

УДК 533.1:620.93:658.56

Модель багатофакторної оцінки якості природного газу

К.М.Предун¹, Ю.Й.Франчук², О.І.Ободянська³

¹к.т.н., професор. Київський національний університет будівництва і архітектури. м. Київ, Україна. 31172@ukr.net
ORCID: 0000-0002-2634-9310

²асистент. Київський національний університет будівництва і архітектури. м. Київ, Україна. franchuk196405@gmail.com
ORCID: 0000-0002-7910-8705.

³к.т.н., ст. викладач. Вінницький національний технічний університет. м. Вінниця, Україна. olha.obodyanska@i.ua
ORCID: 0000-0003-4464-3537

Анотація. Природний газ відповідно до положень Енергетичної стратегії України на період до 2035 р. попри суттєвий розвиток «зеленої» енергетики залишається основним енергоносієм у державі. У зв'язку з долученням до єдиного Європейського простору регулювання торгівлі природним газом в країні всі розрахунки за спожите паливо слід виконувати в одиницях енергії. Таким чином, визначальними постають питання щодо якості природного газу. Однією з особливостей системи газопостачання є значний ступінь невизначеності зміни великої кількості збурювальних факторів впливу і постійно мінливих параметрів її функціонування. Для оцінки якості газу доцільною є математична модель, яка базується на теорії нечіткої логіки. За результатами розгляду факторів, що характеризують фізико-хімічні властивості видобутого з родовища природного газу, якості його підготовки до транспортування та технічні умови експлуатації газорозподільної системи населеного пункту, отримано нечітку множину для визначення якості палива. Відповідно до етапу дефазифікації за методом «центр ваги» нечіткій множині відповідає кількісна оцінка, що знаходиться в запропонованому діапазоні від одного до п'яти балів. Як приклад, для природного газу з граничними значеннями параметрів згідно з Кодексом газотранспортної системи якість оцінена в 3,1 бали. Модель нечіткого логічного висновку разом з процедурою дефазифікації забезпечує можливість спостереження за змінами вихідного показника – якості природного газу – залежно від зміни кількісних та якісних факторів на шляху від родовища газу до споживача. Пропонована математична модель у комплексі для всіх рівнів та підрівнів дозволяє отримати прогнозовану оцінку впливу наведенних факторів на якість палива. При цьому отримане значення приймається за результатами віртуального експерименту, який ґрунтується на експертній базі знань.

Ключові слова: природний газ, фізико-хімічні властивості, якість газу, математична модель, матриця знань, лінгвістична змінна, нечітка логіка, функція належності

Вступ. Природний газ в Україні є основним органічним паливом. Його частка в загальному первинному постачанні енергії становить майже 30 %. Відповідно до положень Енергетичної стратегії України на період до 2035 р [1] домінуюча роль природного газу залишиться і надалі. В умовах високих цін блакитного палива постають питання щодо якості природного газу та його обліку споживачами, а, відповідно, і розрахунків за спожиту енергію.

Актуальність дослідження. Незважаючи на високу цінність природного газу для потреб економіки держави в Україні практично відсутній системний підхід до оцінювання його якості. Якість газу – це ступінь відповідності показників природного газу встановленим вимогам, яка визначається його складом і фізичними властивостями. Вимоги щодо фізико-хімічних властивостей природного газу встановлені низкою нормативно-технічних документів [2].

Критерієм оцінки якості газу виступає теплота згоряння, визначена при стандартних умовах (температурі згоряння 25 °С, вимірюва-

ння – 20 °С і тиску 101,325 кПа). Зазвичай, в Україні [3] вона перевищує мінімальне значення 32,66 МДж/м³ [2]. Лише на підставі цього робиться висновок про відповідність фізико-хімічних властивостей природного газу вимогам нормативних документів. Однак перелік різноманітних характеристик газу (вміст інгредієнтів, точка роси тощо) з граничними значеннями, які наведені, наприклад, в Кодексі газотранспортної системи [2], порівняно з аналогічними показниками газу, що використовується, не дають кінцевому споживачеві повної інформації про його якість, зокрема, про енергетичну цінність.

Останні дослідження та публікації. Відповідно до Закону України «Про ратифікацію Протоколу про приєднання України до договору про заснування Енергетичного Співтовариства» [4] наша держава долучилася до єдиного простору регулювання торгівлі газом та взяла на себе зобов'язання виконувати всі рішення та процедурні акти, прийняті під час застосування Договору. Тобто, кількість спожитого природного газу повинна виражатися в одиницях енергії.

Варто зазначити, що інформація щодо фізико-хімічних властивостей газу, зокрема, теплоти згоряння, в Україні вже доводиться до кінцевого споживача в тій чи іншій формі – як до власника вузла комерційного обліку, так і до абонента житлового будинку. Наприклад, щомісяця по регіонах України публікується карта [3] із середньозваженими значеннями теплоти згоряння, що має різні значення залежно від магістрального газопроводу, родовища газу, технологічного режиму його підготовки до транспортування або конкретної країни-експортера газу.

Із виконаного аналізу наукових досліджень [5...8] і вимог чинних нормативно-технічних документів [2, 9] випливає, що визначенню якості природного газу приділяється значна увага. Однак, здебільшого йдеться про вдосконалення вимірювання окремих його параметрів без комплексного аналізу функціональних або кореляційних зв'язків між ними. У той же час, фізико-хімічні властивості газу, визначені у точках прийому-передачі, наприклад, на газорозподільних станціях (ГРС), можуть зазнавати змін при його транспортуванні газорозподільними мережами населеного пункту.

У роботі [10] розглянуто ієрархічну класифікацію факторів, які впливають на якість природного газу, та наведено лінгвістичні змінні, що описують якість природного газу на системному рівні. Представлено оцінкові терми відповідно до експертної оцінки для кожної з лінгвістичних змінних і виконано фазифікацію нечітких оцінок факторів впливу. Якість природного газу знаходиться під впливом ряду збурювальних кількісних та якісних чинників зовнішнього і внутрішнього характеру. Теорія нечітких множин і оснований на ній логіка дозволяють описувати неточні категорії, уявлення і знання, оперувати ними і робити відповідні висновки. Наявність таких можливостей для формування моделей різноманітних об'єктів, процесів і явищ на якісному рівні визначає інтерес до організації інтелектуального управління на основі використання методів нечіткої логіки [11...13]. Однією із особливостей якості природного газу є великий ступінь невизначеності зміни великої кількості збурювальних факторів впливу і постійно мінливими параметрами функціонування системи газопостачання.

Формулювання цілей статті. Розробка моделі інтегрованої оцінки якості природного газу з урахуванням невизначеностей для підви-

щення енергоефективності газозабезпечення споживачів і є метою даної роботи.

Основна частина. Нечіткі системи керування ефективно використовуються там, де об'єкт керування достатньо складний для його точного опису та існує дефіцит апріорної інформації про поведінку системи. Даним об'єктом керування є якість природного газу.

Нечіткі системи керування мають базу знань і елементи штучного інтелекту та можуть бути реалізовані спеціальними нечіткими контролерами, у яких нечіткі висновки виконуються шляхом обчислення характеристичних значень вихідної лінгвістичної змінної через характеристичні значення вхідних лінгвістичних змінних за логічними формулами, що використовують логічні операції „І” та „АБО” [14, 15].

Оцінка рівнів лінгвістичних змінних, що встановлює зв'язок між факторами, які 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:

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

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

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

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

Лінгвістичну змінну $A_{япг}$, що характеризує якість природного газу на системному рівні, можна подати співвідношенням

$$A_{япг} = f(X; Y; Z), \quad (1)$$

де X – лінгвістична змінна (ЛЗ), що описує фізико-хімічні властивості видобутого 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.

Нечітку матрицю знань з урахуванням уведених якісних термів для моделювання залежності (1) наведено в табл. 1.

Лінгвістичним висловлюванням, які наведені в табл. 1, відповідає система нечітких логічних рівнянь, які характеризують поверхню належності змінних за відповідним термом:

Матриця знань для залежності (1)

| ЯКЦО | | | 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) | |
| 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) | |

$$\begin{aligned} \mu_H(A_{ЯПГ}) &= \mu_H(X) \wedge \mu_H(Y) \wedge \mu_H(Z) \vee \\ &\vee \mu_H(X) \wedge \mu_{нС}(Y) \wedge \mu_H(Z) \vee \\ &\vee \mu_H(X) \wedge \mu_H(Y) \wedge \mu_{нС}(Z); \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \mu_{нС}(A_{ЯПГ}) &= \mu_H(X) \wedge \mu_C(Y) \wedge \mu_C(Z) \vee \\ &\vee \mu_{нС}(X) \wedge \mu_{нС}(Y) \wedge \mu_{нС}(Z) \vee \\ &\vee C(X) \wedge \mu_H(Y) \wedge \mu_{нС}(Z); \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \mu_C(A_{ЯПГ}) &= \mu_{нС}(X) \wedge \mu_C(Y) \wedge \mu_C(Z) \vee \\ &\vee \mu_C(X) \wedge \mu_C(Y) \wedge \mu_C(Z) \wedge \\ &\vee \mu_C(X) \wedge \mu_{нС}(Y) \wedge \mu_{вС}(Z); \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \mu_{вС}(A_{ЯПГ}) &= \mu_{вС}(X) \wedge \mu_{вС}(Y) \wedge \mu_{вС}(Z) \vee \\ &\vee \mu_C(X) \wedge \mu_{вС}(Y) \wedge \mu_B(Z) \vee \\ &\vee \mu_B(X) \wedge \mu_B(Y) \wedge \mu_C(Z); \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \mu_B(A_{ЯПГ}) &= \mu_B(X) \wedge \mu_B(Y) \wedge \mu_{вС}(Z) \vee \\ &\vee \mu_B(X) \wedge \mu_{вС}(Y) \wedge \mu_B(Z) \vee \\ &\vee \mu_B(X) \wedge \mu_B(Y) \wedge \mu_B(Z); \end{aligned} \quad (6)$$

Таким чином розробляються лінгвістичні висловлювання та відповідні системи нечітких логічних рівнянь для кожної змінної на всіх рівнях. Нечіткі логічні рівняння передбачають визначення значень функції належності $\mu_T(u)$ всіх нечітких термів. Якщо вхідна змінна змінюється безперервно, то функції належності

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 $\mu_T(u) = \mu_i$ та $\mu_T(u_{i+1}) = \mu_{i+1}$, то значення $\mu_T(u^*)$, де $u^* \in (U_i, U_{i+1})$, знаходиться зі співвідношення [15]:

$$\begin{aligned} \mu_T(u^*) &= [u^*(\mu_{i+1} - \mu_i) + \mu_i(u_{i+1} - u_i) - \\ &- u_i(\mu_{i+1} - \mu_i)] / (u_{i+1} - u_i). \end{aligned} \quad (7)$$

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 область визначення змінної як умовний інтервал, на якому для кожного елемента множини передбачені відповідні значення.

Функції належності та формула (7) дозволяють знайти аналітичні моделі функції належності оцінок вхідних змінних для всіх термів, які описуються системою рівнянь виду

$$\mu_T(u) = \frac{au^* + b}{c}, \quad (8)$$

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

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 маси» 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 (якості 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 маси» [13...15]:

$$C_R^* = (X^*, Y^*, Z^*, W^*, P^*, S^*) = \frac{\sum_{i=1}^{\ell} A_{япг}^{d_i} \cdot \mu_{d_i}(A_{япг})}{\sum_{i=1}^{\ell} \mu_{d_i}(A_{япг})}, \quad (9)$$

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

Аналітичні формули (2-6) та значення функцій належності змінних X, Y, Z (табл. 2) дають значення функцій належності терм-оцінок змінної $A_{япг}$

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

$$\begin{aligned} \mu_{сC}(A_{япг}) &= 0,723 \cdot 0,857 \cdot 0,807 \vee \\ & \vee 1 \cdot 0,855 \cdot 0,75 \vee 1 \cdot 0,855 \cdot 0,75 = \\ & = 0,857 \cdot 1 \cdot 1 = 0,857; \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} \mu_{сC}(A_{япг}) &= 1 \cdot 1 \cdot 0,807 \vee \\ & \vee 1 \cdot 1 \cdot 0,813 \vee 1 \cdot 0,355 \cdot 0,807 = \\ & = 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1; \end{aligned}$$

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

Якісна оцінка якості природного газу представлена у вигляді нечіткої множини

$$A_{япг} = \left\{ \frac{\mu_{q_1}(A_{япг})}{d_1}, \frac{\mu_{q_2}(A_{япг})}{d_2}, \dots, \frac{\mu_{q_m}(A_{япг})}{d_m} \right\}, \quad (10)$$

де m – кількість 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 маси» нечіткій множині відповідає кількісна оцінка:

$$A_{япг} = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_{q_i}(A_{япг}) \cdot d_i}{\sum_{i=1}^m \mu_{q_i}(A_{япг})}. \quad (11)$$

Підставляємо у вираз (11) d_i для i -го терму q_i :

$$d_i = \left[\frac{A_{япг}}{A_{япг}} + \frac{\overline{A_{япг}} - A_{япг}}{m-1} \cdot (i-1) \right], \quad (12)$$

де $\frac{A_{япг}}{A_{япг}}(\overline{A_{япг}})$ – найменше (найбільше) значення змінної $A_{япг}$. Рівняння (11) з урахуванням (12) набуває вигляду:

$$\begin{aligned} A_{япг}^* &= \sum_{i=1}^m \mu_{q_i}(A_{япг}) \times \\ & \times \left[\frac{A_{япг}}{A_{япг}} + \frac{\overline{A_{япг}} - A_{япг}}{m-1} (i-1) \right] \frac{1}{\sum_{i=1}^m \mu_{q_i}(A_{япг})}. \quad (13) \end{aligned}$$

Для характеристики природного газу, вказаної у табл. 2, за умови що $A_{япг} = 1$ бал, $\overline{A_{япг}} = 5$ балів, дефазифікація за формулою (13) дає такий прогноз якості природного газу:

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

Якість природного газу з параметрами, вибраними для прикладу, становить 3,092 балів.

Значення функції належності факторів, що впливають на якість природного газу

| Фактор (U^*) | | Значення | Значення функції належності термів для оцінки фактора U^* | | Значення функції належності змінної (X, Y, Z) |
|--|----------------------------------|----------------------|---|---|--|
| x_1 – вміст вуглеводнів у складі природного газу | s_1 – вміст метану | 90 % | $\mu_H(s_1) = 0,445$ | $\mu_H(x_1) = 0,56$ $\mu_{nC}(x_1) = 0,723$ $\mu_C(x_1) = 1$ $\mu_{eC}(x_1) = 1$ $\mu_B(x_1) = 1$ | $\mu_H(x_2) = 0,723$ $\mu_{nC}(x_2) = 1$ $\mu_C(x_2) = 1$ $\mu_{eC}(x_2) = 1$ $\mu_B(x_2) = 1$ |
| | | | $\mu_{nC}(s_1) = 0,63$ | | |
| | | | $\mu_C(s_1) = 0,938$ | | |
| | | | $\mu_{eC}(s_1) = 0,83$ | | |
| | | | $\mu_B(s_1) = 0,556$ | | |
| | s_2 – вміст етану | 3 % | $\mu_H(s_2) = 0,56$ | | |
| | | | $\mu_{nC}(s_2) = 0,63$ | | |
| | | | $\mu_C(s_2) = 1$ | | |
| | | | $\mu_{eC}(s_2) = 0,78$ | | |
| | s_3 – вміст пропану | 2,00% | $\mu_B(s_2) = 0,56$ | | |
| | | | $\mu_H(s_3) = 0,47$ | | |
| | | | $\mu_C(s_3) = 0,723$ | | |
| | s_4 – вміст бутану | 1 % | $\mu_B(s_3) = 0,833$ | | |
| | | | $\mu_H(s_4) = 0,5$ | | |
| | | | $\mu_C(s_4) = 1$ | | |
| s_5 – вміст пентану | 1 % | $\mu_B(s_4) = 0,57$ | | | |
| | | $\mu_H(s_5) = 0,125$ | | | |
| | | $\mu_C(s_5) = 0,167$ | | | |
| x_2 – вміст шкідливих компонентів у складі газу | b_1 – вміст сірководню | 10 мг/м ³ | $\mu_B(s_5) = 1$ | | |
| | | | $\mu_H(b_1) = 0,67$ | | |
| | | | $\mu_{nC}(b_1) = 0,45$ | | |
| | | | $\mu_C(b_1) = 1$ | | |
| | | | $\mu_{eC}(b_1) = 0,78$ | | |
| | b_2 – вміст азоту | 2,00% | $\mu_B(b_1) = 0,56$ | | |
| | | | $\mu_H(b_2) = 0,72$ | | |
| | | | $\mu_{nC}(b_2) = 1$ | | |
| | | | $\mu_C(b_2) = 0,78$ | | |
| | | | $\mu_{eC}(b_2) = 0,51$ | | |
| | b_3 – вміст вуглекисло-го газу | 3 % | $\mu_B(b_2) = 0,33$ | | |
| | | | $\mu_H(b_3) = 0,625$ | | |
| | | | $\mu_C(b_3) = 1$ | | |
| | | | $\mu_B(b_3) = 0,5$ | | |
| | b_4 – вміст кисню | 0,5 % | $\mu_{eC}(b_2) = 0,51$ | | |
| | | | $\mu_H(b_4) = 0,57$ | | |
| | | | $\mu_C(b_4) = 1$ | | |
| | b_5 – вміст механічних домішок | 5 г/м ³ | $\mu_B(b_4) = 0,67$ | | |
| | | | $\mu_H(b_5) = 0,56$ | | |
| | | | $\mu_{nC}(b_5) = 0,5$ | | |
| | | | $\mu_C(b_5) = 1$ | | |
| | | | $\mu_{eC}(b_5) = 0,67$ | | |
| | b_6 – вміст вологи | -4 °C | $\mu_B(b_5) = 0,5$ | | |
| | | | $\mu_H(b_6) = 0,5$ | | |
| $\mu_{nC}(b_6) = 0,56$ | | | | | |
| $\mu_C(b_6) = 1$ | | | | | |
| $\mu_{eC}(b_6) = 0,75$ | | | | | |
| | | | $\mu_B(b_6) = 0,56$ | | |

| Фактор (U^*) | Значення | Значення функції належності термів для оцінки фактора U^* | Значення функції належності змінної (X, Y, Z) |
|--|-------------------------|---|--|
| y_1 – очистка від сірководню | 8 мг/м ³ | $\mu_{Bo}(y_1) = 0,824$ | $\mu_H(Y) = 0,855$ $\mu_{nC}(Y) = 0,855$ $\mu_C(Y) = 0,857$ $\mu_{eC}(Y) = 1$ $\mu_B(Y) = 0,835$ |
| | | $\mu_C(y_1) = 0,925$ | |
| | | $\mu_{II}(y_1) = 0,286$ | |
| y_2 – очистка від азоту | 1 % | $\mu_{Bo}(y_2) = 0,855$ | |
| | | $\mu_C(y_2) = 0,78$ | |
| | | $\mu_{II}(y_2) = 0,235$ | |
| y_3 – очистка від вуглекислого газу | 2 % | $\mu_{Bo}(y_3) = 0,6$ | |
| | | $\mu_C(y_3) = 0,857$ | |
| | | $\mu_{II}(y_3) = 0,292$ | |
| y_4 – очистка від кисню | 0,02 % | $\mu_{Bo}(y_4) = 0,167$ | |
| | | $\mu_C(y_4) = 0,11$ | |
| | | $\mu_{II}(y_4) = 1$ | |
| y_5 – очистка від механічних домішок | 1 мг/м ³ | $\mu_{Bo}(y_5) = 0,167$ | |
| | | $\mu_C(y_5) = 0,25$ | |
| | | $\mu_{II}(y_5) = 1$ | |
| y_6 – очистка від вологи | -2 °C | $\mu_{Bo}(y_6) = 0,335$ | |
| | | $\mu_C(y_6) = 0,563$ | |
| | | $\mu_{II}(y_6) = 0,665$ | |
| y_7 – число Воббе (вище) | 51,5 МДж/м ³ | $\mu_H(y_7) = 0,33$ | |
| | | $\mu_{nC}(y_7) = 0,25$ | |
| | | $\mu_C(y_7) = 0,72$ | |
| | | $\mu_{eC}(y_7) = 1$ | |
| | | $\mu_B(y_7) = 0,78$ | |
| y_8 – теплота згоряння (вища) | 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 – відносна густина природного газу | 0,7 | $\mu_H(y_9) = 0,335$ | |
| | | $\mu_C(y_9) = 0,6$ | |
| | | $\mu_B(y_9) = 0,79$ | |
| z_1 – вміст сірководню | 2 мг/м ³ | $\mu_H(z_1) = 0,667$ | $\mu_H(Z) = 1$ $\mu_{nC}(Z) = 0,75$ $\mu_C(Z) = 0,807$ $\mu_{eC}(Z) = 0,807$ $\mu_B(Z) = 0,813$ |
| | | $\mu_{nC}(z_1) = 0,875$ | |
| | | $\mu_C(z_1) = 0,807$ | |
| | | $\mu_{eC}(z_1) = 0,634$ | |
| | | $\mu_B(z_1) = 0,41$ | |
| z_2 – вміст азоту | 1 % | $\mu_H(z_2) = 0,72$ | |
| | | $\mu_{nC}(z_2) = 1$ | |
| | | $\mu_C(z_2) = 0,78$ | |
| | | $\mu_{eC}(z_2) = 0,51$ | |
| | | $\mu_B(z_2) = 0,25$ | |
| z_3 – вміст вуглекислого газу | 1 % | $\mu_H(z_3) = 0,813$ | |
| | | $\mu_C(z_3) = 0,553$ | |
| | | $\mu_B(z_3) = 0,286$ | |

| Фактор (U^*) | Значення | Значення функції належності термів для оцінки фактора U^* | Значення функції належності змінної (X, Y, Z) |
|-----------------------------------|----------------------|---|---|
| z_4 – вміст кисню | 0,75 % | $\mu_H(z_4) = 0,275$ | $\mu_H(Z) = 1$ $\mu_{HC}(Z) = 0,75$ $\mu_C(Z) = 0,807$ $\mu_{6C}(Z) = 0,807$ $\mu_B(Z) = 0,813$ |
| | | $\mu_C(z_4) = 0,57$ | |
| | | $\mu_B(z_4) = 0,7$ | |
| z_5 – вміст механічних домішок | 1 мг/м ³ | $\mu_H(z_5) = 0,14$ | |
| | | $\mu_C(z_5) = 0,11$ | |
| | | $\mu_B(z_5) = 1$ | |
| z_6 – вміст вологи | -2 °C | $\mu_H(z_6) = 0,33$ | |
| | | $\mu_{HC}(z_6) = 0,25$ | |
| | | $\mu_C(z_6) = 0,78$ | |
| | | $\mu_{6C}(z_6) = 1$ | |
| | | $\mu_B(z_6) = 0,75$ | |
| z_7 – вміст меркаптанової сірки | 15 мг/м ³ | $\mu_H(z_7) = 0,334$ | |
| | | $\mu_C(z_7) = 0,563$ | |
| | | $\mu_B(z_7) = 0,715$ | |

Модель нечіткого логічного висновку разом з процедурою дефазифікації забезпечує можливість спостереження за змінами вихідного показника – якості природного газу – залежно від кількісних та якісних факторів (табл. 1). Математична модель у комплексі для всіх підрівнів та рівнів дозволяє 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.

Висновки. Моделювання оцінювання якості природного газу успішно виконується з

використанням доступної експертно-лінгвістичної інформації у вигляді правил “ЯКЦО – ТО”, які пов’язують логічні терми вхідних і вихідних змінних. У результаті отримано аналітичні моделі функцій належності експертних нечітких баз знань, які впливають на оцінювання і прогнозування якості природного газу. Запропонована методика служить комплексним інструментом для експерта проекту щодо оцінювання та прогнозування якості природного газу та дає змогу отримати незалежні управлінські рішення з урахуванням кількісних та якісних збурювальних факторів, що впливають на якість природного газу.

Література

1. Енергетична стратегія України на період до 2035 р. «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». – Схвал. розпорядженням КМУ від 18.08.2017 р. №605-р. [Електронний ресурс]. – URL: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/publish/article?art_id=245234085
2. Кодекс газотранспортної системи. – Затвердж. Постановою НКРЕКП №2493 від 30.09.2015. – [Електронний ресурс]. – URL: <http://zakon.rada.gov.ua/go/z1378-15>.
3. Якість газу. [Електронний ресурс]. – URL: http://utg.ua/utg/business_info/yakist-gazu.html
4. 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. – Київ: ВВР, 2011, №24, ст.170.
5. 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.
6. 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 та архітектури. – Харків, 2018. – 20 с.
7. 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.
8. 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.
9. ДСТУ ISO 15112:2009. Природний газ. Визначення енергії. – Держспоживстандарт України, 2010. – 29 с.

10. 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. – КНУБА, 2019. – Вип.38. – с.143-150.
11. Рагушняк Г. С. Управління змістом проєктів із забезпечення надійності зовнішніх газорозподільних мереж: монографія / Г. С. Рагушняк, О. І. Ободянська. – Вінниця, 2014. – 128 с.
12. Рагушняк Г. С. Модель багатофакторної оцінки технічного стану системи газопостачання / Г. С. Рагушняк, О. І. Ободянська // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2010. – № 1. – с. 125–131.
13. Митюшкин Ю. И. Soft Computing: идентификация закономерностей нечеткими базами знаний / Ю. И. Митюшкин, Б. И. Мокин, А. П. Ротштейн. – Винница : УНИВЕРСУМ–Винница, 2002. – 145 с.
14. Ротштейн А. Нечеткая надежность алгоритмических процессов / А. Ротштейн, С. Штовба. – Винница : Континент – ПРИМ, 1997. – 142 с.
15. 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.

References

1. Enerhetychna stratehiiia Ukrainy na period do 2035 r. «Bezpeka, enerhoefektyvnist, konkurentospromozhnist». Skhval. rozporiadzhenniam KМУ vid 18.08.2017 r. №605-r. URL: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/publish/article?art_id=245234085
2. Kodeks hazotransportnoi systemy. Zatverdzh. Postanovoiu NKREKP №2493 vid 30.09.2015. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/go/z1378-15>.
3. Yakist' hazu. URL: http://utg.ua/utg/business_info/yakist-gazu.html
4. Pro ratyfikatsiiu Protokolu pro pryednannia Ukrainy do dohovoru pro zasnuvannia Enerhetychnoho Spivtovarystva: zakon Ukrainy. № 2787-VI (2787-17) vid 15.12.2010. VVR, 2011, №24, st.170.
5. Hordiyenko A. I., Bohomolets I. H., Chub M. V. “Do pytannia perekhodu na oblik pryrodnoho hazu yak enerhonosiia.” *Naftova i hazova promyslovist*. 2001. №3. P. 42-43.
6. Kaptsova N. I. *Pidvyshchennia efektyvnosti ekspluatatsii ta remontu miskykh hazoprovodiv*. Diss. abstract. Kharkivskiy natsionalnyi universytet budivnytstva i arkhitektury, 2016.
7. Kozii V. M., Lurie A. I., Rubanova I. A. “Yakist hazu rodovyshch Ukrainy.” *Pytannia rozvytku hazovoi promyslovosti Ukrainy: Zbirn. nauk. Prats UkrNDIhaz*. Vyp. 28. 2000. P. 66-68.
8. Motalo A. V., Stadnyk B. I., Motalo V. P. “Analiz osnovnykh problem metodolohii otsiniuvannia yakosti vuhlevodnevykh haziv.” *Naukovyy visnyk NLTU Ukrayiny: Zbirn. nauk.-tekhn. prats. 2. Ekolohiia ta dovkillia*. 2015. Vyp.25.10 . P. 178-183.
9. *Pryrodnyi haz. Vyznachennia enerhii*. DSTU ISO 15112:2009. Derzhspozhyvstandart Ukrayiny, 2010.
10. Franchuk Yu.Y., Obodyanska O. I., Predun K. M. “Otsinka yakosti pryrodnoho hazu yak enerhonosiia na osnovi linhvistychnoi informatsii.” *Upravlinnia rozvytkom skladnykh system: Nauk.- tekhn. Zbirnyk*. 2019. Vyp.38. P.143-150.
11. Ratushnyak H. S., Obodyanska O. I. *Upravlinnia zmistom proektiv iz zabezpechennia nadiinosti zovnishnikh hazorozpodilnykh merezh*. Vinnytsya, 2014. 128 p.
12. Ratushnyak H. S., Obodyanska O. I. “Model bahatofaktornoї otsinky tekhnichnoho stanu systemy hazopostachannia.” *Suchasni tekhnolohii, materialy i konstruksii v budivnytstvi*. 2010. № 1. P. 125–131.
13. Mytiushkyn Yu. I., Mokyn, A. P. Rotshteyn A. P. *Soft Computing: identyfikatsiia zakonomernostei nechetkimi bazami znanii*. UNYVERSUM–Vynnytsya, 2002. 145 p.
14. Rotshteyn A., Shtovba S. *Nechetkaia nadezhnost algoritmicheskikh protsessov*. Kontynent-PRYM, 1997. 142 s.
15. Nikola K. Kasabov. *Foundations of neural networks, fuzzy systems, and knowledge engineering*. London, England, Cambridge, Massachusetts: A Bradford Book, The MIT Press, 1998. 538 p.

УДК 533.1:620.93:658.56

Модель многофакторной оценки качества природного газа

К. М. Предун¹, Ю. И. Франчук², О. И. Ободянская³

¹к.т.н., проф. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, 31172@ukr.net, ORCID: 0000-0002-2634-9310

²асистент. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, г. Киев, Украина, franchuk196405@gmail.com ORCID: 0000-0002-7910-8705

³к.т.н., старший преподаватель. Винницкий национальный технический университет, г. Винница Украина, olha.obodyanska@i.ua ORCID: 0000-0003-4464-3537

Аннотация. Природный газ в соответствии с положениями Энергетической стратегии Украины на период до 2035 года несмотря на существенное развитие «зелёной» энергетики остаётся основным энергоносителем в государстве. В связи с присоединением к единому Европейскому пространству регулирования торговли природным газом в стране все расчёты за потреблённое топливо следует выполнять в единицах энергии. Таким образом, определяющими становятся вопросы качества природного газа. Одной из особенностей системы газоснабжения является значительная степень неопределённости изменения большого количества возмущающих факторов влияния и постоянно меняющихся параметров её функционирования. Для оценки качества целесообразной является математическая модель, основанная на теории нечёткой логики. По результатам рассмотрения факторов, характеризующих физико-химические свойства добытого из месторождения природного газа, качество его подготовки к транспортировке и технические условия эксплуатации газораспределительной системы населённого пункта, получено нечёткое множество для определения качества топлива. На этапе дефазификации по методу «центра масс» нечёткому множеству соответствует количественная оценка, находящаяся в предложенном диапазоне от одного до пяти баллов. В качестве примера, для природного газа с предельными значениями параметров согласно Кодексу газотранспортной системы качество оценено в 3,1 балла. Модель нечёткого логического вывода вместе с процедурой дефазификации обеспечивает возможность наблюдения за изменениями исходного показателя – качества природного газа – в зависимости от изменения количественных и качественных факторов на пути от месторождения газа к потребителю. Используя предлагаемую математическую модель в комплексе для всех уровней и подуровней, можно получить прогнозируемую оценку влияния указанных факторов на качество топлива. При этом полученное значение принимается по результатам виртуального эксперимента, основанного на экспертной базе знаний.

Ключевые слова: природный газ, физико-химические свойства, качество газа, математическая модель, матрица знаний, лингвистическая переменная, нечёткая логика, функция принадлежности.

UDC 533.1:620.93:658.56

Model of Multifactorial Assessment of Natural Gas Quality

K. M. Predun¹, Y. Y. Franchuk², O. I. Obodianska³

¹Ph.D., Professor. Kyiv National University of Construction and Architecture. Kyiv, Ukraine. 31172@ukr.net
ORCID: 0000-0002-2634-9310

²Assistant. Kyiv National University of Construction and Architecture. Kyiv, Ukraine. franchuk196405@gmail.com
ORCID: 0000-0002-7910-8705

³Ph.D., Senior Lecturer. Vinnitsia National Technical University. Vinnitsia, Ukraine. olha.obodyanska@i.ua
ORCID: 0000-0003-4464-3537

Abstract. In accordance with the provisions of the Energy Strategy of Ukraine for the period until 2035, despite the significant development of green energy, natural gas remains the main energy source in the country. In connection with the accession to the common European space of regulation of natural gas trade in the country, all payments for fuel consumption should be made in units of energy. Thus, the main question is the quality of natural gas. One of the peculiarities of the gas supply system is the considerable degree of uncertainty in the change of a large number of disturbing factors and constantly changing parameters of its functioning. A mathematical model based on fuzzy logic theory is expedient for gas quality assessment. According to the results of consideration of the factors characterizing the physico-chemical properties of the natural gas extracted, the quality of its preparation for transportation and the technical operation conditions of the gas distribution system in a settlement, a fuzzy set was obtained to determine the quality of the fuel. According to the "center of mass" method for defuzzification, the fuzzy set corresponds to a fuzzy set that is in the range from one to five points. As an example, for natural gas with limit values in accordance with the Gas Transmission System Code, the quality is estimated at 3.1 points. The fuzzy inference model, together with the defasification procedure, provides the ability to observe changes in the baseline – the quality of natural gas – depending on changes in quantitative and qualitative factors on the path from the gas field to the consumer. Using the proposed mathematical model in a complex for all levels and sublevels, it is possible to obtain a predicted estimate of the impact of the above factors on fuel quality. In this case, the value obtained is taken from the results of a virtual experiment, which is based on an expert knowledge base.

Keywords: natural gas, physico-chemical properties, gas quality, mathematical model, knowledge matrix, linguistic variable, fuzzy logic, membership function

Надійшла до редакції / Received 03.09.2019