і доступні користувачам. Вони використовуються для розроблення експертно-моделювальної системи прийняття організаційно-технологічних рішень щодо оцінювання і прогнозування якості природного газу. Метод побудови функцій належності передбачає фазифікацію нечітких оцінок факторів впливу. Фазифікація включає визначення нечітких термів для лінгвістичної оцінки факторів впливу, які задані на відповідних універсальних множинах [51, 57].

Нечіткою множиною, за допомогою якої формалізується терм \tilde{S} , є сукупність пар [58]:

$$\tilde{S} = \left\{ \frac{\mu_s(u_1)}{u_1}, \frac{\mu_s(u_2)}{u_2}, \dots, \frac{\mu_s(u_n)}{u_n} \right\}, \quad (2.7)$$

де $\{u_1, u_2, \dots, u_n\} = U$ – універсальна множина, на якій задається нечітка множина $S \in U$; $\mu_s(u_i)$ – ступінь належності елемента $u_i \in U$ до нечіткої множини \tilde{S} .

Сукупність значень $\mu_s(u_i)$ для всіх $i = \overline{1, n}$, яку необхідно визначити, представляє собою невідому функцію належності. Основа для розв'язання поставленої задачі базується на ідеї розподілу ступенів належності універсальної множини згідно з їх рангами. Рангами елемента $u_i \in U$

передбачено число $r_s(u_i)$, яке характеризується значимістю цього елемента у створенні властивості, яка описується нечітким термом \tilde{S} . При цьому ступінь належності елемента більший, чим вищий його ранг.

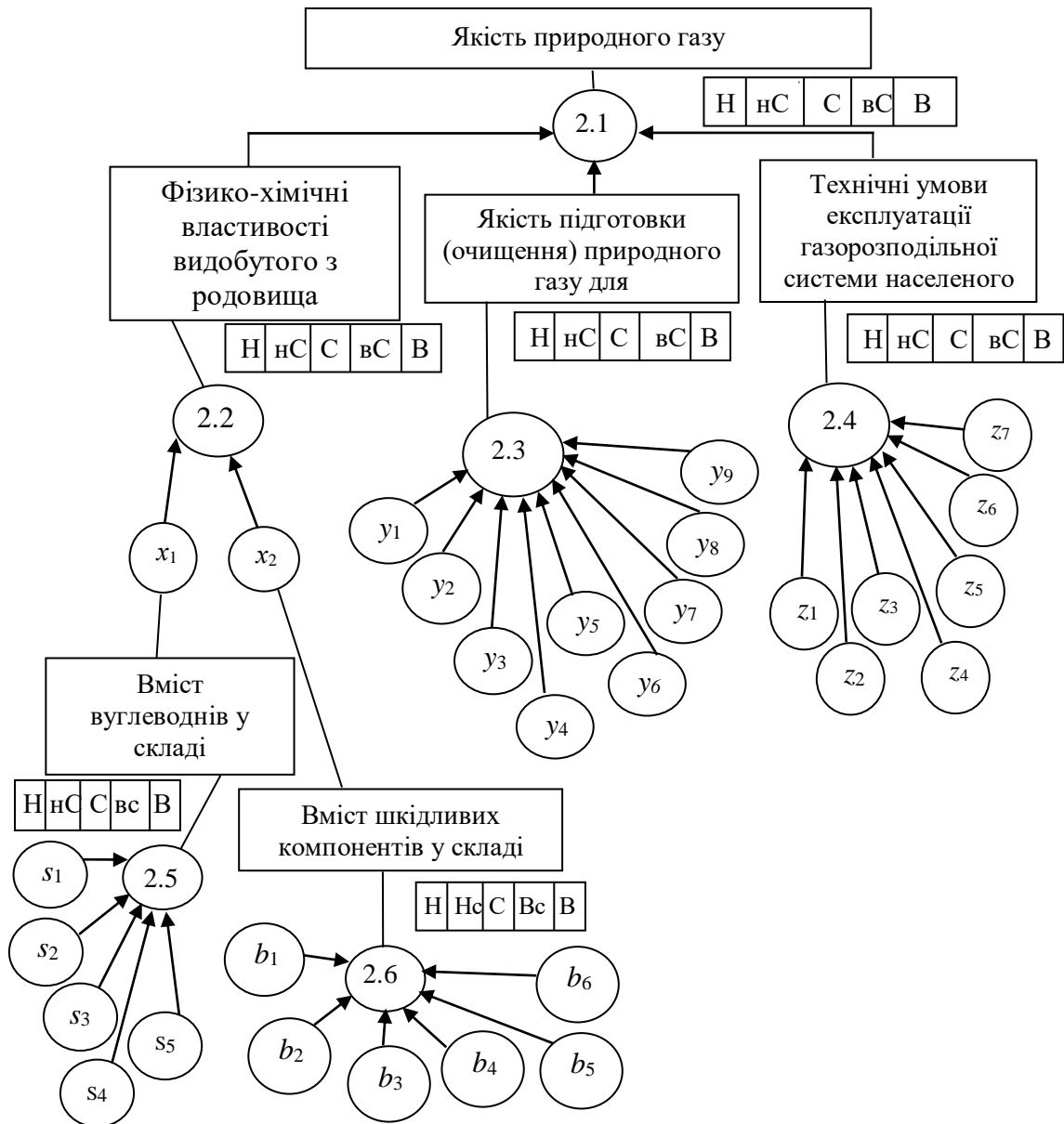


Рис. 2.2. Дерево логічного висновку ієрархічних зв'язків факторів, що впливають на якість природного газу

Представлена методика побудови функції належності розглядається на прикладі фактора s_1 – «вміст метану (CH_4)».

1. Фактор s_1 – «вміст метану (CH_4)»:

$$U(x_1) = 80 \dots 98 \%$$

Для лінгвістичної оцінки фактора s_1 використовується терм-множина:

$T(s_1) = \langle \text{низький (Н)}, \text{нижче середнього (нС)}, \text{середній (С)}, \text{вище середнього (вС)}, \text{високий (В)} \rangle$.

Для відображення парних порівнянь різних величин вмісту метану (CH_4) у складі природного газу з точки зору їх близькості до терму «низький» будується матриця, яка має вигляд

$$A_{\text{низький}}(s_1) = \begin{array}{c} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{array} \begin{array}{ccccc} u_1 & u_2 & u_3 & u_4 & u_5 \\ \hline 1 & 6/8 & 4/8 & 2/8 & 1/8 \\ \hline 8/6 & 1 & 4/6 & 2/6 & 1/6 \\ \hline 8/4 & 6/4 & 1 & 2/4 & 1/4 \\ \hline 8/2 & 6/2 & 4/2 & 1 & 1/2 \\ \hline 8 & 6 & 4 & 2 & 1 \end{array} \quad (2.8)$$

З матриці $A_{\text{низький}}(s_1)$, отримуємо ступені належності елементів $u_1 \dots u_5$ до терму «низький»:

$$\mu_{\text{низький}}(u_1) = \frac{1}{1 + \frac{6}{8} + \frac{4}{8} + \frac{2}{8} + \frac{1}{8}} = 0,381;$$

$$\mu_{\text{низький}}(u_2) = \frac{1}{\frac{8}{6} + 1 + \frac{4}{6} + \frac{2}{6} + \frac{1}{6}} = 0,286;$$

$$\mu_{\text{низький}}(u_3) = \frac{1}{\frac{8}{4} + \frac{6}{4} + 1 + \frac{2}{4} + \frac{1}{4}} = 0,191;$$

$$\mu_{\text{низький}}(u_4) = \frac{1}{\frac{8}{2} + \frac{6}{2} + \frac{4}{2} + 1 + \frac{1}{2}} = 0,095;$$

$$\mu_{\text{низький}}(u_5) = \frac{1}{8 + 6 + 4 + 2 + 1} = 0,048.$$

Аналогічно визначаємо матриці парних порівнянь для термів «нижче середнього», «середній», «вище середнього», «високий» та відповідні ступені належності. Результати наведено в табл. 2.2.

Функції належностей для всіх термів були отримані після розв'язання матриць парних порівнянь. Результати функцій належності, які були отримані, пронормовані на одиницю шляхом ділення на найбільший ступінь належності. В результаті цього вміст метану у складі природного газу представлено у вигляді таких нечітких множин:

- вміст метану (CH₄) у складі природного газу «низький»

$$= \left\{ \frac{1}{80}; \frac{0,75}{84,5}; \frac{0,5}{89}; \frac{0,25}{93,5}; \frac{0,125}{98} \right\};$$

- вміст метану (CH₄) у складі природного газу «нижче середнього»

$$= \left\{ \frac{0,78}{80}; \frac{1}{84,5}; \frac{0,72}{89}; \frac{0,34}{93,5}; \frac{0,11}{98} \right\};$$

- вміст метану (CH₄) у складі природного газу «середній»

$$= \left\{ \frac{0,43}{80}; \frac{0,72}{84,5}; \frac{1}{89}; \frac{0,72}{93,5}; \frac{0,43}{98} \right\};$$

- вміст метану (CH₄) у складі природного газу «вище середнього»

$$= \left\{ \frac{0,34}{80}; \frac{0,56}{84,5}; \frac{0,78}{89}; \frac{1}{93,5}; \frac{0,11}{98} \right\};$$

- вміст метану (CH₄) у складі природного газу «високий»

$$= \left\{ \frac{0,125}{80}; \frac{0,25}{84,5}; \frac{0,5}{89}; \frac{0,75}{93,5}; \frac{1}{98} \right\}.$$

Визначені нечіткі множини свідчать про те, що вміст метану (CH₄) у складі природного газу впливають на оцінювання якості природного газу за таким рейтингом: оцінені у 80 % (низький) – на першому місці по впливу; в 84,5 % (нижче середнього) – на другому; в 89 % (середній) – на третьому; в 93,5 % (вище середнього) – на четвертому; 98 % (високий) – на п'ятому.

Нечіткі множини можна описати за допомогою функцій належності, які наведено на рис. 2.3. Графічні зображення нечітких множин для різних лінгвістичних змінних таких параметрів якості природного газу як фізико-хімічні властивості видобутого з родовища природного газу, якість підготовки (очищення) природного газу для транспортування та технічні умови експлуатації газорозподільної системи населеного пункту наведено на рис. 2.4–2.12.

Таблиця 2.2

Матриці парних порівнянь та ступенів належності

Терми для оцінки	Матриця парних порівнянь	Ступені належності																									
1	2	3																									
Нижче середнього середніх	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>9/7</td><td>5/7</td><td>3/7</td><td>1/7</td></tr> <tr><td>7/9</td><td>1</td><td>5/9</td><td>3/9</td><td>1/9</td></tr> <tr><td>7/5</td><td>9/5</td><td>1</td><td>3/5</td><td>1/5</td></tr> <tr><td>7/3</td><td>9/3</td><td>5/3</td><td>1</td><td>1/3</td></tr> <tr><td>7</td><td>9</td><td>5</td><td>3</td><td>1</td></tr> </table>	1	9/7	5/7	3/7	1/7	7/9	1	5/9	3/9	1/9	7/5	9/5	1	3/5	1/5	7/3	9/3	5/3	1	1/3	7	9	5	3	1	$\mu(u_1) = 0,381$ $\mu(u_2) = 0,286$ $\mu(u_3) = 0,191$ $\mu(u_4) = 0,095$ $\mu(u_5) = 0,048$
1	9/7	5/7	3/7	1/7																							
7/9	1	5/9	3/9	1/9																							
7/5	9/5	1	3/5	1/5																							
7/3	9/3	5/3	1	1/3																							
7	9	5	3	1																							
Середній	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>5/3</td><td>7/3</td><td>5/3</td><td>1</td></tr> <tr><td>3/5</td><td>1</td><td>7/5</td><td>1</td><td>3/5</td></tr> <tr><td>3/7</td><td>5/7</td><td>1</td><td>5/7</td><td>3/7</td></tr> <tr><td>3/5</td><td>1</td><td>7/5</td><td>1</td><td>3/5</td></tr> <tr><td>1</td><td>5/3</td><td>7/3</td><td>5/3</td><td>1</td></tr> </table>	1	5/3	7/3	5/3	1	3/5	1	7/5	1	3/5	3/7	5/7	1	5/7	3/7	3/5	1	7/5	1	3/5	1	5/3	7/3	5/3	1	$\mu(u_1) = 0,131$ $\mu(u_2) = 0,217$ $\mu(u_3) = 0,304$ $\mu(u_4) = 0,217$ $\mu(u_5) = 0,131$
1	5/3	7/3	5/3	1																							
3/5	1	7/5	1	3/5																							
3/7	5/7	1	5/7	3/7																							
3/5	1	7/5	1	3/5																							
1	5/3	7/3	5/3	1																							
Вище середнього	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>5/3</td><td>7/3</td><td>9/3</td><td>1/3</td></tr> <tr><td>3/5</td><td>1</td><td>7/5</td><td>9/5</td><td>1/5</td></tr> <tr><td>3/7</td><td>5/7</td><td>1</td><td>9/7</td><td>1/7</td></tr> <tr><td>3/9</td><td>5/9</td><td>7/9</td><td>1</td><td>1/9</td></tr> <tr><td>3</td><td>5</td><td>7</td><td>9</td><td>1</td></tr> </table>	1	5/3	7/3	9/3	1/3	3/5	1	7/5	9/5	1/5	3/7	5/7	1	9/7	1/7	3/9	5/9	7/9	1	1/9	3	5	7	9	1	$\mu(u_1) = 0,12$ $\mu(u_2) = 0,12$ $\mu(u_3) = 0,28$ $\mu(u_4) = 0,36$ $\mu(u_5) = 0,04$
1	5/3	7/3	9/3	1/3																							
3/5	1	7/5	9/5	1/5																							
3/7	5/7	1	9/7	1/7																							
3/9	5/9	7/9	1	1/9																							
3	5	7	9	1																							

Високий	1	2	4	6	8	$\mu(u_1) = 0,048$ $\mu(u_2) = 0,095$ $\mu(u_3) = 0,191$ $\mu(u_4) = 0,286$ $\mu(u_5) = 0,381$
	1/2	1	4/2	6/2	8/2	
	1/4	2/4	1	6/4	8/4	
	1/6	2/6	4/6	1	8/6	
	1/8	2/8	4/8	6/8	1	

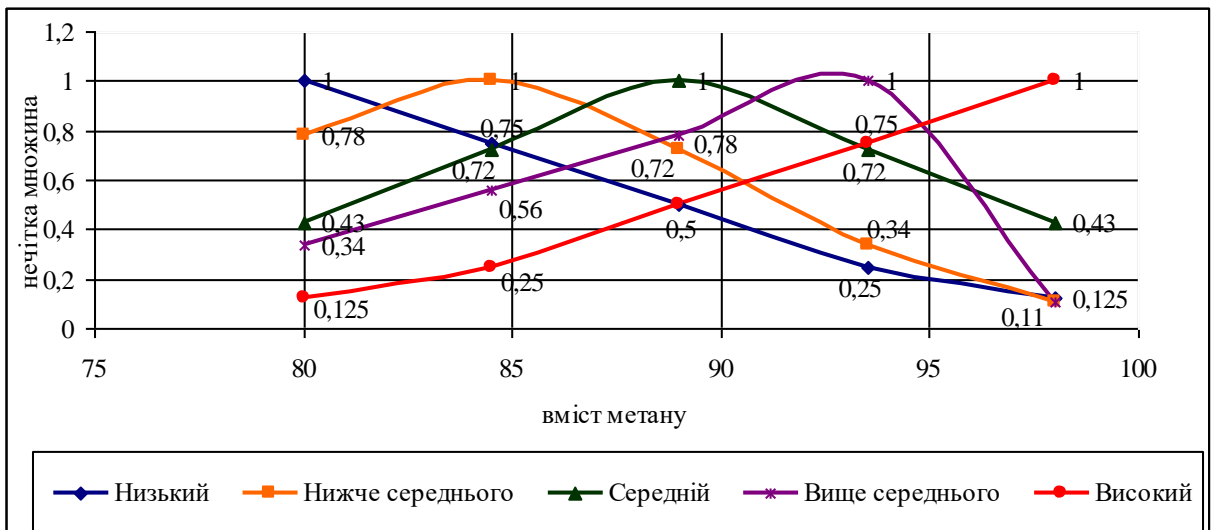


Рис. 2.3. Функції належності для ЛЗ «вміст метану (CH₄) у складі природного газу»

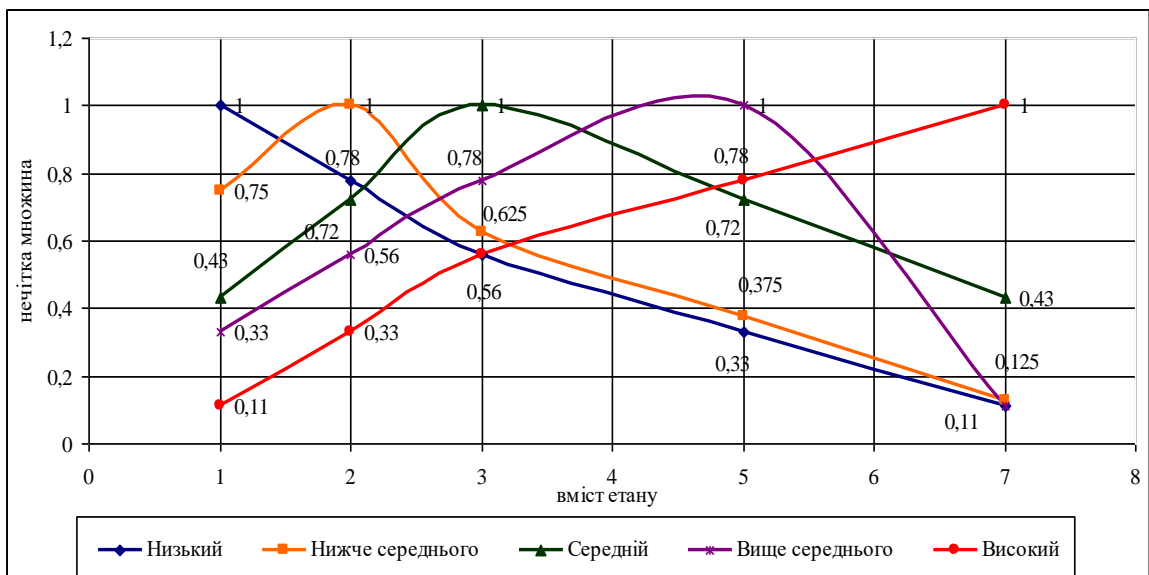


Рис. 2.4. Функції належності для ЛЗ «вміст етану (C₂H₆)»

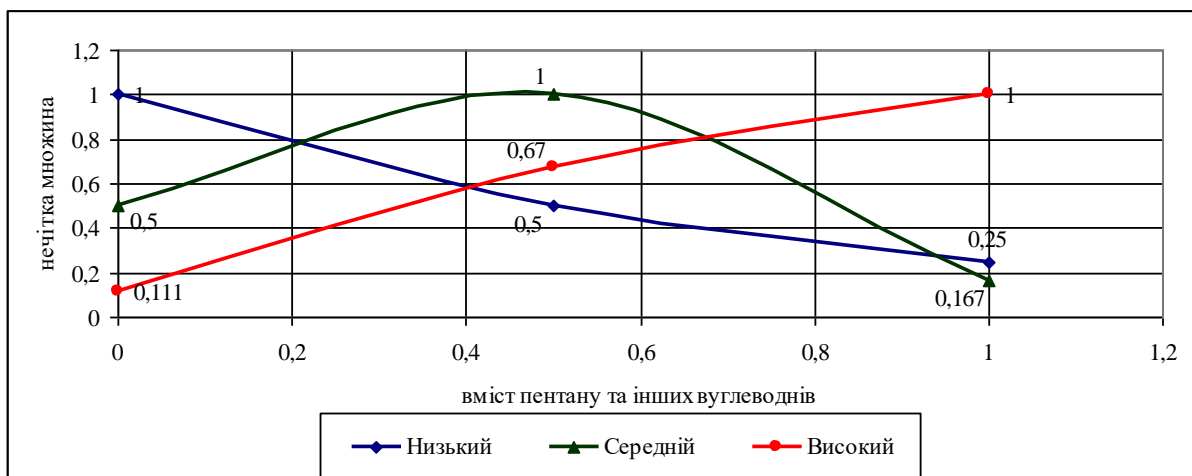
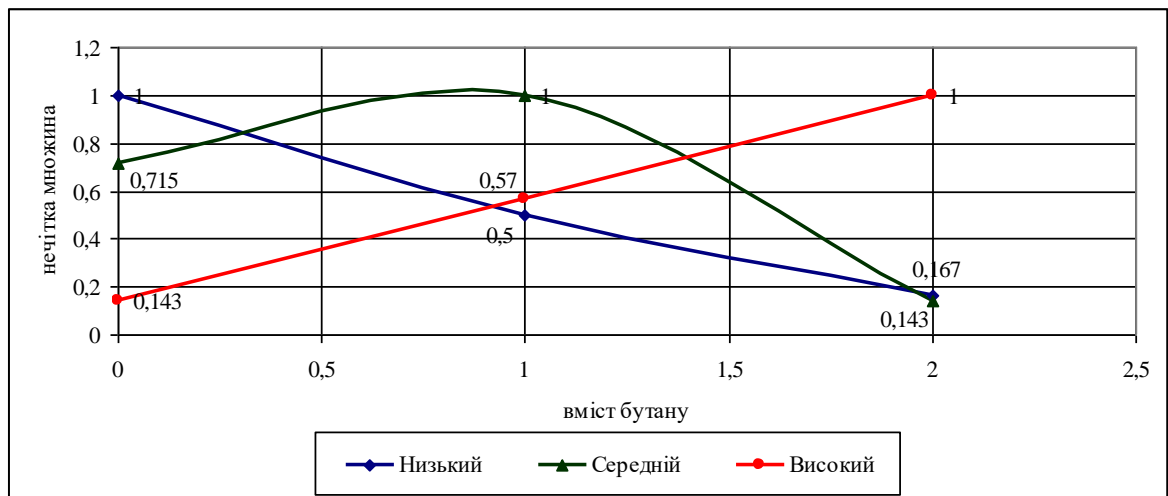
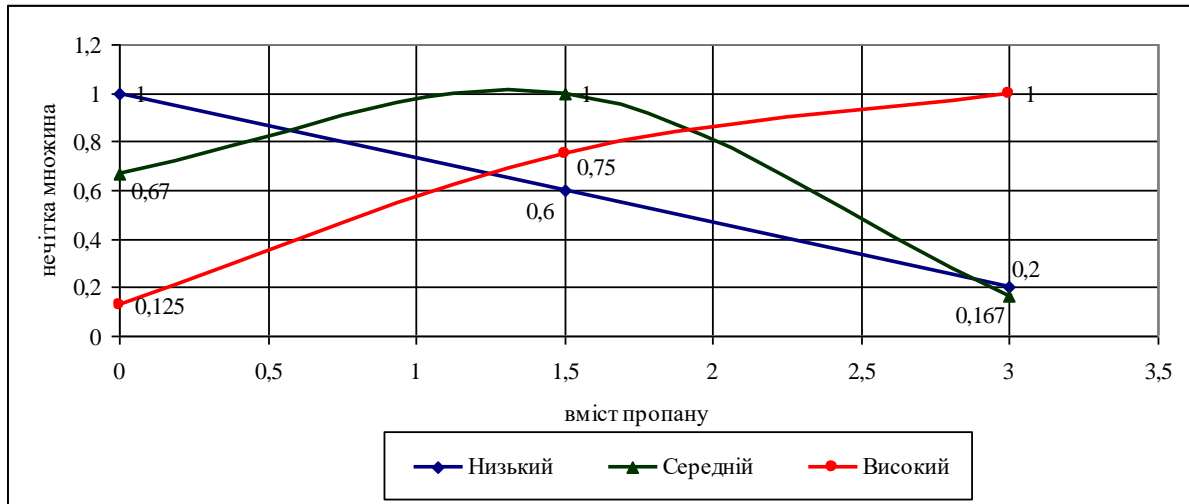


Рис. 2.5. Функції належності для ЛЗ, що описують фізико-хімічні властивості видобутого з родовища природного газу (вміст вуглеводнів у складі природного газу)

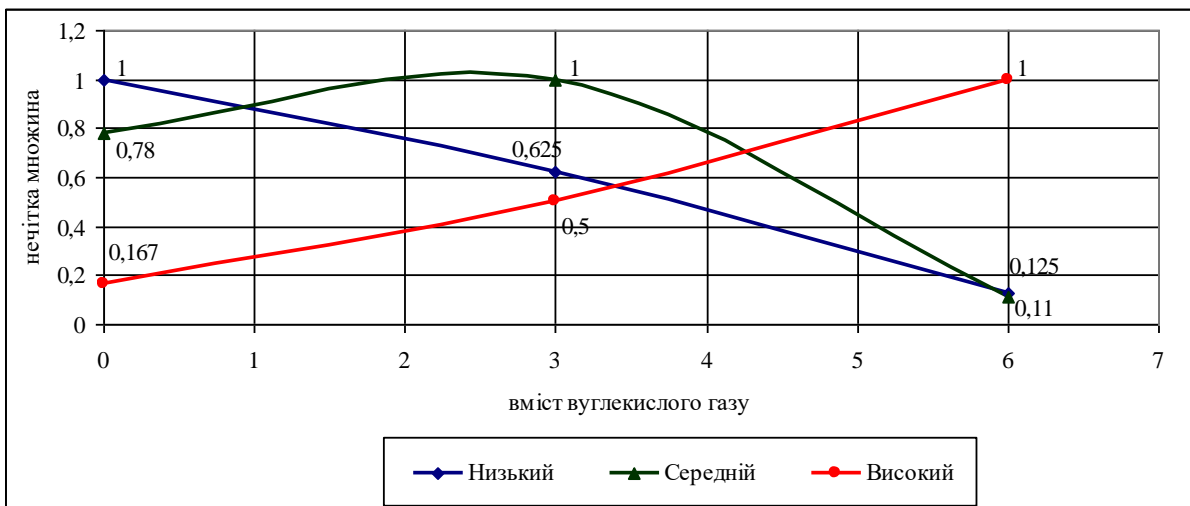
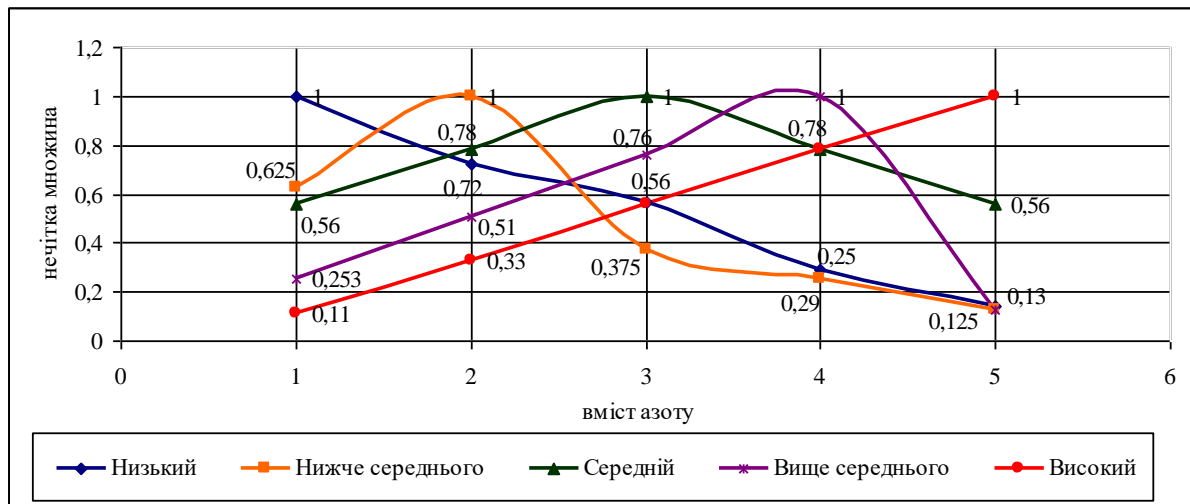
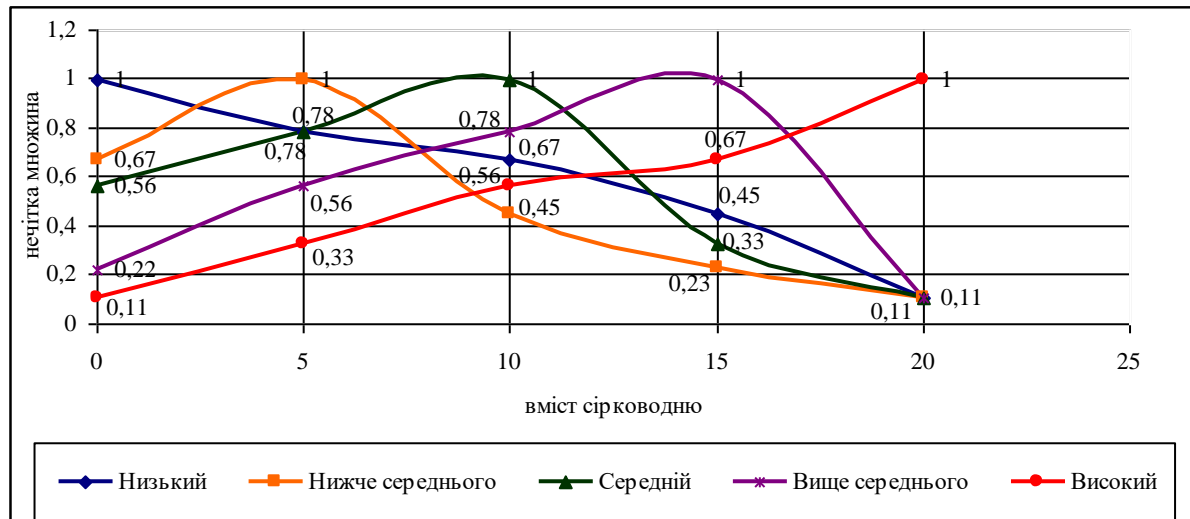


Рис. 2.6. Функції належності для ЛЗ, що описують фізико-хімічні властивості видобутого з родовища природного газу (вміст шкідливих компонентів у складі природного газу)

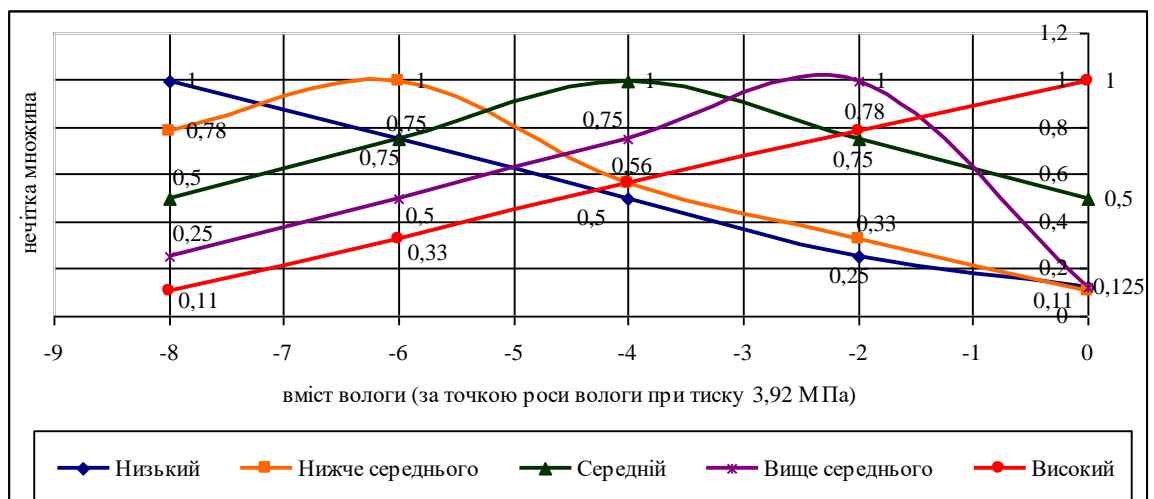
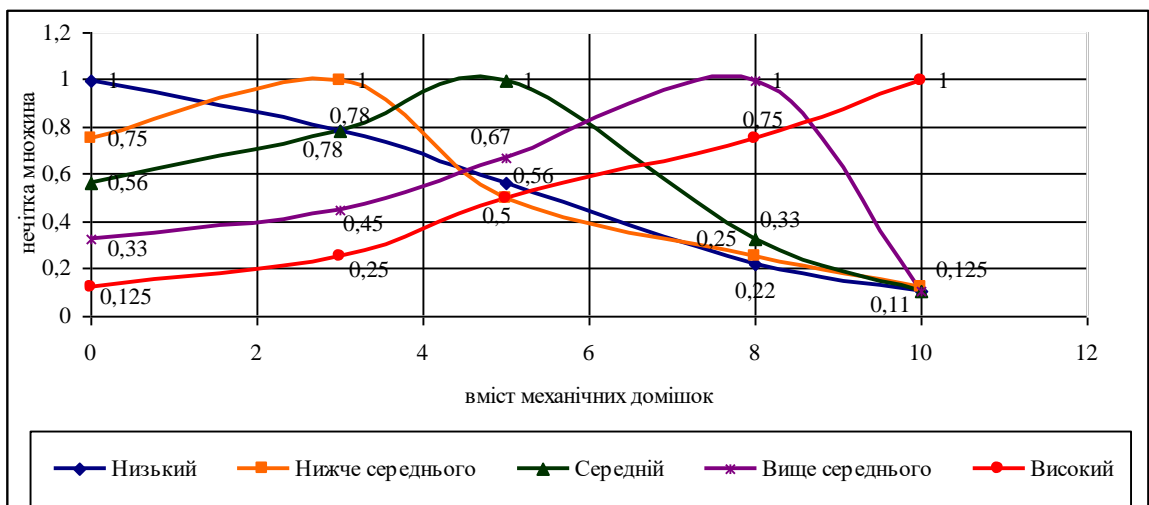
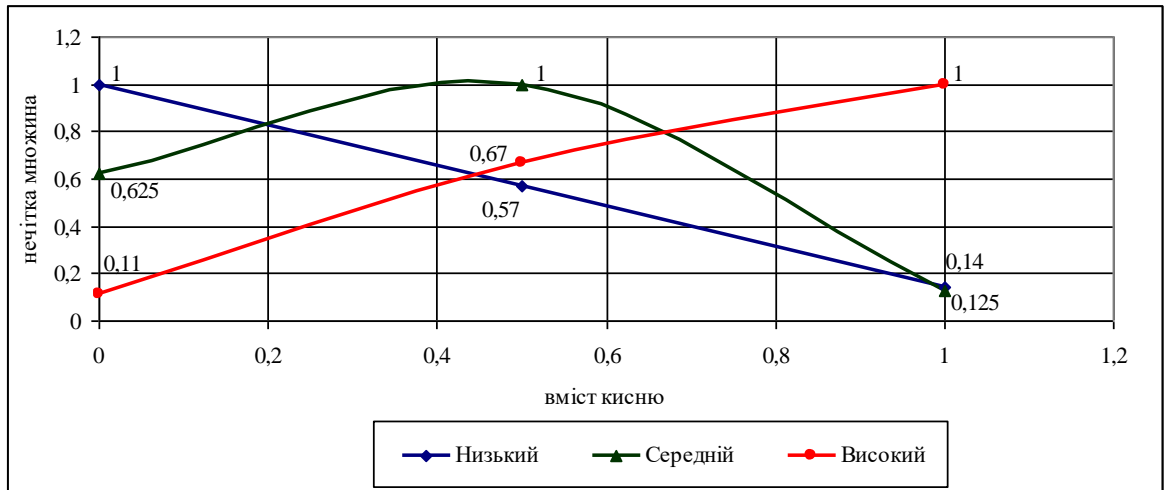


Рис. 2.7. Функції належності для ЛЗ, що описують фізико-хімічні властивості видобутого з родовища природного газу (вміст шкідливих компонентів у складі природного газу)

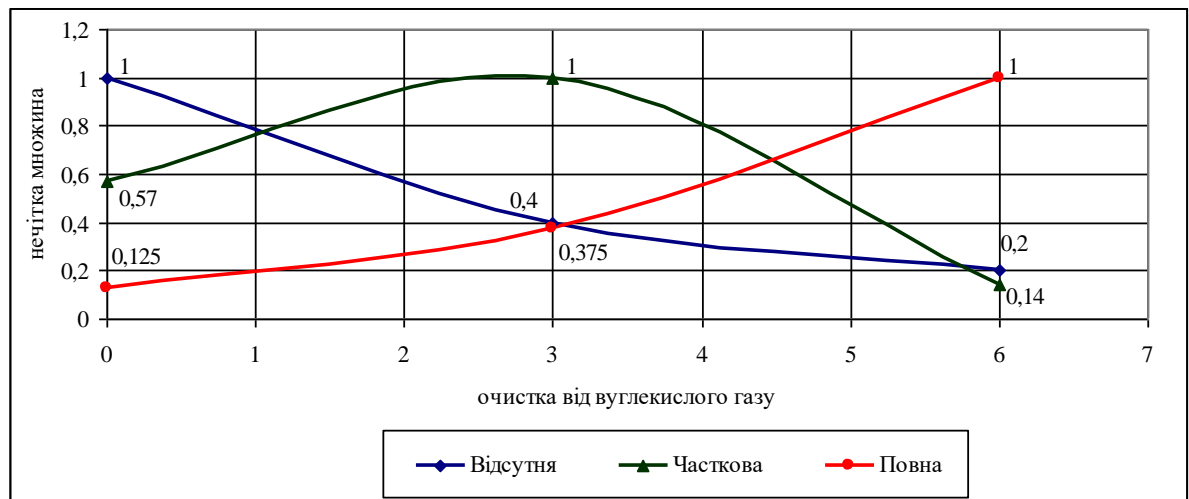
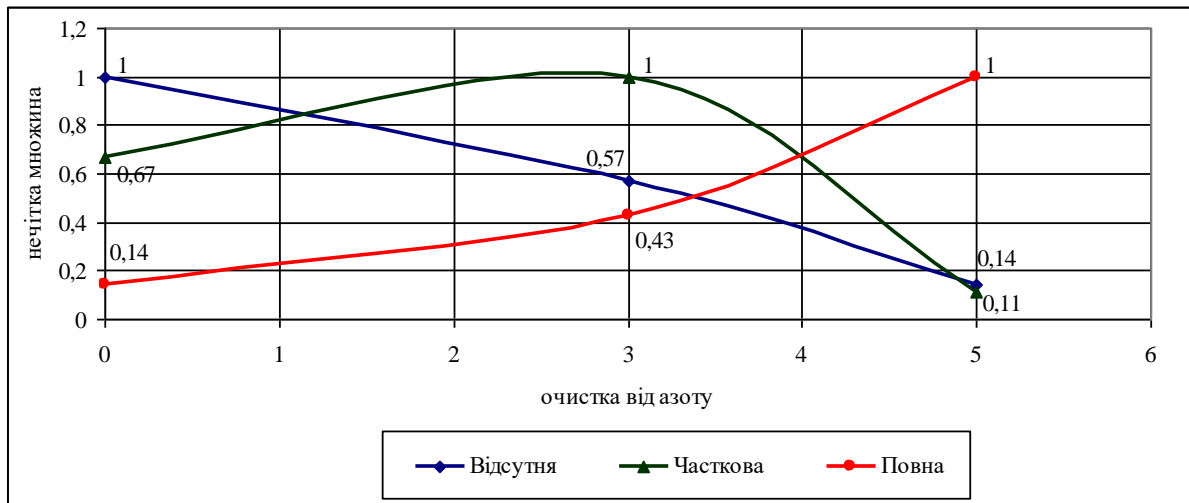
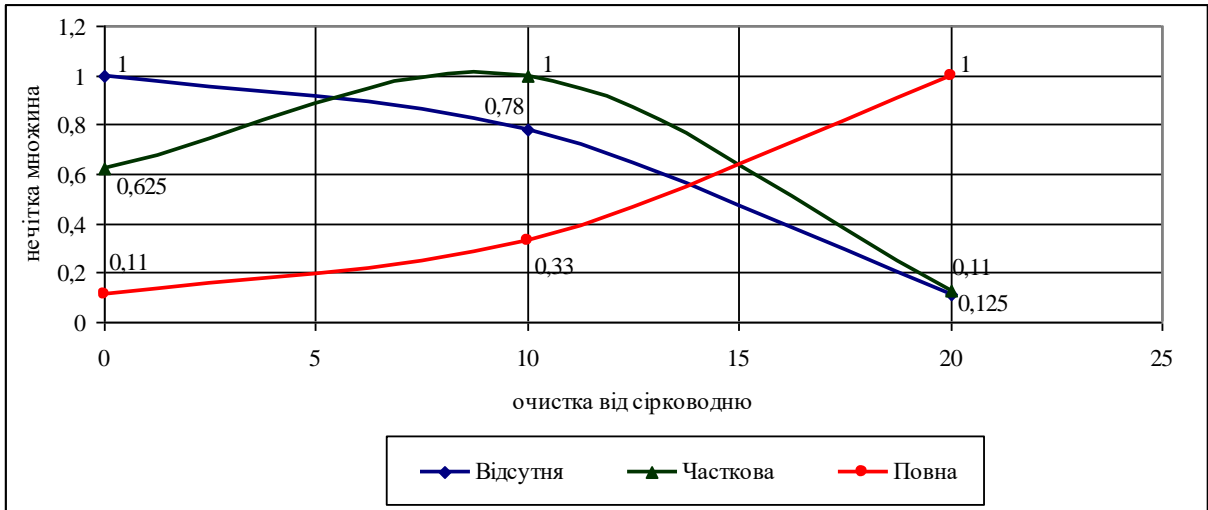


Рис. 2.8. Функції належності для ЛЗ, що описують якість підготовки (очищення) природного газу для транспортування

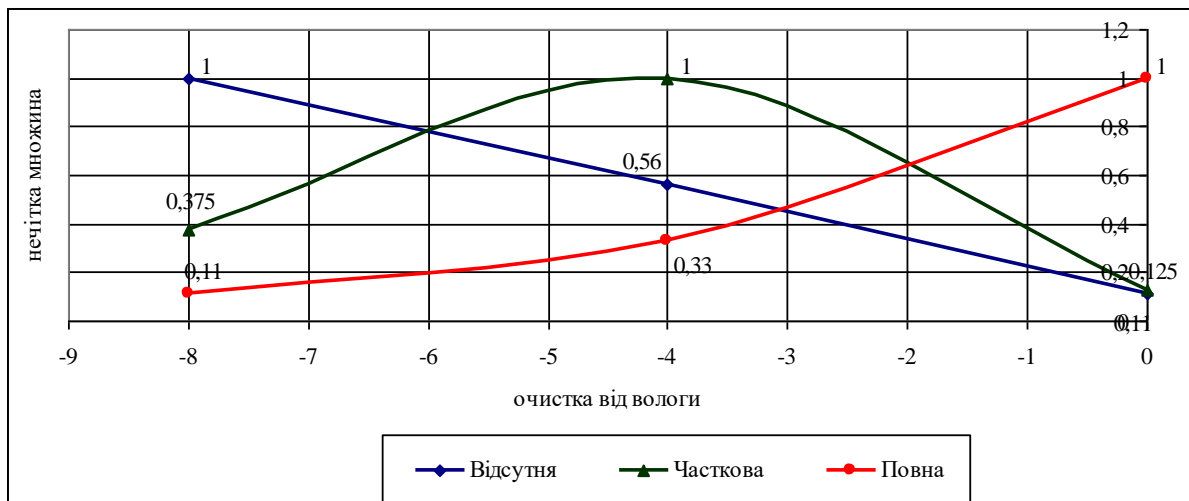
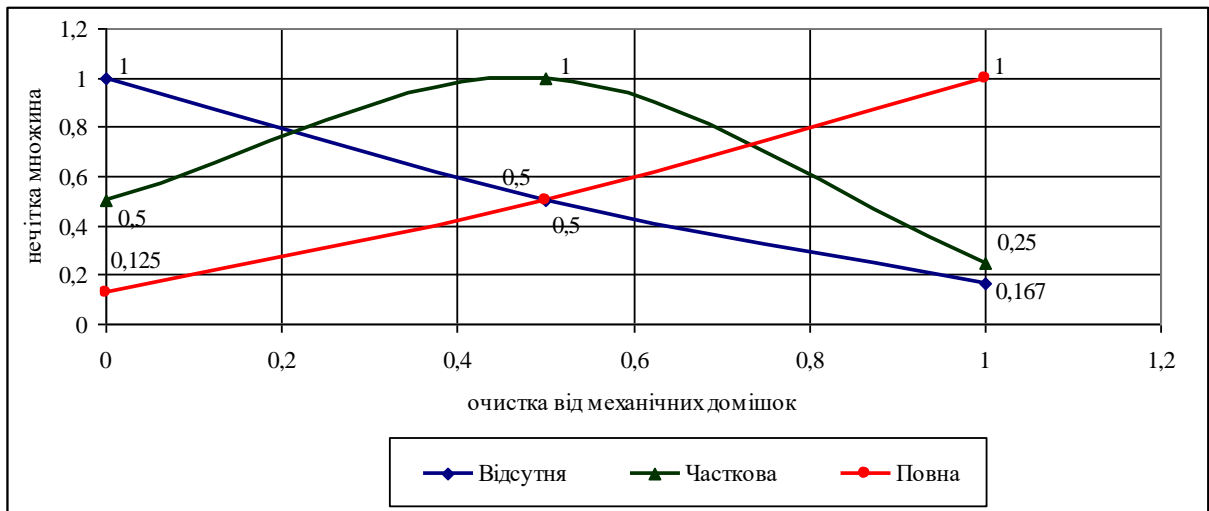
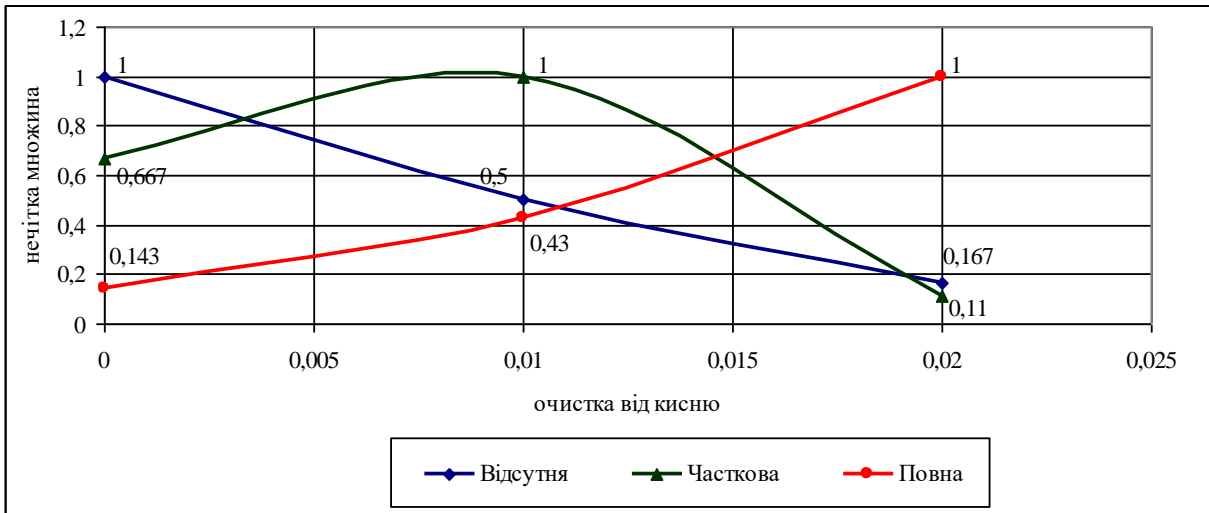


Рис. 2.9. Функції належності для ЛЗ, що описують якість підготовки (очищення) природного газу для транспортування

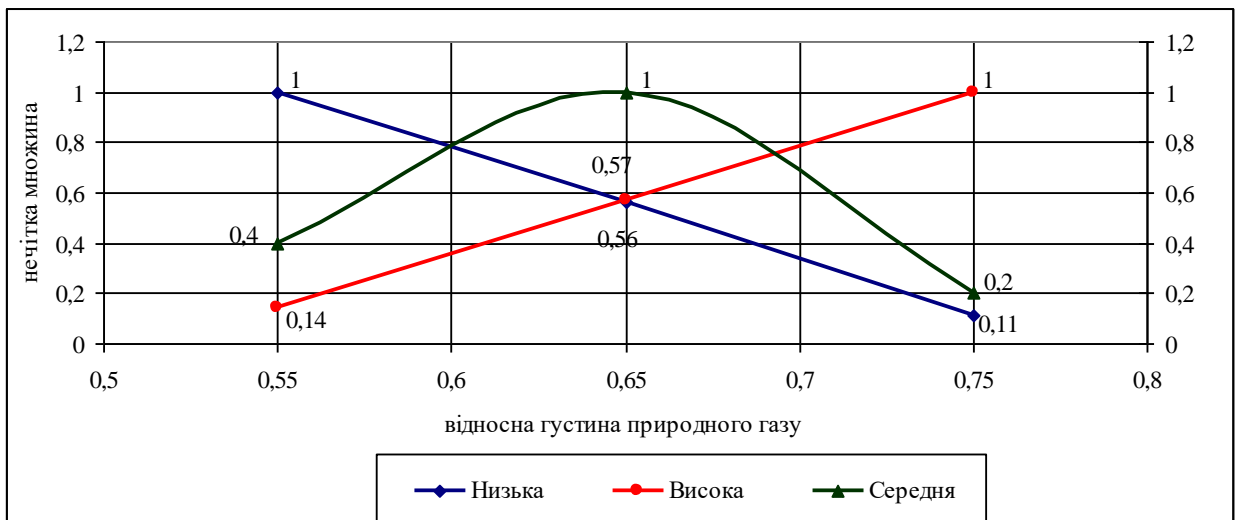
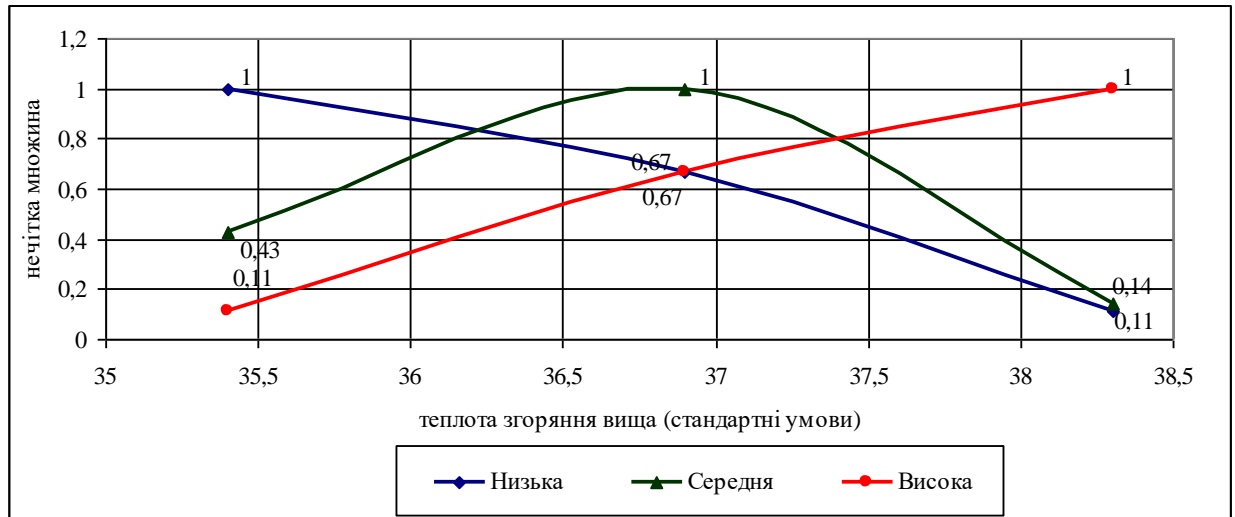
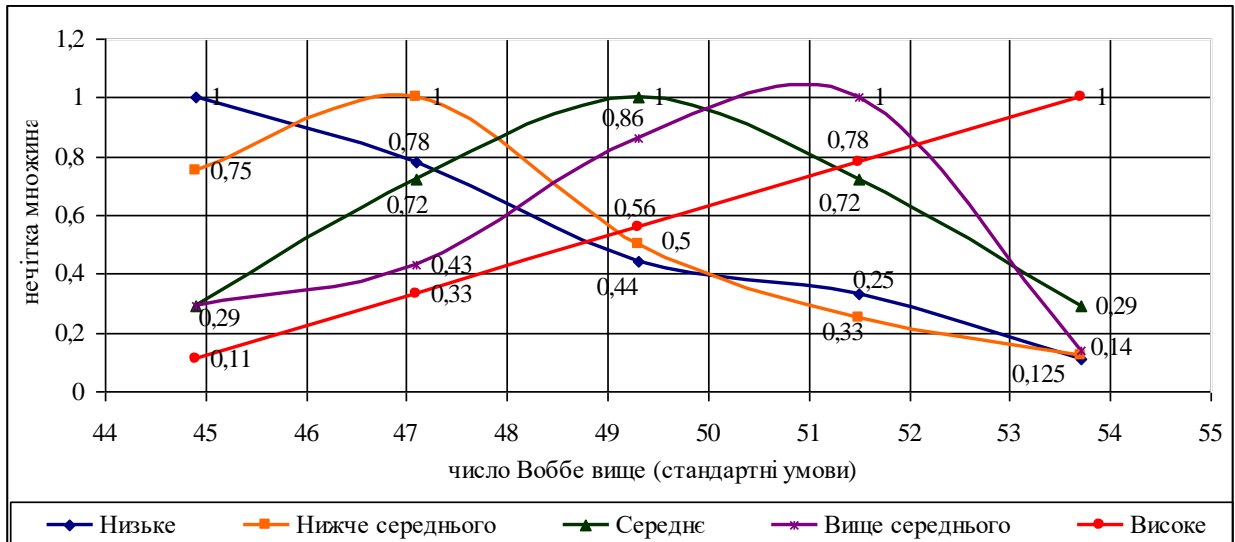


Рис. 2.10. Функції належності для ЛЗ, що описують якість підготовки (очищення) природного газу для транспортування

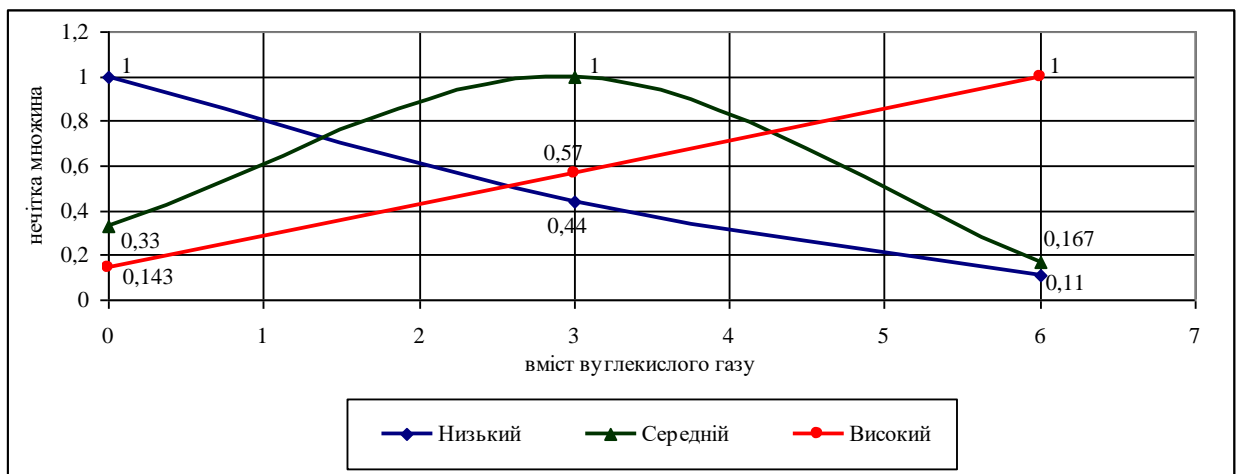
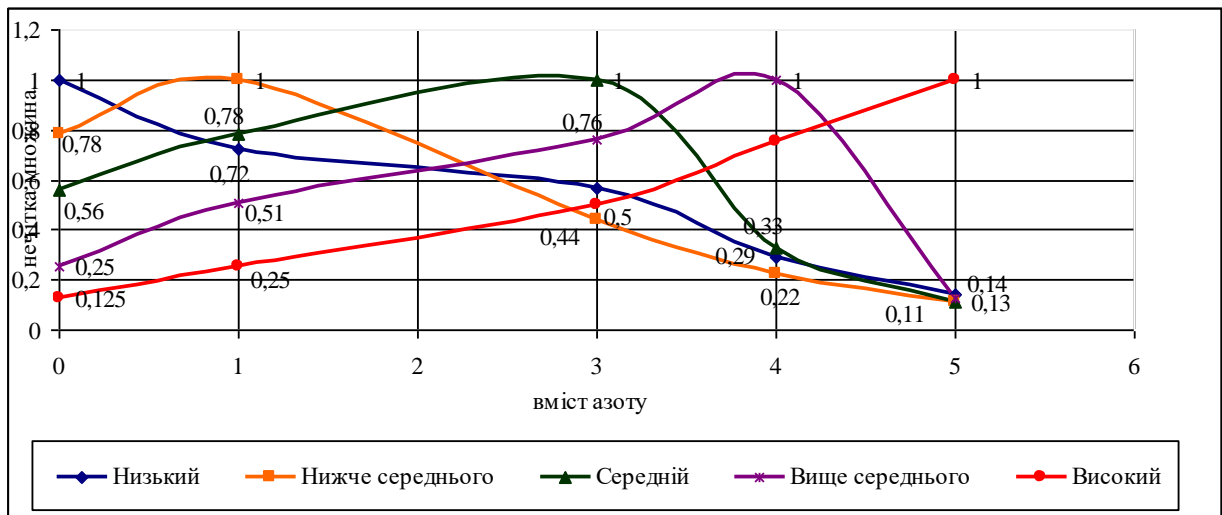
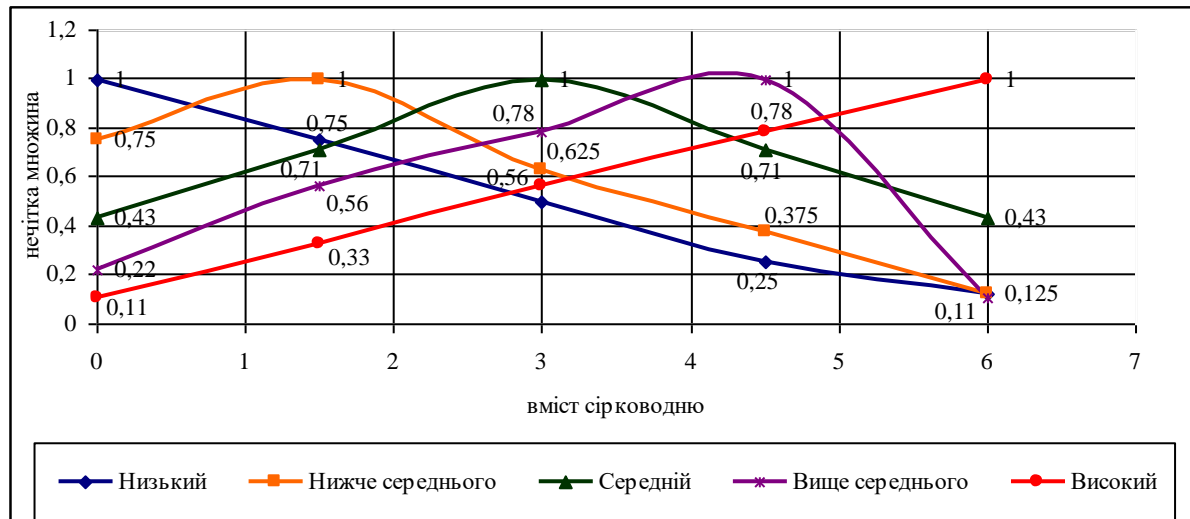


Рис. 2.11. Функції належності для ЛЗ, що описують технічні умови експлуатації газорозподільної системи населеного пункту

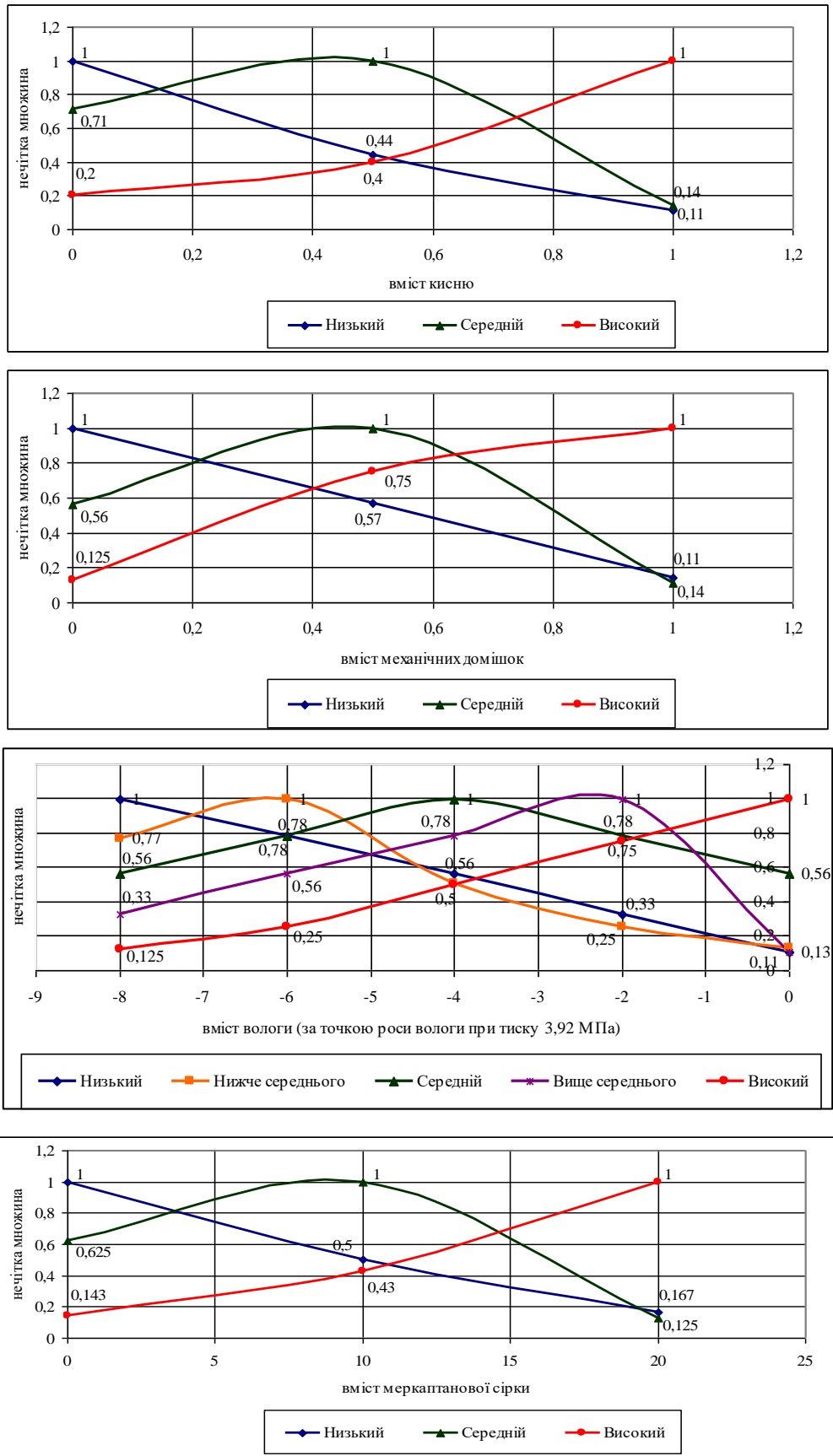


Рис. 2.12. Функції належності для ЛЗ, що описують технічні умови експлуатації газорозподільної системи населеного пункту

2.2. Моделювання інтелектуальної підтримки оцінювання якості природного газу

Оцінка рівнів лінгвістичних змінних, що встановлює зв'язок між факторами, що впливають на якість природного газу ($A_{япг}$) з фізико-хімічними властивостями видобутого з родовища природного газу (X), якістю підготовки (очищення) природного газу для транспортування (Y) та технічними умовами експлуатації газорозподільної системи населеного пункту (Z), виконується з використанням системи терм-множини

$T(A_{япг}) = \langle \text{низька, нижче середнього, середня, вище середнього, висока} \rangle$;

$T(X) = \langle \text{низькі, нижче середніх, середні, вище середніх, високі} \rangle$;

$T(Y) = \langle \text{низька, нижче середнього, середня, вище середнього, висока} \rangle$;

$T(Z) = \langle \text{низькі, нижче середнього, середні, вище середнього, високі} \rangle$.

Нечітку матрицю знань з урахуванням введених якісних термів для моделювання залежності (2.1) наведено в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Матриця знань для залежності (2.1)

ЯКЩО			ТО
Фізико-хімічні властивості видобутого з родовища природного газу (X)	Якість підготовки (очищення) природного газу для транспортування (Y)	Технічні умови експлуатації газорозподільної системи населеного пункту (Z)	Якість природного газу ($A_{япг}$)
1	2	3	4
Низькі (Н)	Низька (Н)	Низькі (Н)	Низька (Н)
Низькі (Н)	Нижче середнього (нС)	Низькі (Н)	
Низькі (Н)	Низька (Н)	Нижче середнього (нС)	

Продовження табл. 2.3

1	2	3	4
Низькі (Н)	Середня (С)	Середні (С)	Нижче середнього (нС)
Нижче середніх (нС)	Нижче середнього (нС)	Нижче середнього (нС)	
Середні (С)	Низька (Н)	Нижче середнього (нС)	
Нижче середніх (нС)	Середня (С)	Середні (С)	Середня (С)
Середні (С)	Середня (С)	Середні (С)	
Середні (С)	Нижче середнього (нС)	Вище середнього (вС)	
Вище середніх (вС)	Вище середнього (вС)	Вище середнього (вС)	Вище середнього (вС)
Середні (С)	Вище середнього (вС)	Високі (В)	
Вище середніх (вС)	Висока (В)	Середні (С)	
Високі (В)	Висока (В)	Вище середнього (вС)	Висока (В)
Високі (В)	Вище середнього (вС)	Високі (В)	
Високі (В)	Висока (В)	Високі (В)	

Лінгвістичним висловлюванням, які наведені в табл. 2.3, відповідає система нечітких логічних рівнянь, котрі характеризують поверхню належності змінних за відповідним термом:

$$\begin{aligned} \mu_H(A_{ЯПГ}) = & \mu_H(X) \wedge \mu_H(Y) \wedge \mu_H(Z) \vee \mu_H(X) \wedge \mu_{нС}(Y) \wedge \\ & \wedge \mu_H(Z) \vee \mu_H(X) \wedge \mu_H(Y) \wedge \mu_{нС}(Z); \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} \mu_{нС}(A_{ЯПГ}) = & \mu_H(X) \wedge \mu_C(Y) \wedge \mu_C(Z) \vee \mu_{нС}(X) \wedge \mu_{нС}(Y) \wedge \\ & \wedge \mu_{нС}(Z) \vee \mu_C(X) \wedge \mu_H(Y) \wedge \mu_{нС}(Z); \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} \mu_C(A_{ЯПГ}) = & \mu_{нС}(X) \wedge \mu_C(Y) \wedge \mu_C(Z) \vee \mu_C(X) \wedge \mu_C(Y) \wedge \\ & \wedge \mu_C(Z) \vee \mu_C(X) \wedge \mu_{нС}(Y) \wedge \mu_{вС}(Z); \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\mu_{вС}(A_{ЯПГ}) = \mu_{вС}(X) \wedge \mu_{вС}(Y) \wedge \mu_{вС}(Z) \vee \mu_C(X) \wedge \mu_{вС}(Y) \wedge$$

$$\wedge \mu_B(Z) \vee \mu_{\text{сC}}(X) \wedge \mu_B(Y) \wedge \mu_C(Z); \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} \mu_B(A_{\text{ЯПГ}}) = & \mu_B(X) \wedge \mu_B(Y) \wedge \mu_{\text{сC}}(Z) \vee \mu_B(X) \wedge \mu_{\text{сC}}(Y) \wedge \\ & \wedge \mu_B(Z) \vee \mu_B(X) \wedge \mu_B(Y) \wedge \mu_B(Z). \end{aligned} \quad (2.13)$$

2.2.1. Моделювання оцінювання якості природного газу на рівні фізико-хімічних властивостей видобутого з родовища природного газу

Оцінка рівнів лінгвістичних змінних, що зв'язує фізико-хімічні властивості видобутого з родовища природного газу (X) з вмістом вуглеводнів у складі природного газу (x_1) та вмістом шкідливих компонентів у складі газу (x_2), виконується з використанням системи терм-множин:

$T(X) = \langle \text{низькі, нижче середнього, середні, вище середнього, високі} \rangle;$

$T(x_1) = \langle \text{низький, нижче середнього, середній, вище середнього, високий} \rangle;$

$T(x_2) = \langle \text{низький, нижче середнього, середній, вище середнього, високий} \rangle.$

Нечітку матрицю знань з урахуванням введених якісних терм для моделювання залежності (2.2) наведено в табл. 2.4.

Таблиця 2.4

Матриця знань для залежності (2.2)

ЯКЩО		ТО
Вміст вуглеводнів у складі природного газу (x_1)	Вміст шкідливих компонентів у складі газу (x_2)	Фізико-хімічні властивості видобутого з родовища природного газу (X)
1	2	3
Низький (Н)	Низький (Н)	Низькі (Н)
Низький (Н)	Нижче середнього (нС)	
Нижче середнього (нС)	Низький (Н)	
Нижче середнього (нС)	Нижче середнього (нС)	Нижче середнього (нС)
Середній (С)	Нижче середнього (нС)	
Нижче середнього (нС)	Середній (С)	
Середній (С)	Середній (С)	Середні (С)
Середній (С)	Вище середнього (вС)	
Вище середнього (вС)	Середній (С)	

Продовження табл. 2.4

1	2	3
Вище середнього (вС)	Вище середнього (вС)	Вище середнього (вС)
Середній (С)	Високий (В)	
Високий (В)	Середній (С)	
Високий (В)	Високий (В)	Високі (В)
Вище середнього (вС)	Високий (В)	
Високий (В)	Вище середнього (вС)	

Лінгвістичним висловлюванням, які наведені в табл. 2.4, відповідає система нечітких логічних рівнянь, котрі характеризують поверхню належності змінних за відповідним термом:

$$\begin{aligned} \mu_H(X) = & \mu_H(x_1) \wedge \mu_H(x_2) \vee \mu_H(x_1) \wedge \\ & \wedge \mu_{nC}(x_2) \vee \mu_{nC}(x_1) \wedge \mu_H(x_2); \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} \mu_{nC}(X) = & \mu_{nC}(x_1) \wedge \mu_{nC}(x_2) \vee \mu_C(x_1) \wedge \\ & \wedge \mu_{nC}(x_2) \vee \mu_{nC}(x_1) \wedge \mu_C(x_2); \end{aligned} \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned} \mu_C(X) = & \mu_C(x_1) \wedge \mu_C(x_2) \vee \mu_C(x_1) \wedge \\ & \wedge \mu_{eC}(x_2) \vee \mu_{eC}(x_1) \wedge \mu_C(x_2); \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned} \mu_{eC}(X) = & \mu_{eC}(x_1) \wedge \mu_{eC}(x_2) \vee \mu_C(x_1) \wedge \\ & \wedge \mu_B(x_2) \vee \mu_B(x_1) \wedge \mu_C(x_2); \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned} \mu_B(X) = & \mu_B(x_1) \wedge \mu_B(x_2) \vee \mu_{eC}(x_1) \wedge \\ & \wedge \mu_B(x_2) \vee \mu_B(x_1) \wedge \mu_{eC}(x_2). \end{aligned} \quad (2.18)$$

Нечітку матрицю знань з урахуванням введених якісних терм для моделювання залежності (2.5) наведено в табл. 2.5.

Лінгвістичним висловлюванням, які наведені в табл. 2.5, відповідає система нечітких логічних рівнянь, які характеризують поверхню належності змінних за відповідним термом:

$$\begin{aligned} \mu_H(x_1) = & \mu_H(s_1) \wedge \mu_H(s_2) \wedge \mu_H(s_3) \wedge \mu_H(s_4) \wedge \mu_H(s_5) \vee \\ & \vee \mu_{nC}(s_1) \wedge \mu_H(s_2) \wedge \mu_H(s_3) \wedge \mu_H(s_4) \wedge \mu_H(s_5) \vee \\ & \vee \mu_H(s_1) \wedge \mu_{nC}(s_2) \wedge \mu_H(s_3) \wedge \mu_H(s_4) \wedge \mu_H(s_5); \end{aligned} \quad (2.19)$$

$$\begin{aligned}
\mu_{nC}(x_1) &= \mu_{nC}(s_1) \wedge \mu_{nC}(s_2) \wedge \mu_C(s_3) \wedge \mu_C(s_4) \wedge \mu_H(s_5) \vee \\
&\vee \mu_C(s_1) \wedge \mu_C(s_2) \wedge \mu_H(s_3) \wedge \mu_H(s_4) \wedge \mu_H(s_5) \vee \\
&\vee \mu_{nC}(s_1) \wedge \mu_{nC}(s_2) \wedge \mu_C(s_3) \wedge \mu_H(s_4) \wedge \mu_C(s_5);
\end{aligned} \tag{2.20}$$

$$\begin{aligned}
\mu_C(x_1) &= \mu_C(s_1) \wedge \mu_C(s_2) \wedge \mu_C(s_3) \wedge \mu_C(s_4) \wedge \mu_C(s_5) \vee \\
&\vee \mu_{nC}(s_1) \wedge \mu_{nC}(s_2) \wedge \mu_C(s_3) \wedge \mu_C(s_4) \wedge \mu_C(s_5) \vee \\
&\vee \mu_C(s_1) \wedge \mu_C(s_2) \wedge \mu_B(s_3) \wedge \mu_C(s_4) \wedge \mu_H(s_5);
\end{aligned} \tag{2.21}$$

$$\begin{aligned}
\mu_{nC}(x_1) &= \mu_{nC}(s_1) \wedge \mu_{nC}(s_2) \wedge \mu_B(s_3) \wedge \mu_C(s_4) \wedge \mu_C(s_5) \vee \\
&\vee \mu_B(s_1) \wedge \mu_C(s_2) \wedge \mu_C(s_3) \wedge \mu_B(s_4) \wedge \mu_C(s_5) \vee \\
&\vee \mu_{nC}(s_1) \wedge \mu_{nC}(s_2) \wedge \mu_C(s_3) \wedge \mu_C(s_4) \wedge \mu_B(s_5);
\end{aligned} \tag{2.22}$$

$$\begin{aligned}
\mu_B(x_1) &= \mu_B(s_1) \wedge \mu_B(s_2) \wedge \mu_B(s_3) \wedge \mu_B(s_4) \wedge \mu_B(s_5) \vee \\
&\vee \mu_{nC}(s_1) \wedge \mu_B(s_2) \wedge \mu_B(s_3) \wedge \mu_B(s_4) \wedge \mu_B(s_5) \vee \\
&\vee \mu_B(s_1) \wedge \mu_{nC}(s_2) \wedge \mu_B(s_3) \wedge \mu_B(s_4) \wedge \mu_B(s_5).
\end{aligned} \tag{2.23}$$

Нечітку матрицю знань з урахуванням введених якісних терм для моделювання залежності (2.6) наведено в табл. 2.6.

Лінгвістичним висловлюванням, які наведені в табл. 2.6, відповідає система нечітких логічних рівнянь, які характеризують поверхню належності змінних за відповідним термом:

$$\begin{aligned}
\mu_H(x_2) &= \mu_H(b_1) \wedge \mu_H(b_2) \wedge \mu_H(b_3) \wedge \mu_H(b_4) \wedge \mu_H(b_5) \wedge \mu_H(b_6) \vee \\
&\vee \mu_{nC}(b_1) \wedge \mu_{nC}(b_2) \wedge \mu_H(b_3) \wedge \mu_H(b_4) \wedge \mu_H(b_5) \wedge \mu_H(b_6) \vee \\
&\vee \mu_H(b_1) \wedge \mu_H(b_2) \wedge \mu_H(b_3) \wedge \mu_H(b_4) \wedge \mu_{nC}(b_5) \wedge \mu_{nC}(b_6);
\end{aligned} \tag{2.24}$$

$$\begin{aligned}
\mu_{nC}(x_2) &= \mu_{nC}(b_1) \wedge \mu_{nC}(b_2) \wedge \mu_C(b_3) \wedge \mu_H(b_4) \wedge \mu_{nC}(b_5) \wedge \mu_{nC}(b_6) \vee \\
&\vee \mu_C(b_1) \wedge \mu_C(b_2) \wedge \mu_H(b_3) \wedge \mu_H(b_4) \wedge \mu_{nC}(b_5) \wedge \mu_{nC}(b_6) \vee \\
&\vee \mu_H(b_1) \wedge \mu_H(b_2) \wedge \mu_C(b_3) \wedge \mu_C(b_4) \wedge \mu_{nC}(b_5) \wedge \mu_{nC}(b_6);
\end{aligned} \tag{2.25}$$

$$\begin{aligned}
\mu_C(x_2) &= \mu_C(b_1) \wedge \mu_C(b_2) \wedge \mu_C(b_3) \wedge \mu_C(b_4) \wedge \mu_C(b_5) \wedge \mu_C(b_6) \vee \\
&\vee \mu_{nC}(b_1) \wedge \mu_{nC}(b_2) \wedge \mu_C(b_3) \wedge \mu_C(b_4) \wedge \mu_{nC}(b_5) \wedge \mu_{nC}(b_6) \vee \\
&\vee \mu_C(b_1) \wedge \mu_C(b_2) \wedge \mu_B(b_3) \wedge \mu_B(b_4) \wedge \mu_H(b_5) \wedge \mu_H(b_6);
\end{aligned} \tag{2.26}$$

Таблиця 2.5

Матриця знань для залежності (2.5)

ЯКЩО					ТО
Вміст метану (CH_4) (s_1)	Вміст етану (C_2H_6) (s_2)	Вміст пропану (C_3H_8) (s_3)	Вміст бутану (C_4H_{10}) (s_4)	Вміст пентану та інших вуглеводнів (C_5H_{12}) (s_5)	Вміст вуглеводнів (x_1) у складі природного газу
Низький (Н)	Низький (Н)	Низький (Н)	Низький (Н)	Низький (Н)	Низький (Н)
Нижче середнього (нС)	Низький (Н)	Низький (Н)	Низький (Н)	Низький (Н)	
Низький (Н)	Нижче середнього (нС)	Низький (Н)	Низький (Н)	Низький (Н)	
Нижче середнього (нС)	Нижче середнього (нС)	Середній (С)	Середній (С)	Низький (Н)	Нижче середнього (нС)
Середній (С)	Середній (С)	Низький (Н)	Низький (Н)	Низький (Н)	
Нижче середнього (нС)	Нижче середнього (нС)	Середній (С)	Низький (Н)	Середній (С)	
Середній (С)	Середній (С)	Середній (С)	Середній (С)	Середній (С)	Середній (С)
Вище середнього (вС)	Нижче середнього (нС)	Середній (С)	Середній (С)	Середній (С)	
Середній (С)	Середній (С)	Високий (В)	Середній (С)	Низький (Н)	
Вище середнього (вС)	Вище середнього (вС)	Високий (В)	Середній (С)	Середній (С)	Вище середнього (вС)
Високий (В)	Середній (С)	Середній (С)	Високий (В)	Середній (С)	
Вище середнього (вС)	Вище середнього (вС)	Середній (С)	Середній (С)	Високий (В)	
Високий (В)	Високий (В)	Високий (В)	Високий (В)	Високий (В)	Високий (В)
Вище середнього (вС)	Високий (В)	Високий (В)	Високий (В)	Високий (В)	
Високий (В)	Вище середнього (вС)	Високий (В)	Високий (В)	Високий (В)	

Таблиця 2.6

Матриця знань для залежності (2.6)

ЯКЦО						ТО
Вміст сірководню (H ₂ S) (b ₁)	Вміст азоту (N ₂) (b ₂)	Вміст вуглекислого газу (CO ₂) (b ₃)	Вміст кисню (O ₂) (b ₄)	Вміст механічних домішок (b ₅)	Вміст вологи (за точкою роси вологи при тиску 3,92 МПа) (b ₆)	Вміст (x ₂) шкідливих компонентів у складі газу
Низький (Н)	Низький (Н)	Низький (Н)	Низький (Н)	Низький (Н)	Низький (Н)	Низький (Н)
Нижче середнього (нС)	Нижче середнього (нС)	Низький (Н)	Низький (Н)	Низький (Н)	Низький (Н)	
Низький (Н)	Низький (Н)	Низький (Н)	Низький (Н)	Нижче середнього (нС)	Нижче середнього (нС)	
Нижче середнього (нС)	Нижче середнього (нС)	Середній (С)	Низький (Н)	Нижче середнього (нС)	Нижче середнього (нС)	Нижче середнього (нС)
Середній (С)	Середній (С)	Низький (Н)	Низький (Н)	Нижче середнього (нС)	Нижче середнього (нС)	
Низький (Н)	Низький (Н)	Середній (С)	Середній (С)	Нижче середнього (нС)	Нижче середнього (нС)	
Середній (С)	Середній (С)	Середній (С)	Середній (С)	Середній (С)	Середній (С)	Середній (С)
Вище середнього (вС)	Вище середнього (вС)	Середній (С)	Середній (С)	Нижче середнього (нС)	Нижче середнього (нС)	
Середній (С)	Середній (С)	Високий (В)	Високий (В)	Низький (Н)	Низький (Н)	
Вище середнього (вС)	Вище середнього (вС)	Середній (С)	Високий (В)	Вище середнього (вС)	Вище середнього (вС)	Вище середнього (вС)
Високий (В)	Високий (В)	Середній (С)	Середній (С)	Вище середнього (вС)	Вище середнього (вС)	
Вище середнього (вС)	Високий (В)	Середній (С)	Високий (В)	Середній (С)	Вище середнього (вС)	
Високий (В)	Високий (В)	Високий (В)	Високий (В)	Високий (В)	Високий (В)	Високий (В)
Вище середнього (вС)	Високий (В)	Високий (В)	Високий (В)	Високий (В)	Високий (В)	
Високий (В)	Високий (В)	Високий (В)	Високий (В)	Високий (В)	Вище середнього (вС)	

$$\begin{aligned} \mu_{\delta C}(x_2) = & \mu_{\delta C}(b_1) \wedge \mu_{\delta C}(b_2) \wedge \mu_C(b_3) \wedge \mu_B(b_4) \wedge \mu_{\delta C}(b_5) \wedge \mu_{\delta C}(b_6) \vee \\ & \vee \mu_B(b_1) \wedge \mu_B(b_2) \wedge \mu_C(b_3) \wedge \mu_C(b_4) \wedge \mu_{\delta C}(b_5) \wedge \mu_{\delta C}(b_6) \vee \\ & \vee \mu_{\delta C}(b_1) \wedge \mu_B(b_2) \wedge \mu_C(b_3) \wedge \mu_B(b_4) \wedge \mu_C(b_5) \wedge \mu_{\delta C}(b_6); \end{aligned} \quad (2.27)$$

$$\begin{aligned} \mu_B(x_2) = & \mu_B(b_1) \wedge \mu_B(b_2) \wedge \mu_B(b_3) \wedge \mu_B(b_4) \wedge \mu_B(b_5) \wedge \mu_B(b_6) \vee \\ & \vee \mu_{\delta C}(b_1) \wedge \mu_B(b_2) \wedge \mu_B(b_3) \wedge \mu_B(b_4) \wedge \mu_B(b_5) \wedge \mu_B(b_6) \vee \\ & \vee \mu_B(b_1) \wedge \mu_B(b_2) \wedge \mu_B(b_3) \wedge \mu_B(b_4) \wedge \mu_B(b_5) \wedge \mu_{\delta C}(b_6). \end{aligned} \quad (2.28)$$

Системи нечітких логічних рівнянь для моделювання інтелектуальної підтримки в процесі оцінки якості природного газу дають можливість зобразити належність змінних (x_1) та (x_2) за відповідними термами щодо кожного лінгвістичного висловлювання. Таким чином, розробляються лінгвістичні висловлювання і відповідні системи нечітких логічних рівнянь для кожної змінної на всіх рівнях.

2.2.2. Моделювання оцінювання якості природного газу на рівні якості підготовки (очищення) природного газу для транспортування

Оцінка рівнів лінгвістичних змінних, що зв'язує якість підготовки (очищення) природного газу для транспортування (Y) з очисткою від сірководню (H_2S) (y_1) , очисткою від азоту (N_2) (y_2) , очисткою від вуглекислого газу (CO_2) (y_3) , очисткою від кисню (O_2) (y_4) , очисткою від механічних домішок (y_5) , очисткою від вологи (y_6) , числом Воббе вищим при стандартних умовах (y_7) , теплотою згоряння вищою при стандартних умовах (y_8) та відносною густиною природного газу (y_9) виконується з використанням системи термножин:

$T(Y) = \langle \text{низька, нижче середнього, середня, вище середнього, висока} \rangle;$

$T(y_1) = \langle \text{повна, часткова, відсутня} \rangle;$

$T(y_2) = \langle \text{повна, часткова, відсутня} \rangle;$

$T(y_3) = \langle \text{повна, часткова, відсутня} \rangle;$

$T(y_4) = \langle \text{повна, часткова, відсутня} \rangle;$

$T(y_5) = \langle \text{повна, часткова, відсутня} \rangle;$

$T(y_6) = \langle \text{повна, часткова, відсутня} \rangle;$

$T(y_7) = \langle \text{низьке, нижче середнього, середнє, вище середнього, високе} \rangle;$

$T(y_8) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle;$

$T(y_9) = \langle \text{низька, середня, висока} \rangle.$

Нечітку матрицю знань з урахуванням введених якісних термів для моделювання залежності (2.3) наведено в табл. 2.7.

Лінгвістичним висловлюванням, які наведені в табл. 2.7, відповідає система нечітких логічних рівнянь, які характеризують поверхню належності змінних за відповідним термом:

$$\begin{aligned} \mu_H(Y) = & \mu_{B\partial}(y_1) \wedge \mu_{B\partial}(y_2) \wedge \mu_{B\partial}(y_3) \wedge \mu_{B\partial}(y_4) \vee \mu_{B\partial}(y_5) \wedge \\ & \wedge \mu_{B\partial}(y_6) \wedge \mu_H(y_7) \wedge \mu_H(y_8) \wedge \mu_H(y_9) \vee \\ & \vee \mu_{B\partial}(y_1) \wedge \mu_{B\partial}(y_2) \wedge \mu_{B\partial}(y_3) \wedge \mu_C(y_4) \vee \mu_{B\partial}(y_5) \wedge \\ & \wedge \mu_{B\partial}(y_6) \wedge \mu_H(y_7) \wedge \mu_H(y_8) \wedge \mu_C(y_9) \vee \\ & \vee \mu_{B\partial}(y_1) \wedge \mu_{B\partial}(y_2) \wedge \mu_C(y_3) \wedge \mu_{B\partial}(y_4) \vee \mu_{B\partial}(y_5) \wedge \\ & \wedge \mu_C(y_6) \wedge \mu_H(y_7) \wedge \mu_H(y_8) \wedge \mu_H(y_9); \end{aligned} \quad (2.29)$$

$$\begin{aligned} \mu_{nC}(Y) = & \mu_{B\partial}(y_1) \wedge \mu_{B\partial}(y_2) \wedge \mu_C(y_3) \wedge \mu_{B\partial}(y_4) \vee \mu_C(y_5) \wedge \\ & \wedge \mu_{B\partial}(y_6) \wedge \mu_{nC}(y_7) \wedge \mu_H(y_8) \wedge \mu_C(y_9) \vee \\ & \vee \mu_C(y_1) \wedge \mu_{B\partial}(y_2) \wedge \mu_{B\partial}(y_3) \wedge \mu_{B\partial}(y_4) \vee \mu_{B\partial}(y_5) \wedge \\ & \wedge \mu_{B\partial}(y_6) \wedge \mu_C(y_7) \wedge \mu_H(y_8) \wedge \mu_H(y_9) \vee \\ & \vee \mu_{B\partial}(y_1) \wedge \mu_{B\partial}(y_2) \wedge \mu_{B\partial}(y_3) \wedge \mu_{B\partial}(y_4) \vee \mu_{B\partial}(y_5) \wedge \\ & \wedge \mu_C(y_6) \wedge \mu_{nC}(y_7) \wedge \mu_C(y_8) \wedge \mu_C(y_9); \end{aligned} \quad (2.30)$$

$$\begin{aligned} \mu_C(Y) = & \mu_C(y_1) \wedge \mu_C(y_2) \wedge \mu_C(y_3) \wedge \mu_C(y_4) \vee \mu_C(y_5) \wedge \\ & \wedge \mu_C(y_6) \wedge \mu_C(y_7) \wedge \mu_C(y_8) \wedge \mu_C(y_9) \vee \\ & \vee \mu_{B\partial}(y_1) \wedge \mu_C(y_2) \wedge \mu_C(y_3) \wedge \mu_C(y_4) \vee \mu_C(y_5) \wedge \\ & \wedge \mu_{\Pi}(y_6) \wedge \mu_{nC}(y_7) \wedge \mu_C(y_8) \wedge \mu_C(y_9) \vee \\ & \vee \mu_{B\partial}(y_1) \wedge \mu_C(y_2) \wedge \mu_C(y_3) \wedge \mu_C(y_4) \vee \mu_{B\partial}(y_5) \wedge \\ & \wedge \mu_C(y_6) \wedge \mu_C(y_7) \wedge \mu_B(y_8) \wedge \mu_H(y_9); \end{aligned} \quad (2.31)$$

$$\begin{aligned}
\mu_{\text{сc}}(Y) = & \mu_{\text{ч}}(y_1) \wedge \mu_{\text{ч}}(y_2) \wedge \mu_{\text{п}}(y_3) \wedge \mu_{\text{ч}}(y_4) \vee \mu_{\text{п}}(y_5) \wedge \\
& \wedge \mu_{\text{вд}}(y_6) \wedge \mu_{\text{сc}}(y_7) \wedge \mu_{\text{в}}(y_8) \wedge \mu_{\text{с}}(y_9) \vee \\
& \vee \mu_{\text{п}}(y_1) \wedge \mu_{\text{п}}(y_2) \wedge \mu_{\text{ч}}(y_3) \wedge \mu_{\text{п}}(y_4) \vee \mu_{\text{ч}}(y_5) \wedge \\
& \wedge \mu_{\text{ч}}(y_6) \wedge \mu_{\text{с}}(y_7) \wedge \mu_{\text{в}}(y_8) \wedge \mu_{\text{с}}(y_9) \vee \\
& \vee \mu_{\text{вд}}(y_1) \wedge \mu_{\text{п}}(y_2) \wedge \mu_{\text{ч}}(y_3) \wedge \mu_{\text{п}}(y_4) \vee \mu_{\text{п}}(y_5) \wedge \\
& \wedge \mu_{\text{п}}(y_6) \wedge \mu_{\text{сc}}(y_7) \wedge \mu_{\text{с}}(y_8) \wedge \mu_{\text{в}}(y_9); \tag{2.32}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mu_{\text{в}}(Y) = & \mu_{\text{п}}(y_1) \wedge \mu_{\text{п}}(y_2) \wedge \mu_{\text{п}}(y_3) \wedge \mu_{\text{п}}(y_4) \vee \mu_{\text{п}}(y_5) \wedge \\
& \wedge \mu_{\text{п}}(y_6) \wedge \mu_{\text{в}}(y_7) \wedge \mu_{\text{в}}(y_8) \wedge \mu_{\text{в}}(y_9) \vee \\
& \vee \mu_{\text{п}}(y_1) \wedge \mu_{\text{п}}(y_2) \wedge \mu_{\text{п}}(y_3) \wedge \mu_{\text{ч}}(y_4) \vee \mu_{\text{ч}}(y_5) \wedge \\
& \wedge \mu_{\text{п}}(y_6) \wedge \mu_{\text{в}}(y_7) \wedge \mu_{\text{в}}(y_8) \wedge \mu_{\text{в}}(y_9) \vee \\
& \vee \mu_{\text{п}}(y_1) \wedge \mu_{\text{п}}(y_2) \wedge \mu_{\text{п}}(y_3) \wedge \mu_{\text{п}}(y_4) \vee \mu_{\text{п}}(y_5) \wedge \\
& \wedge \mu_{\text{ч}}(y_6) \wedge \mu_{\text{в}}(y_7) \wedge \mu_{\text{в}}(y_8) \wedge \mu_{\text{в}}(y_9). \tag{2.33}
\end{aligned}$$

Системи нечітких логічних рівнянь для моделювання інтелектуальної підтримки в процесі оцінки якості природного газу дають можливість зобразити належність змінних (y_1) , (y_2) , (y_3) , (y_4) , (y_5) , (y_6) , (y_7) , (y_8) та (y_9) за відповідними термами щодо кожного лінгвістичного висловлювання.

Таким чином, розробляються лінгвістичні висловлювання і відповідні системи нечітких логічних рівнянь для кожної змінної на всіх рівнях.

Таблиця 2.7

Матриця знань для залежності (2.3)

ЯКЩО									ТО
Очистка від сірководню (H_2S) (y_1)	Очистка від азоту (N_2) (y_2)	Очистка від вуглекислого газу (CO_2) (y_3)	Очистка від кисню (O_2) (y_4)	Очистка від механічних домішок (y_5)	Очистка від вологи (y_6)	Число Воббе вище (y_7)	Теплота згоряння вища (y_8)	Відносна густина природного газу (y_9)	Якість підготовки і природного газу (Y)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Відсутня (Вд)	Відсутня (Вд)	Відсутня (Вд)	Відсутня (Вд)	Відсутня (Вд)	Відсутня (Вд)	Низьке (Н)	Низька (Н)	Низька (Н)	Низька (Н)
Відсутня (Вд)	Відсутня (Вд)	Відсутня (Вд)	Часткова (Ч)	Відсутня (Вд)	Відсутня (Вд)	Низьке (Н)	Низька (Н)	Середня (С)	
Відсутня (Вд)	Відсутня (Вд)	Часткова (Ч)	Відсутня (Вд)	Відсутня (Вд)	Часткова (Ч)	Низьке (Н)	Низька (Н)	Низька (Н)	
Відсутня (Вд)	Відсутня (Вд)	Часткова (Ч)	Відсутня (Вд)	Часткова (Ч)	Відсутня (Вд)	Нижче середнього (нС)	Низька (Н)	Середня (С)	Нижче середнього (нС)
Часткова (Ч)	Відсутня (Вд)	Відсутня (Вд)	Відсутня (Вд)	Відсутня (Вд)	Відсутня (Вд)	Середнє (С)	Низька (Н)	Низька (Н)	
Відсутня (Вд)	Відсутня (Вд)	Відсутня (Вд)	Відсутня (Вд)	Відсутня (Вд)	Часткова (Ч)	Нижче середнього (нС)	Середня (С)	Середня (С)	

Продовження табл. 2.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Часткова (Ч)	Часткова (Ч)	Часткова (Ч)	Часткова (Ч)	Часткова (Ч)	Часткова (Ч)	Середнє (С)	Середня (С)	Середня (С)	Середня (С)
Відсутня (Вд)	Часткова (Ч)	Часткова (Ч)	Часткова (Ч)	Часткова (Ч)	Повна (П)	Нижче середнього (НС)	Середня (С)	Середня (С)	
Відсутня (Вд)	Часткова (Ч)	Часткова (Ч)	Часткова (Ч)	Відсутня (Вд)	Часткова (Ч)	Середнє (С)	Висока (В)	Низька (Н)	
Часткова (Ч)	Часткова (Ч)	Повна (П)	Часткова (Ч)	Повна (П)	Відсутня (Вд)	Вище середнього (ВС)	Висока (В)	Середня (С)	Вище середнього (ВС)
Повна (П)	Повна (П)	Часткова (Ч)	Повна (П)	Часткова (Ч)	Часткова (Ч)	Середнє (С)	Висока (В)	Середня (С)	
Відсутня (Вд)	Повна (П)	Часткова (Ч)	Повна (П)	Повна (П)	Повна (П)	Вище середнього (ВС)	Середня (С)	Висока (В)	
Повна (П)	Повна (П)	Повна (П)	Повна (П)	Повна (П)	Повна (П)	Високе (В)	Висока (В)	Висока (В)	Висока (В)
Повна (П)	Повна (П)	Повна (П)	Часткова (Ч)	Часткова (Ч)	Повна (П)	Високе (В)	Висока (В)	Висока (В)	
Повна (П)	Повна (П)	Повна (П)	Повна (П)	Повна (П)	Часткова (Ч)	Високе (В)	Висока (В)	Висока (В)	

2.2.3. Моделювання оцінювання якості природного газу на рівні технічних умов експлуатації газорозподільної системи населеного пункту

Оцінка рівнів лінгвістичних змінних, що зв'язує технічні умови експлуатації газорозподільної системи населеного пункту (Z) з вмістом сірководню (H_2S) (z_1), вмістом азоту (N_2) (z_2), вмістом вуглекислого газу (CO_2) (z_3), вмістом кисню (O_2) (z_4), вмістом механічних домішок (z_5), вмістом вологи (z_6) та вмістом меркаптанової сірки (z_7), виконується з використанням системи терм-множин:

- $T(Z) = \langle \text{низькі, нижче середнього, середні, вище середнього, високі} \rangle;$
 $T(z_1) = \langle \text{низький, нижче середнього, середній, вище середнього, високий} \rangle;$
 $T(z_2) = \langle \text{низький, нижче середнього, середній, вище середнього, високий} \rangle;$
 $T(z_3) = \langle \text{низький, середній, високий} \rangle;$
 $T(z_4) = \langle \text{низький, середній, високий} \rangle;$
 $T(z_5) = \langle \text{низький, середній, високий} \rangle;$
 $T(z_6) = \langle \text{низький, нижче середнього, середній, вище середнього, високий} \rangle;$
 $T(z_7) = \langle \text{низький, середній, високий} \rangle.$

Нечітка матриця знань з урахуванням введених якісних термів для моделювання залежності (2.4) наведена в табл. 2.8.

Лінгвістичним висловлюванням, які наведені в табл. 2.8, відповідає система нечітких логічних рівнянь, котрі характеризують поверхню належності змінних за відповідним термом:

$$\begin{aligned} \mu_H(Z) = & \mu_B(z_1) \wedge \mu_B(z_2) \wedge \mu_B(z_3) \wedge \mu_B(z_4) \vee \mu_B(z_5) \vee \mu_B(z_6) \vee \mu_H(z_7) \vee \\ & \vee \mu_B(z_1) \wedge \mu_B(z_2) \wedge \mu_B(z_3) \wedge \mu_B(z_4) \vee \mu_B(z_5) \vee \mu_{6C}(z_6) \vee \mu_H(z_7) \wedge \\ & \vee \mu_{6C}(z_1) \wedge \mu_{6C}(z_2) \wedge \mu_B(z_3) \wedge \mu_B(z_4) \vee \mu_B(z_5) \vee \mu_B(z_6) \vee \mu_H(z_7); \end{aligned} \quad (2.34)$$

$$\begin{aligned} \mu_{HC}(Z) = & \mu_{6C}(z_1) \wedge \mu_{6C}(z_2) \wedge \mu_B(z_3) \wedge \mu_B(z_4) \vee \mu_B(z_5) \vee \mu_{6C}(z_6) \vee \mu_C(z_7) \vee \\ & \vee \mu_{6C}(z_1) \wedge \mu_B(z_2) \wedge \mu_C(z_3) \wedge \mu_B(z_4) \vee \mu_C(z_5) \vee \mu_B(z_6) \vee \mu_H(z_7) \wedge \\ & \vee \mu_C(z_1) \wedge \mu_{6C}(z_2) \wedge \mu_B(z_3) \wedge \mu_C(z_4) \vee \mu_B(z_5) \vee \mu_B(z_6) \vee \mu_H(z_7); \end{aligned} \quad (2.35)$$

$$\begin{aligned} \mu_C(Z) = & \mu_C(z_1) \wedge \mu_C(z_2) \wedge \mu_B(z_3) \wedge \mu_H(z_4) \vee \mu_H(z_5) \vee \mu_B(z_6) \vee \mu_B(z_7) \vee \\ & \vee \mu_{nC}(z_1) \wedge \mu_{nC}(z_2) \wedge \mu_C(z_3) \wedge \mu_C(z_4) \vee \mu_B(z_5) \vee \mu_{nC}(z_6) \vee \mu_C(z_7) \wedge \\ & \vee \mu_C(z_1) \wedge \mu_C(z_2) \wedge \mu_C(z_3) \wedge \mu_C(z_4) \vee \mu_C(z_5) \vee \mu_C(z_6) \vee \mu_C(z_7); \end{aligned} \quad (2.36)$$

$$\begin{aligned} \mu_{nC}(Z) = & \mu_{nC}(z_1) \wedge \mu_{nC}(z_2) \wedge \mu_C(z_3) \wedge \mu_H(z_4) \vee \mu_C(z_5) \vee \mu_{nC}(z_6) \vee \mu_B(z_7) \vee \\ & \vee \mu_{nC}(z_1) \wedge \mu_H(z_2) \wedge \mu_H(z_3) \wedge \mu_C(z_4) \vee \mu_H(z_5) \vee \mu_C(z_6) \vee \mu_B(z_7) \wedge \\ & \vee \mu_C(z_1) \wedge \mu_C(z_2) \wedge \mu_C(z_3) \wedge \mu_H(z_4) \vee \mu_H(z_5) \vee \mu_H(z_6) \vee \mu_C(z_7); \end{aligned} \quad (2.37)$$

$$\begin{aligned} \mu_B(Z) = & \mu_H(z_1) \wedge \mu_H(z_2) \wedge \mu_H(z_3) \wedge \mu_H(z_4) \vee \mu_H(z_5) \vee \mu_H(z_6) \vee \mu_B(z_7) \vee \\ & \vee \mu_{nC}(z_1) \wedge \mu_{nC}(z_2) \wedge \mu_H(z_3) \wedge \mu_H(z_4) \vee \mu_H(z_5) \vee \mu_H(z_6) \vee \mu_B(z_7) \wedge \\ & \vee \mu_H(z_1) \wedge \mu_H(z_2) \wedge \mu_H(z_3) \wedge \mu_H(z_4) \vee \mu_H(z_5) \vee \mu_{nC}(z_6) \vee \mu_B(z_7). \end{aligned} \quad (2.38)$$

Системи нечітких логічних рівнянь для моделювання інтелектуальної підтримки прийняття управлінських рішень в процесі оцінки якості природного газу дають можливість зобразити належність змінних (z_1) , (z_2) , (z_3) , (z_4) , (z_5) , (z_6) та (z_7) за відповідними термами щодо кожного лінгвістичного висловлювання.

Таким чином, розробляються лінгвістичні висловлювання і відповідні системи нечітких логічних рівнянь для кожної змінної на всіх рівнях.

Таблиця 2.8

Матриця знань для залежності (2.4)

ЯКЩО							ТО
Вміст сірководню (H ₂ S) (z ₁)	Вміст азоту (N ₂) (z ₂)	Вміст вуглекислого газу (CO ₂) (z ₃)	Вміст кисню (O ₂) (z ₄)	Вміст механічних домішок (z ₅)	Вміст вологи (z ₆)	Вміст меркаптанової сірки (z ₇)	Технічні умови експлуатації газорозподільної системи (Z)
1	2	3	4	5	6	7	8
Високий (В)	Високий (В)	Високий (В)	Високий (В)	Високий (В)	Високий (В)	Низький (Н)	Низькі (Н)
Високий (В)	Високий (В)	Високий (В)	Високий (В)	Високий (В)	Вище середнього (вС)	Низький (Н)	
Вище середнього (вС)	Вище середнього (вС)	Високий (В)	Високий (В)	Високий (В)	Високий (В)	Низький (Н)	
Вище середнього (вС)	Вище середнього (вС)	Високий (В)	Високий (В)	Високий (В)	Вище середнього (вС)	Середній (С)	Нижче середнього (нС)
Вище середнього (вС)	Високий (В)	Середній (С)	Високий (В)	Середній (С)	Високий (В)	Низький (Н)	
Середній (С)	Вище середнього (вС)	Високий (В)	Середній (С)	Високий (В)	Високий (В)	Низький (Н)	

Продовження табл. 1.8

1	2	3	4	5	6	7	8
Середній (С)	Середній (С)	Високий (В)	Низький (Н)	Низький (Н)	Високий (В)	Високий (В)	Середні (С)
Нижче середнього (нС)	Нижче середнього (нС)	Середній (С)	Середній (С)	Високий (В)	Вище середнього (вС)	Середній (С)	
Середній (С)	Середній (С)	Середній (С)	Середній (С)	Середній (С)	Середній (С)	Середній (С)	
Нижче середнього (нС)	Нижче середнього (нС)	Середній (С)	Низький (Н)	Середній (С)	Нижче середнього (нС)	Високий (В)	Вище середнього (вС)
Нижче середнього (нС)	Низький (Н)	Низький (Н)	Середній (С)	Низький (Н)	Середній (С)	Високий (В)	
Середній (С)	Середній (С)	Середній (С)	Низький (Н)	Низький (Н)	Низький (Н)	Середній (С)	
Низький (Н)	Низький (Н)	Низький (Н)	Низький (Н)	Низький (Н)	Низький (Н)	Високий (В)	Високі (В)
Нижче середнього (нС)	Нижче середнього (нС)	Низький (Н)	Низький (Н)	Низький (Н)	Низький (Н)	Високий (В)	
Низький (Н)	Низький (Н)	Низький (Н)	Низький (Н)	Низький (Н)	Нижче середнього (нС)	Високий (В)	

2.3. Аналітичні моделі функцій належності експертних нечітких баз знань, що впливають на організаційно-технологічний механізм управління проектами з якості природного газу

Нечіткі логічні рівняння передбачають визначення значень функції належності $\mu_T(u)$ всіх нечітких термів, що наведені в табл. 2.1. Якщо вхідна змінна змінюється безперервно, то функції належності (див. рис. 2.3–2.12) не можуть бути використані. Вхідна змінна може приймати значення не тільки u_i ($i = \overline{1,5}$), але й проміжні. Використання лінійної інтерполяції дозволяє знехтувати цим обмеженням. Якщо відомо, що $\mu_T(u_i) = \mu_i$ та $\mu_T(u_{i+1}) = \mu_{i+1}$, то значення $\mu_T(u^*)$, де $u^* \in (U_i, U_{i+1})$, знаходиться із співвідношення [57]:

$$\mu_T(u^*) = \frac{u^*(\mu_{i+1} - \mu_i) + \mu_i(u_{i+1} - u_i) - u_i(\mu_{i+1} - \mu_i)}{u_{i+1} - u_i}. \quad (2.39)$$

Аналіз змінних (X, Y, Z) тільки на дискретній універсальній множині не передбачає врахування випадків, коли на якість природного газу впливають змішані фактори. З метою уникнення цього обмеження задаємо в якості області визначення змінної умовний інтервал, на якому для кожного елемента множини передбачені відповідні значення. Використовуючи функції належності (див. рис. 2.3–2.12) та формулу (2.39) знаходимо аналітичні моделі функції належності оцінок вхідних змінних для всіх термів, які описуються системою рівнянь виду

$$\mu_T(u) = \frac{au^* + b}{c}, \quad (2.40)$$

де $a = \mu_{i+1} - \mu_i$; $b = \mu_i(u_{i+1} - u_i) - u_i(\mu_{i+1} - \mu_i)$; $c = u_{i+1} - u_i$.

Параметри, що входять в систему рівнянь (2.9)–(2.38), які описують моделі функції належності на фізико-хімічному, підготовчому та експлуатаційному рівнях, наведені в табл. 2.9 – 2.11. Щоб отримати кількісні оцінки з отриманих нечітких множин, потрібно виконати процедуру дефазифікації, тобто перетворення нечіткої інформації в чіткий вигляд. Серед

різних методів дефазифікації найбільш поширеним є знаходження «центра ваги» плоскої фігури, яка обмежена горизонтальною координатою та функцією належності нечіткої множини. Нечіткий логічний висновок разом з процедурою дефазифікації забезпечує можливість спостереження за змінами вихідного показника (якістю природного газу) при варіації факторів впливу. Кількісну оцінку якості природного газу C_R^* при заданих значеннях факторів впливу отримано в процесі дефазифікації нечітких множин, яку виконано за допомогою методу «центра ваги» [51, 52, 55]:

$$C_R^* = (X^*, Y^*, Z^*, W^*, P^*, S^*) = \frac{\sum_{i=1}^l A_{япг}^{d_i} \cdot \mu_{d_i}(A_{япг})}{\sum_{i=1}^l \mu_{d_i}(A_{япг})}, \quad (2.41)$$

де l – кількість нечітких термів для оцінки змінної C_R ; d_i – назва i -го терму, $i = \overline{1, l}$; $\mu_{d_i}(A_{япг})$ – ступінь належності $A_{япг}$ до терму d_i .

Таблиця 2.9

Параметри рівняння моделі функції належності на рівні фізико-хімічних властивостей видобутого з родовища природного газу

Фактори впливу	$\mu_T(u^*)$	$\mu_T(u^*) = \frac{au^* + b}{c}$			$u^* \in (U_i, U_{i+1})$
		a	b	c	
1	2	3	4	5	6
Вміст метану (CH ₄)	$\mu_H(s_1)$	-0,25	24,5	4,5	80...84,5
		-0,25	24,5	4,5	84,5...89
		-0,25	24,5	4,5	89...93,5
		-0,125	12,8125	4,5	93,5...98
	$\mu_{nC}(s_1)$	0,22	-14,09	4,5	80...84,5
		-0,28	28,16	4,5	84,5...89
		-0,38	37,06	4,5	89...93,5
		-0,23	23,035	4,5	93,5...98
	$\mu_C(s_1)$	0,29	-21,265	4,5	80...84,5
		0,28	-20,42	4,5	84,5...89
		-0,28	29,42	4,5	89...93,5
		-0,29	30,355	4,5	93,5...98

Продовження табл. 2.9

1	2	3	4	5	6
Вміст метану (CH ₄)	$\mu_{\text{сC}}(s_1)$	0,22	-16,07	4,5	80...84,5
		0,22	-16,07	4,5	84,5...89
		0,22	-16,07	4,5	89...93,5
		-0,89	87,715	4,5	93,5...98
	$\mu_B(s_1)$	0,125	-9,4375	4,5	80...84,5
		0,25	-20	4,5	84,5...89
		0,25	-20	4,5	89...93,5
		0,25	-20	4,5	93,5...98
Вміст етану (C ₂ H ₆)	$\mu_B(s_1)$	-0,22	1,22	1	1...2
		-0,22	2	2	2...4
		-0,23	1,25	1	4...5
		-0,22	1,76	2	5...7
	$\mu_{\text{сC}}(s_2)$	0,25	0,5	1	1...2
		-0,375	2,75	2	2...4
		-0,25	1,375	1	4...5
		-0,25	2	2	5...7
	$\mu_C(s_2)$	0,29	0,14	1	1...2
		0,28	0,88	2	2...4
		-0,28	1,84	1	4...5
		-0,29	2,89	2	5...7
	$\mu_{\text{сC}}(s_2)$	0,23	0,1	1	1...2
		0,22	0,68	2	2...4
		0,22	0,12	1	4...5
		-0,89	6,45	2	5...7
	$\mu_B(s_2)$	0,22	-0,11	1	1...2
		0,23	0,2	2	2...4
		0,22	-0,1	1	4...5
		0,22	0,46	2	5...7
Вміст пропану (C ₃ H ₈)	$\mu_H(s_3)$	-0,27	0,75	0,75	0...0,75
		-0,26	0,8075	0,75	0,75...1,5
		-0,14	0,6325	0,75	1,5...2,25
		-0,13	0,5725	0,75	2,25...3
	$\mu_C(s_3)$	0,22	0,5025	0,75	0...0,75
		-0,167	0,8345	0,75	0,75...1,5
		-0,278	1,09825	0,75	1,5...2,25
		-0,278	1,02875	0,75	2,25...3

Продовження табл. 2.9

1	2	3	4	5	6
Вміст пропану (C ₃ H ₈)	$\mu_B(s_3)$	0,417	0,09375	0,75	0...0,75
		0,291	0,1155	0,75	0,75...1,5
		0,083	0,45875	0,75	1,5...2,25
		0,084	0,477	0,75	2,25...3
Вміст бутану (C ₄ H ₁₀)	$\mu_H(s_4)$	-0,25	0,5	0,5	0...0,5
		-0,25	0,5	0,5	0,5...1
		-0,166	0,416	0,5	1...1,5
		-0,167	0,4175	0,5	1,5...2
	$\mu_C(s_4)$	0,143	0,3575	0,5	0...0,5
		0,142	0,358	0,5	0,5...1
		-0,428	0,928	0,5	1...1,5
		-0,429	0,9295	0,5	1,5...2
	$\mu_B(s_4)$	0,214	0,0715	0,5	0...0,5
		0,213	0,072	0,5	0,5...1
		0,215	0,07	0,5	1...1,5
		0,215	0,07	0,5	1,5...2
Вміст пентану та інших вуглеводнів (C ₅ H ₁₂)	$\mu_H(s_5)$	-0,25	0,25	0,25	0...0,25
		-0,25	0,25	0,25	0,25...0,5
		-0,187	0,2185	0,25	0,5...0,75
		-0,188	0,21925	0,25	0,75...1
	$\mu_C(s_5)$	0,25	0,125	0,25	0,6...1,0
		0,25	0,125	0,25	0...0,25
		-0,416	0,458	0,25	0,25...0,5
		-0,417	0,45875	0,25	0,5...0,75
	$\mu_B(s_5)$	0,279	0,02775	0,25	0,75...1
		0,28	0,0275	0,25	0,6...1,0
		0,165	0,085	0,25	0...0,25
		0,165	0,085	0,25	0,25...0,5
Вміст сірководню (H ₂ S)	$\mu_H(b_1)$	-0,22	5	5	0...5
		-0,11	4,45	5	5...10
		-0,22	5,55	5	10...15
		-0,34	7,35	5	15...20
	$\mu_{HC}(b_1)$	0,33	3,35	5	0...5
		-0,55	7,75	5	5...10
		-0,22	4,45	5	10...15
		-0,12	2,95	5	15...20

Продовження табл. 2.9

1	2	3	4	5	6	
Вміст сірководню (H_2S)	$\mu_C(b_1)$	0,22	2,8	5	0...5	
		0,22	2,8	5	5...10	
		-0,67	11,7	5	10...15	
		-0,22	4,95	5	15...20	
	$\mu_{\text{сC}}(b_1)$	0,34	1,1	5	0...5	
		0,22	1,7	5	5...10	
		0,22	1,7	5	10...15	
		-0,89	18,35	5	15...20	
	$\mu_B(b_1)$	0,22	0,55	5	0...5	
		0,23	0,5	5	5...10	
		0,11	1,7	5	10...15	
		0,33	-1,6	5	15...20	
	Вміст азоту (N_2)	$\mu_H(b_2)$	-0,28	1,28	1	1...2
			-0,15	1,02	1	2...3
			-0,28	1,41	1	3...4
			-0,15	0,89	1	4...5
$\mu_{\text{нC}}(b_2)$		0,375	0,25	1	1...2	
		-0,625	2,25	1	2...3	
		-0,125	0,75	1	3...4	
		-0,125	0,75	1	4...5	
$\mu_C(b_2)$		0,22	0,34	1	1...2	
		0,22	0,34	1	2...3	
		-0,22	1,66	1	3...4	
		-0,22	1,66	1	4...5	
$\mu_{\text{сC}}(b_2)$		0,257	-0,004	1	1...2	
		0,25	0,01	1	2...3	
		0,24	0,04	1	3...4	
		-0,87	4,48	1	4...5	
$\mu_B(b_2)$		0,22	-0,11	1	1...2	
		0,23	-0,13	1	2...3	
		0,22	-0,1	1	3...4	
		0,22	-0,1	1	4...5	
Вміст вуглекисло го газу (CO_2)		$\mu_H(b_3)$	-0,1875	1,5	1,5	0...1,5
			-0,1875	1,5	1,5	1,5...3
			-0,25	1,6875	1,5	3...4,5
			-0,25	1,6875	1,5	4,5...6

Продовження табл. 2.9

1	2	3	4	5	6	
Вміст вуглекислого газу (CO ₂)	$\mu_C(b_3)$	0,11	1,17	1,5	0...1,5	
		0,11	1,17	1,5	1,5...3	
		-0,445	2,835	1,5	3...4,5	
		-0,445	2,835	1,5	4,5...6	
	$\mu_B(b_3)$	0,167	0,2505	1,5	0...1,5	
		0,166	0,252	1,5	1,5...3	
		0,25	0	1,5	3...4,5	
		0,25	0	1,5	4,5...6	
Вміст кисню (O ₂)	$\mu_H(b_4)$	-0,215	0,25	0,25	0...0,25	
		-0,215	0,25	0,25	0,25...0,5	
		-0,215	0,25	0,25	0,5...0,75	
		-0,215	0,25	0,25	0,75...1	
	$\mu_C(b_4)$	0,188	0,15625	0,25	0...0,25	
		0,187	0,1565	0,25	0,25...0,5	
		-0,437	0,4685	0,25	0,5...0,75	
		-0,438	0,46925	0,25	0,75...1	
	$\mu_B(b_4)$	0,28	0,0275	0,25	0...0,25	
		0,28	0,0275	0,25	0,25...0,5	
		0,165	0,085	0,25	0,5...0,75	
		0,165	0,085	0,25	0,75...1	
	Вміст механічних домішок	$\mu_H(b_5)$	-0,22	2	2	1...3
			-0,22	2,22	2	3...5
			-0,34	3,38	3	5...8
			-0,11	1,32	2	8...10
$\mu_{HC}(b_5)$		0,25	1,5	2	1...3	
		-0,5	3,5	2	3...5	
		-0,25	2,75	3	5...8	
		-0,125	1,5	2	8...10	
$\mu_C(b_5)$		0,22	1,12	2	1...3	
		0,22	0,9	2	3...5	
		-0,67	6,35	3	5...8	
		-0,22	2,42	2	8...10	
$\mu_{6C}(b_5)$		0,12	0,66	2	1...3	
		0,22	0,24	2	3...5	
		0,33	0,36	3	5...8	
		-0,89	9,12	2	8...10	

Продовження табл. 2.9

1	2	3	4	5	6
Вміст механічних домішок	$\mu_B(b_5)$	0,125	0,25	2	1...3
		0,25	-0,25	2	3...5
		0,25	0,25	3	5...8
		0,25	-0,5	2	8...10
Вміст вологи (за точкою роси вологи при тиску 3,92 МПа)	$\mu_H(b_6)$	-0,25	0	2	-8...-6
		-0,25	0	2	-6...-4
		-0,25	0	2	-4...-2
		-0,125	0,25	2	-2...0
	$\mu_{HC}(b_6)$	0,22	3,32	2	-8...-6
		-0,44	-0,64	2	-6...-4
		-0,23	0,2	2	-4...-2
		-0,22	0,22	2	-2...0
	$\mu_C(b_6)$	0,25	3	2	-8...-6
		0,25	3	2	-6...-4
		-0,25	1	2	-4...-2
		-0,25	1	2	-2...0
	$\mu_{cC}(b_6)$	0,25	2,5	2	-8...-6
		0,25	2,5	2	-6...-4
		0,25	2,5	2	-4...-2
		-0,875	0,25	2	-2...0
	$\mu_B(b_6)$	0,22	1,98	2	-8...-6
		0,23	2,04	2	-6...-4
		0,22	2	2	-4...-2
		0,22	2	2	-2...0

Таблиця 2.10

Параметри рівняння моделі функції належності на рівні якості підготовки (очищення) природного газу для транспортування

Фактори впливу	$\mu_T(u^*)$	$\mu_T(u^*) = \frac{au^* + b}{c}$			$u^* \in (U_i, U_{i+1})$
		a	b	c	
1	2	3	4	5	6

Продовження табл. 2.10

1	2	3	4	5	6
Очистка від сірководню (H_2S)	$\mu_B(y_1)$	-0,11	5	5	0...5
		-0,11	5	5	5...10
		-0,34	7,3	5	10...15
		-0,33	7,15	5	15...20
	$\mu_{\text{ч}}(y_1)$	0,188	3,125	5	0...5
		0,187	3,13	5	5...10
		-0,438	9,38	5	10...15
		-0,437	9,365	5	15...20
	$\mu_{\text{п}}(y_1)$	0,11	0,55	5	0...5
		0,11	0,55	5	5...10
		0,335	-1,7	5	10...15
		0,335	-1,7	5	15...20
Очистка від азоту (N_2)	$\mu_B(y_2)$	-0,29	2	2	0...2
		-0,14	0,99	1	2...3
		-0,21	1,2	1	3...4
		-0,22	1,24	1	4...5
	$\mu_{\text{ч}}(y_2)$	0,22	1,34	2	0...2
		0,11	0,67	1	2...3
		-0,44	2,32	1	3...4
		-0,45	2,36	1	4...5
	$\mu_{\text{п}}(y_2)$	0,19	0,28	2	0...2
		0,1	0,13	1	2...3
		0,29	-0,44	1	3...4
		0,28	-0,4	1	4...5
Очистка від вуглекислого газу (CO_2)	$\mu_B(y_3)$	-0,3	1,5	1,5	0...1,5
		-0,3	1,5	1,5	1,5...3
		-0,1	0,9	1,5	3...4,5
		-0,1	0,9	1,5	4,5...6
	$\mu_{\text{ч}}(y_3)$	0,215	0,855	1,5	0...1,5
		0,215	0,855	1,5	1,5...3
		-0,43	2,79	1,5	3...4,5
		-0,43	2,79	1,5	4,5...6
	$\mu_{\text{п}}(y_3)$	0,125	0,1875	1,5	0...1,5
		0,125	0,1875	1,5	1,5...3
		0,313	-0,3765	1,5	3...4,5
		0,312	-0,372	1,5	4,5...6

Продовження табл. 2.10

1	2	3	4	5	6
Очистка від кисню (O ₂)	$\mu_B(y_4)$	-0,25	0,005	0,005	0...0,005
		-0,25	0,005	0,005	0,005...0,01
		-0,166	0,00416	0,005	0,01...0,015
		-0,167	0,004175	0,005	0,015...0,02
	$\mu_Q(y_4)$	0,167	0,003335	0,005	0...0,005
		0,166	0,00334	0,005	0,005...0,01
		-0,445	0,00945	0,005	0,01...0,015
		-0,445	0,00945	0,005	0,015...0,02
	$\mu_{II}(y_4)$	0,144	0,000715	0,005	0...0,005
		0,143	0,00072	0,005	0,005...0,01
		0,285	-0,0007	0,005	0,01...0,015
		0,285	-0,0007	0,005	0,015...0,02
Очистка від механічних домішок	$\mu_B(y_5)$	-0,25	0,25	0,25	0...0,25
		-0,25	0,25	0,25	0,25...0,5
		-0,166	0,208	0,25	0,5...0,75
		-0,167	0,20875	0,25	0,75...1
	$\mu_Q(y_5)$	0,25	0,125	0,25	0...0,25
		0,25	0,125	0,25	0,25...0,5
		-0,375	0,4375	0,25	0,5...0,75
		-0,375	0,4375	0,25	0,75...1
	$\mu_{II}(y_5)$	0,188	0,03125	0,25	0...0,25
		0,187	0,0315	0,25	0,25...0,5
		0,25	0	0,25	0,5...0,75
		0,25	0	0,25	0,75...1
Очистка від вологи	$\mu_B(y_6)$	-0,22	0,24	2	-8...-6
		-0,22	0,24	2	-6...-4
		-0,225	0,22	2	-4...-2
		-0,225	0,22	2	-2...0
	$\mu_Q(y_6)$	0,313	3,254	2	-8...-6
		0,312	3,248	2	-6...-4
		-0,437	0,252	2	-4...-2
		-0,438	0,25	2	-2...0
	$\mu_{II}(y_6)$	0,11	1,1	2	-8...-6
		0,11	1,1	2	-6...-4
		0,335	2	2	-4...-2
		0,335	2	2	-2...0

Продовження табл. 2.10

1	2	3	4	5	6
Число Воббе вище (стандартні умови)	$\mu_H(y_7)$	-0,22	12,078	2,2	44,9...47,1
		-0,34	17,73	2,2	47,1...49,3
		-0,11	6,391	2,2	49,3...51,5
		-0,22	12,056	2,2	51,5...53,7
	$\mu_{HC}(y_7)$	0,25	-9,575	2,2	44,9...47,1
		-0,5	25,75	2,2	47,1...49,3
		-0,25	13,425	2,2	49,3...51,5
		-0,125	6,9875	2,2	51,5...53,7
	$\mu_C(y_7)$	0,43	-18,669	2,2	44,9...47,1
		0,28	-11,604	2,2	47,1...49,3
		-0,28	16,004	2,2	49,3...51,5
		-0,43	23,729	2,2	51,5...53,7
	$\mu_{eC}(y_7)$	0,14	-5,648	2,2	44,9...47,1
		0,43	-19,307	2,2	47,1...49,3
		0,14	-5,01	2,2	49,3...51,5
		-0,86	46,49	2,2	51,5...53,7
	$\mu_B(y_7)$	0,22	-9,636	2,2	44,9...47,1
		0,23	-10,107	2,2	47,1...49,3
		0,22	-9,614	2,2	49,3...51,5
		0,22	-9,614	2,2	51,5...53,7
Теплота згоряння вища (стан. умови)	$\mu_H(y_8)$	-0,16	6,464	0,8	35,4...36,2
		-0,17	6,742	0,7	36,2...36,9
		-0,28	10,801	0,7	36,9...37,6
		-0,28	10,801	0,7	37,6...38,3
	$\mu_C(y_8)$	0,285	-9,745	0,8	35,4...36,2
		0,285	-9,8165	0,7	36,2...36,9
		-0,43	16,567	0,7	36,9...37,6
		-0,43	16,567	0,7	37,6...38,3
	$\mu_B(y_8)$	0,28	-9,824	0,8	35,4...36,2
		0,28	-9,863	0,7	36,2...36,9
		0,165	-5,6195	0,7	36,9...37,6
		0,165	-5,6195	0,7	37,6...38,3
Відносна густина природного газу	$\mu_H(y_9)$	-0,22	0,621	0,5	0,55...0,6
		-0,22	0,522	0,5	0,6...0,65
		-0,225	0,42625	0,5	0,65...0,7
		-0,225	0,325	0,5	0,7...0,75

Продовження табл. 2.10

1	2	3	4	5	6
Відносна густина природного газу	$\mu_C(y_9)$	0,3	0,035	0,5	0,55...0,6
		0,3	0,17	0,5	0,6...0,65
		-0,4	0,76	0,5	0,65...0,7
		-0,4	0,58	0,5	0,7...0,75
	$\mu_B(y_9)$	0,21	-0,0455	0,5	0,55...0,6
		0,22	0,043	0,5	0,6...0,65
		0,22	0,142	0,5	0,65...0,7
		0,21	0,248	0,5	0,7...0,75

Таблиця 2.11

Параметри рівняння моделі функції належності на рівні технічних умов експлуатації газорозподільної системи населеного пункту

Фактори впливу	$\mu_T(u^*)$	$\mu_T(u^*) = \frac{au^* + b}{c}$			$u^* \in (U_i, U_{i+1})$
		a	b	c	
1	2	3	4	5	6
Вміст сірководню (H_2S)	$\mu_H(z_1)$	-0,25	1,5	1,5	0...1,5
		-0,25	1,5	1,5	1,5...3
		-0,25	1,5	1,5	3...4,5
		-0,125	0,9375	1,5	4,5...6
	$\mu_{HC}(z_1)$	0,25	1,125	1,5	0...1,5
		-0,375	2,0625	1,5	1,5...3
		-0,25	1,6875	1,5	3...4,5
		-0,25	1,6875	1,5	4,5...6
	$\mu_C(z_1)$	0,28	0,645	1,5	0...1,5
		0,29	0,63	1,5	1,5...3
		-0,29	2,37	1,5	3...4,5
		-0,28	2,325	1,5	4,5...6
	$\mu_{eC}(z_1)$	0,34	0,33	1,5	0...1,5
		0,22	0,51	1,5	1,5...3
		0,22	0,51	1,5	3...4,5
		-0,89	5,505	1,5	4,5...6
$\mu_B(z_1)$	0,22	0,165	1,5	0...1,5	
	0,23	0,15	1,5	1,5...3	
	0,22	0,18	1,5	3...4,5	
	0,22	0,18	1,5	4,5...6	

Продовження табл. 2.11

1	2	3	4	5	6
Вміст азоту (N ₂)	$\mu_H(z_2)$	-0,28	1	1	0...1
		-0,15	1,59	2	1...3
		-0,28	1,41	1	3...4
		-0,15	0,89	1	4...5
	$\mu_{nC}(z_2)$	0,22	0,78	1	0...1
		-0,56	2,56	2	1...3
		-0,22	1,1	1	3...4
		-0,11	0,66	1	4...5
	$\mu_C(z_2)$	0,22	0,56	1	0...1
		0,22	1,34	2	1...3
		-0,67	3,01	1	3...4
		-0,22	1,21	1	4...5
	$\mu_{oC}(z_2)$	0,26	0,25	1	0...1
		0,25	0,77	2	1...3
		0,24	0,04	1	3...4
		-0,87	4,48	1	4...5
	$\mu_B(z_2)$	0,125	0,125	1	0...1
		0,25	0,25	2	1...3
		0,25	-0,25	1	3...4
		0,25	-0,25	1	4...5
Вміст вуглекислого газу (CO ₂)	$\mu_H(z_3)$	-0,28	1,5	1,5	0...1,5
		-0,28	1,5	1,5	1,5...3
		-0,165	1,155	1,5	3...4,5
		-0,165	1,155	1,5	4,5...6
	$\mu_C(z_3)$	0,335	0,495	1,5	0...1,5
		0,335	0,495	1,5	1,5...3
		-0,416	2,748	1,5	3...4,5
		-0,417	2,7525	1,5	4,5...6
	$\mu_B(z_3)$	0,214	0,2145	1,5	0...1,5
		0,213	0,216	1,5	1,5...3
		0,215	0,21	1,5	3...4,5
		0,215	0,21	1,5	4,5...6
Вміст кисню (O ₂)	$\mu_H(z_4)$	-0,28	0,25	0,25	0...0,25
		-0,28	0,25	0,25	0,25...0,5
		-0,165	0,1925	0,25	0,5...0,75
		-0,165	0,1925	0,25	0,75...1
	$\mu_C(z_4)$	0,15	0,1775	0,25	0...0,25

Продовження табл. 2.11

1	2	3	4	5	6	
Вміст кисню (O ₂)	$\mu_C(z_4)$	0,14	0,18	0,25	0,25...0,5	
		-0,43	0,465	0,25	0,5...0,75	
		-0,43	0,465	0,25	0,75...1	
	$\mu_B(z_4)$	0,1	0,05	0,25	0...0,25	
		0,1	0,05	0,25	0,25...0,5	
		0,3	-0,05	0,25	0,5...0,75	
		0,3	-0,05	0,25	0,75...1	
	Вміст механічних домішок	$\mu_H(z_5)$	-0,215	0,25	0,25	0...0,25
-0,215			0,25	0,25	0,25...0,5	
-0,21			0,2475	0,25	0,5...0,75	
-0,22			0,255	0,25	0,75...1	
$\mu_C(z_5)$		0,22	0,14	0,25	0...0,25	
		0,22	0,14	0,25	0,25...0,5	
		-0,44	0,47	0,25	0,5...0,75	
		-0,45	0,4775	0,25	0,75...1	
$\mu_B(z_5)$		0,313	0,03125	0,25	0...0,25	
		0,312	0,0315	0,25	0,25...0,5	
		0,125	0,125	0,25	0,5...0,75	
		0,125	0,125	0,25	0,75...1	
Вміст вологи (за точкою роси вологи при тиску 3,92 МПа)		$\mu_H(z_6)$	-0,22	0,24	2	-8...-6
			-0,22	0,24	2	-6...-4
			-0,23	0,2	2	-4...-2
			-0,22	0,22	2	-2...0
	$\mu_{HC}(z_6)$	0,23	3,38	2	-8...-6	
		-0,49	-0,94	2	-6...-4	
		-0,26	-0,02	2	-4...-2	
		-0,12	0,26	2	-2...0	
	$\mu_C(z_6)$	0,22	2,88	2	-8...-6	
		0,22	2,88	2	-6...-4	
		-0,22	1,12	2	-4...-2	
		-0,22	1,12	2	-2...0	
	$\mu_{6C}(z_6)$	0,23	2,5	2	-8...-6	
		0,22	2,44	2	-6...-4	
		0,22	2,44	2	-4...-2	
		-0,89	0,22	2	-2...0	
	$\mu_B(z_6)$	0,125	1,25	2	-8...-6	

Продовження табл. 2.11

1	2	3	4	5	6
Вміст вологи	$\mu_B(z_6)$	0,25	2	2	-6...-4
		0,25	2	2	-4...-2
		0,25	2	2	-2...0
Вміст меркаптанової сірки	$\mu_H(z_7)$	-0,25	5	5	0...5
		-0,25	5	5	5...10
		-0,166	4,16	5	10...15
		-0,167	4,175	5	15...20
	$\mu_C(z_7)$	0,188	3,125	5	0...5
		0,187	3,13	5	5...10
		-0,437	9,37	5	10...15
		-0,438	9,385	5	15...20
	$\mu_B(z_7)$	0,144	0,715	5	0...5
		0,143	0,72	5	5...10
		0,285	-0,7	5	10...15
		0,285	-0,7	5	15...20

Таблиця 2.12

Значення функції належності факторів, що впливають
на якість природного газу

Фактор ($U \cdot$)		Значення	Значення функції належності термів для оцінки фактора $U \cdot$	Значення функції належності змінної (X, Y, Z)	
1	2	3	4	4	
x_1	s_1	90 %	$\mu_H(s_1) = 0,445$	$\mu_H(x_1) = 0,56$ $\mu_{HC}(x_1) = 0,723$ $\mu_C(x_1) = 1$ $\mu_{eC}(x_1) = 1$ $\mu_B(x_1) = 1$	$\mu_H(X) = 0,723$ $\mu_{HC}(X) = 1$ $\mu_C(X) = 1$ $\mu_{eC}(X) = 1$ $\mu_B(X) = 1$
			$\mu_{HC}(s_1) = 0,63$		
			$\mu_C(s_1) = 0,938$		
			$\mu_{eC}(s_1) = 0,83$		
			$\mu_B(s_1) = 0,556$		
	s_2	3 %	$\mu_H(s_2) = 0,56$		
			$\mu_{HC}(s_2) = 0,63$		
			$\mu_C(s_2) = 1$		
			$\mu_{eC}(s_2) = 0,78$		
	s_3	2 %	$\mu_B(s_2) = 0,56$		
			$\mu_H(s_3) = 0,47$		
			$\mu_C(s_3) = 0,723$		
	s_4	1 %	$\mu_B(s_3) = 0,833$		
			$\mu_H(s_4) = 0,5$		
	s_5	1 %	$\mu_C(s_4) = 1$		
			$\mu_B(s_4) = 0,57$		
			$\mu_H(s_5) = 0,125$		

Продовження табл. 2.12

Фактор (U^*)		Значення	Значення функції належності термів для оцінки фактора U^*		Значення функції належності змінної (X, Y, Z)
1		2	3		4
x_1	s_5	1 %	$\mu_C(s_5) = 0,167$		$\mu_H(X) = 0,723$ $\mu_{HC}(X) = 1$ $\mu_C(X) = 1$ $\mu_{eC}(X) = 1$ $\mu_B(X) = 1$
			$\mu_B(s_5) = 1$		
x_2	b_1	10 мг/м ³	$\mu_H(b_1) = 0,67$	$\mu_H(x_2) = 0,72$ $\mu_{HC}(x_2) = 1$ $\mu_C(x_2) = 1$ $\mu_{eC}(x_2) = 1$ $\mu_B(x_2) = 0,67$	
			$\mu_{HC}(b_1) = 0,45$		
			$\mu_C(b_1) = 1$		
			$\mu_{eC}(b_1) = 0,78$		
			$\mu_B(b_1) = 0,56$		
	b_2	2 %	$\mu_H(b_2) = 0,72$		
			$\mu_{HC}(b_2) = 1$		
			$\mu_C(b_2) = 0,78$		
			$\mu_{eC}(b_2) = 0,51$		
	b_3	3 %	$\mu_B(b_2) = 0,33$		
			$\mu_H(b_3) = 0,625$		
			$\mu_C(b_3) = 1$		
	b_4	0,5 %	$\mu_B(b_3) = 0,5$		
			$\mu_H(b_4) = 0,57$		
			$\mu_C(b_4) = 1$		
	b_5	5 г/м ³	$\mu_B(b_4) = 0,67$		
			$\mu_H(b_5) = 0,56$		
			$\mu_{HC}(b_5) = 0,5$		
			$\mu_C(b_5) = 1$		
	b_6	-4 °C	$\mu_{eC}(b_5) = 0,67$		
$\mu_B(b_5) = 0,5$					
$\mu_H(b_6) = 0,5$					
$\mu_{HC}(b_6) = 0,56$					
y_1	8 мг/м ³	$\mu_C(b_6) = 1$	$\mu_H(Y) = 0,855$ $\mu_{HC}(Y) = 0,855$ $\mu_C(Y) = 0,857$ $\mu_{eC}(Y) = 1$ $\mu_B(Y) = 0,835$		
		$\mu_{eC}(b_6) = 0,75$			
		$\mu_B(b_6) = 0,56$			
y_2	1 %	$\mu_{B0}(y_1) = 0,824$			
		$\mu_{C1}(y_1) = 0,925$			
		$\mu_{П1}(y_1) = 0,286$			
y_3	2 %	$\mu_{B0}(y_2) = 0,855$			
		$\mu_{C1}(y_2) = 0,78$			
		$\mu_{П1}(y_2) = 0,235$			
y_4	0,02 %	$\mu_{B0}(y_3) = 0,6$			
		$\mu_{C1}(y_3) = 0,857$			
		$\mu_{П1}(y_3) = 0,292$			
		$\mu_{B0}(y_4) = 0,167$			
		$\mu_{C1}(y_4) = 0,11$			
		$\mu_{П1}(y_4) = 1$			

Продовження табл. 2.12

Фактор (U^*)	Значення	Значення функції належності термів для оцінки фактора U^*	Значення функції належності змінної (X, Y, Z)
1	2	3	4
y_5	1 мг/м ³	$\mu_{B0}(y_5) = 0,167$	$\mu_H(Y) = 0,855$ $\mu_{HC}(Y) = 0,855$ $\mu_C(Y) = 0,857$ $\mu_{6C}(Y) = 1$ $\mu_B(Y) = 0,835$
		$\mu_C(y_5) = 0,25$	
		$\mu_{\Pi}(y_5) = 1$	
y_6	-2 °C	$\mu_{B0}(y_6) = 0,335$	
		$\mu_C(y_6) = 0,563$	
		$\mu_{\Pi}(y_6) = 0,665$	
y_7	51,5 МДж/м ³	$\mu_H(y_7) = 0,33$	
		$\mu_{HC}(y_7) = 0,25$	
		$\mu_C(y_7) = 0,72$	
		$\mu_{6C}(y_7) = 1$	
		$\mu_B(y_7) = 0,78$	
y_8	37,6 МДж/м ³	$\mu_H(y_8) = 0,39$	
		$\mu_C(y_8) = 0,57$	
		$\mu_B(y_8) = 0,835$	
y_9	0,7 кг/м ³	$\mu_H(y_9) = 0,335$	
		$\mu_C(y_9) = 0,6$	
		$\mu_B(y_9) = 0,79$	
z_1	2 мг/м ³	$\mu_H(z_1) = 0,667$	$\mu_H(Z) = 1$ $\mu_{HC}(Z) = 0,75$ $\mu_C(Z) = 0,807$ $\mu_{6C}(Z) = 0,807$ $\mu_B(Z) = 0,813$
		$\mu_{HC}(z_1) = 0,875$	
		$\mu_C(z_1) = 0,807$	
		$\mu_{6C}(z_1) = 0,634$	
		$\mu_B(z_1) = 0,41$	
z_2	1 %	$\mu_H(z_2) = 0,72$	
		$\mu_{HC}(z_2) = 1$	
		$\mu_C(z_2) = 0,78$	
		$\mu_{6C}(z_2) = 0,51$	
		$\mu_B(z_2) = 0,25$	
z_3	1 %	$\mu_H(z_3) = 0,813$	
		$\mu_C(z_3) = 0,553$	
		$\mu_B(z_3) = 0,286$	
z_4	0,75 %	$\mu_H(z_4) = 0,275$	
		$\mu_C(z_4) = 0,57$	
		$\mu_B(z_4) = 0,7$	
z_5	1 мг/м ³	$\mu_H(z_5) = 0,14$	
		$\mu_C(z_5) = 0,11$	
		$\mu_B(z_5) = 1$	
z_6	-2 °C	$\mu_H(z_6) = 0,33$	
		$\mu_{HC}(z_6) = 0,25$	

Продовження табл. 2.12

Фактор (U^*)	Значення	Значення функції належності термів для оцінки фактора U^*	Значення функції належності змінної (X, Y, Z)
1	2	3	4
z_6	$-2\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\mu_C(z_6) = 0,78$	$\mu_H(Z) = 1$ $\mu_{nC}(Z) = 0,75$ $\mu_C(Z) = 0,807$ $\mu_{eC}(Z) = 0,807$ $\mu_B(Z) = 0,813$
		$\mu_{eC}(z_6) = 1$	
		$\mu_B(z_6) = 0,75$	
z_7	15 мг/м^3	$\mu_H(z_7) = 0,334$	
		$\mu_C(z_7) = 0,563$	
		$\mu_B(z_7) = 0,715$	

Використовуючи аналітичні формули (2.9)–(2.13) та значення функцій належності змінних X, Y, Z (див. табл. 2.12), отримано значення функцій належності терм-оцінок змінної $A_{япг}$:

$$\mu_H(A_{япг}) = 0,723 \cdot 0,855 \cdot 1 \vee 0,723 \cdot 0,855 \cdot 1 \vee 0,723 \cdot 0,855 \cdot 0,75 = 1 \cdot 1 \cdot 0,855 = 0,855;$$

$$\mu_{nC}(A_{япг}) = 0,723 \cdot 0,857 \cdot 0,807 \vee 1 \cdot 0,855 \cdot 0,75 \vee 1 \cdot 0,855 \cdot 0,75 = 0,857 \cdot 1 \cdot 1 = 0,857;$$

$$\mu_C(A_{япг}) = 1 \cdot 0,857 \cdot 0,807 \vee 1 \cdot 0,857 \cdot 0,807 \vee 1 \cdot 0,855 \cdot 0,807 = 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1;$$

$$\mu_{eC}(A_{япг}) = 1 \cdot 1 \cdot 0,807 \vee 1 \cdot 1 \cdot 0,813 \vee 1 \cdot 0,835 \cdot 0,807 = 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1;$$

$$\mu_B(A_{япг}) = 1 \cdot 0,835 \cdot 0,807 \vee 1 \cdot 1 \cdot 0,813 \vee 1 \cdot 0,835 \cdot 0,813 = 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1.$$

Якісна оцінка якості природного газу представлена у вигляді нечіткої множини

$$A_{япг} = \left\{ \frac{\mu_{q_1}(A_{япг})}{d_1}, \frac{\mu_{q_2}(A_{япг})}{d_2}, \dots, \frac{\mu_{q_m}(A_{япг})}{d_m} \right\}, \quad (2.42)$$

де m – число нечітких термів для змінної $A_{япг}$; q_i – назва i -го терму, $i = \overline{1, m}$; $\mu_{q_i}(A_{япг})$ – ступінь належності змінної $A_{япг}$ терму q_i ; d_i – кількісне значення, яке відповідає терму q_i .

Отримана нечітка множина визначає якість природного газу для фіксованого вектора факторів впливу. Відповідно до етапу дефазифікації за методом «центр ваги» нечіткій множині відповідає кількісна оцінка:

$$A_{япг}^* = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_{q_i}(A_{япг}) \cdot d_i}{\sum_{i=1}^m \mu_{q_i}(A_{япг})}. \quad (2.43)$$

Підставивши у (2.43) формулу d_i для i -го терму q_i :

$$d_i = \left[\frac{A_{япг}}{m-1} + \frac{\overline{A_{япг}} - A_{япг}}{m-1} \cdot (i-1) \right],$$

де $\overline{A_{япг}}$ ($A_{япг}$) – найменше (найбільше) значення змінної $A_{япг}$, рівняння (2.43) буде мати вигляд

$$A_{япг}^* = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_{q_i}(A_{япг}) \cdot \left[\frac{A_{япг}}{m-1} + \frac{\overline{A_{япг}} - A_{япг}}{m-1} \cdot (i-1) \right]}{\sum_{i=1}^m \mu_{q_i}(A_{япг})}. \quad (2.44)$$

Для прикладу, наведеного в табл. 2.12, за умови, що $\underline{A_{япг}} = 1$ бал, $\overline{A_{япг}} = 5$ балів, дефазифікація за формулою (2.44) дає такий прогноз якості природного газу:

$$A_{япг}^* = \frac{0,855 \cdot 1 + 0,857 \cdot 2 + 1 \cdot 3 + 1 \cdot 4 + 1 \cdot 5}{0,855 + 0,857 + 1 + 1 + 1} = 3,092 \text{ (балів)}.$$

Якість природного газу з параметрами, що були вибрані для прикладу, становить 3,092 балів. Модель нечіткого логічного висновку разом з процедурою дефазифікації забезпечує можливість спостереження за змінами вихідного показника – якості природного газу залежно від кількісних та якісних факторів, що наведено в табл. 2.1. Використовуючи математичну модель в комплексі для всіх підрівнів та рівнів, можна отримати прогнозовану оцінку впливу наведених факторів на якість природного газу. При цьому отримане значення приймається за результатами віртуального експерименту, який базується на експертній базі знань.

2.4. Оцінка адекватності моделі підтримки прийняття організаційно-технологічних управлінських рішень в проектах оцінювання якості природного газу

З врахуванням ієрархічної класифікації факторів (див. рис. 2.1) запропоновано математичну модель прийняття управлінських рішень, щодо оцінки якості природного газу, що розроблена з використанням теорії нечіткої логіки та лінгвістичних змінних.

Адекватність запропонованої математичної моделі та алгоритму інтелектуальної підтримки прийняття управлінського рішення для реалізації проекту оцінювання якості природного газу із застосуванням нечіткої логіки та лінгвістичних змінних потребує перевірки одним із відомих незалежних методів. Розв'язання цієї задачі можливе з використанням математичної моделі прийняття управлінських рішень, розробленої з використанням методу парних порівнянь Т. Сааті. Цей метод дозволяє при моделюванні враховувати кількісні та якісні збуджувальні параметри, які впливають на якість природного газу, оскільки він є одним з методів аналітичного моделювання ієрархічних процесів і аналітичних мережевих процесів підтримки прийняття управлінських рішень [63–65]. Це забезпечується тим, що фактори впливу зрівнюються попарно по відношенню до їх дії на загальну для них характеристику. Збіжність результатів, отриманих з використанням однакових вхідних даних двома незалежними методами, дозволить перевірити достовірність запропонованої математичної моделі інтелектуальної підтримки прийняття рішення, щодо оцінки якості природного газу.

Принцип ідентичності та декомпозиції передбачає структурування проблеми оцінювання якості природного газу у вигляді ієрархії. Ієрархія сприймається як певний тип системи, де фактори впливу на якість природного газу групуються у множини. Елементи кожної групи знаходяться під впливом елементів деякої групи I , і у свою чергу впливають на елементи іншої групи. Вважається, що елементи кожної групи (рівня) ієрархії незалежні, а ієрархія

будується з вершини. Її загальна структура, множина її елементів і різні ієрархічні рівні щодо оцінки якості природного газу наведені на рис. 2.13.

Експерту проекту з оцінки якості природного газу послідовно пред'являються пари альтернатив (X_i, X_j) і пропонують визначити ступінь d_{ij} переваги альтернативи X_i над альтернативою X_j відносно деякого якісного фактору впливу на якість природного газу. При цьому, якщо експерту була представлена пара (X_i, X_j) і він визначив ступінь переваги d_{ij} , то пара (X_i, X_j) вже не пропонується, а ступінь переваги d_{ij} визначається, виходячи з (2.45).

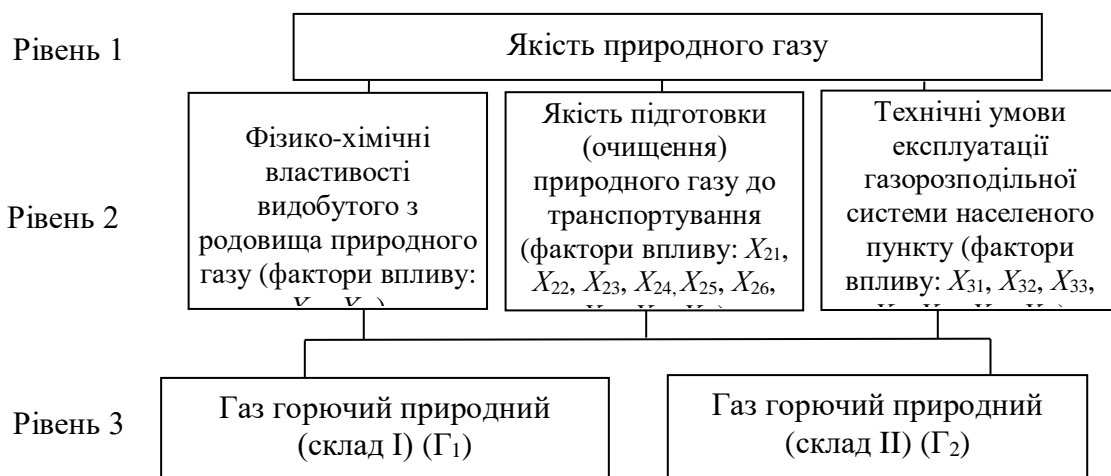


Рис. 2.13. Ієрархічна модель прийняття рішення з оцінки якості природного газу

Таким чином, за наявності n альтернатив експерт повинен виконати $n(n-1)/2$ порівнянь. Оскільки матриця має властивість оберненої симетричності тому

$$d_{ij} = 1/d_{ji}. \quad (2.45)$$

Елементи d_{ij} , $i, j = (1, n)$, утворюють квадратну матрицю парних порівнянь D [63]. При цьому елемент d_{ij} можна трактувати як відношення вагів альтернатив X_i і X_j , тобто w_i/w_j

$$D = \begin{vmatrix} w_1 / w_1 & w_1 / w_2 & \dots & w_1 / w_n \\ w_2 / w_1 & w_2 / w_2 & \dots & w_2 / w_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_n / w_1 & w_n / w_2 & \dots & w_n / w_n \end{vmatrix}. \quad (2.46)$$

Якщо значення w_1, w_2, \dots, w_n невідомі, тоді парне порівняння здійснюється з використанням суб'єктивних суджень експертів, чисельно оцінене за шкалою парних порівнянь Т. Сааті, запропонованою в [13] та наведеною в табл. 2.13.

Таблиця 2.13

Шкала парних порівнянь Т. Сааті

Відносна важливість (бали w_1, w_2, \dots, w_n)	Визначення	Пояснення
1	Однакова важливість	Обидва елементи вносять однаковий вклад
3	Один елемент трохи важливіший за другий	Досвід дозволяє поставити один елемент трохи вище за другий
5	Суттєва перевага	Досвід дозволяє встановити безумовну перевагу одного над другим
7	Значна перевага	Один елемент настільки важливіший за другий, що є практично значимим
9	Абсолютна перевага одного над другим	Очевидність переваги підтверджується більшістю
2, 4, 6, 8	Проміжні оцінки між сусідніми твердженнями	Компромісне рішення
Обернені величини чисел, наведених вище	Якщо при порівнянні одного елемента з другим отримано одне з вищевказаних чисел (1–9), то при порівнянні другого з першим матимемо обернену величину	

При розробленні моделі інтелектуальної підтримки рішення щодо оцінювання якості природного газу складається матриця для порівняння

відносної важливості фізико-хімічних властивостей видобутого з родовища природного газу (X_{11} – вміст вуглеводнів у складі природного газу, X_{12} – вміст шкідливих компонентів у складі газу); якості підготовки (очищення) природного газу для транспортування (X_{21} – очистка від сірководню (H_2S), X_{22} – очистка від азоту (N_2), X_{23} – очистка від вуглекислого газу (CO_2), X_{24} – очистка від кисню (O_2), X_{25} – очистка від механічних домішок, X_{26} – очистка від вологи, X_{27} – число Воббе вище (стандартні умови), X_{28} – теплота згоряння вища (стандартні вимоги), X_{29} – відносна густина природного газу); технічних умов експлуатації газорозподільної системи населеного пункту (X_{31} – вміст сірководню (H_2S), X_{32} – вміст азоту (N_2), X_{33} – вміст вуглекислого газу (CO_2), X_{34} – вміст кисню (O_2), X_{35} – вміст механічних домішок, X_{36} – вміст вологи, X_{37} – вміст меркаптанової сірки) на другому рівні по відношенню до загальної мети на першому рівні (якість природного газу). Подібні матриці будуються для парних порівнянь кожної альтернативи на третьому рівні по відношенню до критеріїв другого рівня [63].

Для моделювання інтелектуальної підтримки управлінського рішення щодо визначення якості природного газу, який характеризується фізико-хімічними властивостями, якістю очищення та технічними умовами експлуатації, будується дев'ятнадцять матриць, одна для другого рівня ієрархії (табл. 2.14) і вісімнадцять – для третього рівня (табл. 2.15). В табл. 2.15 наведено парне порівняння можливих варіантів організаційно-управлінських рішень щодо вибору важливості факторів впливу на якість природного газу. Отримано вісімнадцять матриць суджень розмірністю 2×2 , оскільки є 18 критеріїв на другому рівні і два склади горючого природного газу, які досліджуються і парно порівнюються по кожному з критеріїв. З групи матриць парних порівнянь формується набір локальних пріоритетів, які виражають відносний вплив елементів ($X_{11} \dots X_{37}$) на елемент, який межує з верхнім рівнем. Знаходимо цінність кожного окремого об'єкта через «розв'язання» матриць. Для цього визначаються власні вектори для кожної матриці, а потім нормалізується результат до одиниці, отримуючи цим сам вектор пріоритетів.

Для отримання векторів пріоритетів виконано оцінювання компонентів власного вектора по рядках, яке здійснюється для першого рядка матриці за такою формулою:

$$\sqrt[n]{\frac{w_1}{w_1} \times \frac{w_1}{w_2} \times \frac{w_1}{w_3} \times \dots \times \frac{w_1}{w_n}} = m_1. \quad (2.47)$$

Наступним кроком є визначення вектора пріоритету для першого рядка матриці (див. табл. 2.14 та табл. 2.15) за формулою

$$\frac{m_1}{m_1 + m_2 + \dots + m_n} = x_1. \quad (2.48)$$

Аналогічно розраховують компонент власного вектора та вектор пріоритету для інших m_n рядків.

Компоненти власного вектора використовуються в якості множини відносних вагів альтернатив, що відповідає максимальному характеристичному числу λ_{\max} . Якщо матриця неузгоджена $\lambda_{\max} \geq n$ відповідно до методу Сааті, в якості показника ступеня узгодженості елементів матриці D використовується величина індексу узгодженості (consistency index – CI)

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / n - 1. \quad (2.49)$$

Відповідно до методу Сааті оцінювання достатності ступеня узгодженості представлене відношенням узгодженості (consistency ratio – CR)

$$CR = CI / CIS, \quad (2.50)$$

де CIS – середнє значення CR , яке обчислене для певної кількості матриць парних порівнянь, що зібрані у фундаментальній шкалі [63]. Якщо CR рівне 0,10 (але не перевищує 0,20), результуючий вектор щодо вагів вважати задовільним.

Для матриці факторів впливу другого рівня – «Технічні умови експлуатації газорозподільної мережі населеного пункту» – вектор пріоритетів складає: $X_{11} = 0,193$; $X_{12} = 0,078$; $X_{21} = 0,024$; $X_{22} = 0,033$; $X_{23} = 0,021$; $X_{24} = 0,031$; $X_{25} = 0,017$; $X_{26} = 0,124$; $X_{27} = 0,125$; $X_{28} = 0,138$; $X_{29} = 0,071$; $X_{31} = 0,012$; $X_{32} = 0,017$; $X_{33} = 0,01$; $X_{34} = 0,016$; $X_{35} = 0,009$; $X_{36} = 0,075$; $X_{37} = 0,006$ та $\lambda_{\max} = 29,923$, індекс узгодженості $CI = 0,701$, відношення узгодженості $CR = 0,20$, що задовольняє вимоги [66]. Для матриці третього рівня ці показники наведено в табл. 2.16.

Таблиця 2.14

Парне порівняння факторів впливу на якість природного газу: матриця парних порівнянь для рівня 2

Факто ри впливу	X_{11}	X_{12}	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	X_{25}	X_{26}	X_{27}	X_{28}	X_{29}	X_{31}	X_{32}	X_{33}	X_{34}	X_{35}	X_{36}	X_{37}
X_{11}	1	9	7	8	6	7	8	5	4	6	3	7	8	6	7	8	5	9
X_{12}	1/9	1	7	6	8	7	5	3	1/7	1/8	1/4	6	7	8	5	9	3	5
X_{21}	1/7	1/7	1	5	4	1/3	2	1/5	1/7	1/9	1/6	3	4	3	1/3	2	1/5	5
X_{22}	1/8	1/6	1/5	1	6	5	7	1/7	1/8	1/8	1/7	6	5	6	5	3	1/6	6
X_{23}	1/6	1/8	1/4	1/6	1	1/4	5	1/8	1/9	1/9	1/7	3	4	5	3	4	1/7	5
X_{24}	1/7	1/7	3	1/5	4	1	6	1/7	1/8	1/9	1/7	5	3	6	5	6	1/6	5
X_{25}	1/8	1/5	1/2	1/7	1/5	1/6	1	1/8	1/7	1/8	1/6	3	4	5	4	2	1/5	4
X_{26}	1/5	1/3	5	7	8	7	8	1	5	4	7	6	7	5	6	5	2	9
X_{27}	1/4	7	7	8	9	8	7	1/5	1	1/2	4	7	8	7	8	9	4	9
X_{28}	1/6	8	9	8	9	9	8	1/4	2	1	3	8	7	9	8	9	5	8
X_{29}	1/3	4	6	7	7	7	6	1/7	1/4	1/3	1	4	5	4	3	6	1/3	7
X_{31}	1/7	1/6	1/3	1/6	1/3	1/5	1/3	1/6	1/7	1/8	1/4	1	1/3	3	1/4	2	1/7	5
X_{32}	1/8	1/7	1/4	1/5	1/4	1/3	1/4	1/7	1/8	1/7	1/5	3	1	6	5	7	1/6	8
X_{33}	1/6	1/8	1/3	1/5	1/5	1/6	1/5	1/5	1/7	1/9	1/4	1/3	1/6	1	1/3	4	1/5	7
X_{34}	1/7	1/5	3	1/5	1/3	1/5	1/4	1/6	1/8	1/8	1/3	4	1/5	3	1	5	1/6	6
X_{35}	1/8	1/9	1/2	1/3	1/4	1/6	1/2	1/5	1/9	1/9	1/6	1/2	1/7	1/4	1/5	1	1/7	5
X_{36}	1/5	1/3	5	6	7	6	5	1/2	1/4	1/5	3	7	6	5	6	7	1	8
X_{37}	1/9	1/5	1/5	1/6	1/5	1/5	1/4	1/9	1/9	1/8	1/7	1/5	1/8	1/7	1/6	1/5	1/8	1

Таблиця 2.15

Парне порівняння факторів впливу на
якість природного газу: матриця парних порівнянь для рівня 3

X_{11}	Γ_1	Γ_2	X_{12}	Γ_1	Γ_2	X_{21}	Γ_1	Γ_2	X_{22}	Γ_1	Γ_2	X_{23}	Γ_1	Γ_2
Γ_1	1	7	Γ_1	1	5	Γ_1	1	4	Γ_1	1	1/3	Γ_1	1	1/7
Γ_2	1/7	1	Γ_2	1/5	1	Γ_2	1/4	1	Γ_2	3	1	Γ_2	7	1
X_{24}	Γ_1	Γ_2	X_{25}	Γ_1	Γ_2	X_{26}	Γ_1	Γ_2	X_{27}	Γ_1	Γ_2	X_{28}	Γ_1	Γ_2
Γ_1	1	2	Γ_1	1	1/5	Γ_1	1	1/9	Γ_1	1	1/3	Γ_1	1	4
Γ_2	1/2	1	Γ_2	5	1	Γ_2	9	1	Γ_2	3	1	Γ_2	1/4	1
X_{29}	Γ_1	Γ_2	X_{31}	Γ_1	Γ_2	X_{32}	Γ_1	Γ_2	X_{33}	Γ_1	Γ_2	X_{34}	Γ_1	Γ_2
Γ_1	1	1/3	Γ_1	1	5	Γ_1	1	1/4	Γ_1	1	1/6	Γ_1	1	3
Γ_2	3	1	Γ_2	1/5	1	Γ_2	4	1	Γ_2	6	1	Γ_2	1/3	1
X_{35}	Γ_1	Γ_2	X_{36}	Γ_1	Γ_2	X_{37}	Γ_1	Γ_2						
Γ_1	1	1/4	Γ_1	1	1/8	Γ_1	1	1/7						
Γ_2	4	1	Γ_2	8	1	Γ_2	7	1						

Таблиця 2.16

Фактори впливу на якість природного газу:
матриця для другого рівня, рішення та узгодженість

Показники	X_{11}	X_{12}	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	X_{25}	X_{26}	X_{27}
Вектор переваг (Γ_1)	0,875	0,834	0,8	0,25	0,125	0,667	0,166	0,1	0,25
Вектор переваг (Γ_2)	0,125	0,166	0,2	0,75	0,875	0,333	0,834	0,9	0,75
λ_{\max}	3,024	2,683	2,5	2,307	3,024	2,117	2,683	3,333	2,307
CI	1,024	0,683	0,5	0,307	1,024	0,117	0,683	1,333	0,307
CR	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Показники	X_{28}	X_{29}	X_{31}	X_{32}	X_{33}	X_{34}	X_{35}	X_{36}	X_{37}
Вектор переваг (Γ_1)	0,8	0,25	0,834	0,2	0,143	0,75	0,2	0,113	0,125

Продовження табл. 2.16

Вектор переваг (Γ_2)	0,2	0,75	0,166	0,8	0,857	0,25	0,8	0,887	0,875
λ_{\max}	2,5	2,307	2,683	2,5	2,858	2,307	2,5	3,128	3,024
CI	0,5	0,307	0,683	0,5	0,858	0,307	0,5	1,128	1,024
CR	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Наступним кроком попарних порівнянь є застосування принципу синтезу. Для виявлення глобальних пріоритетів якості природного газу в матриці локальні пріоритети розташовуються по відношенню до кожного критерію, кожний стовпець векторів множиться на пріоритет відповідного критерію і результат підсумовується для кожного рядка.

Отримані глобальні пріоритети якості природного газу: газ горючий природний (склад I) (Γ_1) – 0,487; газ горючий природний (склад II) (Γ_2) – 0,513. Газ горючий природний (склад II) отримав найвищу оцінку за глобальними пріоритетами і тому можна його вважати найбільш залежним від факторів впливу на якість природного газу в цілому.

В результаті чисельного експерименту, використовуючи метод парних порівнянь Сааті, отримано кількісні оціночні критерії якості природного газу, а саме 0,487 для газу природного горючого (склад I) та 0,513 для газу природного горючого (склад II). Отримані результати дозволяють оцінити питому вагу кожного фактора впливу на формування кінцевих незалежних управлінських висновків та пропозицій щодо якості природного газу. Це є підтвердженням адекватності моделі прогнозування якості природного газу з використанням теорії нечіткої логіки та лінгвістичних змінних та достовірності й доцільності запропонованої експертно-моделювальної системи інтелектуальної підтримки прийняття управлінських рішень.

2.5. Визначення пріоритету факторів впливу на якість природного газу

Методи управління якістю природного газу характеризуються плановим, повторювальним і науково-обґрунтованим способами реалізації певних завдань. Одним із методів аналізу в складних й багатозв'язних системах є метод Парето, який полягає в класифікації проблем на нечисленні, але суттєво важливі, і численні, але несуттєві [67]. Він дозволяє розподілити зусилля експерта проекту з оцінювання і прогнозування якості природного газу і встановити основні фактори, з яких необхідно починати діяти з метою запобігання проблем, що виникають під час споживання газу в складних багатофакторних системах, якими є газові мережі. Етапи застосування методу Парето до аналізу управління якістю газу на газових мережах наведено на рис. 2.14.

При побудові діаграми Парето використано класифікацію параметрів, що виникають, – факторів впливу на якість природного газу за окремими чинниками [56]. Такими основними групами факторів є: фізико-хімічні властивості видобутого з родовища природного газу (x_1 – вміст вуглеводнів у складі природного газу, x_2 – вміст шкідливих компонентів у складі газу), якість підготовки (очищення) природного газу для транспортування (y_1 – очистка від сірководню (H_2S), y_2 – очистка від азоту (N_2), y_3 – очистка від вуглекислого газу (CO_2), y_4 – очистка від кисню (O_2), y_5 – очистка від механічних домішок, y_6 – очистка від вологи, y_7 – число Воббе вище (стандартні умови), y_8 – теплота згоряння вище (стандартні умови), y_9 – відносна густина природного газу) та технічні умови експлуатації газорозподільної системи населеного пункту (z_1 – вміст сірководню (H_2S), z_2 – вміст азоту (N_2), z_3 – вміст вуглекислого газу (CO_2), z_4 – вміст кисню (O_2), z_5 – вміст механічних домішок, z_6 – вміст вологи, z_7 – вміст меркаптанової сірки) [56].

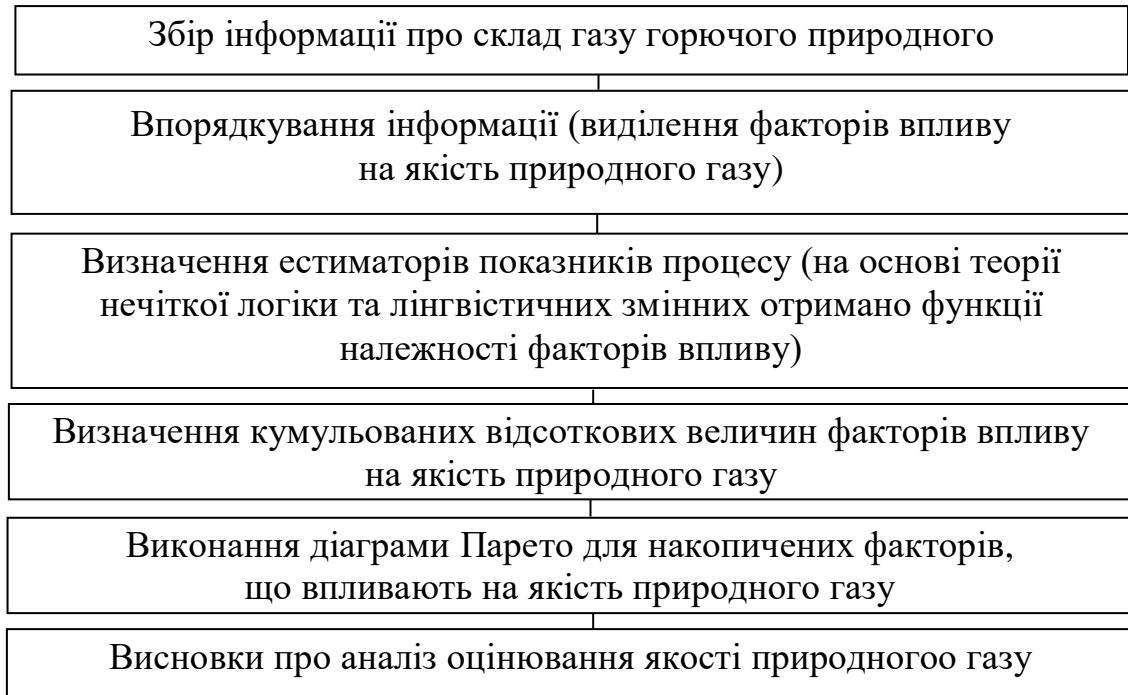


Рис. 2.14. Етапи аналізу оцінювання якості природного газу за допомогою методу Парето

Оцінка значень лінгвістичних змінних, якими є фактори впливу якості природного газу, проводиться за допомогою системи якісних термів: Н – низька; нС – нижче середнього; С – середня; вС – вище середнього; В – висока [56]. Кожний з цих термів становить відповідну нечітку множину, тобто деяку властивість, яка розглядається як лінгвістичний терм. Після виконання збору та аналізу інформації по кожному фактору впливу для проведення порівняння між ними з’ясовують, які з них є такими, що переважають у створенні проблем. Для порівняльного аналізу використано функції належності лінгвістичних змінних факторів впливу на якість природного газу, які отримані методом знаходження «центра ваги» плоскої фігури під час перетворення нечіткої лінгвістичної інформації в чітку форму на основі теорії нечіткої логіки та лінгвістичних змінних [57]. Для визначення функцій належності факторів впливу на якість природного газу як лінгвістичних змінних були використані дані експертних

оцінок. Усі зібрані дані факторів впливу на якість природного газу наведено в табл. 2.17, в порядку зменшення їх значень – функцій належності [57].

Таблиця 2.17

Фактори впливу для аналізу оцінювання якості природного газу
та їх накопичені значення

№ п/п	Фактор впливу	Функція належності фактора впливу	Накопичена сума	Накопичений відсоток, %
1	2	3	4	5
1	Теплота згоряння вища (стандартні умови) (y_8)	0,835	0,835	9,6
2	Вміст вологи (z_6)	0,78	1,615	18,5
3	Число Воббе вище (стандартні умови) (y_7)	0,78	2,395	27,5
4	Вміст вуглеводнів у складі природного газу (x_1)	0,723	3,118	35,8
5	Вміст шкідливих компонентів у складі газу (x_2)	0,67	3,788	43,5
6	Очистка від вологи (y_6)	0,665	4,453	51,1
7	Відносна густина природного газу (y_9)	0,6	5,053	58
8	Вміст кисню (O_2) (z_4)	0,57	5,623	64,5
9	Вміст вуглекислого газу (CO_2) (z_3)	0,553	6,176	70,9
10	Вміст азоту (N_2) (z_2)	0,51	6,686	76,7
11	Вміст сірководню (H_2S) (z_1)	0,41	7,096	81,4
12	Вміст меркаптанової сірки (z_7)	0,334	7,43	85,2
13	Очистка від вуглекислого газу (CO_2) (y_3)	0,292	7,722	88,6
14	Очистка від сірководню (H_2S) (y_1)	0,286	8,008	91,9
15	Очистка від азоту (N_2) (y_2)	0,235	8,243	94,6
16	Очистка від кисню (O_2) (y_4)	0,167	8,41	96,5
17	Очистка від механічних домішок (y_5)	0,167	8,577	98,4
18	Вміст механічних домішок (z_5)	0,14	8,717	100
	Всього	8,717		

В табл. 2.17 також наведено дані накопиченої суми функцій належності та накопиченого відсотка факторів впливу на якість природного газу. Стовпцева діаграма Парето (рис. 2.15), яка наочно ілюструє кількість факторів впливу на якість природного газу, побудована за даними табл. 2.17.

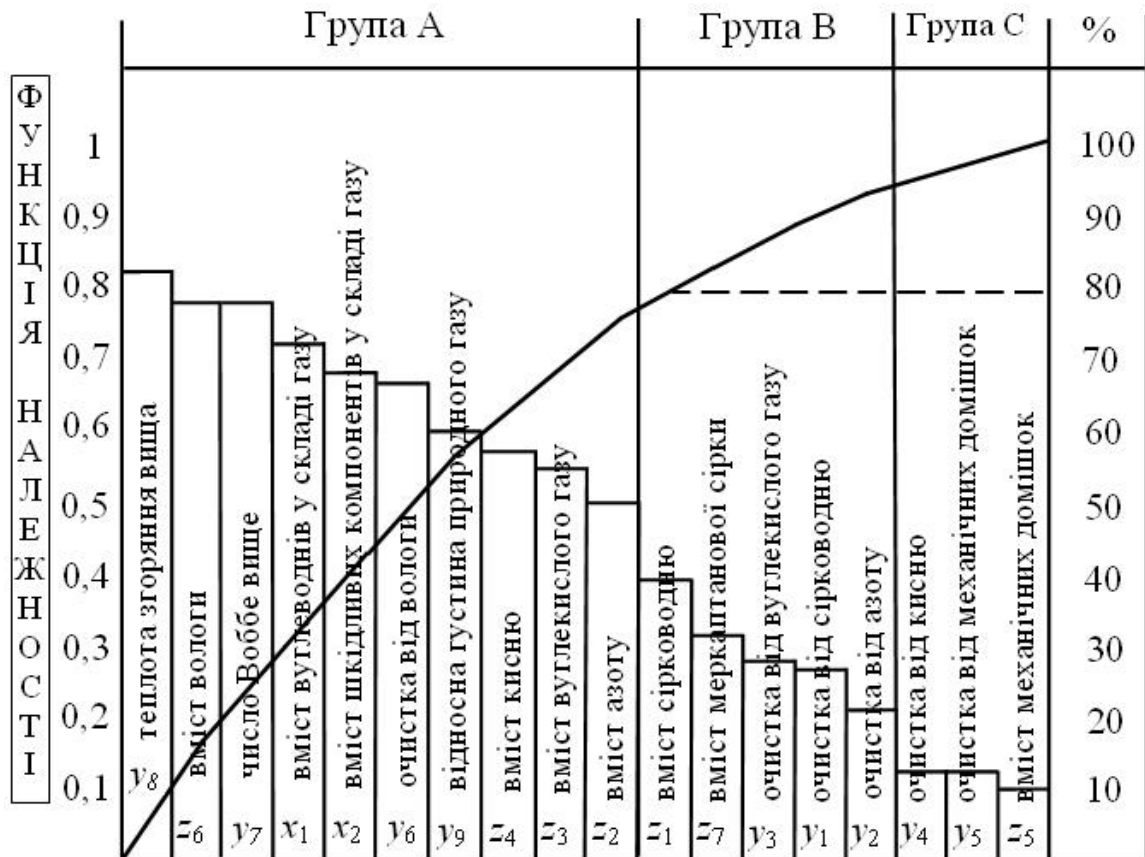


Рис. 2.15. Діаграма Парето накопичених факторів, що характеризують якість природного газу

Побудована діаграма дає можливість визначити ключові області і допомагає встановити пріоритети серед факторів впливу на якість природного газу, що одразу не видно з табл. 2.17. За даними накопичених факторів впливу побудовано кумулятивну криву (див. рис. 2.15). Для побудови графіка накреслено три основних осі (див. рис. 2.15). Горизонтальна вісь – для самих факторів впливу, вертикальна вісь ліворуч призначена для значень функцій належності факторів впливу, а вертикальна вісь справа – для позначення відсотків, що характеризують частину в загальній сумі накопичених значень. Вертикальну вісь використовують для забезпечення інтерпретації діаграми за допомогою відсоткових співвідношень. За правилом Парето, у технічних системах 20 % факторів відповідають за 80 % наслідків [67], тому проведено пунктирну пряму від 80 % процентної осі на лінію накопичених значень

функцій належності для визначення факторів, які є найбільше впливовими на якість природного газу.

Аналіз діаграми свідчить, що перші десять факторів: y_8 – теплота згоряння вища (стандартні умови), z_6 – вміст вологи, y_7 – число Воббе вище (стандартні умови), x_1 – вміст вуглеводнів у складі природного газу, x_2 – вміст шкідливих компонентів у складі газу, y_6 – очистка від вологи, y_9 – відносна густина природного газу, z_4 – вміст кисню (O_2), z_3 – вміст вуглекислого газу (CO_2), z_2 – вміст азоту (N_2) (число яких відповідає 55 % первинного списку з 18 категорій випадків (див. табл. 2.17) виникли приблизно в 77 % випадках). Діаграма Парето в цьому випадку показує ключові області і допомагає встановити пріоритети серед факторів впливу на якість природного газу. Крім того, графік (див. рис. 2.29) уможливорює ієрархізацію факторів впливу на якість природного газу, тобто показує, який з факторів впливу більше за інші впливає на якість природного газу.

Концепція Парето полягає у поділі поля під діаграмою на три зони (групи А, В та С). На підставі цього використано метод АВС-аналізу в процесі управління проектом з оцінки якості газу, в основі якого лежить правило Парето (принцип 80/20). Його розглядають як інформаційну основу, що дозволяє прийняти управлінські рішення, які потребують максимально точного визначення якості природного газу з подальшою можливістю прогнозування його складу [67]. Результати аналізу діаграми Парето дозволяють виділити групи факторів за їх суттєвістю, тобто в залежності від рівня впливу фактора на якість природного газу. Таким чином, якість природного газу зростає, оскільки буде відомо, які профілактичні заходи необхідно провести для покращення газоспоживання.

Група А (фактори: теплота згоряння вища (стандартні умови), вміст вологи, число Воббе (стандартні умови), вміст вуглеводнів у складі природного газу, вміст шкідливих компонентів у складі газу, очистка від вологи, відносна густина природного газу, вміст кисню, вміст вуглекислого газу, вміст азоту) –

найважливіші, суттєві фактори. Відносний відсоток групи А в загальній кількості факторів зазвичай від 60 до 80 %, в нашому випадку це 76,7 %. Відповідно, ліквідація причин групи А має найбільший пріоритет, а пов'язані з нею дії – найбільшу ефективність. Нехтування одним з факторів впливу на якість природного газу, що входить в групу А, може призвести до погіршення складу транспортованого газу горючого природного до споживача, що істотно впливає на газоспоживання. Тому в першу чергу необхідно взяти профілактичні заходи у поєднанні із засобами, що стосуються факторів з групи А, які запобігатимуть або суттєво обмежуватимуть погіршення якості природного газу.

Група В (фактори: вміст сірководню, вміст меркаптанової сірки, очистка від вуглекислого газу, очистка від сірководню, очистка від азоту) – фактори впливу, які мають в сумі не більше 20 %, в нашому випадку це 17,9 %. Як наслідок можуть виникнути проблеми з газоспоживанням меншого рівня важливості, імовірність яких потрібно обмежувати в другу чергу.

Група С (фактори: очистка від кисню, очистка від механічних домішок, вміст механічних домішок) – найменш значимі фактори впливу. Покращення якості природного газу несе незначний характер, стосовно якого застосування коригувальних заходів є необґрунтованим з економічних причин і стихійного характеру, оскільки виникнення таких змін складу газу горючого природного «вписане» в функціонування системи, а наслідки негативного впливу мають обмежений діапазон.

З діаграми Парето накопичених факторів, що впливають на якість природного газу, видно, що найбільш впливовим є теплота згоряння вища при стандартних умовах. Водночас теплота спалювання визначається в першу чергу кількісним і якісним складом суміші вуглеводнів (яка практично залишається незмінною протягом часу експлуатації родовища) та інших інгредієнтів (у першу чергу негорючих, максимально допустимий вміст котрих зазначений в Кодексі [14]), а також наявністю механічних домішок тощо. Тобто, вміст

останніх двох груп шкідливостей слід обмежити (що і відбувається в УКПГ під час підготовки природного газу до транспортування магістральними газопроводами). Наступним суттєвим чинником є вологість палива: наявність вологи впливає на експлуатаційну надійність як газотранспортної, так і у значно більшій мірі газорозподільної системи. Таким чином, він також є ключовим параметром і підлягає розгляду в першу чергу. Моделювання управління якістю природного газу з використанням функцій належності лінгвістичних змінних, якими є фактори впливу на неї методом Парето, дозволяє варіювати найбільш суттєвими чинниками, які забезпечують врахування найбільш впливових із них. З діаграми, що була побудована за допомогою методу Парето, видно, що найбільш впливовими факторами на якість природного газу та на погіршення умов газоспоживання є теплота згоряння вища при стандартних умовах та вологовміст палива. В зв'язку з цим при організаційно-технологічному забезпеченні споживання газу природного на високому рівні вони підлягають розгляду в першу чергу.

2.6. Висновки за розділом 2

1. Запропонована ієрархічна класифікація та формалізація фізико-хімічних, підготовчих та експлуатаційних кількісних та якісних факторів, що впливають на якість природного газу, дозволила побудувати функції належності оцінок класифікованих факторів за допомогою лінгвістичних змінних. Функції належності оцінок впливу факторів на якість природного газу є підтримання для моделювання прогнозованої оцінки якості природного газу в системах газопостачання.

2. Моделювання інтелектуальної підтримки оцінювання якості природного газу за допомогою системи нечітких логічних рівнянь дозволило отримати якісну оцінку складу газу природного горючого у вигляді нечіткої множини. В результаті дефазифікації нечіткої множини отримано прогнозовану бальну оцінку якості природного газу. Для розглянутого прикладу віртуального

чисельного експерименту, який базується на експертній базі знань, якість природного газу становить 3,092 бали.

3. Запропоновано методику визначення оцінки якості і природного газу та програмний продукт для її комп'ютерної реалізації. Адекватність запропонованої моделі методики оцінювання якості і природного газу перевірено з використанням методу парних порівнянь Сааті. За результатами чисельного експерименту глобальні пріоритети якості природного газу складають: газ горючий природний (склад I) – 0,487; газ горючий природний (склад II) – 0,513.

4. Визначення пріоритету факторів впливу якості природного газу методом Парето з використанням отриманих в результаті моделювання функцій належності лінгвістичних змінних свідчить, що найбільш впливовими фактором на якість природного газу є теплота згоряння вища при стандартних умовах та вологовміст палива. Вони є ключовими факторами і, відповідно, підлягають розгляду в першу чергу.

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ, ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА ЯКІСТЬ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

3.1. Завдання досліджень

З метою перевірки адекватності запропонованої методики оцінювання якості природного газу були проведені експериментальні дослідження щодо впливу вологовмісту газу на енергетичну цінність блакитного палива і, в кінцевому випадку, на експлуатаційну надійність газорозподільних систем населених пунктів.

Основними завданнями досліджень були:

- 1) хроматографічний аналіз відібраних проб природного газу в характерних точках газотранспортної (на ГРС, тиск газу 2,5 МПа) і газорозподільної (на ГРП, тиск газу 0,3 МПа) мереж, в які надходить паливо з одного джерела;
- 2) обґрунтування вибору обладнання і конструювання експериментального стенду для визначення точок роси (по волозі і вуглеводням) природного газу у відібраних пробах;
- 3) безпосереднє визначення температур точок роси (ТТР).

Поставлені завдання досліджень вирішувались як методами безпосереднього виміру параметрів природного газу, так і шляхом моделювання вмісту важких вуглеводнів C_{5+} з використанням програмної системи «ГазКондНафта» з наступною перевіркою адекватності отриманих результатів.

Для знаходження кількісного і якісного складу природного газу використано газовий хроматограф 6890N фірми «Agilent» (США) [75] разом з відповідним програмним забезпеченням «OpenLabChemStation». В хроматографі встановлено дві капілярні колонки:

- 1) HP-MOLSIV (15 м x 0,32 мм), яка заповнена молекулярними ситами, і дозволяє ідентифікувати такі гази як H_2 , O_2 , N_2 , CH_4 , CO ;

2) HP-PLOTO Q (15 м x 0,537 мм), яка заповнена полістерен-дивініл-бенzenом, дозволяє ідентифікувати CO₂, CH₄, C₂H₄, C₂H₆, C₃H₆, C₃H₈ і бутани.



Рис. 3.1. Газовий хроматограф 6890N фірми «Agilent» (США)

За допомогою хроматографічного аналізу був ідентифікований склад відібраних проб природного газу в широкому діапазоні концентрацій – від мікродомішок (як, наприклад, бутани C₄H₁₀) до практично 100 % (що характерно для метану CH₄ – основного компоненту природного газу).

Обробка результатів аналізів, а саме: побудова оптимальної градувальної характеристики за допомогою регресійного аналізу, обчислення молярних часток та невизначеностей компонентів, побудова контрольних карт, роздруківка звіту тощо виконувались за допомогою програми «Report10.1». Результати наведено у табл.3.1.

Таблиця 3.1

Компонентний склад газу, %

Компоненти	Колба №1	Колба №2	Колба №3	Колба №4
N ₂	1,03	1,52	1,18	1,36
CH ₄	90,78	91,89	90,87	91,12
CO ₂	2,41	0,95	2,27	1,84
C ₂ H ₆	3,89	3,77	3,79	3,74
C ₃ H ₈	0,94	0,93	0,89	0,91
iC ₄ H ₁₀	0,09	0,1	0,06	0,1
nC ₄ H ₁₀	0,14	0,14	0,09	0,13
H ₂ O	0,72	0,7	0,85	0,8
Сума	100,00	100,00	100,00	100,00

3.2. Методика визначення вологості (точки роси) природного газу

Надмірна кількість води в природному газі може спричинити утворення гідратів у трубопроводах та розподільчій арматурі, що може призвести до зниження продуктивності, порушення нормального функціонування або вихід з ладу газового обладнання. Для видалення надлишкової води використовують процес осушення. Контроль вологості має здійснюватися на всіх етапах підготовки та транспортування природного газу. Тому точність вимірювання вологості є важливим фактором економічності та надійності газопостачання.

Для видалення надлишкової води в газі використовують різні системи осушення газу, які є досить складними і дорогими, тому надмірне осушення газів значно збільшує затрати енергоносіїв і підвищує вартість палива для кінцевого споживача [68-71].

Особливо високу похибку на рівні 10^0 C і більше можуть викликати присутні в газі гідрофільні домішки, зокрема спирти (метанол, діетиленгліколь, триетиленгліколь), які додаються в газ з метою запобігання утворення гідратів, а також використовуються в технології осушки газу. Як показали наші дослідження, при низьких від'ємних температурах точки роси можливе утворення на поверхні конденсації гідрофільних наноплівок вищих спиртів. На поверхні цих плівок вода конденсується не у вигляді краплин, що розсіюють світло, на яке реагує фотодатчик, а у вигляді тонкого шару води, яка практично не впливає на інтенсивність відбитого від поверхні конденсації світлового потоку. В результаті компаратор спрацьовує при температурах конденсації значно нижчих за істинну температуру початку конденсації води. Отримані таким чином недостовірні дані точки роси, що показують гігрометри при утворенні гідрофільних плівок на дзеркалі, можуть сприйматись оператором помилково за конденсацію важких вуглеводнів.

У нормативних документах України, точка роси води природного газу встановлена в Кодексі газотранспортної мережі [14] на рівні -8^0 C. У проекті Технічного регламенту «щодо вимог до природного газу» [21] встановлено два

сезонних значення: у «зимовий період» з 1 жовтня до 31 березня температура точки роси має бути не вище -8°C , а у «літній період», з 1 квітня до 30 вересня не вище 0°C .

Механізм визначення вмісту вологи в газі можна розділити на кілька основних напрямків [68-71]:

Фізичні методи вимірювання параметрів вологості газів можна додатково розділити на дві групи: хвильові та загально-фізичні. Хвильові (спектрально-оптичні) методи вимірювання вмісту вологи в газоподібному середовищі засновані на різниці ступеня поглинання електромагнітних та радіоактивних випромінювань водою та іншими складовими, що містяться в газі. Ці методи мають високу чутливість, яка збільшується при зменшенні вологості, невелику похибку вимірювань на рівні 0,5-3,0 %. Основними недоліками хвильових методів є складність апаратури, яка використовується при побудові вимірювальної техніки, та можливість його використання для визначення вмісту вологи тільки в чистих газах.

Хімічні методи засновані на протіканні хімічної реакції з наявною вологою. В свою чергу ці методи розділяються на кілька груп: ваговий метод заснований на зміні ваги, при вступанні деяких хімічних елементів в реакцію з водою. Абсорбційний метод заснований на здатності рідкого сорбенту поглинати вологу з газу. Метод зміни кольору заснований на хімічній реакції зміни кольору деяких речовин при вступанні в реакцію з водою. Ці методи потребують використання спеціальних реактивів в визначених лабораторних умовах і важко піддаються автоматизованому аналізу, так як засновані на візуальному аналізу результатів досліджень.

Фізико-хімічні методи є найбільшою з усіх груп методів визначення вмісту вологи в газах. Методи, які входять до даної групи, вельми різноманітні за принципом дії, а вимірювальна база, що їх реалізує, має значну кількість модифікацій. Однак спільним є основний принцип первинної дії - це поглинання твердою (адсорбція), або рідкою (абсорбція) речовиною вологи з

газу, що аналізується. Тому, частіше, їх позиціонують як сорбційні. Волога, що має можливість накопичуватись в масі активної речовини, тим чи іншим чином змінює її властивості, змінення яких пропорційне вмісту вологи в газі. Серед цих методів можна виділити кілька, які найкраще підходять для автоматизованого вимірювання. Це частотний (п'єзокварцевий) метод, що заснований на зміні резонансної частоти деяких матеріалів, при зміні вологості газу, але резонансна частота змінюється і при зміні температури, що значно ускладнює вимірювання малих концентрації вологи та дає в результаті відносну вологість. Сорбційно-ємнісний метод заснований на зміні діелектричної проникності матеріалу, при насиченні вологою (діелектрична проникність вологи значно перевищує показники для інших матеріалів), але метод має ті самі недоліки, що і частотний метод. Резистивний метод заснований на зміні провідності матеріалів, при зміні вологості, і має ті ж самі недоліки. Найбільшу популярність серед фізико-хімічних методів отримали резистивний та сорбційно-ємнісний спосіб для вимірювання відносної вологості у широкому діапазоні з невисокою точністю через компактність та простоту датчика.

Випаровувально-психрометричні методи засновані на залежності швидкості випаровування вологи з поверхні датчика, при зміні відносної вологості оточуючого газу. В цій групі методів визначається температура «сухого» та «мокрого» термометра і згідно психрометричної таблиці для певного хімічного складу газу визначається відносна вологість. До переваг методу можна віднести його простоту та відсутність необхідності окремого калібрування датчиків температури, до недоліків відноситься неможливість проведення вимірювань при від'ємних температурах та складність вимірювань під тиском.

Конденсаційні методи засновані на визначенні температури початку конденсації. В залежності від способу визначення початку моменту конденсації вони розділяються на кілька класів.

Конденсаційний-адіабатичний метод заснований на вимірюванні тиску газу, що досліджується, в момент початку конденсації пари вологи при його адіабатичному розширенні. У гігрометрах, які реалізують даний метод, газ, що досліджується, подається в циліндр з поршнем. Вимірюється початкова температура газу, після чого поршень починає свій рух і газ в циліндрі розширюється. При розширенні газу його температура знижується і утворюються умови для створення насиченої пари води та конденсації вологи. В момент початку конденсації в об'ємі газу утворюється пара, яка легко фіксується оптичними методами, одночасно вимірюється тиск газу. При відомому початковому значенні тиску газу та визначеному його складі, мається можливість розрахувати температуру початку конденсації, яка і є температурою точки роси. Перевагами даного методу є низька інерційність (1-2 с), можливість вимірювання температури точки роси при низьких значеннях вмісту вологи (від -70°C температури точки роси) та при високих робочих тисках газу, що обмежено тільки механічною міцністю елементів вимірювача. Основним недоліком методу є велика похибка вимірювання (до 15 %), наявність якої пов'язано з похибкою визначення тиску при початку конденсації внаслідок його швидкої зміни. Додаткова похибка виникає за рахунок розбіжності моменту утворення насиченої пари і моменту початку конденсації вологи, а також зміни хімічного складу газу. Внаслідок наявності вказаних недоліків метод не здобув широкого розповсюдження.

Конденсаційний-тепловий метод заснований на визначенні моменту початку конденсації вологи на конденсаційній поверхні при зміні її температури внаслідок виділення тепла від скритої теплоти пароутворення. Особливість цього методу полягає в тому, що визначення моменту початку конденсації вологи здійснюється за зміною параметру, який не залежить від стану та ступеню забруднення конденсаційної поверхні.

Конденсаційний-компресійний метод заснований на визначенні мінімального надлишкового тиску газу, при якому на конденсаційній поверхні,

яка попередньо охолоджена, відбувається конденсація вологи. В таких гігрометрах підтримують постійною температуру конденсаційної поверхні та повільно підвищують тиск газу до моменту утворення стійкої плівки конденсату. Недоліками даного методу є вузький діапазон вимірювань та збільшена похибка отриманих даних.

Конденсаційний-вихровий метод заснований на використанні ефекту Ранка. Цей ефект полягає в тому, що при потраплянні в середину циліндричного отвору крізь тангенційно-розташоване сопло стисненого газу відбувається перерозподіл температур газу вздовж перетину за рахунок відцентрових сил. При наявності в газі вологи, при охолодженні вона конденсується та переходить в рідкий або твердий стан. При цьому ефективність роботи вихрової труби зменшується та температура «холодного» газу починає збільшуватись. Вміст вологи може бути визначеним за температурами газу, який надходить до трубки та виходить з неї, тиску газу, що подається до неї, та ступенем розширення газу. До недоліку методу відносять потребу у достатньо великій витраті газу під високим тиском. Крім того, метод має достатньо велику інерційність - для виходу у робочий режим роботи потрібен значний проміжок часу та витрата великої кількості газу.

Конденсаційно-термометричний метод визначення вмісту вологи за значенням температури точки роси заснований на вимірюванні температури конденсації та випарювання вологи на поверхні охолоджуваного тіла при досягненні рівноваги тисків насиченої водяної пари газу і робочого тиску. При температурі початку конденсації (температурі точки роси) досягається гідродинамічна рівновага між водяною парою вологого газу та шаром конденсату вологи на поверхні охолоджуваного тіла. Важлива перевага приладів, які використовують цей метод, полягає в незалежності температури, яка визначається, від температури газу, що досліджується. Це надає можливість встановлювати вимірювачі на значної відстані від основної магістралі з газом, звідки відбирається проба. Оскільки вимірювання точки роси зводиться до

вимірювання температури, точність вимірювачів, які реалізують цей метод, дуже велика, а для їх градуювання в більшості випадків достатньо градуювання термометру або перетворювача температури. Межі вимірювання гігрометрами, які реалізують конденсаційний метод, достатньо широкі. Прилади мають достатньо просте конструктивне виконання та можуть бути застосованими для вимірювань при великих значеннях тиску газу (до 25 МПа).



Рис.3.2. Експериментальний стенд

де 1 – балон з газом, $P \leq 10,0$ МПа; 2 – манометр МТИ 1246 (діапазон 0 - 6 МПа, клас точності 0,6); 3 – манометр цифровий «Varoli» DS200M (діапазон 0 - 60 бар, клас точності 0,35); 4 – редуктор типу ДОНМЕТ БКО-50ДМ (МГ) (пропускна здатність – 50 м³/год., тиски максимальні: $P_{вх}=20$ МПа, $P_{вих}=1,25$ МПа); 5 – реактор-абсорбер; 6 – гігрометр «ТОРОС-3-2В» (діапазон вимірювань точки роси -45 - +20 °С, максимальна похибка $\pm 0,5$ °С, витрата $2 \pm 0,25$ л/хвил.); 7 – з'єднувальні трубопроводи

Порівнюючи наведені методи вимірювання, а також необхідність у портативності та автономності приладу, для можливості проводити вимірювання безпосередньо на віддалених газопроводах, вибрано **конденсаційно-термометричний** [72, 73] метод вимірювання вологості газу, так як цей метод дає можливість достатньо точно отримати як абсолютне

значення вмісту вологи, так прямо отримати точку роси, при тиску у газопроводі.

Дослідження щодо визначення точки роси для відібраних на ГРС і ГРП проб природного газу виконувались на експериментальному стенді, зображеному на рис.3.2.

Було проведено декілька дослідів: реальний газ (проби 1а і 1б), газ штучно насичений вологою (проба 2). Для осушки палива використано два типи адсорбентів: технічні силікагель (проба 3) і цеоліт (проба 4).

3.3. Результати експериментальних досліджень щодо визначень температури точки роси

У табл.3.2 наведено результати безпосередніх вимірів значень температур точок роси (ТТР) для характерних значень тисків газу, які мають місце в газотранспортній (на ГРС) та газорозподільній (на ГРП) системах.

Таблиця 3.2

Вимірювання температури точки роси (ТТР)

Характеристика точки вимірювання	ТТР, °С		Тиск газу, МПа	Проба №
	вода	вуглеводні		
Газ із балону реальний	-9,3	+0,8	2,5	1а
	-23,1	-20,5	0,3	1б
Газ із балону насичений	+4,3	+5,7	2,5	2
Газ із балону після осушки (силікагель)	<-40	<-40	0,3	3
Газ із балону після осушки (цеоліт)	-29,7	-27,9	0,3	4

У зв'язку з тим, що існуючі методики щодо проведення хроматографічного аналізу (результат – див. табл.3.3) не передбачають визначення вмісту важких вуглеводнів C_{5+} , то було застосовано програмну систему (ПС) «ГазКондНафта» [74]. Поряд з іншими можливостями ПС дозволяє моделювати умови випадання кристалогідратів (визначення температури їх утворення, витрати певного інгібітора для унеможливлення кристалізації тощо), точок роси по волозі й вуглеводням.

Попередньо була виконана адаптація складу природного газу до отриманих даних щодо ТТР по воді (табл.3.4), а потім проведено адаптацію температури точки роси по вуглеводням шляхом введення домішок важких вуглеводнів C_{5+} при збереженні концентрації води (табл.3.5). Результати моделювань подані нижче.

Таблиця 3.3

Розрахункова температура точки роси по воді й вуглеводням
(відповідно до відібраних проб природного газу)

Проба №		1а	1б	2	3	4
Давление	МПа	2.500	.300	2.500	.300	.300
Температура	°С	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
Доля : газа (пара) нефти (конденсата) водного раствора		.99387 .00000 .00613	1.00000 .00000 .00000	.99407 .00000 .00593	.99942 .00000 .00058	.99992 .00000 .00008
Расход	кмоль/час	.0	.0	.0	.0	.0
	кг/час	.69	.69	.64	.62	.65
	ст.м3/час	.94	.94	.89	.84	.89
	м3/час	.04	.31	.03	.28	.30
Мол.масса		17.76	17.76	17.39	17.68	17.61
Плотность	кг/м3	19.40	2.20	18.97	2.19	2.18
		мольн.доля	мольн.доля	мольн.доля	мольн.доля	мольн.доля
Азот		.0103000	.0103000	.0152000	.0118000	.0136000
Метан		.9078000	.9078000	.9189000	.9087000	.9112000
Диоксид углерода		.0241000	.0241000	.0095000	.0227000	.0184000
Этан		.0389000	.0389000	.0377000	.0379000	.0374000
Пропан		.0094000	.0094000	.0093000	.0089000	.0091000
изо-Бутан		.0009000	.0009000	.0010000	.0006000	.0010000
н-Бутан		.0014000	.0014000	.0014000	.0009000	.0013000
Вода		.0072000	.0072000	.0070000	.0085000	.0080000
Точка росы по воде	°С К	55.70 328.85	18.52 291.67	55.08 328.23	21.17 294.32	20.08 293.23
Точка росы по углеводородам	°С К	-58.67 214.48	-84.45 188.70	-58.98 214.17	-88.05 185.10	-84.92 188.23

Таблиця 3.4

Розрахункова температура точки роси по воді
(скорегований компонентний склад природного газу)

Проба №		1а	1б	2	3	4
Давление	МПа	2.500	.300	2.500	.300	.300
Температура	°С	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
Доля : газа (пара) нефти (конденсата) водного раствора		1.00000 .00000 .00000	1.00000 .00000 .00000	1.00000 .00000 .00000	1.00000 .00000 .00000	1.00000 .00000 .00000
Расход	кмоль/час	.0	.0	.0	.0	.0
	кг/час	.41	.51	.52	.35	.49
	ст.м3/час	.55	.70	.72	.48	.67
	м3/час	.02	.23	.03	.16	.23
Мол.масса		17.76	17.76	17.39	17.67	17.61
Плотность	кг/м3	19.27	2.20	18.85	2.19	2.18
		мольн.доля	мольн.доля	мольн.доля	мольн.доля	мольн.доля
Азот		.0103732	.0103719	.0153011	.0119003	.0137078
Метан		.9142586	.9141367	.9250110	.9164248	.9184201
Диоксид углерода		.0242714	.0242682	.0095632	.0228930	.0185458
Этан		.0391767	.0391716	.0379507	.0382222	.0376964
Пропан		.0094668	.0094657	.0093618	.0089756	.0091722
изо-Бутан		.0009064	.0009062	.0010067	.0006051	.0010079
н-Бутан		.0014099	.0014097	.0014093	.0009078	.0013102
Вода		.0001370	.0002700	.0003962	.0000712	.0001396
Точка росы по воде	°С К	-9.29 263.86	-23.26 249.89	4.30 277.45	-36.52 236.63	-29.93 243.22

Таблиця 3.5

**Розрахункова температура точки роси по воді й вуглеводням
(скорегований компонентний склад природного газу)**

Проба №		1а	1б	2	3	4
Давление	МПа	2.500	.300	2.500	.300	.300
Температура	°С	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
Доля : газа (пара)		1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
нефти (конденсата)		.00000	.00000	.00000	.00000	.00000
водного раствора		.00000	.00000	.00000	.00000	.00000
Расход	кмоль/час	.0	.0	.0	.0	.0
	кг/час	.09	.04	.31	.25	.25
	ст.м3/час	.12	.05	.43	.34	.34
	м3/час	.00	.02	.02	.11	.11
Мол.масса		17.78	17.77	17.42	17.69	17.63
Плотность	кг/м3	19.30	2.20	18.89	2.19	2.18
	мольн. доля		мольн. доля	мольн. доля	мольн. доля	мольн. доля
Азот		.0103732	.0103719	.0153011	.0119003	.0137078
Метан		.9142586	.9141367	.9250110	.9164248	.9184201
Диоксид углерода		.0242714	.0242682	.0095632	.0228930	.0185458
Этан		.0391767	.0391716	.0379507	.0382222	.0376964
Пропан		.0094668	.0094657	.0093618	.0089756	.0091722
изо-Бутан		.0009064	.0009062	.0010067	.0006051	.0010079
н-Бутан		.0007099	.0010097	.0006093	.0005078	.0006102
н-Пентан		.0002000	.0001100	.0002000	.0002000	.0003000
н-Гексан		.0002000	.0001000	.0002000	.0001000	.0001000
н-Гептан		.0001200	.0000700	.0001500	.0000500	.0001600
н-Октан		.0001000	.0000600	.0001400	.0000500	.0001400
н-Нонан		.0000800	.0000600	.0001100	.0000000	.0000000
Вода		.0001370	.0002700	.0003962	.0000712	.0001396

Точка росы	°С	-9.29	-23.26	4.30	-36.52	-29.93
по воде	К	263.86	249.89	277.45	236.63	243.22

Точка росы	°С	.55	-20.39	5.55	-39.92	-28.20
по углеводородам	К	273.70	252.76	278.70	233.23	244.95

Розрахункові значення температур точки роси по воді й вуглеводням, отримані за результатами вимірювань і змодельовані (з урахуванням фракцій C_{5+}), є достатньо адекватними. Максимальна похибка не перевищує для: води – 1,0 %, вуглеводнів – 3,0 %. Причому, наявність важких вуглеводнів C_{5+} (за результатами моделювання) дещо підвищує відповідне значення ТТР.

3.4. Висновки до розділу 3

1. На основі сучасних методів планування і обробки результатів експериментів щодо визначення температури точки роси виконані дослідження довели адекватність отриманого аналітичним чином математичного опису щодо оцінювання якості природного газу експериментальним даним. Це дозволило уточнити деякі положення інженерної методики комплексної оцінки якості природного газу.

2. Наявність важких фракцій вуглеводнів C_{5+} , які неможливо визначити хроматографічним аналізом і вміст яких у природному газу не регламентується вимогами чинних нормативних документів, проте може бути змодельованим, дещо підвищує відповідне значення ТТР: по воді – до 1 %, по вуглеводням – до 3 %.

РОЗДІЛ 4. ІНЖЕНЕРНА МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЯКОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

Процес інноваційного організаційно-технологічного забезпечення якості природного газу потребує застосування комп'ютеризованих систем інтелектуальної підтримки прийняття рішень. Для аналізу та формування альтернативних рішень в системах підтримки прийняття рішень використовуються різні теоретичні підходи, зокрема, інтелектуальний аналіз даних, імітаційне та нечітке моделювання, генетичні алгоритми, нейронні мережі, теорія прийняття рішень, теорія нечітких множин та нечітка логіка тощо. Використання нечіткої логіки в системах підтримки прийняття рішень набуло поширення, адже побудова моделей мислення людини і впровадження їх в інтерактивні комп'ютерні системи є сьогодні однією з важливих задач штучного інтелекту [59].

Нечіткі системи по відношенню до інших мають такі переваги [60]: можливість обробки та аналізу нечітких вхідних даних; нечітка формалізація критеріїв оцінки та порівняння; проведення якісного оцінювання як вхідної інформації, так і вихідних результатів; швидке моделювання складних динамічних систем та їх порівняльний аналіз із заданим ступенем точності. Використання теорії нечітких множин та нечіткої логіки при побудові системи підтримки прийняття рішень дозволяє розв'язувати задачі на інтелектуальному рівні за допомогою нечітких баз правил, а також дає можливість оцінити альтернативні розв'язки і обрати серед них оптимальний.

Розглянемо нечітку систему підтримки прийняття рішень. Вихідною змінною для нечіткої системи підтримки прийняття рішень є якість природного газу, яка включає 27 вхідних сигнали (рис. 2.1). Для лінгвістичних змінних, які є факторами впливу на якість природного газу, оціночні терми наведено в табл. 2.1.

На рис. 4.1 представлено структуру ієрархічної нечіткої системи підтримки прийняття рішень, яка складається з 27 вхідних лінгвістичних змінних, 6 баз знань з нечіткими правилами та однієї вихідної лінгвістичної змінної.

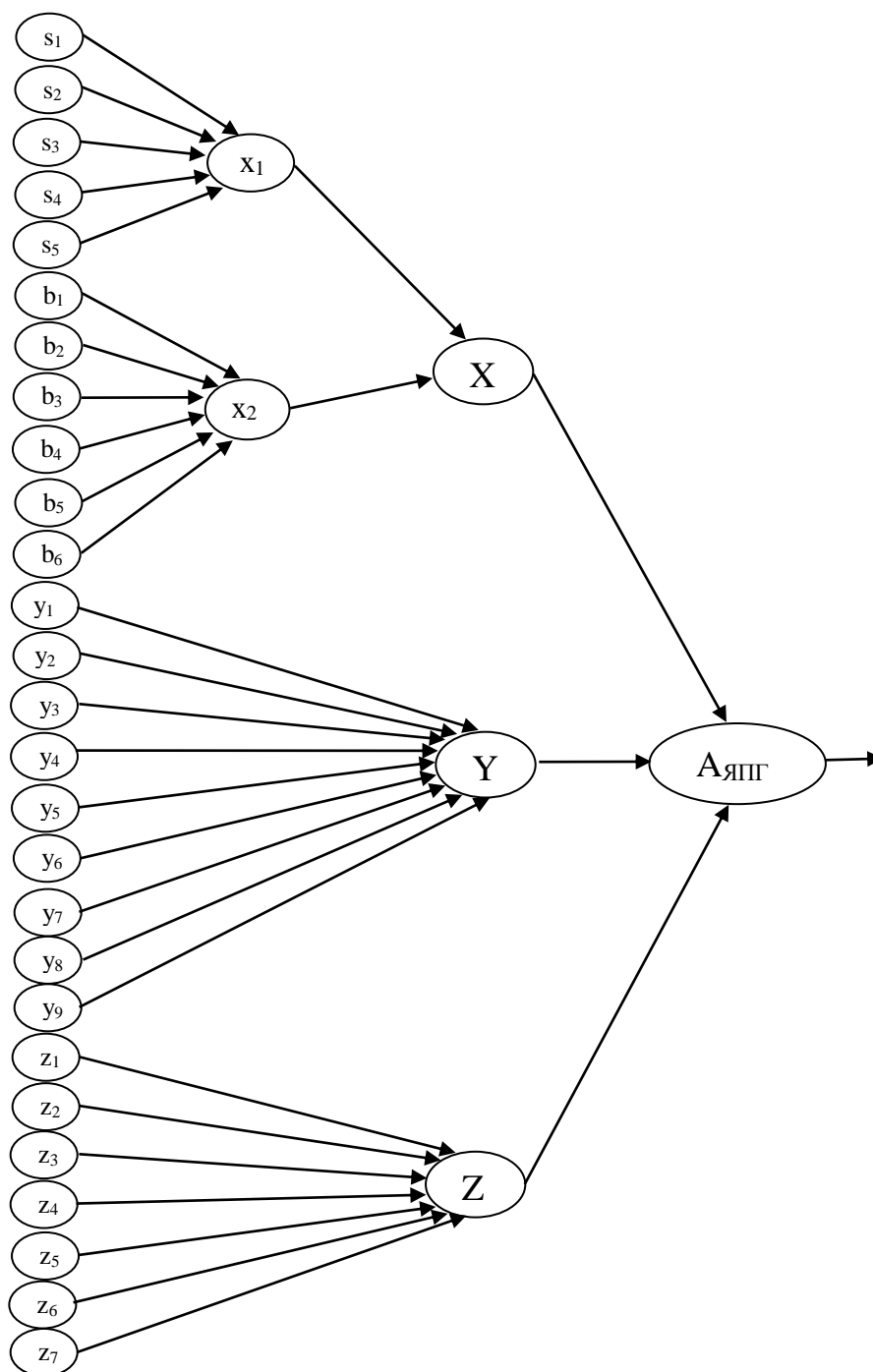


Рис. 2.13. Структура ієрархічної системи підтримки прийняття рішень для оцінювання якості природного газу

В табл. 2.8 наведено набір нечітких правил з бази знань підсистеми першого ієрархічного рівня $Z = f_z(z_1; z_2; z_3; z_4; z_5; z_6; z_7)$, яка складається з 15 нечітких правил (див. підрозділ 2.2.3). При цьому для оцінки вхідних лінгвістичних змінних, які встановлюють зв'язок між факторами, що впливають на технічні умови експлуатації газорозподільної системи населеного пункту використовується 5 термів і для оцінки вихідної змінної – 5, також.

Підсистема 1-го рівня ієрархії має сім вхідних змінних [61]: вміст сірководню (H_2S) (z_1), вміст азоту (N_2) (z_2), вміст вуглекислого газу (CO_2) (z_3), вміст кисню (O_2) (z_4), вміст механічних домішок (z_5), вміст вологи (z_6) та вміст меркаптанової сірки (z_7). Результатом роботи цієї підсистеми та системи в цілому є вихідна лінгвістична змінна – інтегральний показник оцінки технічних умов експлуатації газорозподільної системи населеного пункту, яка дає уявлення про стан системи при різномісних значеннях вхідних параметрів системи підтримки прийняття рішень.

Модель нечіткої ієрархічної системи підтримки прийняття рішень для оцінки якості природного газу, згідно з рис.4.1, синтезовано в середовищі програмування MatLab інструментами Fuzzy Logic Toolbox.

Fuzzy Logic Toolbox – інтуїтивне графічне середовище для розроблення інтелектуальних систем. Пакет Fuzzy Logic має простий і добре продуманий інтерфейсом, що дозволяє легко проектувати і діагностувати нечіткі моделі. Основні властивості [62]:

- визначення змінних, нечітких правил і функцій належності;
- інтерактивний перегляд нечіткого логічного висновку;
- можливість вибору широко відомого методу Мамдані або потужного методу Сугено для створення гібридних нечітких систем.

Схема нечіткої системи підтримки прийняття рішень (рис. 4.3) буде складатися з:

- семи входів (вміст сірководню (H_2S) (z_1), вміст азоту (N_2) (z_2), вміст вуглекислого газу (CO_2) (z_3), вміст кисню (O_2) (z_4), вміст механічних домішок (z_5), вміст вологи (z_6) та вміст меркаптанової сірки (z_7);
- одного виходу (технічні умови експлуатації газорозподільної системи населеного пункту);
- блока із заданими правилами, що працює на основі методу Мамдані.

Для експертних значень функцій належності для входів та виходу у відповідності до універсальної множини кожного з факторів впливу (див. табл. 2.1) було використано паспортні дані фізико-хімічних якісних показників природного газу. Місцями відбору проб природного газу є газовимірвальна станція установки комплексної підготовки газу в Ямало-Ненецькому АО та газопровід “Тула – Шостка – Київ”, що постачає газ споживачам Київської області. Етапи створення та роботи нечіткої системи підтримки прийняття рішень зображено на рис. 4.2–4.14.

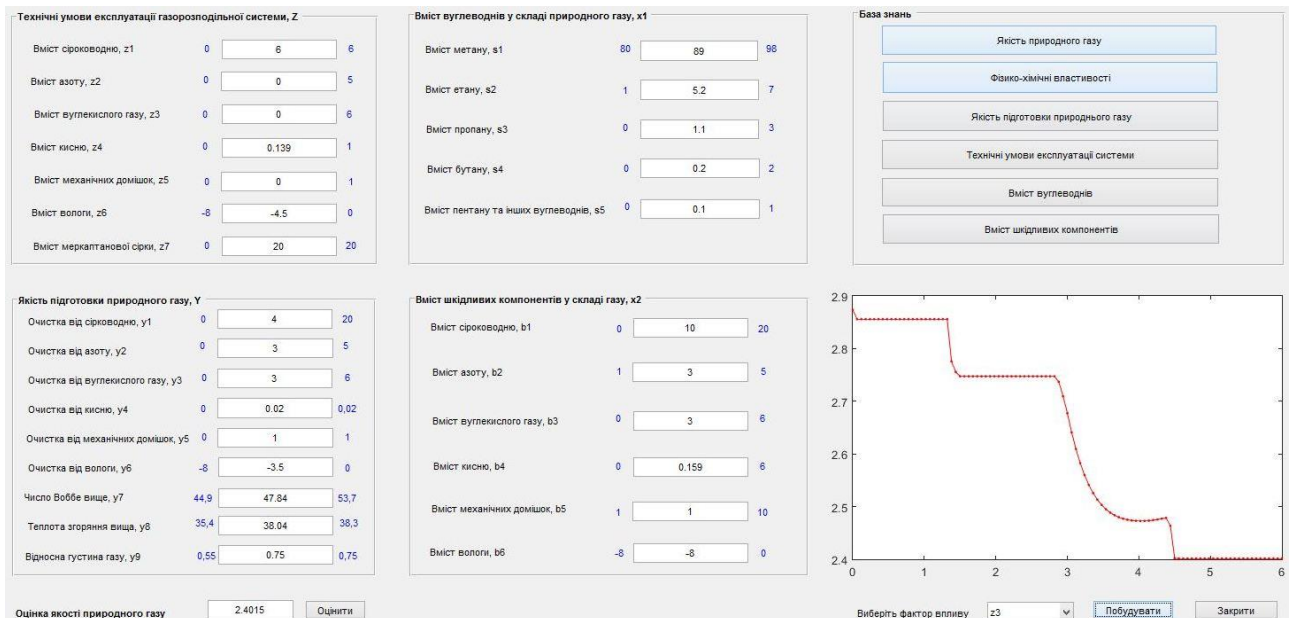


Рис. 4.2. Робочий інтерфейс експерто-моделюючої системи оцінки якості природного газу

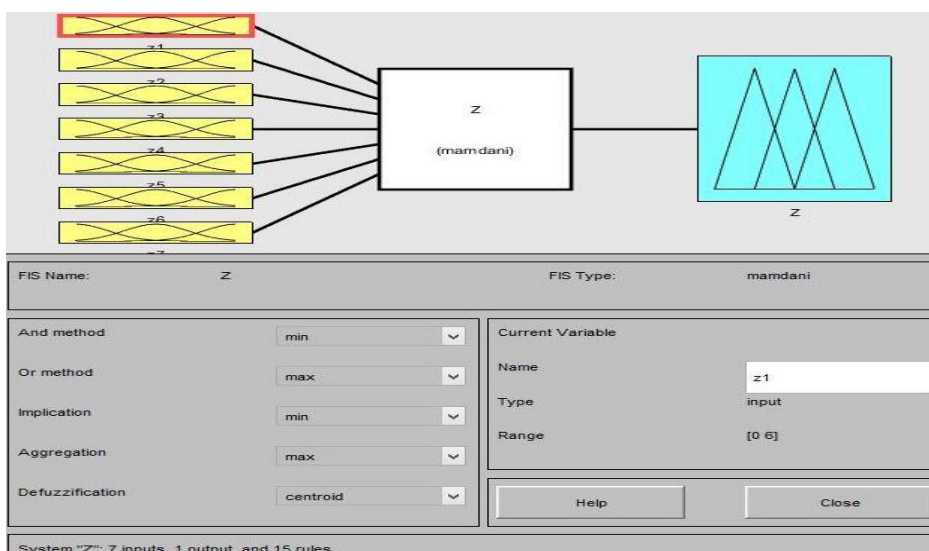


Рис. 4.3. Робоче вікно програми зі схемою нечіткої системи підтримки прийняття управлінських рішень в процесі оцінки якості природного газу

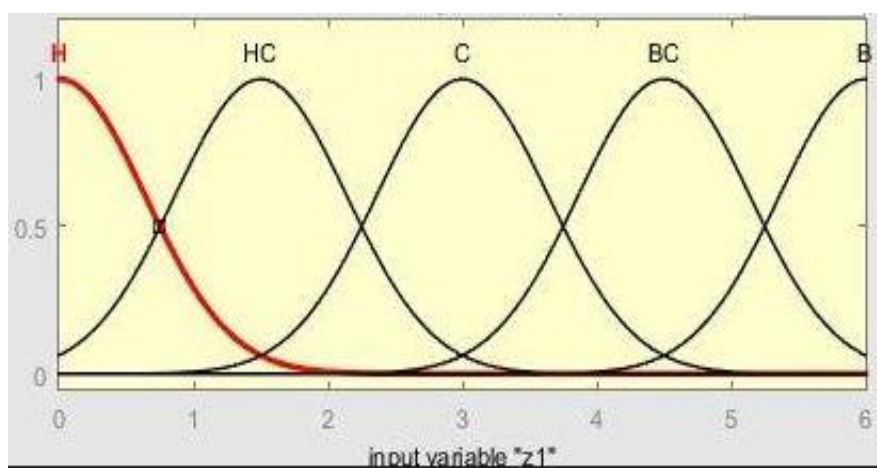


Рис. 4.4. Робоче вікно програми з зображенням функції належності “вміст сірководню (H_2S)”

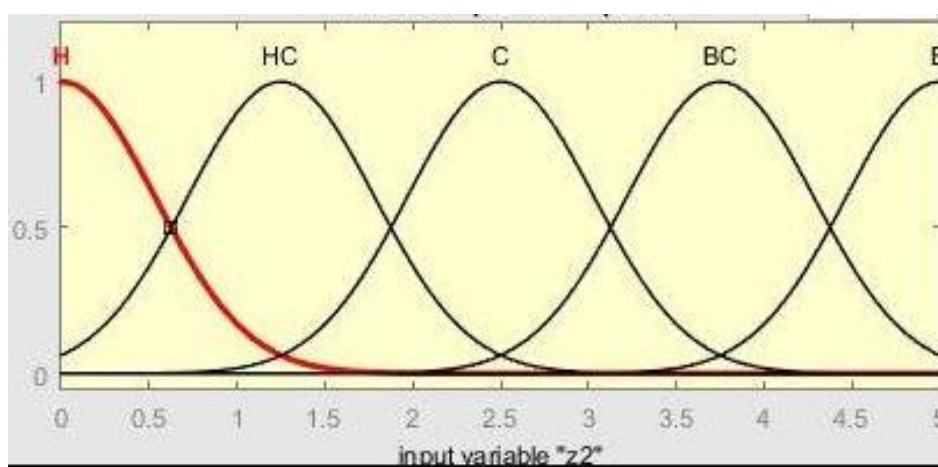


Рис. 4.5. Робоче вікно програми з зображенням функції належності “вміст азоту (N_2)”

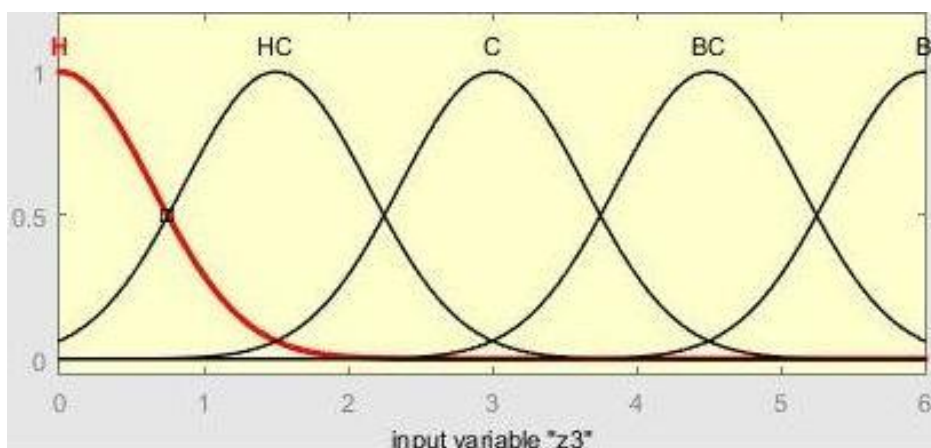


Рис. 4.6. Робоче вікно програми з зображенням функції належності
“вміст вуглекислого газу (CO_2)”

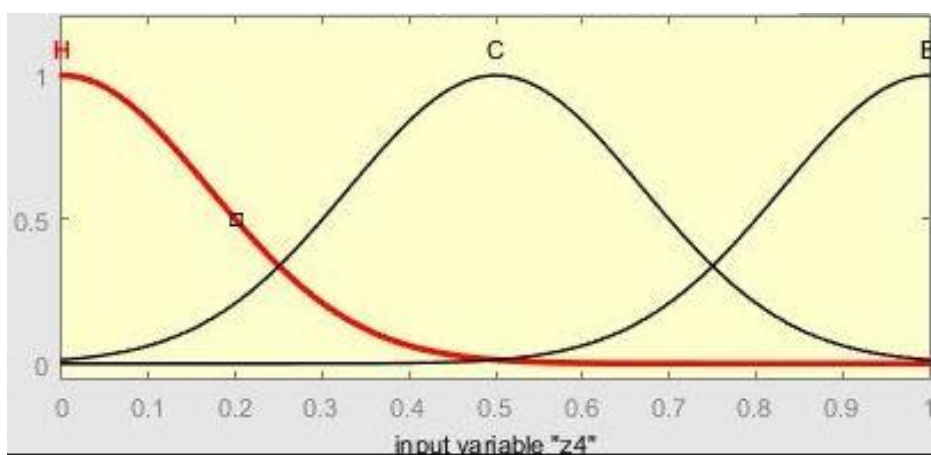


Рис. 4.7. Робоче вікно програми з зображенням функції належності
“вміст кисню (O_2)”

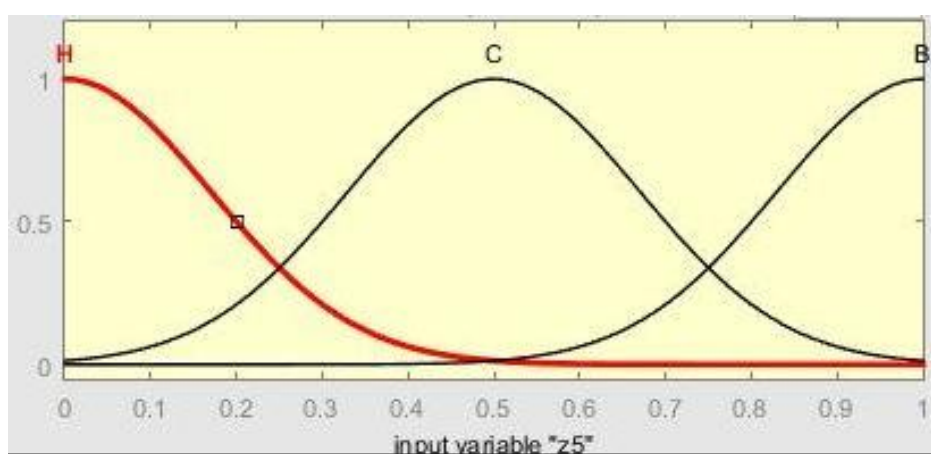


Рис. 4.8. Робоче вікно програми з зображенням функції належності
“вміст механічних домішок”

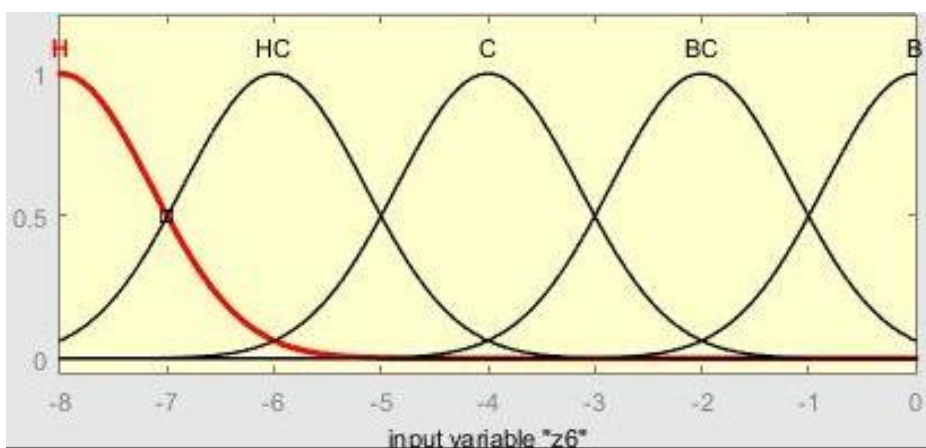


Рис. 4.9. Робоче вікно програми з зображенням функції належності
“зміст вологи”

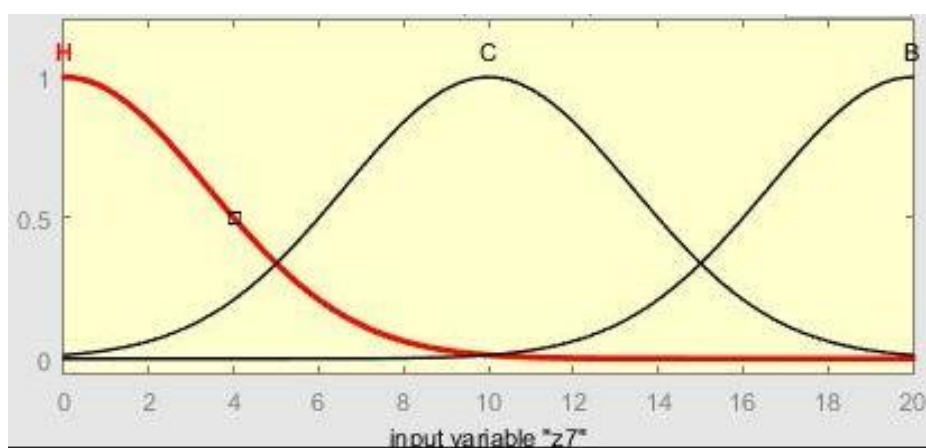


Рис. 4.10. Робоче вікно програми з зображенням функції належності
“зміст меркаптанової сірки”

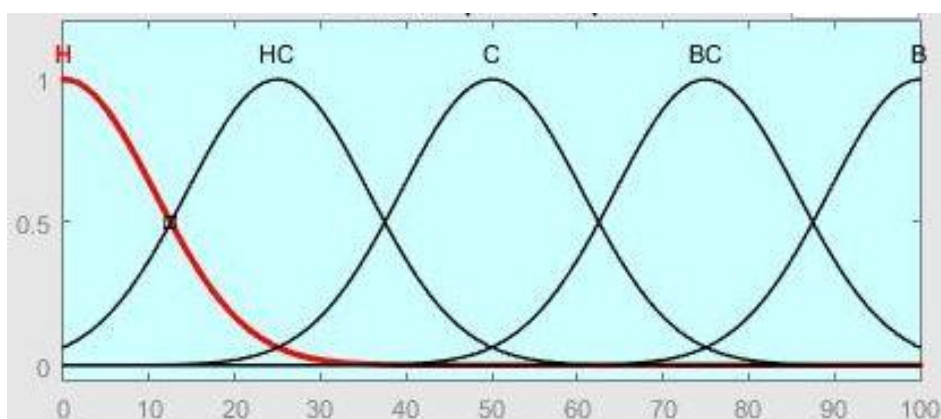


Рис. 4.11. Робоче вікно програми з зображенням функції належності
“технічні умови експлуатації газорозподільної системи населеного пункту”

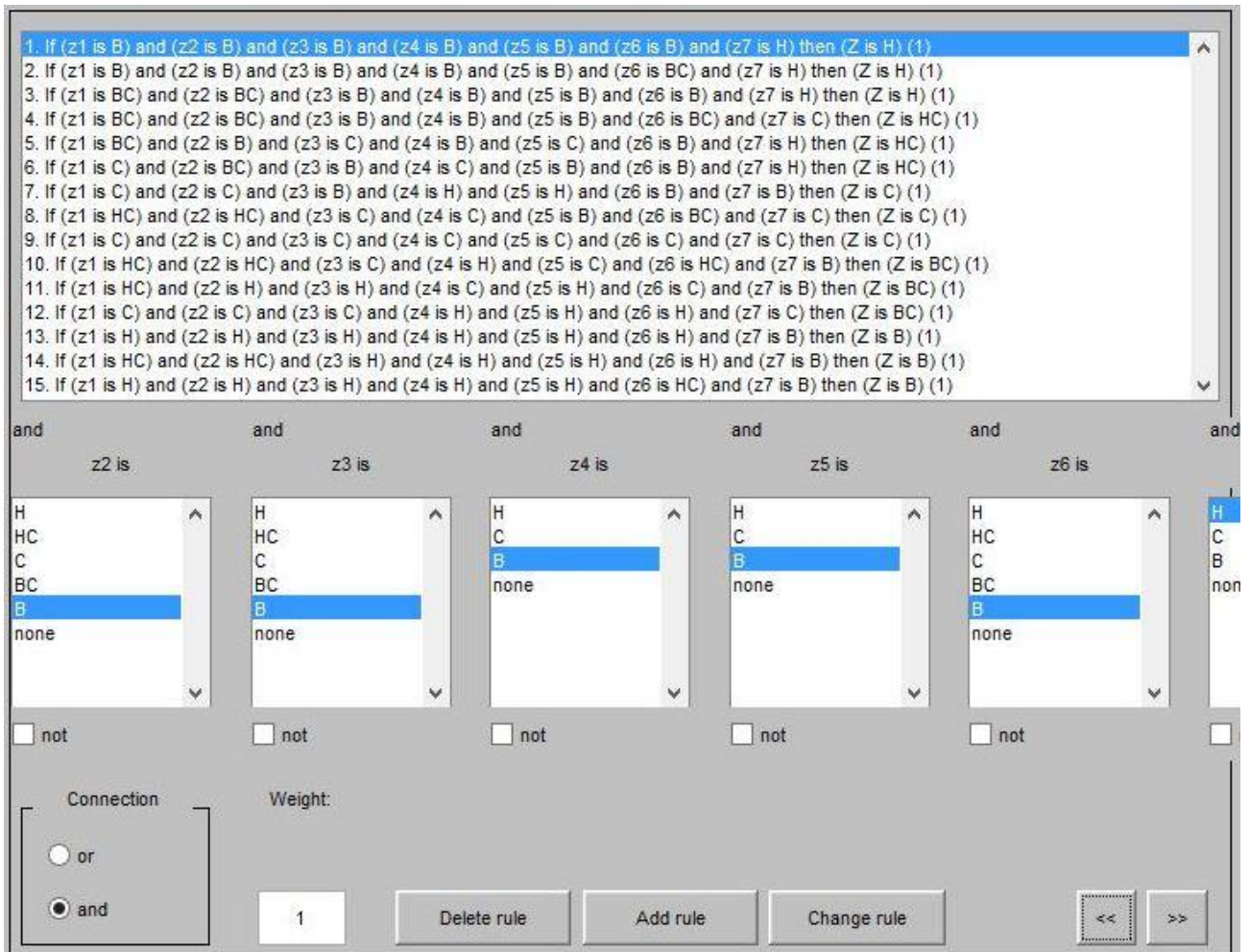


Рис. 4.12. Робоче вікно програми з наведенням бази правил нечітких даних для підсистеми першого рівня ієрархії $Z = f_z(z_1; z_2; z_3; z_4; z_5; z_6; z_7)$



Рис. 4.13. Робоче вікно програми з наведенням процесу фазифікації вхідних змінних підсистеми першого рівня ієрархії $Z = f_z(z_1; z_2; z_3; z_4; z_5; z_6; z_7)$

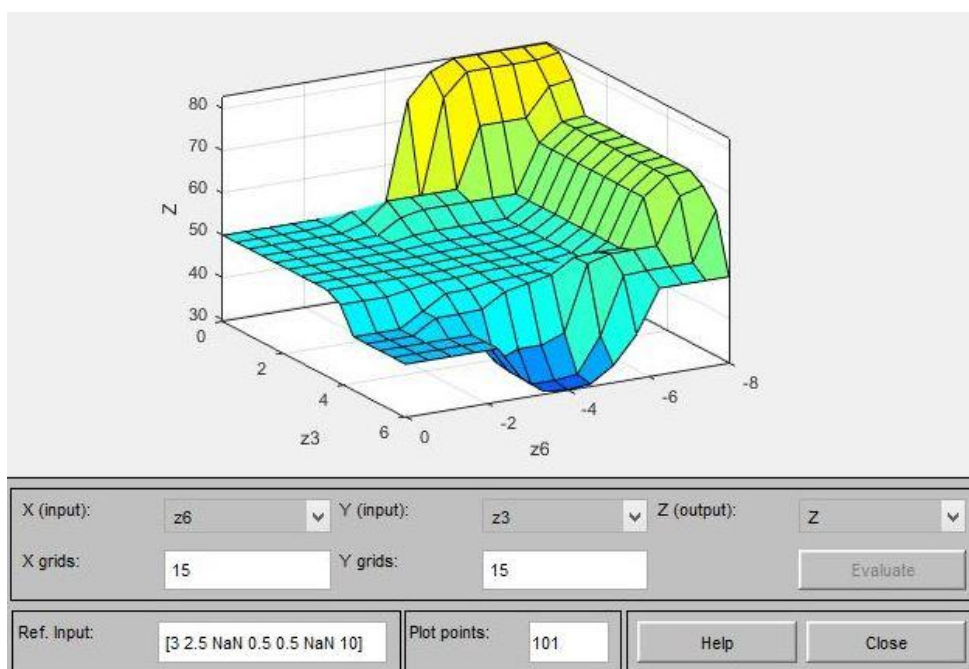


Рис. 4.14. Робоче вікно програми з зображенням поверхні поведінки нечіткого регулятора підсистеми першого рівня ієрархії $Z = f_z(z_1; z_2; z_3; z_4; z_5; z_6; z_7)$

Усі варіанти поведінки нечіткого регулятора, при усіх можливих комбінаціях вхідних змінних, формують поверхню поведінки регулятора (див. рис. 4.14) у залежності від обраного методу дефазифікації, за допомогою якої є можливість досліджувати взаємозв'язки між вхідними параметрами.

У додатку А наведено текст програми для оцінки якості природного газу за пропонуваною 5-бальною шкалою.

РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

5.1. Сучасні тенденції розвитку енергопостачання

У світовій енергетичній сфері останнім часом відбулися значні зміни щодо стратегії розвитку енергетики. Головний наголос зроблено на забезпеченні нерозривності та узгодженості дій при забезпеченні трьох складових: енергозабезпечення (безперебійне постачання електричної, теплової енергії, природного газу тощо відповідної якості), енергодоступність (енергоощадність та доступна ціна електроенергії та інших енергоресурсів) й енергоприйнятність (мінімальний вплив на навколишнє середовище). Зазначені складові розглядаються як основа в умовах переходу до реалізації сучасних та перспективних «інтелектуальних» технологій для забезпечення стабільного розвитку, що гарантує водночас стале зростання економіки, підвищення рівня життя громадян, захист навколишнього природного середовища.

При цьому підвищення рівня енергоефективності є стратегічним напрямом зниження енергоємності економіки. Одним з основних рушійних мотивів розвитку енергетики у період 2020–2040 рр. стане запобігання глобальним змінам клімату за рахунок планомірного зниження викидів у атмосферне повітря продуктів згоряння як традиційних, так і альтернативних палив: різного виду забруднювальних речовин й парникових газів. Ключову роль в успішному вирішенні нагальних проблем енергетики, включаючи задоволення зростаючого попиту, підвищення енергоефективності та надійності енергопостачання з поліпшенням стану навколишнього середовища, визначатимуть інноваційні технології енергетики, спрямовані на розвиток «інтелектуальних» мереж (Smart Grid), технологій «інтелектуальних» систем обліку і розрахунків (Smart Metering), управління попитом (Demand Response, DR), пристроїв акумулювання енергії тощо.

Центральне місце серед енергоефективних розробок займають

«інтелектуальні» мережі, які представляють собою автоматизовані саморегульовані енергосистеми, засновані на передових інформаційних технологіях, котрі спроможні забезпечити більшу надійність енергопостачання, а споживання енергоресурсів – більш економічним, з максимальним обмеженням негативного впливу на екологію.

У світовій енергетичній сфері існують різні трактування поняття «інтелектуальні мережі» (Smart Grid). У загальному понятті «інтелектуальна» мережа – це електрична мережа, що на основі сучасних інноваційних технологій обладнання ефективно координує та управляє дією всіх підключених до неї об'єктів – від різних систем генерації, передачі та розподілу електроенергії до її споживачів з метою створення економічно рентабельної та стабільної енергосистеми з низькими втратами і високим рівнем надійності та якості енергопостачання для кінцевих споживачів.

Перш за все Smart Grid трактується сьогодні в усьому світі як концепція інноваційного оновлення електроенергетики, що дозволяє за рахунок використання новітніх технологій, інструментів і методів значно підвищити ефективність роботи енергетичних систем.

У рамках концепції та методології реалізації систем SmartGrid мають бути врахованими вимоги усіх зацікавлених сторін – держави, генеруючих мережних і енергозбутових компаній, споживачів і виробників обладнання тощо.

Наразі у Європейському Союзі реалізується Програма розвитку «інтелектуальних» мереж «Технологічна платформа SmartGrid для Електричних Мереж Майбутнього в Європі», згідно з якою 80 % європейських споживачів до 2020 р. мають бути оснащеними «розумними» приладами обліку, а до 2022 р. – 100 % споживачів.

Загалом Інтелектуальна інформаційна система (ІС) — це один з видів автоматизованих інформаційних систем. Вона є комплексом програмних, лінгвістичних і логіко-математичних засобів для реалізації основного завдання:

здійснення підтримки діяльності людини та пошуку інформації в режимі розширеного діалогу природною мовою.

Таблиця 5.1

Етапи схеми функціонування інтелектуальної системи

№ з/п	Типова схема ІС	Газорозподільна система населеного пункту (облік природного газу)
1.	Безпосереднє сприйняття зовнішньої ситуації; результатом є формування первинного опису ситуації.	Вимірювання кількості спожитого газу кожним абонентом за допомогою лічильника: в режимі реального часу, за певний період тощо. Отримання кінцевим інформації з приладів обліку та білінг індивідуального споживання.
2.	Зіставлення первинного опису зі знаннями системи і поповнення цього опису; результатом є формування вторинного опису ситуації в термінах знань системи. Цей процес можна розглядати як процес розуміння ситуації, або як процес перекладу первинного опису на внутрішню мову системи.	Визначення кількості використаного газу в одиницях енергії. Складання балансів природного газу для кінцевого споживача, окремого будинку чи підприємства та населеного пункту загалом.
3.	Планування цілеспрямованих дій та прийняття рішень, тобто аналіз можливих дій та їх наслідків і вибір тієї дії, яка найкраще узгоджується з метою системи.	Розрахунки з постачальником природного газу. Мінімізації збитків. Запровадження добового балансування. Виявлення місць можливих втрат природного газу в системах газорозподілу, споживання тощо.
4	Зворотна інтерпретація прийнятого рішення, тобто формування робочого алгоритму для здійснення реакції системи.	Забезпечення постачання природного газу споживачам на тривалу перспективу, що ґрунтується на достовірних прогнозах, реальних показах лічильників тощо. Аналіз причин виникнення та оптимізація заходів для усунення аварійних ситуацій.
5.	Реалізація реакції системи; наслідком є зміна зовнішньої ситуації і внутрішнього стану системи тощо.	Ліквідація проблем при узгодженні фактичних витрат палива між суб'єктами господарювання при транспортуванні, розподілі, постачанні та споживанні газу. Забезпечення інформаційної підтримки прийняття рішень.

Завдання, які вирішують ІС, багатогранні та мають свої особливості для кожної категорії користувачів. Серед інших можна відмітити такі: інтерпретація даних, діагностика і моніторинг, прогнозування, керування і підтримка прийняття рішень. Стосовно застосування подібних систем в

житлово-комунальному господарстві, то в статті 2 глави 1 Директиві 2012/27/EU «Про енергоефективність» [49] дано визначення розумної (інтелектуальної) системи обліку як електронної системи, що може вимірювати енергоспоживання, надаючи більший обсяг інформації, ніж традиційний лічильник, та передавати й приймати дані за допомогою певної форми електронного зв'язку.

Не слід вважати, що вказані в табл.5.1 етапи є повністю незалежними один від одного у тому розумінні, що наступний етап починається тільки після того, як повністю закінчиться попередній. Навпаки, для функціонування інтелектуальної системи характерним є взаємне проникнення цих етапів. Наприклад, ті чи інші рішення можуть прийматися уже на етапі безпосереднього сприйняття ситуації.

Створення в Україні інтелектуальних систем обліку енергоносіїв, у т.ч. і природного газу є одним із пріоритетних завдань державної технічної політики. Роботи можуть проводитись, наприклад, на базі існуючих систем телеметрії газорозподільних систем населених пунктів після відповідного аудиту їх технічного стану та оцінки придатності до роботи у складі інтелектуальних систем.

В загальному розумінні терміну «телеметрія» – це вимірювання на відстані фізичних параметрів, які характеризують технологічний процес. Безпосереднє вимірювання виконується за допомогою спеціальних датчиків-перетворювачів. Отримані результати автоматично передаються у вигляді кодованих сигналів каналами зв'язку на приймальні пристрої, де їх розшифровують для наступного опрацювання.

Головним завданням системи телеметрії газорозподільних систем населених пунктів є контроль технологічних параметрів природного газу: тиску (перепаду тисків), температури, кількості спожитого газу, а також тих, які стосуються безпеки: загазованості приміщення, спрацювання запірної арматури, несанкціонованого доступу у приміщення тощо. Наприклад, для

мережних газорегуляторних пунктів (ГРП) у м. Києві вище вказані (за винятком обліку) функції реалізовані. Формування та передача сигналів відбувається з мінімальною частотою з метою безперервного контролю стану ГРП та оперативного реагування у випадку виникнення будь-яких непередбачуваних (аварійних) ситуацій.

Встановлення комерційного вузла обліку (ВОГ), вбудованого (при можливості) або прибудованого до такого ГРП, і оснащеного інтелектуальним лічильником природного газу, дозволяє впорядкувати його споживання в системах низького тиску багатоступеневих газорозподільних мереж населеного пункту, отримати в реальному часі фактичну картину його використання. Тим більш, що необхідна інфраструктура для передачі даних вже створена і успішно функціонує. А при недостатньому оснащенні достовірними засобами обліку газу абонентів багатоквартирних житлових будинків наявність такого вузла обліку дозволить уточнити значення питомих норм споживання природного газу з урахуванням характерних особливостей (менталітету мешканців, кліматичних умов тощо). Існуючі загально будинкові вузли обліку сприятимуть досягненню цієї мети.

Для абонентів житлових будинків в Україні створені вітчизняні iSmart-лічильники марок ЕГЛ, ГОРН, Самгаз RSE типорозмірів G1.6...G6, які поєднали кращі функції традиційних механічних приладів з функціями інтелектуального обліку [76, 77]. Усі лічильники оснащені технічними засобами коригування показів за температурою (що забезпечує приведення фактичної кількості спожитого газу до стандартних умов вимірювання), передачі сигналів за допомогою мобільних технологій GPRS, мають високий рівень захисту від несанкціонованого впливу недобросовісних споживачів, оснащені високоефективними фільтрами-відстійниками та забезпечують не менше 10 років безперервної роботи від автономного джерела живлення з сигналізацією про необхідності його заміни (при спрацюванні на 90 %) та контролю поточної величини напруги. Вбудований клапан дозволяє

дистанційно відключати абонента від споживання природного газу при несплаті за раніше використаний. Тобто, конструктивно вже передбачена та реалізована функція зворотного зв'язку та управління.

Таблиця 5.2

Ієрархічна структура системи з довільною кількістю вузлів обліку газу (ВОГ) включно з абонентськими лічильниками – районний диспетчерський пункт (ДП) – ДП газорозподільної компанії – центральний ДП

Структурний елемент системи містобудування	Житловий будинок	Мікрорайон (район)	Населений пункт	
Структурний елемент системи газопостачання	Будинкова система газопостачання низького тиску	Міська газорозподільна мережа (ГРМ) низького тиску	Міська ГРМ високого (середнього) тиску	Газотранспортна система (ГТС) (магістральний газопровід)
Облік природного газу	Абонент. ЛГ Загально будинковий ЛГ*	ВОГ комерційний, поряд з мережним ГРП	ВОГ комерційний, поряд з ГРС (на вході в ГРМ)	ВОГ комерційний, на ГРС
Наявність приладів обліку:	+ (не у всіх абонентів чи будинках)	-	-	+
Визначення показників якості газу	-	-	-	+ (не у всіх ГРС)
Мета	1) єдиний інформаційний простір щодо обліку природного газу окремим абонентом, багатоквартирним будинком (при необхідності), районним ВОГ поряд з мережним ГРП (ГРМ низького тиску), міським ВОГ (ГРМ високого (середнього) тиску), ВОГ газотранспортної системи (магістральний газопровід). 2) балансування природного газу з урахуванням фізико-хімічних властивостей (у т.ч. в одиницях енергії) між: - абонентськими лічильниками і загально будинковим; - ВОГ поряд з мережними ГРП і загальноміським ВОГ; - загальноміським ВОГ і ВОГ газотранспортної системи. 3) визначення фізико-хімічних властивостей (показників якості) природного газу на вході в міську ГРМ, поточний контроль у характерних точках ГРМ.			

Наявність декількох потужних операторів мобільного зв'язку, практично 100 % покриття ним території України дозволяють створити єдиний інформаційний простір для впорядкування обліку природного газу та взаєморозрахунків за спожите паливо.

З цією метою диспетчерський пункт газової компанії, що надає послуги з газопостачання населенню та іншим споживачам, оснащують технічними

засобами для отримання інформації від підприємств, які займаються його транспортуванням, щодо фізико-хімічних властивостей природного газу в режимі реального часу .

5.2. Економічна ефективність підвищення якості природного газу для використання в житлово-комунальному господарстві

Запровадження обліку використання енергоресурсів – це ключовий крок щодо енергоресурсозбереження та підвищення енергоефективності будь-якої галузі економіки. А відсутність достовірного обліку в енергетичних одиницях створює незручності та розбаланси під час їх транспортування, зберігання, розподілу, видобутку, купівлі-продажу, постачання та споживання. Відповідно, це перешкоджає розвитку ринку природного газу в Україні, не забезпечує коректне та справедливе ціноутворення, ускладнює складання енергетичних балансів суб'єктів господарювання та подальший аналіз ефективності використання цього палива у порівнянні з іншими енергоносіями.

Дослідженнями проблем комплексного аналізу фізико-хімічних показників природного газу, удосконаленню технологій та засобів щодо підвищення достовірності його обліку присвячено праці таких вчених як А.І.Гордієнко, І.В.Коробко, Ф.Д.Матіко, А.В.Мотало, В.О.Осієвський, Є.П.Пістун, Г.Г.Шишко та інших. У працях [78, 79] проаналізовано вимоги чинних в Україні нормативно-правових актів стосовно обліку природного газу з урахуванням його фізико-хімічних показників. Проте, навіть останні документи продовжують вказувати нормативи витрат палива у метричних одиницях – м³. Правда, слід відмітити, що вже тривалий час кількість використаного газу дублюється в одиницях енергії – кВт-год., Гкал і МДж. Витрати енергії [80] отримані шляхом звичайного множення кількості газу за певний проміжок часу (за показами лічильника, з достовірністю яких існують певні проблеми [81]) на теплоту згоряння палива (перевірити її величину ні споживач, ні постачальник газу практично не мають жодної можливості). Як правило, контроль якості газу

виконують лабораторії газотранспортної компанії ПАТ «Укртрансгаз» у відповідності з вимогами Кодексу газотранспортної системи [14]. В Україні на сьогодні функціонує близько 120 таких лабораторій, акредитованих на право визначення фізико-хімічних показників палива. Загалом, у державі для всієї газотранспортної системи (ГТС) відібрано біля 700 характерних місць взяття проб газу для подальшого аналізу. В основному це газорозподільні станції (ГРС), до яких приєднані газорозподільні мережі (ГРМ) населених пунктів та промислових районів тощо, а також підземні сховища (ПСШ) для регулювання сезонної нерівномірності газоспоживання. В особливо важливих місцях ГТС держави встановлені потокові хроматографи, покази яких використовують для визначення енергії газу в режимі реального часу. Результати вимірювань оформлюють у вигляді паспортів природного газу зі середньозваженими величинами показників якості (за 10 діб чи за місяць) для кожного з розроблених маршрутів (від точки приймання/передачі газу і водночас заміру його параметрів до споживача) [14, 82]. Таким чином, сьогодні лише оператор газотранспортної системи отримує достовірну інформацію щодо фізико-хімічних показників природного газу.

Незважаючи на високу цінність природного газу для потреб економіки держави, а також екологічну безпечність у порівнянні з іншими паливами, у т.ч. і альтернативними [83], в Україні існує багато проблемних питань, пов'язаних з видобуванням, транспортуванням і використанням блакитного палива. Відсутність достовірного приладового обліку, наявність значної кількості споживачів, для яких плата за використання палива нараховується за укрупненими показниками, неможливість дієвого контролю за якістю природного газу не сприяють зменшенню корупційних ризиків, що можуть мати місце при розрахунках і балансуванні на ринку газу на різних рівнях ієрархічної структури газотранспортної та газорозподільної систем [84].

Для абонентів, у яких відсутній приладовий облік природного газу, питомі норми газоспоживання були розроблені ще у 70-і роки минулого століття. За час, що минув, відбулись суттєві зрушення у використанні побутових приладів для інженерного обладнання будівель: на заміну газовим прийшла широка гамма електричних приладів. Відповідно, змінювались і норми газоспоживання. Зазвичай вони не відображали реальних витрат газу населенням, носили стохастичний характер і нерідко були та залишаються предметом судових суперечок. В чинному ДБН [48] вказані річні нормативи споживання природного газу у теплових одиницях МДж/(рік·особа), в Кодексі газорозподільних систем [82] – місячні, у метричних одиницях (м^3 /(місяць·особа)).

Аналіз застосування у 2016 р. будинкових вузлів обліку природного газу у м. Києві [76] підтвердив існування нерівномірності газоспоживання абонентами таких багатоквартирних будинків: збільшення в холодний період року (особливо у жовтні, у зв'язку з затримкою початку опалювального періоду) і зменшення, відповідно, у теплий. Максимальне споживання природного газу одним мешканцем становило у січні – $5,6 \text{ м}^3$, мінімальне – у червні – $2,63 \text{ м}^3$ – при середньорічному значенні $3,95 \text{ м}^3$. Остання величина на 10,2 % перевищує існуючу на той час норму – $4,4 \text{ м}^3$ [85]. А якщо порівнювати з чинною сьогодні – $3,28 \text{ м}^3$, то є на 20,1 % вищою. Тобто, у 2016 р. компанія ПАТ «Київгаз» отримала незадекларовані прибутки, а сьогодні реалізація послуги із забезпеченням природним газом населення є збитковою.

Таблиця 5.3

Зміни норм споживання природного газу (в помешканні встановлена газова плита і наявне централізоване гаряче водопостачання), м^3 /людина·місяць

Посилання				
ДБН В.2.5-20 [48]	Постанова КМУ від			Кодекс ГРС [82]
	29.04.15 №237 [86]	23.03.16 №203 [85]	27.02.19 №143 [87]	
6,9	3,0	4,4	3,28	9,8*

Примітка.* Граничний об'єм споживання природного газу у разі порушення вимог Кодексу газорозподільних систем [82] .

У переважній більшості кінцевий споживач сьогодні отримує неякісні, економічно необґрунтовані послуги підприємств житлово-комунального господарства, в структуру тарифу яких включені у т.ч. непродуктивні втрати. Тобто, сьогодні пересічний мешканець України у тій чи іншій формі покриває збитки суб'єктів господарювання, пов'язаних з розподілом та наданням послуг газопостачання.

5.3. Висновки за розділом 5

Запровадження систем інтелектуального обліку природного газу для споживачів населених пунктів дозволить:

1. Суттєво зменшити фінансові збитки, які можуть виникнути у зв'язку з відсутністю на більшості ГРС і головних ГРП потокових хроматографів для моніторингу фізико-хімічних властивостей природного газу в режимі реального часу, а також достовірних засобів обліку у суб'єктів господарювання чи безпосередньо у споживачів, що сприятиме добовому балансуванню природного газу між газотранспортною організацією і постачальником, постачальником і споживачем.

2. Відмовитись від необґрунтованих нормативів витрат природного газу при забезпеченні приладового обліку хоча для характерних ГРП, що обслуговують мікрорайони з однаковою поверховістю забудови, або навіть загальнобудинкових вузлів обліку (на їх показах можна встановити уточнені значення фактичних питомих витрат).

3. Достатньо точно визначити місця можливих витоків і втрат природного газу в багатоступеневих газорозподільних системах населених пунктів.

4. Ліквідувати проблеми при узгодженні фактичних витрат палива між газотранспортним підприємством, газорозподільними організаціями, постачальником і споживачем, що сприятиме налагодженню платежів в обумовлені терміни.

5. Забезпечити постачання природного газу на тривалу перспективу, що ґрунтуватиметься на достовірних прогнозах, реальних показах лічильників тощо.

6. Проводити облік і, відповідно, розрахунки за передачу природного газу, спожите паливо в одиницях енергії (враховуючи реальну теплоту згоряння, а не середньозважену за розрахунковий проміжок часу).

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На підставі аналізу літературних джерел, інженерно-технічних розробок розглянуто і систематизовано чинники, які впливають на фізико-хімічні властивості природного газу на етапах «видобування – підготовка до транспортування – транспортування – використання кінцевим споживачем». Відслідковано процесно-контентну еволюцію поняття «якість природного газу» для подальшого застосування для визначення кількості спожитої енергії.

2. Розроблено математичну модель для оцінки якості природного газу, а також встановлено пріоритетність факторів, які характеризують фізико-хімічні властивості палива, і впливають на експлуатаційну надійність газорозподільних мереж населених пунктів, окремих об'єктів, а також на достовірність показів засобів обліку в одиницях енергії.

3. На підставі виконаних теоретичних досліджень розроблено методику комплексної оцінки якості природного газу, адекватність якої підтверджена за результатами експериментальних досліджень. Щодо чинника, наприклад, «вологість природного газу» максимальна похибка у визначенні температури точки роси не перевищує: для води – 1,0 %, вуглеводнів – 3,0 %.

4. Удосконалено технологічну схему інформаційної системи інтелектуального обліку природного газу в одиницях енергії, яка сприятиме підвищенню достовірності при запровадженні добового балансування палива, вирішенню виникаючих проблем при узгодженні фактичних витрат між суб'єктами господарювання при транспортуванні, розподілі, постачанні та використанні газу, а також налагодженню платежів в обумовлені терміни. Техніко-економічні розрахунки дозволяють констатувати можливість зниження неврахованих втрат природного газу не менше, чим на 4,5 млрд. грн. щороку.

5. Запропоновані технічні рішення щодо удосконалення конструкції інтелектуального лічильника природного газу шляхом обліку спожитого палива

в одиницях енергії в режимі реального часу і в залежності від його фізико-хімічних властивостей.

6. Розроблена енергоефективна система осушки природного газу для газорегуляторних пунктів, установок тощо, що запобігає утворенню гідратів і, відповідно, підвищує експлуатаційну надійність та безаварійну роботоздатність багатоступневих газорозподільних систем. Економічний ефект від впровадження на об'єктах газового господарства за рахунок відмови від використання традиційних абсорбційних методів становив близько 175 тис. грн.

7. Теоретико-методичні та науково-прикладні результати досліджень було інтегровано в пакет прикладних програм «Комплексна оцінка якості природного газу», яка може бути використана при розробці та обґрунтуванні рекомендацій щодо принципової модернізації змісту та методології організаційно-технічного проектування та регламентування експлуатації газорозподільних систем населених пунктів в частині достовірності обліку та балансування природного газу, а також безаварійної (безвідмовної) роботоздатності цих систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Україна: енергетика и економіка. – Київ, Енергоцентр ЕС, 1996. – 128 с.
2. У 2019 році видобуток газу в Україні зменшився на 1,4 %. URL: www.naftogaz.com/www/3/nakweb.nsf/0/85643131C18C8258C22585070043D8C1?OpenDocument (дата звернення 27.07.2020).
3. Протокол №10-4(ГР)-2019 засідання Громадської ради при Міністерстві енергетики та вугільної промисловості України від 2 липня 2019 р. / Міністерство енергетики та вугільної промисловості України. URL: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/publish/article?art_id=245383088 (дата звернення 25.02.2020).
4. Енергетична стратегія України на період до 2030 р. Схвал. розпорядженням Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. № 1071. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0002120-13/print> (дата звернення 27.07.2021).
5. Енергетична стратегія України на період до 2030 р. – Схвал. розпорядженням КМУ від 15 березня 2006 р. N 145-р. – URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/145-2006-p> (дата звернення 13.09.2021).
6. Енергетична стратегія України на період до 2035р. «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». Схвал. розпорядженням КМУ від 18.08.2017 р. №605-р. – URL: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/publish/article?art_id=245234085 (дата звернення 13.09.2021).
7. Розпорядження Кабінету Міністрів України «Про Національний план дій з енергоефективності на період до 2020 року» від 25 листопада 2015 р. № 1228-р. URL :<http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/1228-2015> (дата звернення 11.10.2020).
8. Україна через 5 років – енергонезалежна країна, через 10 – постачальник енергії в Європу. URL: <https://strategy.uifuture.org/ukraine-cherez-5-rokiv-energonezalezhna-kraina.html> (дата звернення 27.07.2021).

9. Єнін П.М., Шишко Г.Г., Предун К.М. Газопостаачння населених пунктів і об'єктів природним газом / Навч. посібник. – К.: Логос, 2002 – 198 с.
10. ДСТУ ISO 6976:2009 Природний газ. Обчислення теплоти згоряння, густини, відносної густини і числа Воббе на основі компонентного складу. - URL: online.budstandart.com/ua/catalog/document.html?iddoc=26775 (дата звернення 11.10.2020).
11. ГОСТ 5542-87. Газы горючие природные для промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия. М.: Изд.-во стандартов, 1987. 2 с.
12. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Физматгиз, 1963. – 720 с.
13. Ионин А.А. Газоснабжение: Учебн. для вузов. – М.: Стройиздат, 1989. – 439 с.
14. Кодекс газотранспортної системи, 2015. (Верховна Рада України). Офіційний сайт Верховної Ради України. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/go/z1378-15/> (дата звернення 13.09.2021).
15. Якість газу. URL: <http://utg.ua/utg/business-info/yakist-gazu.html> (дата звернення 13.09.2021).
16. ГОСТ 31369-2008 (ИСО 6976: 1995) Газ природный. Вычисление теплоты сгорания, плотности, относительной плотности и числа Воббе на основе компонентного состава. URL: <https://dok.ipedia.ru/document/5337355> (дата звернення 11.10.2020).
17. Паспорт качества №4. Газ горючий природный. СТО Газпром 089-2010. ОАО «Севернефтегазпром». Газовый промысел Южно-Русского нефтегазоконденсатного месторождения. Апрель 2019 г. URL: <https://ОАО Севернефтегазпром Южно-Русского НГМ ГИС5383602633016703924.pdf> (дата звернення 13.09.2021).

18. Про нафту і газ: Закон України. (Верховна Рада України). Офіційний сайт Верховної Ради України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2665-14#Text> (дата звернення 13.09.2021).

19. Про ринок природного газу: Закон України від 29.12.2019 р. № [394-IX](#)/ Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/329-19>(дата звернення 03.09.2021).

20. Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони: Закон України від 16.09.2014 р. № [1678-VII](#) / Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011 (дата звернення 10.06.2021).

21. Проект Постанова КМУ «Про затвердження Технічного регламенту природного газу». URL: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=245366216&cat_id=167475 (дата звернення 13.09.2021).

22. Капцова Н.І. Підвищення ефективності експлуатації та ремонту міських газопроводів: автореф. дис. ... канд. техн. наук.: 05.23.03 / Капцова Н.І.; Міністерство освіти і науки України, Харківський національний університет будівництва і архітектури. – Харків, 2018. – 20 с.

23. Одишария Г. Э. Гидравлический расчет рельефных трубопроводов при незначительном содержании жидкости в потоке газа / Г. Э. Одишария, А. В. Катушенко // Газовая промышленность. – Москва : Недрa, 1976. – № 9. – С. 42 – 43.

24. Козак Р. И. Опыт очистки газопровода Дашева – Минск / Р. И. Козак, Р. И. Багнюк // ЭИ. Эксплуатация магистральных газопроводов, 1962. – № 10. – С. 29 – 31.

25. Скрыбин В. Г. Продувка и испытание магистральных газопроводов / В. Г. Скрыбин. – Москва : Гостоптехиздат, 1963. – 156 с.

26. Сорока И. И. Опыт очистки внутренней полости магистральных газопроводов ВПО Укргазпром / И. И. Сорока, И. И. Капцов // Транспорт и

хранение газа, 1999. – Вып. 12. – 46 с.

27. Smith R. V., Miller I. S., Ferguson I. W. Flow of natural gas through experimental pipelines and transmission lines. Bureau of Mines Monograph, 9, New York, 1956.

28. Грудз В. Я. Исследование процесса продувки газопроводов многократным пропуском очистного устройства / В. Я. Грудз // Строительство трубопроводов. 1977. – № 6. – С. 15 – 16.

29. Грудз В. Я. Исследование эффективности очистных устройств в газопроводах с пересеченным профилем трассы / В. Я. Грудз // Дис. на соиск. ученой ст. канд. техн. наук. – Ивано-Франковск, 1980. – 140 с.

30. Грудз В. Я. Влияние скорости движения очистных устройств на эффективность продувки газопроводов / В. Я. Грудз, В. Н. Переяслов, И. Х. Хизгилов // Нефтяная и газовая промышленность, 1974. – № 6. – С. 40 – 41.

31. Клапчук О. В. Экспериментальные исследования процесса выноса жидкости из газопровода / О. В. Клапчук // Сборник научных трудов. Транспорт газа и газотранспортное оборудование. – Москва : ВНИИГаз, 1980. – С. 105 – 109.

32. Борщенко Л. И. Подготовка газа и конденсата к транспорту / Л. И. Борщенко. – Москва : Недра, 1987. – 143 с.

33. Пустовойтов В. П. Исследование продуктов отложения и источников их поступления в газопроводы / В. П. Пустовойтов, Н. И. Капцова // Республиканский межведомственный научно-технический сборник «Коммунальное хозяйство городов». – Киев : «Техника», 1997. – Вып. 8. – С. 71 – 74.

34. Деточенко А. В. Спутник газовика / А. В. Деточенко. – Москва : Недра, 1978. – 311 с.

35. Общесоюзные нормы технологического проектирования. Магистральные газопроводы. Ч. 1. Газопроводы. ОНТП 61-1 – 85. – Москва : Газпром, 1986. –

222 с.

36. Правила обследования, оценки и технического состояния, паспортизации и проведения планово-предупредительных ремонтов газопроводов и сооружений на них. – Киев, 1998. – 61 с.

37. Русанов А. А. Справочник по пыле- и золоулавливанию / А. А. Русанов. – Москва : Энергоатомиздат, 1985. – 312 с.

38. Бакаров Т. М. Сбор и подготовка к транспорту природных газов / Т. М. Бакиров и др. – Москва : Недра, 1986, – 261 с.

39. Савин Г. Н. Распределение напряжений около отверстий / Г. Н. Савин. – Киев : Наукова думка, 1982. – 891 с.

40. Романков П. Г. Расчетные диаграммы и номограммы по курсу «Процессы и аппараты химической промышленности» / П. Г. Романков и др. – Ленинград : Химия, 1985. – 56 с.

41. Капцова Н. И. Оптимизация взаимосвязей показателей надежности с объемами ремонтно-восстановительных работ изделий газового оборудования и трубопроводных систем / Н. И. Капцова // Вестник – Белгород, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, Научно-теоретический журнал. – Белгород. – № 3. 2015. – С. 77 – 79.

42. Kiefner J. Full-encirclement sleerle repair methods given for dented or corrodent pipe / J. Kaefner. – The Oil a Gas J., 1983, 26. – V. 81. – No 52. – С. 160 – 163.

43. Лутошкин Г. С. Сбор и подготовка нефти, газа и воды / Г. С. Лутошкин. – Москва : Недра, 1977. – 192 с.

44. Day, Stepanek. «Pipe Line Industry», v.14 № 5, 1962.

45. Багатогалузева програма виробництва приладів обліку природного газу і поетапного оснащення ними житлового фонду: Затв. Держкомнафтогазом України 23.08.95 р. – К., 1995. – 28 с.

46. Предун К.М. Достовірність обліку природного газу абонентами житлових будинків / К.М.Предун, Ю.Й.Франчук // Матеріали XLVII науково-технічної

конференції ФБ ТУГП. – Вінниця, 2018. – Тези доповідей.

47. ДСТУ 3336-96. Лічильники газу побутові. Загальні технічні вимоги. – К.: Держстандарт України, 1996. – 11 с.

48. ДБН В.2.5-20-2018. Газопостачання / Мінрегіон України. – К.: Мінрегіон України, 2019. – 109 с.

49. Директива Європейського парламенту та Ради 2012/27/EU «Про енергоефективність». URL: http://sae.gov.ua/sites/default/files/UKR_Directive_27_2012_2 (дата звернення 09.09.2021)

50. Петришин І. Аналіз показників якості природного газу, які впливають на процес горіння / І.Петришин, В.Соколовський, Н.Петришин, І. Дарвай // Стандартизація. Сертифікація. Якість. – 2012. - №3. – с.51-56.

51. Митюшкин Ю. И. Soft Computing: идентификация закономерностей нечеткими базами знаній / Ю. И. Митюшкин, Б. И. Мокин, А. П. Ротштейн. – Вінниця : УНИВЕРСУМ–Вінниця, 2002. – 145 с.

52. Ротштейн А. П. Нечеткая надежность алгоритмических процессов / А. Ротштейн, С. Штовба. – Вінниця : Континент – ПРИМ, 1997. – 142 с.

53. Rotshtein A. Modeling of algorithmic process reliability with fuzzy source data / A. Rotshtein, S. Shtovba // Eksploatacja i niezawodnosc (Maintenance and Reliability). – 2006. – №2. – P. 40–43.

54. Rotshtein A. Managing a dynamic system by means of a fuzzy knowledge base / A. Rotshtein, S. Shtovba // Automatic Control and Computer Sciences. – 2001. – №2. – P. 16–22.

55. Nikola K. Kasabov. Foundations of neural networks, fuzzy systems, and knowledge engineering / Nikola K. Kasabov. – London, England, Cambridge, Massachusetts: A Bradford Book, The MIT Press, 1998 – 538 p. – ISBN 0-262-11212-4.

56. Франчук Ю.Й. Оцінка якості природного газу як енергоносія на основі лінгвістичної інформації / Ю.Й. Франчук, О.І. Ободянська, К.М. Предун // Управління розвитком складних систем. – 2019. – №38. – С. 143–150.

57. Франчук Ю.Й. Модель багатофакторної оцінки якості природного газу / К.М.Предун, Ю.Й.Франчук, О.І.Ободянська // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: наук.-техн. збірник / Відповід. ред. В.П.Корбут. – К.: КНУБА, 2019. – Вип.30. – с.20-28.

58. Ратушняк Г. С. Управління змістом проектів із забезпечення надійності зовнішніх газорозподільних мереж: монографія / Г. С. Ратушняк, О. І. Ободянська. – Вінниця, 2014. – 128 с. – ISBN 978-966-641-582-3.

59. U. Franchuk. Using fuzzy logic elements to assess the quality of natural gas / K. Predun, U. Franchuk, O. Obodyanska / The scientific heritage. – Vol.73, 2021. – p. 37-48.

60. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С.Д. Штовба – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.

61. Франчук Ю.Й. Моделювання оцінки якості природного газу з використанням нечітких баз знань / К.М.Предун, Ю.Й.Франчук, О.І.Ободянська // Сучасні технології, матеріали і конструкції у будівництві: наук.-техн. журнал. – Т.27, №2. – Вінниця: ВНТУ, 2019. – с.114-122.

62. Леоненко А. В. Нечеткое моделирование в среде Matlab и FuzzyTech / А. В. Леоненко – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2005. – 725 с.

63. Саати Т. Аналитическое планирование. Организация системы: Пер. с англ / Т. Саати, К. Керис – М. : Радио и связь, 1991. – 224 с.

64. Rotshtein A. Modification of Saaty method for the construction of fuzzy set membership functions / A. Rotshtein // Fuzzy logic and its applications. – 1997. – №1. – P. 125–130.

65. Zadeh L. Knowledge representation in fuzzy logic / L. Zadeh // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. – 1989. – №1. – P. 89–98.

66. Франчук Ю.Й. Моделювання інтелектуальної підтримки прийняття рішення щодо оцінки якості природного газу методом парних порівнянь / К.М.Предун, Ю.Й.Франчук, О.І.Ободянська // Вчені записки Таврійського

національного університету ім. В.І.Вернадського. Серія: Технічні науки. – К.:ТНУ, 2019. – Том 30 (69). – №6. – Част.2. – с.195-201.

67. Франчук Ю.Й. Моделювання управління якістю природного газу з використанням функцій належності лінгвістичних змінних методом Парето /К.М.Предун, Ю.Й.Франчук, О.І.Ободянська // Містобудування та територіальне планування : наук.-техн. збірник. – К.: КНУБА, 2021. – Вип.76. – с. 235-249.

68. Вологометрия природного газу / А.Й. Лур'є, О.В. Хвостова, О.Л. Швейкін. – Х. : Курсор, 2011. – 128 с. ISBN 978-966-8944-67-3.

69. Борщенко Л.И. Подготовка газа и конденсата к транспорту. – М.: Недра, 1987. – 285 с.

70. Гриценко А.И., Александров И.А., Галанин И.А. Физические методы переработки и использования газа. – М.: Недраа, 1981. – 621 с.

71. Довідник працівника газотранспортного підприємства / В.В.Розгонюк, А.А.Руднік, В.М.Коломеєв, М.А.Григіль та інші. – К.: Росток, 2001. – 1092 с.

72. Елемент Пельтье. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/> Елемент Пельтье (дата звернення 20.06.2020).

73. Шостаковский П. Современные решения термоэлектрического охлаждения для радиоэлектронной, медицинской, промышленной и бытовой техники / П. Шостаковский // Компоненты и технологии. – 2010. – № 1. – С. 130-137.

74. Програмна система «ГазКондНафта»

75. Газовый хроматограф Agilent 6890. URL: https://www.agilent.com/cs/library/usermanuals/Public/G1530-91010_050926.pdf (дата звернення 20.06.2020).

76. Облік природного газу та метрологія. URL: <http://www.naftogaz.com/files/Information/Dopovidi-berezen2017-Lviv.pdf> (дата звернення 20.06.2020).

77. Облік природного газу та метрологія. URL: <http://www.naftogaz.com/files/Information/Dopovidi-traven2015-Rivne.pdf> (дата звернення 20.06.2020).

78. Осієвський В.О. Імплементация законодавчих та нормативно-правових актів Євросоюзу у частині обліку природного газу та метрології / Всеукраїнський семінар-нарада «Приладовий облік природного газу, його нормативно-правове та метрологічне забезпечення» (збірка тез доповідей). – Запоріжжя, 27-31 травня 2019 р. URL: <http://www.naftogaz.com/files/Information/Tezy-dopovidi-Zaporizhya-trav2019.pdf> (дата звернення 26.10.2020).

79. Власюк Я.М. Хід реалізації Концепції створення єдиної системи обліку природного газу/ Всеукраїнський семінар-нарада «Приладовий облік природного газу, його нормативно-правове та метрологічне забезпечення» (збірка тез доповідей). – Запоріжжя, 27-31 травня 2019 р. URL: <http://www.naftogaz.com/files/Information/Tezy-dopovidi-Zaporizhya-trav-2019.pdf> (дата звернення 26.10.2020)

80. ДСТУ ISO 15112:2009. Природний газ. Визначення енергії. – Київ : Держспоживстандарт України, 2010. – 29 с.

81. Предун К.М. Аналіз стану нормативно-правового забезпечення обліку природного газу // Містобудування та територіальне планування: Наук.-техн. збірник. – Київ : КНУБА, 2018. – Вип. 67. – с.602-609.

82. Кодекс газорозподільних систем. Офіційний сайт Верховної Ради України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1379-15> (дата звернення 26.10.2020).

83. Предун К.М. Інноваційні технології проектування та експлуатації систем енергопостачання в контексті світових екологічних проблем // *Екологічні науки: Наук.-практ. журнал.* – Київ, 2019. – №26. с. 125-131. DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716-2019-3-26-23>.

84. Предун К.М., Ободянська О.І., Франчук Ю.Й. Принципова модернізація змісту та методології організаційно-технічного проектування та регламентування експлуатації ГРМ // *Paradigm of Knowledge. Multidisciplinary Scientific Journal*, No. 2 (34), 2019. – pp.74-92. DOI10.26886/2520-7474.2 (34)2019.5

85. Про внесення змін до норм споживання природного газу населенням у разі відсутності газових лічильників. – Постанова КМУ від 29 квітня 2015 р. № 237. Офіційний вісник України, 2015 р., № 36, ст. 1075.

86. Про норми споживання природного газу населенням у разі відсутності газових лічильників. – Постанова КМУ від 23 березня 2016 р. № 203. Офіційний вісник України, 2016 р., № 24, ст. 958.

87. Питання споживання природного газу. – Постанова КМУ від 27 лютого 2019 р. № 143. URL: <https://www.kmu.gov.ua/ua/npas/pitannya-spozhyvannya-prirodnogo-gazu> (дата звернення: 03 березня 2020).

88. Ларичев О.И. Качественные методы принятия решений / О.И.Ларичев, Е.М. Мошкович. – М.: Наука, Физматлит, 1996. – 208 с.

89. Орловский, С. А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации / С. А. Орловский. – М.: Наука, 1981. – 208 с.

90. Алтунин, А.Е. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях: Монография / А.Е. Алтунин, М.В. Семухин. – Тюмень: ТГУ, 2000. – 352 с.

91. Naeeni, A. F. Advanced Multi-Agent Fuzzy Reinforcement Learning. Master Thesis Computer Engineering, Nr: E3098D / Alireza Ferdowsizadeh Naeeni. – Dalarna University, Sweden, 2004. – 99 p.

92. Sugeno, M. Industrial applications of fuzzy control / M. Sugeno, ed. – North-Holland, Amsterdam, 1985. – 269 p.

93. Ягер Р.Р. Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения. Пер. с англ. / Под ред. Р. Р. Ягера. – М.: Радио и связь, 1986. – 408 с.

94. Франчук Ю.Й. Аналіз та оцінка заходів щодо підвищення енергоефективності систем централізованого теплопостачання / К.М.Предун, Ю.Й.Франчук // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: наук.-техн. збірник. – Вип. 23. – К.: КНУБА, 2017. – с.31-35.

95. Y. Franchuk. Modernization of organizational and technological solutions in design and use of modern heating systems / K. Predun, O. Shevchuk, Y. Franchuk // Scientific journal innovative solutions in modern science, № 2(29), 2019, p.62-77. Dubai, United Arab Emirates. DOI 10.26886/2414-634 X. 2 (29)2019.4.

96. Франчук Ю.Й. Створення експертно-моделювальної системи для аналізу факторів, які впливають на якість природного газу / Ю.Й.Франчук // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: наук.-техн. збірник. – К.: КНУБА, 2019. – Вип. 31. – с.33-41.

97. Франчук Ю. Й. Дослідження проблеми забезпечення оптимального тиску в розподільчих мережах газопостачання перед побутовими газовими приладами / Ю.Й.Франчук, В.А. Коновалюк // Вентиляція, освітлення і теплогазопостачання: наук. техн. збірник. – Вип. 33. – К. КНУБА, 2020. – с. 32-38.

98. Франчук Ю. Й. Дослідження впливу температури на параметри природного паливного газу / Ю.Й.Франчук, В.А. Коновалюк // Вентиляція, освітлення і теплогазопостачання: наук. техн. збірник. – Вип. 36. – К.: КНУБА, 2021. – с. 48-56.

99. Доклад Всемирной комиссии по вопросам окружающей среды и развития «Наше общее будущее». [URL:https://www.un.org/ru/ga/pdf/brundtland.pdf](https://www.un.org/ru/ga/pdf/brundtland.pdf) (дата звернення 09.09.2020).

100. ISO 14004. Environmental management systems. General guidelines on principles, systems and supporting techniques (1996). Brussels: ISO, 1996.

101. ISO 14000 – международный стандарт, содержащий требования к системе экологического управления (environmental management system). [URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/ISO_14000](https://ru.wikipedia.org/wiki/ISO_14000) (дата звернення 09.09.2020)

102. Шевчук В. Я. Макроекономічні проблеми сталого розвитку. Київ : Геопринт, 2006. 200 с.

103. Сталий розвиток. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B9_%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%B2%D0%B8%D1%82%D0%BE%D0%BA (дата звернення 23.07.2021).

104. Програма дій «Порядок денний на XXI століття»: Ухвалена конференцією ООН з навколишнього середовища і розвитку в Ріо-де-Жанейро (Саміт «Планета Земля», 1992 р.): Пер. з англ. 2-ге вид. Київ: Інтелсфера, 2000. 360 с.

105. Цілі сталого розвитку. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A6%D1%96%D0%BB%D1%96_%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%BE_%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%B2%D0%B8%D1%82%D0%BA%D1%83 (дата звернення 23.07.2021).

106. Конституція України: Закон України. Редакція від 01.01.2020, підстава – 254к/96-ВР. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/254%D0%BA/96-%D0%B2%D1%80#Text> (дата звернення 23.09.2020).

107. Про надра / Кодекс України: Закон України. Ред. від 07.06.2020, підстава – 554-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/132/94-%D0%B2%D1%80#Text> (дата звернення 23.09.2020).

108. Про охорону навколишнього природного середовища: Закон України. Ред. від 07.06.2020, підстава – 554-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12#Text> (дата звернення 23.09.2020).

109. Про охорону атмосферного повітря: Закон України. Ред. від 18.12.2017, підстава – 2059-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2707-12#Text> (дата звернення 23.09.2020).

110. Франчук Ю.Й. Деякі аспекти щодо достовірності обліку природного газу та показників його якості / К.М.Предун, Ю.Й.Франчук // International research and practical conference «Modern methods, innovation and experience of practical application in the field of technical science: Conference Proceedings», December 27-28, 2017. – Radom, Republic of Poland. – p. 151-153.

111. Франчук Ю.Й. Нормативно-правове забезпечення обліку природного газу побутовими споживачами / К.М.Предун, Ю.Й.Франчук // The international research and practical conference «The development of technical sciences: problems and solutions», April 27-28, 2018. – Brno, the Czech Republic, – p. 81-84.

112. Франчук Ю.Й. Використання енергії природного газу в багатоступеневих газорозподільних системах населених пунктів / К.М.Предун, Ю.Й.Франчук // Інноваційні технології в будівництві. Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції 13-15 листопада 2018 р. – Вінниця: ВНТУ, 2019. – с.290-291.

113. Франчук Ю.Й. Аналіз факторів, які впливають на якість природного газу / Ю.Й.Франчук // Міжнародна науково-практична конференція «Технічні науки, історія, сучасність, майбутнє, досвід ЄС». – Влоцлавек, Республіка Польща. 27–28 вересня 2019 року. – Wloclavec: Izdevnieciba “Baltija Publishing”, 2019. – p.66-69.

114. Франчук Ю.Й. Модель багатофакторної оцінки якості природного газу / Ю.Й.Франчук // Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика формування мікроклімату та енергопостачання будівель та споруд» (м. Київ, КНУБА, 17-18 жовтня 2019 р.). – К.: КНУБА, 2019.

115. Франчук Ю.И. Анализ факторов, влияющих на качество природного газа / Ю.И.Франчук // Международная научно-практическая конференция «Экологические вопросы в инженерных системах и сооружениях». – Баку, Республика Азербайджан. 10-11 декабря 2019 г. – Баку, 2019. – с. 15-18.

116. Франчук Ю.Й. Дослідження проблеми забезпечення оптимального тиску в розподільних мережах газопостачання перед побутовими газовими приладами / Ю.Й.Франчук // Робоча програма та тези доповідей на міжнародній науково-практичній конференції “Екологія. Ресурси. Енергія. Багатофункціональні еко- та енергоефективні ресурсозберігаючі технології в архітектурі, будівництві та суміжних галузях” (м. Київ, КНУБА, 25-26 листопада 2020 р.). – Київ: КНУБА, 2020. – с.20-21.

117. Франчук Ю. Й. Удосконалення системи обліку природного газу в одиницях енергії / К.М.Предун, В.А. Коновалюк, Ю.Й.Франчук // Вентиляція, освітлення і теплогазопостачання: наук. техн. збірник. – Вип.37. – К.: КНУБА, 2021. – с. 62-66.

118. Цілі сталого розвитку: Національна доповідь, 2017. URL: <https://www.ua.undp.org/content/ukraine/uk/home/library/sustainable-development-report/sustainable-development-goals--2017-baseline-national-report.html> (дата звернення 23.07.2020).

119. Паливно-енергетичний комплекс України на порозі третього тисячоліття. За заг. ред. А. К. Шидловського, М. П. Ковалка. К.: УЕЗ, 2001. 398 с.

120. Про ратифікацію Протоколу про приєднання України до договору про заснування Енергетичного Співтовариства: закон України: станом 1.01.2019 р. № 2787-VI([2787-17](#)) від 15.12.2010. К.: ВВР, 2011, №24, ст.170.

121. Розпорядження Кабінету Міністрів України «Про Національний план дій з енергоефективності на період до 2020 року» від 25 листопада 2015 р. № 1228-р. URL : <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/1228-2015> (дата звернення 11.10.2019).

122. Петришин І. Аналіз показників якості природного газу, які впливають на процес горіння / І.Петришин, В.Соколовський , Н.Петришин, І.Дарвай // Стандартизація, сертифікація, якість. 2012. №3. С.51-56.

123. Про забезпечення комерційного обліку природного газу: Закон України. Редакція від 20.01.2018, підстава - [2260-VIII](#). URL: <https://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/3533-17> (дата звернення 25.05.2019).

124. Про енергетичну ефективність будівель і споруд: Закон України від 22 червня 2017 р. №2118-VIII. Відомості Верховної Ради. 2017, № 33. Ст. 359.

125. ДСТУ EN 12405-1:2017. Коректори до лічильників газу електронні. Част.1. Корекція об'єму. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=74878 (дата звернення 25.05.2019).

126. ДСТУ EN 12405-2:2018. Коректори до лічильників газу електронні. Част.2. Обчислення енергії. URL: <http://online.budstandart.com/ua/catalog/document.html?iddoc=81570> (дата звернення 25.05.2019).
127. Денчев К. Мирова енергетическая безопасность: история и перспективы // Новая и новейшая история. – 2010. – №2. – С. 34–37.
128. Лелюк О. В. Аналіз особливостей українського ринку видобутку та споживання природного газу // БІЗНЕС ІНФОРМ: міжнародний науковий економічний журнал. – 2013. – № 11. – С.170-179.
129. Як змінювалася ціна російського газу для України протягом 24 років. URL: <https://www.slovoidilo.ua/2016/02/12/infografika/ekonomika/yak-zminyu-valasya-czina-rosijskoho-hazu-dlya-ukrayiny-protyahom-24-rokiv> (дата звернення 27.07.2020).
130. Умовне паливо. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D0%BC%D0%BE%D0%B2%D0%BD%D0%B5_%D0%BF%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B2%D0%BE (дата звернення 27.07.2020).
131. Паризька угода: Угоду ратифіковано Законом України 14.07.2016 р. №1469-VIII / Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_161 (дата звернення 03.03.2020)
132. Костров В. Енергетична незалежність по-німецьки // Віче. – 2014. – № 19. – С. 25-29.
133. Предун К. М. Актуальність парадигми сталого розвитку щодо трансформації енергетики в Україні / К. М. Предун // Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія «Економічні науки». Вип. 38. – Херсон : ХДУ, 2020. – С. 57-61.
134. Предун К. М. Становлення, розвиток та тенденції ринку енергопостачання України в контексті біосфери сумісності / К. М. Предун // Науково-виробничий журнал «Держава та регіони. Серія: Економіка та підприємництво». – Вип. 3 (114), част.2. – 2020. – С. 55-61.

135. Статистика энергетике. Цены на газ для бытовых и промышленных потребителей. Статистическое управление Европейского Союза. Последнее обновление метаданных 09.04.2021. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/cache/metadata/en/nrg_pc_202_esms.htm (дата звернення 12.07.2021).

136. Ціни на природний газ для населення. URL: <https://energy.kyivgaz.ua/ofitsijna-informatsiya/tsini-ta-tarifi-na-gaz.html> (дата звернення 03.08.2021).

137. Про затвердження Положення про покладення спеціальних обов'язків на суб'єктів ринку природного газу для забезпечення загальносупільних інтересів у процесі функціонування ринку природного газу: Постанова Кабінету Міністрів України від 19 жовтня 2018 р. № 867 Редакція від 28.01.2020 р., підстава – [17-2020-п](#) / Кабінет Міністрів України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/867-2018-%D0%BF#n77> (дата звернення 12.02.2020).

138. International Energy Agency (IEA), Medium Term Energy Efficiency Market Report (Paris, Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) and IEA, 2015), тр.86. URL: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/MediumTermEnergyefficiencyMarketReport2015.pdf>.

139. International Renewable Energy Agency (IRENA) и Copenhagen Centre of Energy Efficiency (C2E2), Synergies between Renewable Energy and Energy Efficiency. A Working Paper (Abu Dhabi, IRENA и Copenhagen, C2E2, 2015).

140. (REN21), Renewables 2013 Global Status Report (Paris, REN21 Secretariat, 2013). URL: http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2013/GSR2013_lowres.pdf.

141. Про затвердження Правил постачання природного газу: Постанова НКРЕКП від 30.09.2015 № 2496. Офіційний сайт Верховної Ради України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1382-15/page> (дата звернення 26.10.2020)

142. Предун К.М. Аналіз стану нормативно-правового забезпечення обліку природного газу // Містобудування та територіальне планування: Наук.-техн. збірник. – Київ : КНУБА, 2018. – Вип. 67. – с.602-609.

143. ДСТУ 3336-96. Лічильники газу побутові. Загальні технічні вимоги. – К.: Держстандарт України, 1996. – 11 с.
144. Данилишин Б.М., Дорогунцов С.І., Міщенко В.С., Коваль Я.В., Новоторов О.С., Паламарчук М.М. Природно-ресурсний потенціал сталого розвитку України. – Київ: РВПС України, 1999. – С. 238-314.
145. Energy 2020. A strategy for competitive, sustainable and secure energy: Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: Doc. COM (2010) 639 final. Brussels, 10.11.2010 // EUR-Lex. Access to European Union law.
146. European Energy and Transport. Trends to 2030 Update 2005. - European Commission, Directorate-General for Energy and Transport. European Commission, 2006. – 77 p.
147. EU energy trends to 2030 Update 2009. European Commission, Directorate General for Energy and Transport. – European Commission, 2010. – 180 p.
148. Green paper «A 2030 frame work for climate and energy policies». COM(2013) 169 final. – Brussels, 27.3.2013. – 16 p.
149. Хухлындина Л., Чиж А. Энергетическая политика Европейского Союза в начале XXI века // Журнал международного права и международных отношений. – 2012. – № 3.
150. Политика энергоэффективности. Рекомендации. – Париж: МЭА, 2009. – 86 с.
151. EU Energy Efficiency Policy Achievements and Outlook. – Brussels: European Parliament, Directorate general for internal policies, 2010. – 213 p.
152. Energy Efficiency Policy: 25 Recommendations. – International Energy Agency, 2011. – 12 p.
153. П'ятничко О.І., Жук Г.В., Гриценко А.В. та інш. Досвід утилізації звалищного газу в енергетичних установках в Україні: Монографія. – К.: Аграр Медіа Груп, 2015. – 126 с.

154. Крушневич Т.К., Пятничко А.И. Извлечение метана из биогаза полигонов и подача его в магистральный газопровод // Технические газы. – 2006. – №3. – С.41-44.

155. Пятничко А.И., Иванов Ю.В., Жук Г.В., Будняк С.В. Абсорбционное извлечения метана и диоксида углерода из биогаза // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2012. – №1. – С.4-10.

156. Гордієнко А.І. До питання переходу на облік природного газу як енергоносія / А.І.Гордієнко, І.Г.Богомолець, М.В.Чуб // Нафтова і газова промисловість. – 2001. – №3. – С.42-43.

157. Козій В.М. Якість газу родовищ України / В.М.Козій, А.І.Лур'є, І.А.Рубанова // Питання розвитку газової промисловості України: Збірн. наук. праць УкрНДІгаз. – Вип. 28. – 2000. – С.66-68.

158. Мотало А.В. Аналіз основних проблем методології оцінювання якості вуглеводневих газів / А.В.Мотало, Б.І.Стадник, В.П.Мотало // Науковий вісник НЛТУ України: Збірн. наук.-техн. праць. 2. Екологія та довкілля. – 2015. – Вип. 25.10. – С. 178-183.

159. Предун К. М. Достовірність обліку природного газу абонентами житлових будинків / К. М. Предун // Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин: Збірн. наук. праць. – Вип. 35, част.2. – К.: КНУБА, 2017. – С. 158-166.

160. Предун К. М. Рекомендації щодо системного оновлення стратегії, економічного та технологічного регламенту діяльності стейкхолдерів газопостачання в Україні / К. М. Предун // Формування ринкових відносин в Україні: збірник наукових праць. – Вип. 9. – К.: НДІ інформатизації та економіки, 2019. – С. 83-91.

161. Предун К. М. Типологія енергетичних ресурсів та детермінація ефектів їх використання в концепті парадигми «зеленого будівництва» / К. М. Предун // Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І.Вернадського.

Серія: Економіка і управління. – Том 31 (70). – № 2, част.2. – К.: ВД «Гельветика», 2020. – С. 97-103.

162. Предун К. М. Еволюція концептуально-теоретичних основ еколого-економічної оптимізації: сучасні виміри та принципи реалізації / К. М. Предун // Ефективна економіка: електронний журнал. – № 3. – 2020. – URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=7735>.

163. Предун К. М. Еколого-економічні проблеми використання альтернативних палив для потреб енергопостачання населених пунктів України / К. М. Предун // Міжнародна науково-практична конференція «Технічні науки, історія, сучасність, майбутнє, досвід ЄС». (Влоцлавек, Республіка Польща, 27–28 вересня 2019 року). – Wloclavec: Izdevnieciba “Baltija Publishing”, 2019. – P.61-64.

164. Предун К. М. Эколого-экономические аспекты реновации жилищно-коммунального хозяйства Украины / К. М. Предун // Международная научно-практическая конференция «Экологические вопросы в инженерных системах и сооружениях» (Баку, Азербайджан, 10-11 декабря 2019 г.). – Баку, 2019. – С.7-18.

165. Предун К.М. Інноваційні технології в реконструкції газових мереж у м.Києві / К.М.Предун, О.В.Струк // Енергозбереження в будівництві та архітектурі: Наук.-техн. збірник. – К.: КНУБА, 2016. – Вип.8. – С.229-235.

166. Предун К.М. Аналіз стану інженерних мереж та можливостей їх використання для потреб тепlopостачання населених пунктів України. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: наук.-техн. збірник. – К.: КНУБА, 2012. – Вип. 14. – С.147-150.

167. Волосянко В.Д. Деякі проблеми метрологічного забезпечення обліку природного газу в газорозподільній мережі / В.Д.Волосянко, Г.Г.Шишко, К.М.Предун // Український метрологічний журнал. – Х., 2005. – №1. – с.49-54.

168. Єнін П.М. Удосконалення обліку природного газу населенням і дрібними споживачами/ П.М. Єнін, Г.Г. Шишко, К.М.Предун //Нафтова і газова промисловість. – 2002. – №3. – С.39-40.

169. Волосянко В.Д. Проблеми метрологічного забезпечення обліку природного газу / В.Д.Волосянко, Г.Г.Шишко, К.М.Предун // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: наук.-техн. збірник. – К.: КНУБА, 2007. – Вип. 11. – С.43-54.

170. Підвищення конкурентоспроможності в Україні шляхом створення сталого законодавчого підґрунтя для роботи енергосервісних компаній. URL: http://www.oecd.org/globalrelations/Framework_ESCO_Ukraine_UKR.pdf (дата доступу 06.09.2020).

171. Презентація бізнес-моделей енергосервісного контрактингу (EPC). URL: http://www.korosten.in.ua/images/economika/energy_management/-pdf (дата доступу 20.08.2021).

Фрагмент тексту прикладної програми «Комплексна оцінка
якості природного газу»

```

function varargout = main(varargin)
% MAIN MATLAB code for main.fig
%   MAIN, by itself, creates a new MAIN or raises the existing
%   singleton*.
%
%   H = MAIN returns the handle to a new MAIN or the handle to
%   the existing singleton*.
%
%   MAIN('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%   function named CALLBACK in MAIN.M with the given input arguments.
%
%   MAIN('Property','Value',...) creates a new MAIN or raises the
%   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
%   applied to the GUI before main_OpeningFcn gets called. An
%   unrecognized property name or invalid value makes property application
%   stop. All inputs are passed to main_OpeningFcn via varargin.
%
%   *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%   instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help main

% Last Modified by GUIDE v2.5 03-Sep-2019 00:46:15

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
'gui_OpeningFcn', @main_OpeningFcn, ...
'gui_OutputFcn',  @main_OutputFcn, ...
'gui_LayoutFcn',  [] , ...
'gui_Callback',   []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before main is made visible.
function main_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to main (see VARARGIN)

```

```

% Choose default command line output for main
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes main wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = main_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject handle to figure
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes on button press in X.
function X_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to X (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
fuzzy('X.fis')

% --- Executes on button press in A.
function A_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to A (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
fuzzy('A.fis')

% --- Executes on button press in Y.
function Y_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to Y (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
fuzzy('Y.fis')

% --- Executes on button press in Z.
function Z_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to Z (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
fuzzy('Z.fis')

% --- Executes on button press in x1.
function x1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to x1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
fuzzy('x1.fis')

% --- Executes on button press in x2.
function x2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to x2 (see GCBO)

```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
fuzzy('x2.fis')

function s1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to s1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of s1 as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of s1 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function s1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to s1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function s2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to s2 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of s2 as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of s2 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function s2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to s2 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function s3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to s3 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

```



```

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of s3 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of s3 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function s3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to s3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function s4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to s4 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of s4 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of s4 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function s4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to s4 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function s5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to s5 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of s5 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of s5 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function s5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to s5 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

```

```

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%     See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function z1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject     handle to z1 (see GCBO)
% eventdata   reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of z1 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of z1 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function z1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject     handle to z1 (see GCBO)
% eventdata   reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%     See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function z3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject     handle to z3 (see GCBO)
% eventdata   reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of z3 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of z3 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function z3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject     handle to z3 (see GCBO)
% eventdata   reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%     See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function z4_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject    handle to z4 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of z4 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of z4 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function z4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to z4 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function z5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to z5 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of z5 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of z5 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function z5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to z5 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function z6_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to z6 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of z6 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of z6 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function z6_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject    handle to z6 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     empty - handles not created until after all CreateFcns called

```

```

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.

```

```

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function z7_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject    handle to z7 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of z7 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of z7 as a double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

```

```

function z7_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject    handle to z7 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     empty - handles not created until after all CreateFcns called

```

```

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.

```

```

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit13_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject    handle to edit13 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit13 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit13 as a
double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

```

```

function edit13_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject    handle to edit13 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     empty - handles not created until after all CreateFcns called

```

```

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.

```

```

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit14_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit14 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit14 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit14 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit14_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit14 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit15_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit15 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit15 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit15 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit15_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit15 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function z2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to z2 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of z2 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of z2 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function z2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to z2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function y1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to y1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of y1 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of y1 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function y1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to y1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function y3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to y3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of y3 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of y3 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function y3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to y3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

```

```

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%     See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function y4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject     handle to y4 (see GCBO)
% eventdata   reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of y4 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of y4 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function y4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject     handle to y4 (see GCBO)
% eventdata   reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%     See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function y5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject     handle to y5 (see GCBO)
% eventdata   reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of y5 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of y5 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function y5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject     handle to y5 (see GCBO)
% eventdata   reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%     See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function y6_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject    handle to y6 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of y6 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of y6 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function y6_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to y6 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function y7_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to y7 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of y7 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of y7 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function y7_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to y7 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function y2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to y2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of y2 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of y2 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function y2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

```



```

% hObject    handle to y2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

```

```

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.

```

```

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function y8_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject    handle to y8 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of y8 as text
%       str2double(get(hObject,'String')) returns contents of y8 as a double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

```

```

function y8_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject    handle to y8 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

```

```

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.

```

```

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function y9_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject    handle to y9 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of y9 as text
%       str2double(get(hObject,'String')) returns contents of y9 as a double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

```

```

function y9_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject    handle to y9 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

```

```

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.

```

```

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function b1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to b1 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of b1 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of b1 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function b1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to b1 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function b3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to b3 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of b3 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of b3 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function b3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to b3 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function b4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to b4 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of b4 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of b4 as a double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function b4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to b4 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

```

```

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function b5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to b5 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of b5 as text
%       str2double(get(hObject,'String')) returns contents of b5 as a double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function b5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to b5 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

```

```

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function b6_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to b6 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of b6 as text
%       str2double(get(hObject,'String')) returns contents of b6 as a double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function b6_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to b6 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

```

```

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.

```

```

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function b2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject     handle to b2 (see GCBO)
% eventdata   reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of b2 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of b2 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function b2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject     handle to b2 (see GCBO)
% eventdata   reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in estimate.
function estimate_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject     handle to estimate (see GCBO)
% eventdata   reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)
A=readfis('A.fis');
X=readfis('X.fis');
Y=readfis('Y.fis');
Z=readfis('Z.fis');
x1=readfis('x1.fis');
x2=readfis('x2.fis');

s1 = str2num(get(handles.s1,'String')); tt(1) = isempty(s1);
s2 = str2num(get(handles.s2,'String')); tt(2) = isempty(s2);
s3 = str2num(get(handles.s3,'String')); tt(3) = isempty(s3);
s4 = str2num(get(handles.s4,'String')); tt(4) = isempty(s4);
s5 = str2num(get(handles.s5,'String')); tt(5) = isempty(s5);

b1 = str2num(get(handles.b1,'String')); tt(6) = isempty(b1);
b2 = str2num(get(handles.b2,'String')); tt(7) = isempty(b2);
b3 = str2num(get(handles.b3,'String')); tt(8) = isempty(b3);
b4 = str2num(get(handles.b4,'String')); tt(9) = isempty(b4);
b5 = str2num(get(handles.b5,'String')); tt(10) = isempty(b5);
b6 = str2num(get(handles.b6,'String')); tt(11) = isempty(b6);

y1 = str2num(get(handles.y1,'String')); tt(12) = isempty(y1);
y2 = str2num(get(handles.y2,'String')); tt(13) = isempty(y2);
y3 = str2num(get(handles.y3,'String')); tt(14) = isempty(y3);
y4 = str2num(get(handles.y4,'String')); tt(15) = isempty(y4);

```

```

y5 = str2num(get(handles.y5, 'String')); tt(16) = isempty(y5);
y6 = str2num(get(handles.y6, 'String')); tt(17) = isempty(y6);
y7 = str2num(get(handles.y7, 'String')); tt(18) = isempty(y7);
y8 = str2num(get(handles.y8, 'String')); tt(19) = isempty(y8);
y9 = str2num(get(handles.y9, 'String')); tt(20) = isempty(y9);

z1 = str2num(get(handles.z1, 'String')); tt(21) = isempty(z1);
z2 = str2num(get(handles.z2, 'String')); tt(22) = isempty(z2);
z3 = str2num(get(handles.z3, 'String')); tt(23) = isempty(z3);
z4 = str2num(get(handles.z4, 'String')); tt(24) = isempty(z4);
z5 = str2num(get(handles.z5, 'String')); tt(25) = isempty(z5);
z6 = str2num(get(handles.z6, 'String')); tt(26) = isempty(z6);
z7 = str2num(get(handles.z7, 'String')); tt(2) = isempty(z7);

if length(find(tt==1))>0
    msgbox('Ви не ввели значення деяких факторів', 'Увага!!!')
else
    xx1=evalfis([s1 s2 s3 s4 s5], x1);
    xx2=evalfis([b1 b2 b3 b4 b5 b6], x2);
    XX=evalfis([xx1, xx2], X);
    YY=evalfis([y1 y2 y3 y4 y5 y6 y7 y8 y9], Y);
    ZZ=evalfis([z1 z2 z3 z4 z5 z6 z7], Z);
    AA=evalfis([XX YY ZZ], A);
    set(handles.result, 'String', num2str(AA))
end

function result_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to result (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject, 'String') returns contents of result as text
%        str2double(get(hObject, 'String')) returns contents of result as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function result_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to result (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

% --- Executes on button press in close.
function close_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to close (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
close;

% --- Executes on selection change in menu.

```

```

function menu_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to menu (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns menu contents as cell
array
%           contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from menu

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function menu_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to menu (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
%           See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in build.
function build_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to build (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
A=readfis('A.fis');
X=readfis('X.fis');
Y=readfis('Y.fis');
Z=readfis('Z.fis');
x1=readfis('x1.fis');
x2=readfis('x2.fis');

s1=str2num(get(handles.s1,'String')); tt(1)=isempty(s1);

s2=str2num(get(handles.s2,'String'));tt(2)=isempty(s2);
s3=str2num(get(handles.s3,'String'));tt(3)=isempty(s3);
s4=str2num(get(handles.s4,'String'));tt(4)=isempty(s4);
s5=str2num(get(handles.s5,'String'));tt(5)=isempty(s5);

b1=str2num(get(handles.b1,'String'));tt(6)=isempty(b1);
b2=str2num(get(handles.b2,'String'));tt(7)=isempty(b2);
b3=str2num(get(handles.b3,'String'));tt(8)=isempty(b3);
b4=str2num(get(handles.b4,'String'));tt(9)=isempty(b4);
b5=str2num(get(handles.b5,'String'));tt(10)=isempty(b5);
b6=str2num(get(handles.b6,'String'));tt(11)=isempty(b6);

y1=str2num(get(handles.y1,'String'));tt(12)=isempty(y1);
y2=str2num(get(handles.y2,'String'));tt(13)=isempty(y2);
y3=str2num(get(handles.y3,'String'));tt(14)=isempty(y3);
y4=str2num(get(handles.y4,'String'));tt(15)=isempty(y4);
y5=str2num(get(handles.y5,'String'));tt(16)=isempty(y5);
y6=str2num(get(handles.y6,'String'));tt(17)=isempty(y6);
y7=str2num(get(handles.y7,'String'));tt(18)=isempty(y7);
y8=str2num(get(handles.y8,'String'));tt(19)=isempty(y8);
y9=str2num(get(handles.y9,'String'));tt(20)=isempty(y9);

```

```

z1=str2num(get(handles.z1,'String'));tt(21)=isempty(z1);
z2=str2num(get(handles.z2,'String'));tt(22)=isempty(z2);
z3=str2num(get(handles.z3,'String'));tt(23)=isempty(z3);
z4=str2num(get(handles.z4,'String'));tt(24)=isempty(z4);
z5=str2num(get(handles.z5,'String'));tt(25)=isempty(z5);
z6=str2num(get(handles.z6,'String'));tt(26)=isempty(z6);
z7=str2num(get(handles.z7,'String'));tt(27)=isempty(z4);

uu=[];
AAA=[];
if length(find(tt==1))>0
    msgbox('Ви не ввели значення деяких факторів', 'Увага!!!')
else
    Range(1,:)=x1.input(1).range; XXX(1)=s1;
    Range(2,:)=x1.input(2).range; XXX(2)=s2;
    Range(3,:)=x1.input(3).range; XXX(3)=s3;
    Range(4,:)=x1.input(4).range; XXX(4)=s4;
    Range(5,:)=x1.input(5).range; XXX(5)=s5;

    Range(6,:)=x2.input(1).range; XXX(6)=b1;
    Range(7,:)=x2.input(2).range; XXX(7)=b2;
    Range(8,:)=x2.input(3).range; XXX(8)=b3;
    Range(9,:)=x2.input(4).range; XXX(9)=b4;
    Range(10,:)=x2.input(5).range; XXX(10)=b5;
    Range(11,:)=x2.input(6).range; XXX(11)=b6;

    Range(12,:)=Y.input(1).range; XXX(12)=y1;
    Range(13,:)=Y.input(2).range; XXX(13)=y2;
    Range(14,:)=Y.input(3).range; XXX(14)=y3;
    Range(15,:)=Y.input(4).range; XXX(15)=y4;
    Range(16,:)=Y.input(5).range; XXX(16)=y5;
    Range(17,:)=Y.input(6).range; XXX(17)=y6;
    Range(18,:)=Y.input(7).range; XXX(18)=y7;
    Range(19,:)=Y.input(8).range; XXX(19)=y8;
    Range(20,:)=Y.input(9).range; XXX(20)=y9;

    Range(21,:)=Z.input(1).range; XXX(21)=z1;
    Range(22,:)=Z.input(2).range; XXX(22)=z2;
    Range(23,:)=Z.input(3).range; XXX(23)=z3;
    Range(24,:)=Z.input(4).range; XXX(24)=z4;
    Range(25,:)=Z.input(5).range; XXX(25)=z5;
    Range(26,:)=Z.input(6).range; XXX(26)=z6;
    Range(27,:)=Z.input(7).range; XXX(27)=z7;

    t=get(handles.menu,'Value');
    h=(Range(t,2)-Range(t,1))/100;
    uu=Range(t,1):h:Range(t,2);

for i = 1:length(uu)
    XXX(t)=uu(i);

    xx1=evalfis(XXX(1:5), x1);
    xx2=evalfis(XXX(6:11), x2);
    XXXX=evalfis([xx1, xx2], X);
    YY=evalfis(XXX(12:20), Y);
    ZZ=evalfis(XXX(21:27), Z);
    AA=evalfis([XXXX YY ZZ], A);

    AAA(i)=AA;

```

```
end
% [uu;AAA]
plot(handles.axes1,uu,AAA,'r.-')
end
```