

## ОЦІНКА ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАПАСІВ ГАЗУ В ТРУБАХ ЗА УМОВ НЕПОВНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ ГАЗОТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ

В. Я. Грудз, Я. В. Грудз, В. Б. Запужляк, О. В. Іванов\*, О. А. Туровський, Б. М. Сухарський

ІФНТУНГ; 76019, Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел. (0342) 727139,  
e-mail: oleksandr.ivanov@nng.edu.ua

Розглядається задача визначення кількості газу в ділянках лінійної частини газотранспортної системи за нестационарного режиму її експлуатації. В умовах воєнного та повоєнного часу нестационарні процеси в газотранспортних системах характерні умовам підвищеної аварійності та зміни напрямків газопотоків і споживачів. Тому оцінювання обсягів газу в ділянках газопроводу вимушено доводиться здійснювати в умовах нестационарності, що призводить до суттєвих похибок в результатах обчислень. В умовах нестационарності спостерігається коливання тиску газу по довжині і в часі, в зв'язку з чим середній тиск відрізняється від величини, знайденої за стаціонарними методиками. Застосування частотних методів розглянуто в задачах застосування методів імпедансу при розрахунках нестационарних процесів для оцінки частотного діапазону роботи газопроводу, отримання спрощених методів аналізу режимів газопроводу, чисельних способів звернення операційних рівнянь, при аналізі роботи газопроводу методами статистичної динаміки, рівнянь неусталеного руху газу газопроводом. Частота і амплітуда коливань тиску, викликаних збуреннями параметрів газового потоку, є характеристиками нестационарного процесу, тому повинен існувати зв'язок між амплітудно-частотними характеристиками та критерієм нестационарності. Аналіз нестационарних процесів в газопроводі, викликаних зміною витрати газу, проведено на основі аналітичних методів моделювання. Як модель використано диференційні рівняння руху газу та нерозривності, доповнені стаціонарними початковими умовами і граничними умовами другого роду. Отримано відповідні аналітичні розв'язки коливання тиску і витрати в газопроводі по довжині і в часі. Проведений аналіз свідчить, що похибка у визначенні обсягів газу в трубах в умовах нестационарного режиму може бути суттєвою, і її необхідно враховувати. У зв'язку з цим пропонується числова поправка на нестационарність режиму при визначенні кількості газу в газопроводі, яка залежить від критерію нестационарності і яку необхідно ввести в методику розрахунку.

Ключові слова: газопровід; кількість газу; нестационарність; методика розрахунку.

The problem of determining the amount of gas in the sections of the linear part of the gas transportation system under the conditions of non-stationary mode of its operation is considered. In the conditions of war and post-war times, non-stationary processes in gas transport systems are characteristic of conditions of increased emergency and changes in the directions of gas flows and consumers. Therefore, the estimation of gas volumes in gas pipeline sections has to be carried out under conditions of non-stationarity, which leads to significant errors in the calculation results. In conditions of non-stationarity, fluctuations in gas pressure along the length and in time are observed, due to which the average pressure differs from the value found by stationary methods. The use of frequency methods, which is considered in the tasks of applying impedance methods in the calculation of non-stationary processes, to estimate the frequency range of gas pipeline operation, to obtain simplified methods of analysis of gas pipeline modes, numerical methods of applying operational equations, when analyzing the operation of a gas pipeline by methods of statistical dynamics, equations of unsteady gas movement along a gas pipeline. The frequency and amplitude of pressure fluctuations caused by disturbances in gas flow parameters are characteristics of a non-stationary process, therefore there should be a relationship between the amplitude-frequency characteristics and the non-stationarity criterion. The analysis of non-stationary processes in the gas pipeline caused by the change in gas flow was carried out on the basis of analytical modeling methods. As a model, the differential equations of gas motion and continuity, supplemented with stationary initial conditions and boundary conditions of the second kind, were used. Appropriate analytical solutions of pressure fluctuations and flow in the gas pipeline along the length and in time were obtained. The conducted analysis shows that the error in determining the volume of gas in the pipes under non-stationary conditions can be significant and must be taken into account. In this regard, a numerical amendment to non-stationarity of the regime when determining the amount of gas in the gas pipeline, which depends on the criterion of non-stationarity and which must be introduced into the calculation methodology.

Key words: gas pipeline; amount of gas; non-stationarity; calculation method.

## Вступ

В умовах неповного завантаження газотранспортної системи суттєве зниження продуктивності порівняно з пропускною здатністю призводить до розширення діапазону зміни максимального і мінімального тисків. Граничними варіантами допустимих режимів слід вважати максимальний, що характеризується максимальним значенням тиску на початку лінійної ділянки, і мінімальний, що характеризується мінімальним значенням тиску в кінці лінійної ділянки. Множина всіх решта допустимих режимів знаходиться в діапазоні між вказаними граничними.

Отже, при неповному завантаженні складної газотранспортної системи можливі варіації тисків газу в газопроводах при заданій постійній продуктивності. Діапазон можливих змін тиску обмежується зверху лінією депресії при максимальному початковому тиску і знизу – лінією депресії при мініальному кінцевому тиску. Порушення вказаного діапазону може призвести до руйнування трубопроводу за рахунок перевищення допустимого тиску або до відмови нормальної експлуатації відцентрових нагнітачів на компресорних станціях за рахунок пониження тиску нижче від мінімально допустимого. Процес формування депресії тиску в кожний поточний момент при зміні величини продуктивності є нестационарним і характеризується коливанням тисків з певною частотою і амплітудою. Суперпозиція тисків при верхній граничній лінії депресії може призвести до перевищення початкового тиску, а при нижній граничній лінії депресії – до пониження тиску нижче допустимого.

## Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Відзначимо, що розробці методів оцінки кількості газу в трубопроводах складних газотранспортних систем присвячено ряд досліджень Сусака О. М., Касперовича В. К. [1], Грудза В.Я. [2, 3], Чекуріна В. [4], Дацюка А., Гладуна, С., Притули Н. [5], Матіко Ф. Д. [6]. У вказаних роботах детально описано загальновідомі методи визначення обсягу газу в газопроводі в умовах квазістационарного режиму, даються числові характеристики, методи розрахунку параметрів режиму та їх зміни в часі перехідного процесу.

Однак, авторами залишено без уваги принципи і методи розрахунку обсягів газу в газопроводах в період протікання нестационарних перехідних процесів, що в загальному дозволить більш повно і своєчасно оцінити втрати

газу при аварійних ситуаціях, характерних для умов воєнного часу.

## Мета та завдання досліджень

Оцінка кількості газу в лінійних ділянках газопроводу в процесі експлуатації газотранспортної системи в умовах нестационарних перехідних і аварійних режимах.

Вказана мета реалізується шляхом вирішення наступних задач:

- оцінка впливу зміни параметрів роботи газопроводу в часі та їх вплив на точність визначення обсягу газу в трубах;
- характеристика аналітичних підходів до проблеми оцінювання тривалості нестационарного процесу;
- розробка методики і алгоритму оцінювання поправки на нестационарність в розрахунках кількості газу в газопроводі.

## Висвітлення основного матеріалу дослідження

Для розрахунку запасів газу в трубах використовується інформація, отримана при реалізації задачі про розподіл витрати газу між паралельними нитками складної газотранспортної системи. Вихідна інформація для кожної ділянки задається у вигляді:

- абсолютні значення тисків газу на початку  $P_{Hi}$  і в кінці  $P_{Bi+1}$  ділянки;
- абсолютні температури газу на початку  $T_{Hi}$  і в кінці  $T_{Bi+1}$  ділянки (К);
- геометричні характеристики лінійних ділянок: внутрішній діаметр  $d_i$  (мм) і довжина  $L_i$  (км) ділянки;
- геометричні характеристики об'язки КС: геометричний об'єм трубопроводів і обладнання на низькій стороні  $V_{Bi}$  та геометричний об'єм трубопроводів і обладнання на високій стороні  $V_{Hi}$  (м<sup>3</sup>);
- відносна густина  $\Delta$ ;
- середні значення тисків  $P_{cpi}$  і температур газу  $T_{cpi}$ , а також коефіцієнта стисливості  $Z_{cpi}$  за результатами вимірювань

$$P_{cpi} = \frac{2}{3} \left( P_{Hi} + \frac{P_{Bi+1}^2}{P_{Hi} + P_{Bi+1}} \right), \quad (1)$$

$$T_{cpi} = T_{cp} + \frac{T_{Hi} - T_{Bi+1}}{\ln \frac{T_{Hi} - T_{cp}}{T_{Bi+1} - T_{cp}}}, \quad (2)$$

$$Z_{cpi} = 1 - 5,5 * 10^5 \frac{P_{cpi} \Delta^{1,3}}{T^{3,3}_{cpi}}. \quad (3)$$

Кількість газу в кожній з паралельних ниток газотранспортної системи на кожній з ділянок між компресорними станціями з номерами  $i$  та  $i+1$  знаходиться за стандартних умов з формули

$$W_{ij} = \frac{\pi d_{ij}^2}{4} L_i \frac{P_{cpi}}{P_c} \frac{T_c}{T_{cpi}} \frac{1}{Z_{cpi}}. \quad (4)$$

Сумарний об'єм газу в лінійній частині газотранспортної системи

$$W_{лч} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k W_{ij}, \quad (5)$$

де  $k$  – кількість лінійних ділянок.

Кількість газу в обв'язці кожної з компресорних станцій

– на низькій стороні

$$W_{Bj} = V_{геомB} \frac{P_{Bi}}{P_c} \frac{T_c}{T_{Bi}} \frac{1}{Z_{Bi}}; \quad (6)$$

– на високій стороні

$$W_{Hj} = V_{геомH} \frac{P_{Hi}}{P_c} \frac{T_c}{T_{Hi}} \frac{1}{Z_{Hi}}. \quad (7)$$

Сумарна кількість газу в обв'язках КС

$$W_{КС} = \sum_{j=1}^k (W_{Bj} + W_{Hj}). \quad (8)$$

Приведена методика визначення кількості газу в порожнині газопроводів є загальновідомою, і її реалізація не викликає особливих труднощів за умови квазістаціонарного режиму експлуатації системи. При виникненні нестационарності газових потоків картина суттєво ускладнюється. Неврахування нестационарного характеру течії газу може внести суттєву похибку в результати розрахунків.

Як показано в [2], нестационарний процес коливання тиску в газопроводі може бути описаний рівнянням

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{2a}{c^2} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2}, \quad (9)$$

де  $P(x,t)$  – тиск як функція лінійної координати  $x$  і часу  $t$ ;

$2a$  – коефіцієнт лінеаризації;

$c$  – швидкість розповсюдження звуку в газі.

Зауважимо, що коливання тиску в потоці газу можуть мати різну частоту і амплітуду в залежності від причини, що їх викликала. У відповідності до сказаного, коливання тиску умовно розділяють на високочастотні, серед-

ньочастотні та низькочастотні. Високочастотні характеризуються частотою в діапазоні (0,4 – 4,0) Гц і, як правило, є наслідком стрибкоподібної зміни параметру (тиску, витрати) в певному перерізі газопроводу. Амплітуда таких коливань може досягати величини 1 МПа. Коливання розповсюджуються вздовж газопроводу з швидкістю звуку, при цьому амплітуда і частота знижуються. Середньочастотний діапазон складає (0,5 – 10) Гц; такі коливання викликають плавні зміни параметрів потоку в часі. Вони розповсюджуються вздовж трубопроводу з суттєво меншим декрементом затухання. Низькочастотні коливання викликані добовою нерівномірністю газоспоживання і лежать в частотному діапазоні ( $10^{-5}$  – 0,5) Гц. Амплітуда коливання тиску залежить від характеру фактора збурення і може бути необмеженою (наприклад, для умов наповнення ділянки газопроводу газом). В умовах високочастотних коливань вирішальну роль в формуванні процесу відіграють інерційні сили і сили гідравлічного опору в потоці газу. Для коливань середньої і низької частоти основним джерелом є сили гідравлічного опору трубопроводу. З точки зору забезпечення надійної експлуатації газотранспортної системи, вирішальна роль відводиться високочастотним коливанням тиску, в зв'язку з тим, що такий процес найнепередбачуваніший.

Температурна нестационарність, вочевидь, також має вплив на точність визначення об'єму газу в газопроводі, однак, частота коливання температури в нестационарному неізотермічному процесі складає за даними [4, 5] (0,002 – 0,02) Гц, що дозволяє нестационарний процес вважати ізотермічним.

Важливим фактором, що має вплив на точність визначення кількості газу в трубопроводі, є коефіцієнт стисливості газу, значення якого у відповідності з (3) залежить від тиску, температури і фізичних властивостей газу. Якщо склад газу в нестационарному процесі не змінюється, а температурний режим можна вважати стаціонарним, то єдиним фактором, що впливає на значення коефіцієнта стисливості в нестационарному процесі, є коливання тиску. Тому для визначення числового його значення необхідно використати ітераційний метод, в якому початковим наближенням коефіцієнта стисливості газу є його значення для стаціонарного режиму. В подальшому для різних проміжків часу нестационарного процесу середній по довжині і середньозважений в часі тиск слід визначати за залежністю (14) і продовжувати ітераційний процес до досягнення необхідної точності.

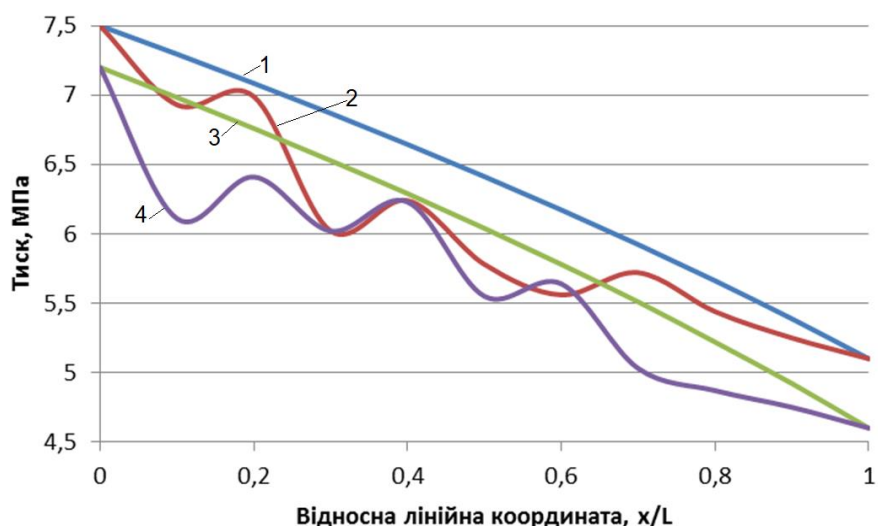


Рисунок 1 – Характер коливання тиску в газопроводі на момент нестационарного процесу  $t=1000$  с при стрибкоподібній зміні витрати в кінці траси на 10% (лінії 1,2) і 25% (лінії 3,4)

Оскільки частота і амплітуда коливань тиску, викликаних збуреннями параметрів газового потоку, є характеристиками нестационарного процесу, то повинен існувати зв'язок амплітудно-частотних характеристик з критерієм нестационарності [3, 4, 5].

Така постановка задачі вимагає розв'язання рівняння (9) при початкових і граничних умовах, вибраних з таких міркувань. До початку нестационарного процесу, викликаного збуренням витрати газу, газопровід працював в стаціонарному технологічному режимі з розподілом тисків по довжині за параболічним законом

$$P(x,0) = \sqrt{P_H^2 - (P_H^2 - P_K^2)x/L}, \quad (10)$$

де  $P(x,0)$  – тиск на відстані  $x$  від початку газопроводу довжиною  $L$ ;

$P_H, P_K$  – тиски на початку і в кінці газопроводу відповідно.

При заданих тисках  $P_H, P_K$  забезпечується певна масова продуктивність газопроводу  $Q_0$ , яку в умовах неповного завантаження можна змінити в кожен момент часу в сторону збільшення або зменшення на деяку величину  $\Delta Q$ . Нехай, починаючи з моменту часу  $t > 0$  подача газу в газопровід не змінилася, а відбір в кінці траси змінився на величину  $\Delta Q$ . Тоді граничні умови для реалізації рівняння (9) матимуть вигляд:

$$Q(0,t) = Q_0; \quad Q(L,t) = Q_1; \quad (11)$$

де

$$Q_1 = Q_0 + \Delta Q. \quad (12)$$

Розв'язок (9) при початкових (10) і граничних (11) умовах шукається методом Фур'є [6, 10]

$$P(x,t) = \frac{\lambda \rho w}{2dF^2} x \left( Q_0 - \frac{Q_0 - Q_L}{2L} x \right) + \frac{2}{L} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \int_0^L \sqrt{P_H^2 - (P_H^2 - P_K^2)x/L} \cos \frac{\pi n x}{L} dx - \frac{\lambda w}{\pi n F} [Q_0(1 - (-1)^n) - \frac{1}{2\pi n} (Q_0 - Q_L)(-1)^n] \right\} \times \exp\left(-\frac{\lambda w}{4d} t\right) \sin \left[ \frac{\lambda w}{4d} t \sqrt{\left(\frac{4\pi m c d}{\lambda w}\right)^2 - 1} \right] \cos \frac{\pi n x}{L}. \quad (13)$$

Отримана математична модель дозволяє оцінити величину амплітуди коливання тисків в газопроводі по його довжині і в часі при виникненні збурень у вигляді стрибкоподібної зміни продуктивності на початку або в кінці ділянки газопроводу. На її основі побудовано графічні залежності тиску від лінійної координати для певного моменту часу, на які накладено аналогічні залежності для  $t = 0$  (рис. 1).

Середній тиск в ділянці газопроводу в умовах нестационарного процесу для кожного моменту часу може бути знайдений із залежності [1, 7]

$$P_{cp}^* = \frac{1}{L} \int_0^L P(x,t) dx. \quad (14)$$

Як видно з графіків (рисунок 1), величина середнього тиску за умов нестационарного режиму, розрахована за (14), чисельно менша за аналогічне значення, знайдене за стаціонарною моделлю (1), тому формально відношення

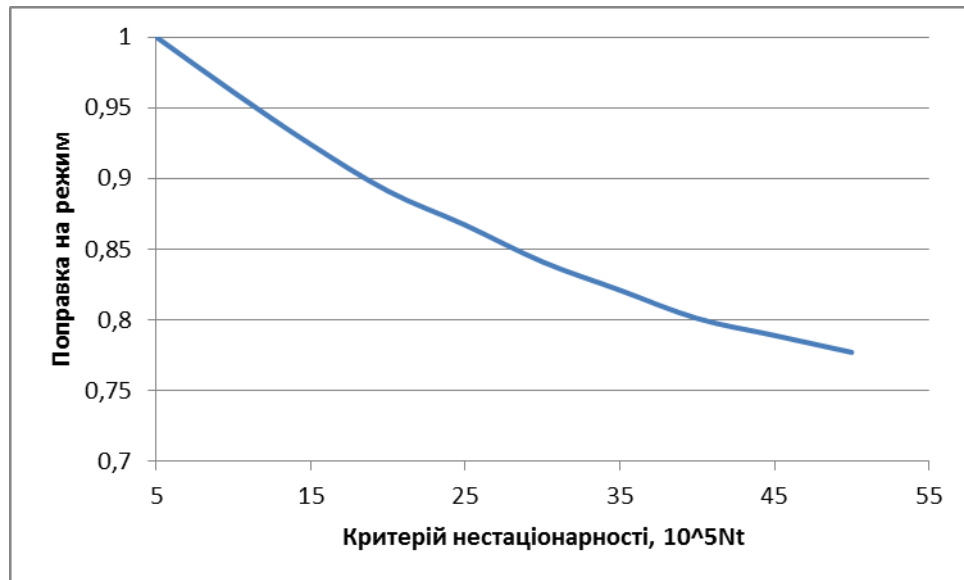


Рисунок 2 – Вплив нестационарності режиму на величину середнього тиску в газопроводі

$k(t) = P_{cp}^* / P_{cpi} < 1$ . З плином часу перехідний нестационарний процес, викликаний стрибкоподібною зміною витрати газу, переходить в новий стаціонарний режим, для якого  $k(\infty) = 1$ .

Очевидно, що для нестационарностей різного характеру, викликаних різноманітними збуреннями технологічного режиму, характер розподілу тиску по довжині і в часі буде різним. Тому в строгій постановці задачі для кожного нестационарного процесу слід отримати залежність тиску від лінійної координати і часу, аналогічну залежності (13), і подальше визначити поправку на режим  $k(t)$  для моменту часу проведення замірів тисків. Однак, існує простіший шлях корегування розрахункової кількості газу в трубопроводі за рахунок нестационарності режиму роботи газопроводу, згідно з яким слід визначити обсяг газу в лінійній частині за стаціонарною моделлю і ввести поправку на нестационарність  $k(t)$ . Для її визначення слід оцінити ступінь нестационарності режиму за критерієм нестационарності [2, 3, 9]. Тоді фактична кількість газу в лінійній ділянці газопроводу на момент проведення вимірювання тисків в умовах нестационарного режиму може бути знайдена з залежності

$$W^f = k(t)W, \quad (15)$$

де  $W$  – кількість газу в газопроводі, знайдена за умови стаціонарного режиму за (4).

Поправка на нестационарність  $k(t)$  є функцією критерію нестационарності

$$N_t = \frac{\delta Q d}{\tau \lambda w}, \quad (16)$$

де  $\delta Q$  – відносна зміна продуктивності газопроводу в нестационарному режимі за проміжок часу  $\tau$

$$\delta Q = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{Q_{cp}}, \quad (17)$$

де  $Q_{\max}, Q_{\min}, Q_{cp}$  – максимальне, мінімальне і середнє значення продуктивності в нестационарному процесі;

$\lambda$  – коефіцієнт гідравлічного опору газопроводу внутрішнім діаметром  $d$ ;

$\bar{w}$  – середня усереднена лінійна швидкість газу в нестационарному процесі [8, 11];

$$\bar{w} = \frac{2}{3}(w(0,t) + 2w(L,t)), \quad (18)$$

$w(0,t)$  і  $w(L,t)$  – усереднені швидкості газу на початку і кінці газопроводу, величини яких можна знайти з співвідношення

$$w(0,t) = \frac{1}{\tau F} \int_0^{\tau} Q_{cp}(t) dt. \quad (19)$$

За вказаною методикою розрахунковим шляхом побудовано графічну залежність поправки на нестационарність при визначенні кількості газу в трубопроводі від критерію нестационарності, яка представлена на рисунку 2.

Аналіз розрахунків показує, що поправка на нестационарність зі збільшенням критерію нестационарності зменшується, а при нульовому критерії нестационарності дорівнює одиниці. Це значить, що розрахункова кількість газу в умовах нестационарного режиму менша за величину, розраховану за стаціонарною методикою.

## Висновки

Показано, що розрахункова кількість газу в трубопроводі суттєво залежить від характеру режиму роботи газопроводу і з зростанням нестационарності зменшується. Запропоновано методику оцінки обсягу газу в лінійній частині газопроводу, яка базується на аналізі нестационарних процесів.

## Література

1. Сусак О.М., Касперович В.К., Андріішин М.П. Трубопровідний транспорт газу: підручник. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2013. 345 с.

2. Грудз В.Я., Лінчевський М.П., Михалків В.Б. Керування режимами газотранспортних систем. Київ: Укргазпроект, 1996. 140 с.

3. Грудз В.Я., Тимків Д.Ф., Михалків В.Б. Обслуговування і ремонт газопроводів. Івано-Франківськ: Лілея-НВ, 2009. 710 с.

4. Чекурін В. Математична модель перехідних процесів перенесення маси та імпульсу в довгому газопроводі. *Фіз.-мат. моделювання та інформ. технології*. 2010. № 11. С. 210–219.

5. Дацюк А., Гладун С., Припула Н., Припула М., П'янило Я. Розрахунок об'ємів акумульованого газу в газотранспортній системі. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка": Комп'ютерні науки та інформаційні технології*. 2009. № 638. С. 81–85.

6. Матіко Ф. Д. Визначення кількості природного газу у ділянках газопроводів складної конфігурації. *Методи та прилади контролю якості*. 2014. №1(32). С. 54–63.

7. Grudz V., Grudz YA., Zapukhliak V., Chudyk I., Poberezhny L., Slobodyan N. Optimal gas transport management taking into account reliability factor. *Management Systems in Production Engineering*. 2020. Vol. 28, № 3. P. 202–208. doi:10.2478/mspe-2020-0030.

8. Meshalkin, V.P.; Moshev, E.R. Modes of functioning of the automated system "pipeline" with integrated logistical support of pipelines and vessels of industrial enterprises. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2015. 44 (7). P. 580–592. doi:10.3103/S1052618815070109.

9. Запукхляк В.Б., Марчук О.М., Грицанчук А.В. Аналіз розрахунку напруженого стану трубопроводів під час капітального ремонту. *Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування. Праці V Міжнародної науково-технічної конференції, (Тернопіль 19-22 вересня 2017 р.)*. Тернопіль: Тернопільський національний тех-

нічний університет імені Івана Пулюя, 2017. С. 191-194.

10. Squires K., Eaton J. Particle response and turbulence modification in isotropic turbulence. *Phys. Fluid*. 1990. No 2 (7). P. 1191–1203.

11. Zapukhliak V., Poberezhny L., Maruschak P., Grudz V. Jr., Stasiuk R., Brezinová J., Guzanová A. Mathematical modeling of unsteady gas transmission system operating conditions under insufficient loading. *Energies*. 2019. Vol. 12, Iss. 7 (April-1 2019). P. 1–14. DOI:10.3390/en12071325.

## References

1. Susak O.M., Kasperovych V.K., Andriishyn M.P. Truboprovodnyi transport hazu: pidruchnyk. Ivano-Frankivsk : IFNTUNH, 2013. 345 p. [in Ukrainian]

2. Hrudz V.Ya., Linchevskiy M.P., Mykhalkiv V.B. Keruvannia rezhymamy hazotrasportnykh system. Kyiv: Ukrhazproekt, 1996. 140 p. [in Ukrainian]

3. Hrudz V.Ya., Tymkiv D.F., Mykhalkiv V.B. Obsluhovuvannia i remont hazoprovodiv. Ivano-Frankivsk: Lileia-NV, 2009. 710 p. [in Ukrainian]

4. Chekurin V. Matematychna model perekhidnykh protsesiv perenesennia masy ta impulsu v dovhomu hazoprovodi. *Fiz.-mat. modeliuвання ta inform. tekhnolohii*. 2010. No 11. P. 210–219. [in Ukrainian]

5. Datsiuk A., Hladun S., Prytula N., Prytula M., Pianylo Ya. Rozrakhunok obiemiv akumulovanoho hazu v hazotrasportnii systemi. *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika": Kompiuterni nauky ta informatsiini tekhnolohii*. 2009. No 638. P. 81–85. [in Ukrainian]

6. Matiko, F. D. Vyznachennia kilkosti pryrodnoho hazu u diliankakh hazoprovodiv skladnoi konfihuratsii. *Metody ta prylady kontroliu yakosti*. 2014. No 1(32). P. 54–63. [in Ukrainian]

7. Grudz V., Grudz YA., Zapukhliak V., Chudyk I., Poberezhny L., Slobodyan N. Optimal gas transport management taking into account reliability factor. *Management Systems in Production Engineering*. 2020. Vol. 28, No 3 . P. 202–208. doi:10.2478/mspe-2020-0030.

8. Meshalkin, V.P.; Moshev, E.R. Modes of functioning of the automated system "pipeline" with integrated logistical support of pipelines and vessels of industrial enterprises. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2015. 44 (7). P. 580–592. doi:10.3103/S1052618815070109.

9. Zapukhliak V.B., Marchuk O.M., Hrytsan-chuk A.V. Analiz rozrakhunku napruzhenoho stanu truboprovodiv pid chas kapitalnoho remontu. Poshkodzhennia materialiv pid chas ekspluatatsii, metody ioho diahnostuvannia i prohnouzuvannia. Pratsi V Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii, (Ternopil 19-22 veresnia 2017 r.). Ternopil: Ternopilskyi natsionalnyi tekhnichniyi universytet imeni Ivana Puliuiia, 2017. P. 191-194. [in Ukrainian]

10. Squires K., Eaton J. Particle response and turbulence modification in isotropic turbulence. *Phys. Fluid.* 1990. No 2 (7). P. 1191–1203.

11. Zapukhliak V., Poberezhnyi L., Maruschak P., Grudz V. Jr., Stasiuk R., Brezinová J., Guzanová A. Mathematical modeling of unsteady gas transmission system operating conditions under insufficient loading. *Energies.* 2019. Vol. 12, Iss. 7 (April-1 2019). P. 1–14. doi:10.3390/en12071325.