

## ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕЧОВИНИ

УДК 681.121:006.91

DOI: 10.31471/1993-9981-2021-2(47)-5-13

### АНАЛІТИКО-МЕТРОЛОГІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА СТИСЛИВОСТІ БІОГАЗУ ЗА НИЗЬКИХ РОБОЧИХ ТИСКІВ

*О.Є. Середюк<sup>1)</sup>, Н.М. Малісевич<sup>2)</sup>, Д.О. Середюк<sup>3)</sup>, В.В. Малісевич<sup>3)</sup>*

<sup>1)</sup> *Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, [mivt@nung.edu.ua](mailto:mivt@nung.edu.ua)*

<sup>2)</sup> *Відокремлений структурний підрозділ «Фаховий коледж електронних приладів Івано-  
Франківського національного технічного університету нафти і газу»,  
вул. Вовчинецька, 223, м. Івано-Франківськ, 76006, [nataliia.malisevych@kep.nung.edu.ua](mailto:nataliia.malisevych@kep.nung.edu.ua)*

<sup>3)</sup> *Державне підприємство «Івано-Франківський науково-виробничий центр  
стандартизації, метрології та сертифікації»,  
вул. Вовчинецька, 127, м. Івано-Франківськ, 76006,  
[sdo.if05@gmail.com](mailto:sdo.if05@gmail.com), [vitaliy\\_malisevych@ukr.net](mailto:vitaliy_malisevych@ukr.net)*

Розглянуто актуальність визначення коефіцієнта стисливості біогазу для умов його обліку. Викладений аналіз відомих українських та закордонних методик і нормативних документів при визначенні фізико-хімічних параметрів газових сумішей, в тому числі природного газу і біогазу. Показано відсутність чинних нормативних документів щодо визначення коефіцієнта стисливості біогазу, що необхідно для реалізації його правильного і точного обліку. Описано суть розробленого алгоритму для визначення коефіцієнта стисливості біогазу, який характеризується зменшенням вмістом метану і збільшенням вмістом двоокису вуглецю, азоту, кисню, а також наявністю водяної пари у складі біогазу. Розроблений практичний алгоритм визначення коефіцієнта стисливості біогазу, який передбачає використання порівняно простого алгоритму його розрахунку на базі об'ємного вмісту компонентів біогазу з врахуванням їх критичних параметрів і псевдоприведених значень тиску і температури для конкретних параметрів абсолютних значень тиску і температури біогазу. Алгоритм реалізований з врахуванням інформації, наведеної у спеціалізованих довідниках, зокрема графічних залежностей зміни коефіцієнта стисливості суміші газів від приведених значень їх температури і тиску. Здійснений приклад розрахунку коефіцієнта стисливості біогазу для умов задання його компонентного складу. Проведено моделювання зміни коефіцієнта стисливості біогазу від його відносної вологості, а також моделювання цього коефіцієнту від робочих тисків і температури біогазу і вмісту в ньому метану. Проведений метрологічний аналіз розробленої методики і алгоритму визначення коефіцієнта стисливості біогазу з урахуванням наявності в ньому вологі.

**Ключові слова:** біогаз, компонентний склад, вологість, абсолютний тиск, температура, псевдокритична температура, псевдокритичний тиск, фактор стисливості, коефіцієнт стисливості, комп'ютерне моделювання, об'єм газу, комерційний параметр біогазу.

Рассмотрена актуальность определения коэффициента сжимаемости биогаза для условий его учета. Изложен анализ известных украинских и зарубежных методик и нормативных документов при определении физико-химических параметров газовых смесей, в том числе природного газа и биогаза. Показано отсутствие действующих документов по определению коэффициента сжимаемости биогаза, что необходимо для реализации его правильного и точного учета. Изложена сущность разработанного алгоритма для определения коэффициента сжимаемости биогаза, характеризующегося уменьшенным содержанием метана и увеличенным содержанием двуокиси углерода, азота, кислорода, а также наличием водяного пара в составе биогаза. Разработан практический алгоритм определения коэффициента сжимаемости биогаза, предполагающий использование сравнительно простого алгоритма его расчета за данными объемного содержания компонентов биогаза с учетом их критических параметров и псевдоприведенных значений давления и температуры для

конкретных параметров абсолютных значений давления и температуры биогаза. Алгоритм реализован с учетом информации, приведенной в специализированных справочниках, в частности, графических зависимостей изменения коэффициента сжимаемости смеси газов от приведенных значений их температуры и давления. Осуществлен пример расчета коэффициента сжимаемости биогаза для условий заданного его компонентного состава. Проведено моделирование изменения коэффициента сжимаемости биогаза от его относительной влажности, а также моделирование этого коэффициента от рабочих давлений и температуры биогаза и содержания в нем метана. Проведен метрологический анализ разработанной методики и алгоритма определения коэффициента сжимаемости биогаза с учетом наличия в нем влаги.

**Ключевые слова:** биогаз, компонентный состав, влажность, абсолютное давление, температура, псевдокритическая температура, псевдокритическое давление, фактор сжимаемости, коэффициент сжимаемости, компьютерное моделирование, объем газа, коммерческий параметр биогаза.

The relevance of determining the compressibility coefficient of biogas for the conditions of its accounting is considered. The analysis of the known Ukrainian and foreign methods and normative documents at definition of physical and chemical parameters of gas mixes, including natural gas and biogas is stated. The absence of current regulations on determining the coefficient of compressibility of biogas, which is necessary for the implementation of its correct and accurate accounting. The essence of the developed algorithm for determining the compressibility coefficient of biogas, which is characterized by a reduced content of methane and increased content of carbon dioxide, nitrogen, oxygen, as well as the presence of water vapor in the biogas. A practical algorithm for determining the compressibility coefficient of biogas has been developed, which involves the use of a relatively simple algorithm for calculating it based on the volume content of biogas components taking into account their critical parameters and pseudo-pressure and temperature values for specific parameters of absolute biogas pressure and temperature. The algorithm is implemented taking into account the information given in specialized reference books, in particular graphical dependences of change of coefficient of compressibility of a mix of gases on the resulted values of their temperature and pressure. An example of calculating the coefficient of compressibility of biogas for the conditions of setting its component composition. Simulation of the change in the compressibility coefficient of biogas from its relative humidity, as well as modeling of this coefficient from the operating pressures and temperature of biogas and its methane content. The metrological analysis of the developed technique and algorithm of determination of coefficient of compressibility of biogas taking into account presence in it of moisture is carried out.

**Keywords:** biogas, component composition, humidity, absolute pressure, temperature, pseudocritical temperature, pseudocritical pressure, compressibility factor, compressibility coefficient, computer simulation, gas volume, commercial parameter of biogas.

**Вступ** На даний час значної актуальності набуває питання обліку біогазу і контролю його якісних показників як одного із альтернативних джерел енергоносіїв [1]. Це вимагає розроблення нових методологій для обчислення його фізичних параметрів, в тому числі коефіцієнта стисливості, що є необхідною умовою для розрахунку зведеного до стандартних умов об'єму сухої частини газу, який є комерційним параметром при оплаті. Особливість визначення коефіцієнта стисливості полягає також і в тому, що біогаз є вологим газом, відносна вологість якого може становити понад 50%.

Важливим також є питання визначення енергії біогазу, що в сучасних умовах також в повній мірі впливає на його вартість і повинен здійснюватися з врахуванням [2]. За участю авторів запропонований патентозахищений

новий спосіб експрес-визначення теплоти згорання природного газу [3], який в повній мірі стосується також контролю якості біогазу, і передбачає прецизійне вимірювання витрати досліджуваного газу під час його спалювання. Для реалізації цього способу також необхідно врахувати коефіцієнта стисливості біогазу.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Аналіз відомих методик по визначенню коефіцієнта стисливості газів згідно чинних нормативних документів показав, що вони не можуть бути застосовуваними, оскільки моделі стосуються певного діапазону компонентів природного газу, який за складом принципово відрізняється від біогазу, насамперед меншим вмістом метану і збільшеними вмістами двоокису вуглецю, азоту, кисню, а також наявністю водяної пари.

Реальний компонентний склад біогазу є близьким за об'ємним вмістом до (50-60) % метану  $\text{CH}_4$ , (28-38) % двоокису вуглецю  $\text{CO}_2$ , (5-11) % азоту  $\text{N}_2$ , (0,5-3,5) % кисню  $\text{O}_2$  і відносній вологості (50-60) %. Облік його здійснюють за відсутності додаткового компримування, тобто при надлишкових тисках (10-20) кПа за робочих температур (10-40) °С.

Так, методика щодо визначення коефіцієнта стисливості згідно [4] не може бути використаною внаслідок невідповідності за компонентним складом, де метану повинно бути більше 65%, двоокису вуглецю не більше 15%, а кисень передбачається практично відсутній (якщо прийняти його як інші складові, то вміст повинен бути не більше 1%).

Застосування методики згідно нормативного документу [5] є неможливим, оскільки вона не підходить по складу газу і водночас не містить методики (алгоритмів) для визначення коефіцієнта стисливості.

Застосування правил [6] також не підходить оскільки стосується тільки природного газу, в якому передбачається наявність багатьох вуглеводневих компонентів, в тому числі вмісту  $\text{CO}_2$  і  $\text{N}_2$  поряд з відсутністю суттєвої наявності кисню. Ще один із алгоритмів для визначення коефіцієнта стисливості згідно [6] не може бути застосовуваним, оскільки він стосується або вуглеводневих газів без  $\text{CO}_2$  і  $\text{N}_2$ , або наявності багатьох складових у вуглеводневих газах, тобто з вмістом  $\text{CO}_2$  і  $\text{N}_2$ .

Крім того, вказані вище методики [4-6] передбачають розрахунок коефіцієнта стисливості тільки для сухого газу (в [6] конкретизується, що відносна вологість такого газу не повинна перевищувати 10%), що не відповідає складу біогазу.

Чинний новий стандарт [7], який стосується визначення фізичних властивостей природного газу, є застосовуваним тільки для природного газу, який містить азот та двоокис вуглецю і не може бути безпосередньо використаний для біогазу.

Відомою для розрахунку фізичних властивостей вологого нафтового газу, в тому числі фактора стисливості є методика [8]. Однак вона передбачає необхідність врахування теплофізичних властивостей газових сумішей на базі розробленого Всеросійським науково-дослідним центром стандартизації, інформації і

сертифікації сировини, матеріалів і речовин Держстандарту Росії узагальненого фундаментального рівняння стану газу з допоміжним розраховуванням безрозмірних комплексів, що вже є досить громіздким при практичному розрахунку. Крім того, для розрахунку згідно цієї методики необхідно додатково враховувати рівноважну концентрацію (розчинність) водяної пари в газовій суміші, що є необхідною умовою для врахування цього фактору при утворенні кристалогідратів льоду або води.

Також щодо області застосування цієї методики відзначено, що вона призначена для застосування у сфері витратометрії нафтового газу, який, на погляд авторів статті, суттєво відрізняється за фізичними властивостями від біогазу.

Тому для низьких значень надлишкових тисків (до 50 кПа) і невисоких температур (до 50 °С) застосування цієї методики є не тільки недоцільним, оскільки суттєво ускладнює практичні аспекти її застосування при розрахунках у сфері обліку біогазу, але і є некоректним внаслідок недостовірності отриманих результатів щодо сфери застосування.

Також відомим є та обставина, що зміна коефіцієнта стисливості природного газу зростає із зростанням його абсолютного тиску і абсолютної температури, які виражають через їх псевдоприведені значення [6], що може бути використаним при дослідженні впливових факторів зміни коефіцієнта стисливості (КС) біогазу.

**Метою роботи** є розроблення практичного алгоритму визначення коефіцієнта стисливості сухого та вологого біогазу за низьких робочих тисків і його метрологічний аналіз.

#### **Виклад основного матеріалу**

На підставі проведеного аналізу відомих методик і нормативних документів доцільно визначати коефіцієнт стисливості біогазу як для суміші окремих компонентів газу з використанням розрахунку псевдокритичних і псевдоприведених параметрів суміші за методикою для природного газу, яка передбачає використання критичних тисків і критичної температури чистих компонентів газової суміші шляхом застосування правила суміщення за

методом Кея [9]. Далі шляхом використання номограм із [10] для визначення коефіцієнта стисливості природних вуглеводневих газів, тобто таких які містять  $\text{CO}_2$  і  $\text{N}_2$ , інтерполяційним методом знаходимо числове значення коефіцієнта стисливості для робочих умов вимірювання за тиском і температурою. Такий підхід є обґрунтованим, оскільки прийнято вважати, що гази або суміші газів, у яких приведені температури і тиски однакові, мають однакові або близькі значення коефіцієнтів стисливості [10].

При цьому вплив вологості біогазу на облік його сухої частини можна врахувати використанням відповідної залежності, яка наведена в [11]. Вона враховує фактори стискуваності водяної пари та вологого газу, парціальний тиск водяної пари і абсолютний тиск вологого газу, який обліковується.

Розроблений алгоритм передбачає використання порівняно простого алгоритму розрахунку коефіцієнта стисливості біогазу на базі об'ємного вмісту компонентів біогазу з врахуванням їх критичних параметрів і розрахунку псевдоприведених значень тиску і температури для конкретних параметрів абсолютного значень тиску і температури біогазу.

Суть практичного алгоритму визначення коефіцієнта стисливості біогазу передбачає визначення абсолютної псевдокритичної температури  $T_{нкр}$  та абсолютного псевдокритичного тиску  $P_{нкр}$  біогазу за формулами:

$$T_{нкр} = 0,01(v_1 T_{кр1} + v_2 T_{кр2} + v_3 T_{кр3} + v_4 T_{кр4}), \quad (1)$$

$$P_{нкр} = 0,01(v_1 P_{кр1} + v_2 P_{кр2} + v_3 P_{кр3} + v_4 P_{кр4}), \quad (2)$$

де  $v_1 \dots v_4$  – об'ємний вміст у відсотках компонентів біогазу  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$  відповідно, сума відсотків яких повинна становити 100%;  $T_{кр1} \dots T_{кр4}$  – абсолютні критичні температури окремих компонентів біогазу  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$  відповідно;  $P_{кр1} \dots P_{кр4}$  – абсолютні критичні тиски окремих компонентів біогазу  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$  відповідно.

За табличними даними [9] критичні параметри окремих компонентів біогазу становлять:

$$\begin{aligned} P_{кр\text{CH}_4} &= 4,5988 \text{ МПа}; & P_{кр\text{CO}_2} &= 7,386 \text{ МПа}; \\ P_{кр\text{N}_2} &= 3,390 \text{ МПа}; & P_{кр\text{O}_2} &= 5,043 \text{ МПа}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{кр\text{CH}_4} &= 190,555 \text{ К}; & T_{кр\text{CO}_2} &= 304,20 \text{ К}; \\ T_{кр\text{N}_2} &= 126,2 \text{ К}; & T_{кр\text{O}_2} &= 154,58 \text{ К}. \end{aligned}$$

Приведену температуру  $T_{нр}$  та приведений тиск  $p_{нр}$  для біогазу, як суміші газів, визначають за формулами:

$$T_{нр} = \frac{(t + 273,15)}{T_{нкр}} = \frac{T}{T_{нкр}}, \quad (3)$$

$$P_{нр} = \frac{(p_n + p_a)}{P_{нкр}} = \frac{P_{абс}}{P_{нкр}}, \quad (4)$$

де  $t$  – температура біогазу, °С;  $p_n$  – надлишковий тиск, Па;  $p_a$  – атмосферний тиск, Па.

КС біогазу визначають за допомогою графіків (рис.1) [10], використовуючи значення попередньо розрахованих псевдоприведених тиску та температури для робочих умов біогазу. Для цього записується рівняння прямої, що проходить через дві точки А і В з координатами  $(p_{нрА}; z_A)$  та  $(p_{нрВ}; z_B)$  відповідно:

$$\frac{P_{нр} - P_{нрА}}{P_{нрВ} - P_{нрА}} = \frac{z - z_A}{z_B - z_A}, \quad (5)$$

де  $z$  – КС біогазу;  $z_A$ ,  $z_B$  – КС біогазу для точок А і В відповідно.

За точку А приймається початок координат графіка, для якої  $z_A=1$  і  $p_{нрА}=0$ .

За точку В приймається значення КС (точка  $z_B$ ), яка вибирається за значеннями  $T_{нр}$  і  $p_{нр}$ . Так як для значень  $p_{нр}$  більше одиниці криві мають суттєво нелінійний характер, то за значення координат точки В можна вибрати значення коефіцієнта стисливості при  $T_{нр}=1,3$  (точка  $z'$ ) або при  $T_{нр}=1,4$  (точка  $z''$ ).

Тут конкретизуємо, що для біогазу при його надлишковому тиску (10-20) кПа і температурі (0-40) °С діапазон приведених значень температури буде знаходитися в діапазоні (1,3-1,4), що відповідає точкам  $z'$  та  $z''$  (рис.1).

За умови, коли приведена температура біогазу знаходиться між 1,3 і 1,4, тобто яким відповідають діапазони значень  $z'$  і  $z''$ , то використовуючи метод лінійної інтерполяції для знаходження значення  $z_B$  застосовується алгоритм:

$$z_B = z' + \frac{z'' - z'}{T_{нр2} - T_{нр1}} \cdot (T_{нрВ} - T_{нр1}), \quad (6)$$

де  $z'$ ,  $z''$  - значення КС при вибраному фіксованому  $p_{нр}$  та двох значеннях  $T_{нр1}$  і  $T_{нр2}$  відповідно (рис.1).

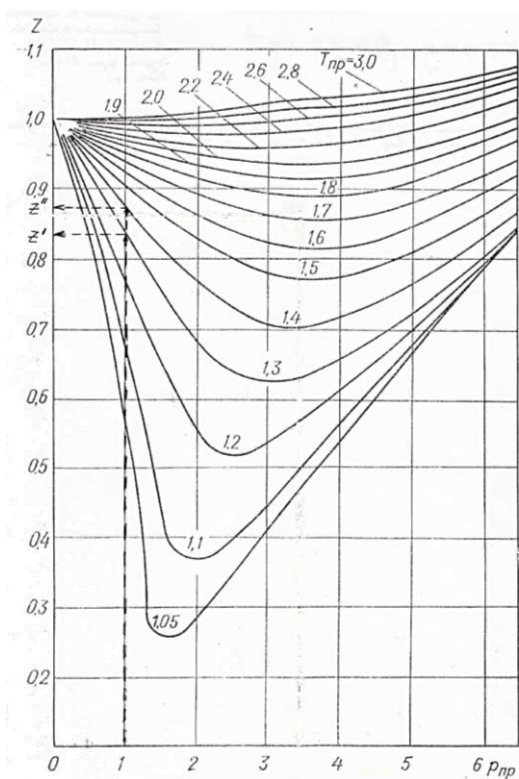


Рисунок 1 – Графіки функції коефіцієнта стисливості  $z = f(T_{np}, p_{np})$

На основі рівняння (5) залежність зміни КС біогазу подамо формулою:

$$z = p_{np} \cdot \frac{z_B - z_A}{p_{npB} - p_{npA}} - p_{npA} \cdot \frac{z_B - z_A}{p_{npB} - p_{npA}} + z_A \quad (7)$$

Далі за розрахованими значеннями  $p_{np}$  для розрахованого значення  $T_{np}$  з графіків  $z=f(p_{np}, T_{np})$  знаходимо значення коефіцієнта стисливості  $z$  (рис.1).

При цьому за необхідності використовуємо лінійну інтерполяцію для знаходження  $z$  за значеннями  $p_{np}$ ,  $T_{np}$ , які знаходяться всередині інтервалу дискретизованих значень.

Наприклад, якщо необхідно знайти КС при  $T_{np1} = 1,381$  (умовно вибране значення), то використовуємо з рис. 1 такі дані: при  $T_{np1} = 1,3$   $z' = 0,84$  і при  $T_{np2} = 1,4$   $z'' = 0,87$ . Ці числові значення згідно (7) дозволяють записати:

$$z_{i1} = z' + \frac{z'' - z'}{T_{np2} - T_{np1}} \cdot (T_{np1} - 1,3) \quad (8)$$

Після підставлення чисельних значень отримуємо:

$$z_{i1} = 0,84 + \frac{0,87 - 0,84}{1,4 - 1,3} \cdot (1,381 - 1,3) = 0,84 + 0,3 \cdot 0,081 = 0,8643$$

Таким чином є можливість записати таку апроксимаційну залежність (рівняння прямої) зміни КС від приведенного тиску за умови незмінної приведенної температури:

$$z = f(p_{np}) = 1 - (z_0 - z_i) \cdot p_{np} \quad (9)$$

За умови, коли  $T_{np1} = 1,381$  за значеннями двох точок  $p_{np} = 0$  при  $z = 1$  і  $p_{np1} = 1$  при  $z_i = 0,8643$ , апроксимаційне рівняння для КС сухого газу  $z_{сух.i}$  у виді (9) можна подати:

$$z_{сух.i} = 1 - 0,1357 \cdot p_{np} \quad (10)$$

Аналогічно можна отримати залежності зміни КС сухого біогазу для будь-якої іншої  $i$ -тої приведенної температури, яка записується з врахуванням фактичної температури і коефіцієнта стисливості біогазу.

Для дослідження впливу вологості на коефіцієнт стисливості вологого біогазу скористаємося відомою залежністю [11]:

$$z_{вол} = \left(1 - \frac{p_{ВП}}{p_{вол}}\right) \cdot z_{сух} + \frac{p_{ВП}}{p_{вол}} z_{ВП} \quad (11)$$

де  $z_{сух}$  – коефіцієнт стисливості сухого газу;  $p_{вол}$  – абсолютний тиск вологого газу;  $z_{ВП}$  – коефіцієнт стисливості водяної пари;  $p_{ВП}$  – парціальний тиск водяної пари.

Тут зауважимо, що при низьких парціальних тисках водяної пари формула (11) є придатною для розрахунку як для фактора стисливості, так і для коефіцієнта стисливості. Це вказується в [11], а обґрунтуванням може бути застосування однакового алгоритму запису залежності для КС як функції від співвідношення парціального тиску водяної пари і абсолютного тиску вологого газу. Саме це співвідношення є впливовою характеристикою на зміну досліджуваного параметра від наявності водяної пари у біогазі.

При температурах газу від  $-30$  °С до  $+80$  °С при низьких парціальних тисках водяну пару можна розглядати як ідеальний газ, коефіцієнт стисливості якого близький до одиниці і в задачах обліку вологого природного газу приймають, що  $z_{ВП} = 1$  [11].

Значення  $p_{ВП}$  розраховується за формулою [9]:

$$p_{ВП} = \frac{\varphi \cdot p_{НП}}{100}, \quad (12)$$

де  $\varphi$  – відносна вологість газу, %;  $p_{НП}$  – тиск насиченої водяної пари, Па.

Залежність  $p_{НП}$  як функція від температури є відомою із довідників [9] і, як приклад, для діапазону температур від 0 °С до 50 °С подається в табл.1.

Тому формула (11) із врахуванням (12) і умови, що  $z_{ВП}=1$  набуває вигляду:

$$\begin{aligned} z_{вол} &= \left(1 - \frac{\varphi \cdot p_{НП}}{100 \cdot p_{вол}}\right) \cdot z_{сух} + \frac{\varphi \cdot p_{НП}}{100 \cdot p_{вол}} = \\ &= z_{сух} - z_{сух} \cdot \frac{\varphi \cdot p_{НП}}{100 \cdot p_{вол}} + \frac{\varphi \cdot p_{НП}}{100 \cdot p_{вол}} = z_{сух} + \frac{\varphi \cdot p_{НП}}{100 \cdot p_{вол}} (1 - z_{сух}) \end{aligned} \quad (13)$$

Таким чином розглянуті вище міркування і формули дають можливість подати таку залежність для розрахунку об'єму за робочих умов (у відносних долях) сухої частини вологого газу  $V_{сух}$ :

$$V_{сух} = 1 - \frac{\varphi \cdot p_{НП}}{p_{вол}} \cdot \frac{z_{вол}}{z_{ВП} \cdot 100}. \quad (14)$$

Для кількісної оцінки впливу вологості біогазу на значення його коефіцієнта стисливості здійснимо комп'ютерне моделювання закономірностей його зміни.

Математичне моделювання КС біогазу проводилося для діапазону надлишкового тиску (5,0-40,0) кПа з кроком 10 кПа, абсолютної температури (0-50) °С, відносної вологості (10-90) % з урахуванням зміни компонентного складу біогазу. За основу при моделюванні вибраний такий склад біогазу, який містить за об'ємом 55 % метану, 32 % вуглекислого газу, 10 % азоту та 3 % кисню. В процесі моделювання змінювався вміст метану в діапазоні (45-65) %, вуглекислого газу (24-40) %, азоту (3-17) %, кисню (0,5-6) %. При зміні вмісту кожного з компонентів вміст решти складових пропорційно збільшувався або зменшувався для досягнення суми 100 %.

Таблиця 1 – Тиск насиченої водяної пари та її густина за різних температур

$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{кПа}$	$\rho \cdot 10^{-3}, \text{кг/м}^3$
0	0,613	4,80
5	0,880	6,80
10	1,226	9,40
15	1,706	12,80
20	2,333	17,3
25	3,173	23,0
30	4,239	30,3
40	7,371	51,2
50	12,33	83,0

Комп'ютерне моделювання реалізоване на базі алгоритму (13) з врахуванням даних табл. 1.

Результати моделювання, які подані на рис. 1, вказують, що зростання відносної вологості біогазу приводить до зростання КС, який в більшій мірі наближається до одиниці. При цьому при більшій температурі біогазу цей вплив спостерігається в більшій мірі. Водночас кількісні (числові) значення КС змінюються на рівні четвертого знаку після коми, що у відсоткових одиницях становить близько 0,009 % при температурі 30 °С і 0,026 % при температурі 50 °С за умови зміни відносної вологості біогазу від 10 % до 90 %.

Незважаючи на перший погляд несуттєві зміни КС, ця обставина повинна враховуватися при обліку біогазу, оскільки це вже кількісно, в такій мірі, впливає на точність його обліку.

Так як моделювання, яке наведено на рис. 1, реалізоване за умови використання середніх значень компонентного складу біогазу, то доцільно дослідити його зміну від вмісту метану в біогазі за різних значень його тиску і температури.

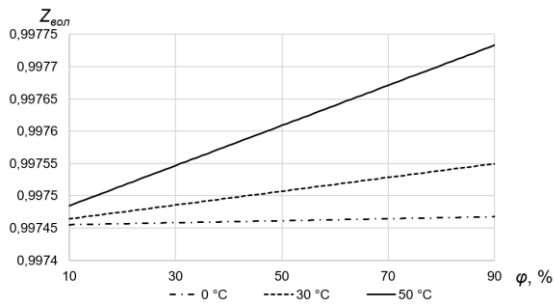
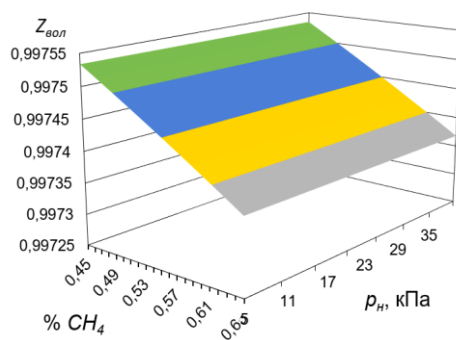
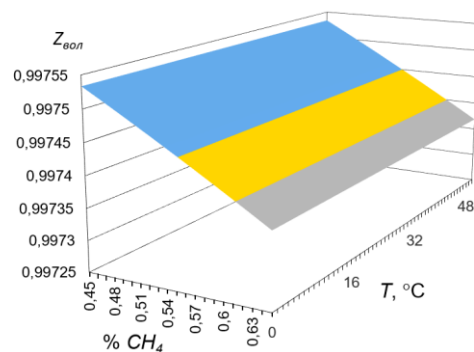


Рисунок 1 – Графічна ілюстрація зміни коефіцієнта стисливості вологого біогазу від його температури і відносної вологості  $\varphi$



а)



б)

Рисунок 2 – Графічна ілюстрація зміни коефіцієнта стисливості вологого біогазу від вмісту в ньому метану за різних значень надлишкового тиску (а) і температури (б) при відносній вологості 60 %

Так як вплив вологості біогазу на визначення КС є несуттєвим, то метрологічний аналіз здійснимо на підставі застосування запропонованого авторами викладеного вище алгоритму його визначення.

$$\Delta T_{кр} = \left( \frac{\partial T_{кр}}{\partial v_1} \cdot \Delta v_1 \right) + \left( \frac{\partial T_{кр}}{\partial v_2} \cdot \Delta v_2 \right) + \left( \frac{\partial T_{кр}}{\partial v_3} \cdot \Delta v_3 \right) + \left( \frac{\partial T_{кр}}{\partial v_4} \cdot \Delta v_4 \right), \quad (15)$$

$$\Delta p_{кр} = \left( \frac{\partial p_{кр}}{\partial v_1} \cdot \Delta v_1 \right) + \left( \frac{\partial p_{кр}}{\partial v_2} \cdot \Delta v_2 \right) + \left( \frac{\partial p_{кр}}{\partial v_3} \cdot \Delta v_3 \right) + \left( \frac{\partial p_{кр}}{\partial v_4} \cdot \Delta v_4 \right), \quad (16)$$

де  $\Delta v_1, \dots, \Delta v_4$  – абсолютні похибки визначення об'ємного вмісту компонентів біогазу  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$  відповідно;  $\frac{\partial T_{кр}}{\partial v_1}, \dots, \frac{\partial T_{кр}}{\partial v_4}$  – коефіцієнти впливу для розрахунку похибок параметрів  $v_1, \dots, v_4$  відповідно;  $\frac{\partial p_{кр}}{\partial v_1}, \dots, \frac{\partial p_{кр}}{\partial v_4}$  – коефіцієнти впливу для розрахунку похибок параметрів  $v_1, \dots, v_4$  відповідно.

Значення абсолютних похибок параметрів  $\Delta v_1, \dots, \Delta v_4$  визначалися з врахуванням прийнятої при метрологічному аналізі відносної похибки їх визначення 0,5% відносно усереднених значень вказаного вище компонентного складу

Графічна ілюстрація (рис. 2) свідчить про дещо більший вплив вмісту метану  $\text{CH}_4$  в біогазі на зміну його КС порівняно із зміною вологості в ньому. Так зростання вмісту  $\text{CH}_4$  із 45 % до 65 % приводить до зменшення значення КС приблизно 0,015 %. Водночас встановлено за результатами комп'ютерного моделювання практично відсутній вплив зміни робочого тиску і температури біогазу на зміну його КС.

Далі здійснимо метрологічний аналіз визначення коефіцієнта стисливості біогазу.

Абсолютні похибки розрахунку критичної температури та критичного тиску згідно (1) та (2) знайдемо за формулами:

біогазу. Вони становлять  $\Delta v_1=0,275$  %,  $\Delta v_2=0,16$  %,  $\Delta v_3=0,05$  %,  $\Delta v_4=0,015$  %. За цих умов числові значення коефіцієнтів впливу становлять  $\frac{\partial T_{кр}}{\partial v_1}=1,906$ ,  $\frac{\partial T_{кр}}{\partial v_2}=3,042$ ,  $\frac{\partial T_{кр}}{\partial v_3}=1,262$ ,  $\frac{\partial T_{кр}}{\partial v_4}=1,546$ ,  $\frac{\partial p_{кр}}{\partial v_1}=0,046$ ,  $\frac{\partial p_{кр}}{\partial v_2}=0,074$ ,  $\frac{\partial p_{кр}}{\partial v_3}=0,034$ ,  $\frac{\partial p_{кр}}{\partial v_4}=0,05$ . В результаті отримаємо такі значення похибок визначення критичних параметрів  $\Delta T_{кр}=0,718$  К,  $\Delta p_{кр}=1,741 \cdot 10^{-2}$  МПа.

Визначимо абсолютні похибки приведених значень тиску і температури біогазу згідно (3) і (4):

$$\Delta T_{np} = \sqrt{\left(\frac{\partial T_{np}}{\partial T} \cdot \Delta T\right)^2 + \left(\frac{\partial T_{np}}{\partial T_{nkr}} \cdot \Delta T_{nkr}\right)^2}, \quad (17)$$

де  $\partial T_{np}/\partial T$ ,  $\partial T_{np}/\partial T_{nkr}$  – коефіцієнти впливу для розрахунку похибки параметрів  $T$  та  $T_{nkr}$  відповідно;  $\Delta T$  та  $\Delta T_{nkr}$  – похибки визначення параметрів  $T$  та  $T_{nkr}$  відповідно.

Враховуючи, що  $\Delta T=0,15$  К,  
 $\partial T_{np}/\partial T=4,558 \cdot 10^{-3}$ ,  $\partial T_{np}/\partial T_{nkr} = -6,297 \cdot 10^{-3}$ ,  
 $\Delta T_{nkr}=0,718$  К отримаємо значення  
 $\Delta T_{np}=4,575 \cdot 10^{-3}$ .

Далі розраховуємо:

$$\Delta z_B = \Delta z' + \sqrt{\left(\frac{\partial z_B}{\partial z'} \Delta z'\right)^2 + \left(\frac{\partial z_B}{\partial z''} \Delta z''\right)^2 + \left(\frac{\partial z_B}{\partial T_{np1}} \Delta T_{np1}\right)^2 + \left(\frac{\partial z_B}{\partial T_{np2}} \Delta T_{np2}\right)^2 + \left(\frac{\partial z_B}{\partial T_{npB}} \Delta T_{npB}\right)^2}, \quad (19)$$

де  $\partial z_B/\partial z'$ ,  $\partial z_B/\partial z''$ ,  $\partial z_B/\partial T_{np1}$ ,  $\partial z_B/\partial T_{np2}$ ,  $\partial z_B/\partial T_{npB}$  – коефіцієнти впливу для розрахунку похибки параметрів  $z'$ ,  $z''$ ,  $T_{np1}$ ,  $T_{np2}$ ,  $T_{npB}$  відповідно;  $\Delta z'$ ,  $\Delta z''$ ,  $\Delta T_{np1}$ ,  $\Delta T_{np2}$ ,  $\Delta T_{npB}$  – похибки вимірювання параметрів  $z'$ ,  $z''$ ,  $T_{np1}$ ,  $T_{np2}$ ,  $T_{npB}$  відповідно.

Для  $\partial z_B/\partial z' = 0,183$ ,  $\partial z_B/\partial z'' = 0,817$ ,  
 $\partial z_B/\partial T_{np1} = 0,245$ ,  $\partial z_B/\partial T_{np2} = -0,245$ ,  $\partial z_B/\partial T_{npB} = 0,3$ , з врахуванням прийнятої похибки зчитування КС по графічному зображенню  $\pm 0,002$  (відповідає

$$\Delta z = \Delta z_A + \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial z_B} \Delta z_B\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial z_A} \Delta z_A\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial p_{npB}} \Delta p_{npB}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial p_{npA}} \Delta p_{npA}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial p_{np}} \Delta p_{np}\right)^2} + \Delta z_{zPM} \quad (20)$$

де  $\Delta z_{zPM}$  – методична похибка графіка, що становить  $0,005$ ;  $\partial z/\partial z_B$ ,  $\partial z/\partial z_A$ ,  $\partial z/\partial p_{npB}$ ,  $\partial z/\partial p_{npA}$ ,  $\partial z/\partial p_{np}$  – коефіцієнти впливу для розрахунку похибки параметрів  $z_B$ ,  $z_A$ ,  $p_{npB}$ ,  $p_{npA}$ ,  $p_{np}$  відповідно;  $\Delta z_B$ ,  $\Delta z_A$ ,  $\Delta p_{npB}$ ,  $\Delta p_{npA}$ ,  $\Delta p_{np}$  – похибки вимірювання параметрів  $z_B$ ,  $z_A$ ,  $p_{npB}$ ,  $p_{npA}$ ,  $p_{np}$  відповідно.

Після підстановки числових значень складових похибки  $\partial z/\partial z_B=0,019$ ;  $\partial z/\partial z_A=0,981$ ;  
 $\partial z/\partial p_{npB}=0,003$ ;  $\partial z/\partial p_{npA}=0,133$ ;  $\partial z/\partial p_{np}=-0,135$ ;  
 $\Delta z_A=0$ ;  $\Delta z_{zPM}=0,005$ ;  $\Delta p_{npA}=0$ ;  $\Delta p_{npB}=0,002$ ;  
 $\Delta p_{np}=6,4 \cdot 10^{-11}$  у (20) отримаємо значення  $\Delta z=0,0109$ , що становить  $1,09\%$ .

#### Висновки:

Розроблений алгоритм визначення коефіцієнта стисливості сухого і вологого біогазу, який може бути реалізований для практично будь-якого компонентного складу біогазу, для якого за умов вимірювання необхідно розраховувати значення приведених тисків і приведених температур.

$$\Delta p_{np} = \sqrt{\left(\frac{\partial p_{np}}{\partial p_{abc}} \cdot \Delta p_{abc}\right)^2 + \left(\frac{\partial p_{np}}{\partial p_{nkr}} \cdot \Delta p_{nkr}\right)^2}, \quad (18)$$

де  $\partial p_{np}/\partial p_{abc}$ ,  $\partial p_{np}/\partial p_{nkr}$  – коефіцієнти впливу для розрахунку похибки параметрів  $p_{abc}$  та  $p_{nkr}$  відповідно;  $\Delta p_{abc}$  та  $\Delta p_{nkr}$  – похибка визначення параметрів  $p_{abc}$  та  $p_{nkr}$  відповідно.

Для значень  $\Delta p_{abc}=0,11 \cdot 10^{-3}$  МПа,  
 $\partial p_{np}/\partial p_{abc}=1,858 \cdot 10^{-7}$ ,  $\partial p_{np}/\partial p_{nkr}=-3,486 \cdot 10^{-9}$   
 отримаємо значення  $\Delta p_{np}=6,403 \cdot 10^{-11}$ .

Абсолютну похибку розрахунку  $z_B$  визначимо за формулою:

$\pm 0,5$  мм згідно з прийнятим масштабом) отримаємо  $\Delta z'=0,002$ ;  $\Delta z''=0,002$ ;  $\Delta T_{npB}=0,004$ ;  
 $\Delta T_{np1}=0,004$ ;  $\Delta T_{np2}=0,004$ . Тому значення  $\Delta z_B=4,83 \cdot 10^{-3}$ .

Числове значення сумарної похибки  $\Delta z$  визначення коефіцієнта стисливості біогазу визначається за формулою:

Здійснений кількісний метрологічний аналіз практичного визначення коефіцієнта стисливості біогазу, який характеризується похибкою близькою до  $1,1\%$ , що обґрунтовує можливість його практичного застосування і досягнення при цьому достатньої для практики точності вимірювань.

Оцінено вплив вологості біогазу на визначення його коефіцієнта стисливості, зміна якого практично не перевищує  $0,026\%$ , що з врахуванням сформульованих вимог щодо точності обліку біогазу необхідно враховувати або цією зміною можна нехтувати.

#### Література

1. Про альтернативні види палива : Закон України від 21 травня 2009 р. № 1391-VI. Відомості Верховної Ради України (ВВР), 2000, № 12, ст. 94.
2. ДСТУ ISO 15112:2009. Природний газ. Визначення енергії. [Чинний від 2011-01-01]. К.: Держспоживстандарт України, 2010. III, 48 с. (Національний стандарт).



3. Спосіб експрес-визначення теплоти згорання природного газу : пат. 112737 С2 Україна. / О.Є. Середюк, Т.В. Лютенко, Н.М. Малісевич. № а201512215; заявл. 09.12.2015; опубл. 10.10.2016, Бюл. № 19.

4. ГОСТ 30319.2-96. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости. [Введен от 1997-07-01]. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1996. III, 53 с. (Межгосударственный стандарт).

5. ГОСТ 30319.3-96. Газ природный. Методы расчета физических свойств определение физических свойств по уравнению состояния. [Введен от 1997-07-01]. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1996. III, 33 с. (Межгосударственный стандарт).

6. РД 50-213-80. Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами. [Введен от 1982-07-01]. Москва: Изд. стандартов, 1982. 333 с.

7. ГОСТ 30319.2-2015. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Вычисление физических свойств на основе данных о плотности при стандартных условиях и содержании азота и диоксида углерода. [Взамен ГОСТ 30319.1-96, ГОСТ 30319.2-96; введен от 2017-01-01].

8. ГСССД МР 113-03. Методика ГСССД. Определение плотности, фактора сжимаемости, показателя адиабаты и коэффициента динамической вязкости влажного нефтяного газа в диапазоне температур 263...500 К при давлениях до 15 МПа. [Дата принятия 2003-06-10]. Москва, 2003. 26 с.

9. Измерение и учет расхода газа : справ. пособие / В.А. Динков и др. М.: Недра, 1979. 304 с.

10. Плотников В. М., Подрешетников В. А., Тетеревятников Л. Н. Приб и ср учета природного газа : Л.: Недра, 1989. 238 с.

11. Матіко Ф. Д., Павлюк І. П. Розрахунок фактора стискуваності вологого природного газу в задачах його обліку. *Методи та прилади контролю якості*. 2002. № 9. С. 79-81.

#### References

1. Pro alternatyvni vydy palyva : Zakon Ukrainy vid 21 travnia 2009 r. № 1391-VI. УДК 681.5:622.248

Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy (VVR), 2000, № 12, st. 94.

2. DSTU ISO 15112:2009. Pryrodnyi haz. Vyznachennia enerhii. [Chynnyi vid 2011-01-01]. K.: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2010. III, 48 s. (Natsionalnyi standart).

3. Sposib ekspres-vyznachennia teploty zghorannia pryrodnoho hazu : pat. 112737 C2 Ukraina. / O.Ie. Serediuk, T.V. Liutenko, N.M. Malisevych. № а201512215; zaiavl. 09.12.2015; opubl. 10.10.2016, Biul. № 19.

4. GOST 30319.2-96. Gaz prirodnyj. Metody rascheta fizicheskikh svojstv. Opredelenie koeficienta szhimaemosti. [Vveden ot 1997-07-01]. Minsk: Mezghosudarstvennyj sovet po standartizacii, metrologii i sertifikacii, 1996. III, 53 s. (Mezghosudarstvennyj standart).

5. GOST 30319.3-96. Gaz prirodnyj. Metody rascheta fizicheskikh svojstv opredelenie fizicheskikh svojstv po uravneniyu sostoyaniya. [Vveden ot 1997-07-01]. Minsk: Mezghosudarstvennyj sovet po standartizacii, metrologii i sertifikacii, 1996. III, 33 s. (Mezghosudarstvennyj standart).

6. RD 50-213-80. Pravila izmereniya raskhoda gazov i zhidkostej standartnymi suzhayushchimi ustrojstvami. [Vveden ot 1982-07-01]. Moskva: Izd. standartov, 1982. 333 s.

7. GOST 30319.2-2015. Gaz prirodnyj. Metody rascheta fizicheskikh svojstv. Vychislenie fizicheskikh svojstv na osnove dannyh o plotnosti pri standartnyh usloviyah i soderzhanii azota i dioksida ugleroda. [Vzamen GOST 30319.1-96, GOST 30319.2-96; vveden ot 2017-01-01].

8. GSSSD MR 113-03. Metodika GSSSD. Opredelenie plotnosti, faktora szhimaemosti, pokazatelya adiabaty i koeficienta dinamicheskoy vyzkosti vlazhnogo neftyanogo gaza v diapazone temperatur 263...500 K pri davleniyah do 15 MPA. [Data prinyatiya 2003-06-10]. Moskva, 2003. 26 s.

9. Izmerenie i uchet raskhoda gaza : sprav. posobie / V.A. Dinkov i dr. M.: Nedra, 1979. 304 s.

10. Plotnikov V. M., Podreshetnikov V. A., Teterevyatnikov L. N. Pribory i sredstva ucheta prirodnogo gaza i kondensata : L.: Nedra, 1989. 238 s.

11. Matiko F. D., Pavliuk I. P. Rozrakhunok faktora styskuvanosti volohoho pryrodnoho hazu v zadachakh yoho obliku. *Metody ta pryklady kontroliu yakosti*. 2002. № 9. S. 79-81.