
Науково-технічні проблеми нафтогазової інженерії

УДК 621.438:622

DOI: 10.31471/1993-9868-2024-1(41)-46-51

ПРОГНОЗУВАННЯ БЕЗВІДМОВНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ БАГАТОЦЕХОВИХ КОМПРЕСОРНИХ СТАНЦІЙ

В. Я. Грудз, Я. В. Грудз, Р. Б. Стасюк*, М. Я. Дволітка, Н. В. Копачук, О. Ф. Козак

ІФНТУНГ; 76019, Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел. (0342) 727139,
e-mail: roman.stasiuk@nuing.edu.ua

Розглядаються методи прогнозування імовірності безвідмовної роботи багатоцехових компресорних станцій системи транзитного транспорту газу в умовах їх неповного завантаження. Для визначення зміщення характеристик нагнітачів, які використовують коефіцієнти технічного стану, по окремих характеристиках в долях одиниці, вказують на погіршення якості роботи агрегату по даних показниках. Сукупності значень коефіцієнтів технічного стану нагнітачів за їх доступними показниками дають можливість визначити типи несправностей, що виникають у нагнітачах. Визначення базових значень коефіцієнта технічного стану передбачає наявність вимірних режимних характеристик нагнітача, а також комерційної витрати газу через нагнітач. При неповному завантаженні системи та зміні величини продуктивності процес формування депресії тиску у кожний поточний момент часу є нестационарним та характеризується коливанням тисків із певною частотою та амплітудою. Суперпозиція тисків при її верхній граничній лінії депресії може призвести до перевищення початковим тиском допустимого рівня. Щоб запобігти поточному перенавантаженню трубопроводу пропонується знижувати його початковий тиск. В таких ситуаціях прогнозування безвідмовної експлуатації системи має особливе значення, оскільки підходи до принципу оптимізації режимів роботи і вибір критерію оптимальності мають певні особливості, зокрема, це стосується багатоцехових станцій. Запропоновано графоаналітичний метод визначення ймовірностей відмовлення елемента за параметром у кожному міжконтрольному періоді, а також сумарної імовірності відмови за термін служби елемента. Метод придатний для будь-яких законів розподілу шляхом плавного регулювання параметра. Установлена залежність відмовлень одного елемента від інших, враховує те, що вона може бути обумовлена загальним режимом і умовами роботи газоперекачувальних агрегатів як елементів системи, зміною умов роботи одного елемента при відмові іншого.

Ключові слова: компресорна станція, імовірність безвідмовної роботи, ресурс, оптимізація.

The methods of forecasting the probability of failure-free operation of multi-shop compressor stations of the long-distance gas transport system under the conditions of their incomplete loading are considered. To determine the displacement of the characteristics of the superchargers, which use the coefficients of the technical condition for individual characteristics in fractions of the unit, they indicate the deterioration of the unit's performance according to these indicators. The aggregates of values of the coefficients of the technical condition of the superchargers according to their available indicators make it possible to determine the types of malfunctions that occur in the superchargers. Determining the basic values of the coefficient of technical condition requires the presence of measured mode characteristics of the supercharger and also commercial gas consumption through the supercharger. When the system is not fully loaded, the pressure depression formation process at each current moment of time when the productivity value changes is non-stationary and is characterized by pressure fluctuations with a certain frequency and amplitude. The superposition of pressures at its upper limit line of depression can lead to the fact that the initial pressure exceeds the allowable one. To currently prevent pipeline overloading, it is suggested to

reduce its initial pressure in relation to the maximum. In such situations, forecasting the fault-free operation of the system is of particular importance, since the approaches to the principle of optimization of operating modes and the selection of the optimality criterion have certain features, in particular, this applies to multi-shop stations. A graph-analytical method for determining the failure probabilities of an element by parameter in each inter-control period, as well as the total probability of failure during the element's service life, is proposed. The method is suitable for any distribution laws with smooth realizations of the parameter change. The established dependence of failures of one element on others takes into account the fact that it can be determined by the general mode and conditions of operation of gas pumping units as elements of the system, by a change in the conditions of operation of one element when another fails.

Keywords: compressor station, probability of failure-free operation, resource, optimization.

Вступ

Газотранспортна система, працюючи в умовах неповного завантаження, характеризується широким діапазоном керуючих факторів і впливів для вибору режиму роботи її елементів, зокрема компресорних станцій.

Компресорна станція, як локальний об'єкт керування, є складним комплексом компресорного устаткування, режим роботи якого змінюється від коливання витрати газу та обсягу відборів вздовж траси магістрального газопроводу. Для компенсації коливань режимів у технологічних схемах КС передбачено різні ступінчасті (дискретні) способи регулювання, як от числом задіяних в процес машин, зміною схеми підключення машин (число груп і агрегатів у групі); застосуванням коліс нагнітачів різних діаметрів тощо. До способів плавного регулювання належать: зміна швидкості обертання ротора нагнітача (в регульованому приводі), перепускання газу з виходу на вхід групи агрегатів і дроселювання.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Питанням оптимізації режимів роботи компресорних станцій газотранспортної систем присвячено роботи Бобровського С.А. [1], Жидкової М.О. [2,3], Зарицького С.П. [4], Поршаківа Б.П. [5], Щербакова С.Г. [6], Яковлева Є.І. [7,8], Грудза В.Я. [9,10].

Однією з головних завдань керування технологічним режимом роботи КС є підтримання тиску нагнітання на заданому рівні при оптимальному розподілі навантаження між агрегатами [1]. При цьому під оптимальним розподілом розуміється таке навантаження агрегатів, яке забезпечує мінімум енерговитрат на компримування заданого обсягу газу при відповідних граничних умовах на вході і виході станції [3].

Науковці пропонують різні підходи до питання оптимізації режимів роботи ГПА на компресорних станціях газопроводів [2,7] і для цього використовують різноманітні критерії

оптимальності [4,9]. Однак, в умовах неповного завантаження газотранспортної системи вказані підходи до принципу оптимізації режимів роботи КС і вибір критерію оптимальності при цьому мають певні особливості, зокрема це стосується багатоцехових станцій.

Багатоцехові компресорні станції можна подати у вигляді складної системи, ланками якої є окремі компресорні цехи, а елементами – газоперекачувальні агрегати. В такому вигляді прогнозування безвідмовної роботи системи визначається технічним станом елементів і ланок, для показників якого характерний часовий тренд. Як правило, детермінований підхід до вирішення поставленої задачі малоефективний, оскільки показники надійності елементів і ланок та їх зміну в ході експлуатації важко описати відповідними математичними моделями. Тому найбільш прийнятний підхід базується на принципах прогнозування за середньостатистичною зміною параметра.

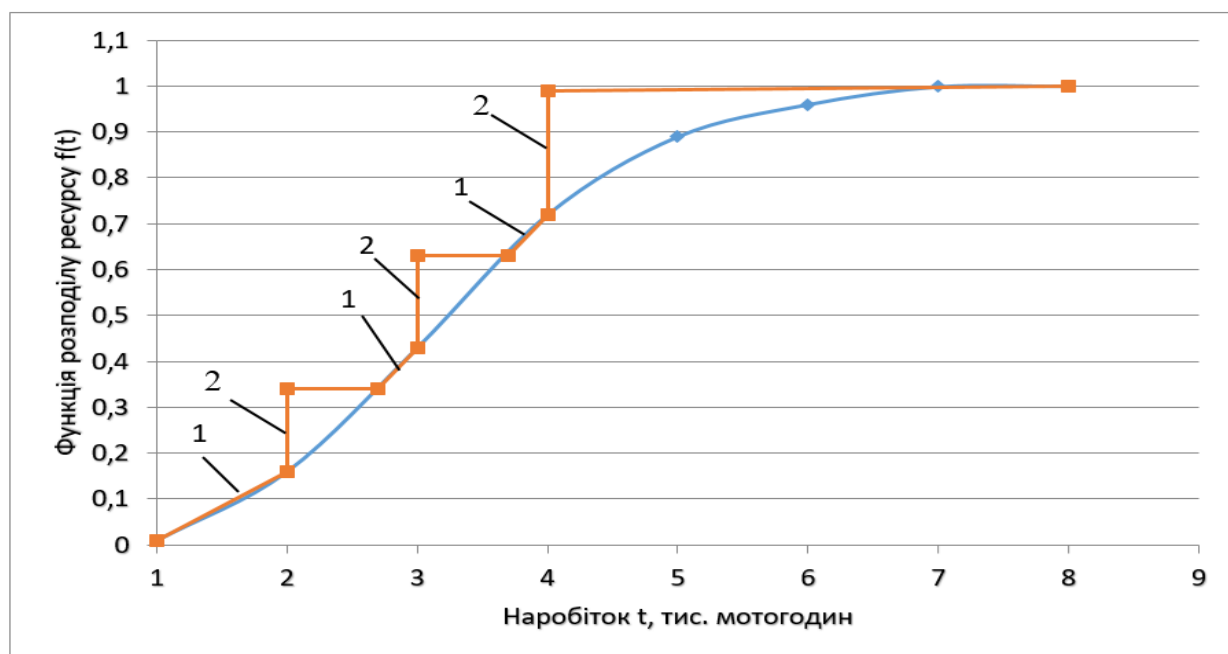
При такому прогнозуванні імовірність безвідмовної роботи складової частини обчислюють за формулою

$$P(D, t_m) = 1 - Q(D, t_m) .$$

Для розв'язання задачі попередньо знаходять імовірності відмов і заносять у таблицю у відповідності до вихідних даних: середнього нормованого ресурсу T_0 ; коефіцієнта варіації ресурсу v ; показника степеня функції зміни параметра α , що допускається; відхилення D_0 і характеристик процесу $Z(t)$. Поряд із застосуванням таблиць апроксимується імовірність безвідмовної роботи простими функціями. Так, використовують апроксимуючі функції

$$Q(D_0, T_0) = D_0^d; \quad T_0(D_0, T_0) = T_0 D_0^n. \quad (1)$$

Вид рівнянь прийнято на основі аналізу знайдених кривих і їхньої побудови в прямокутних координатах з нерівномірними шкалами (спосіб випрямлення). Для цих рівнянь при $D_0=1$ виконуються умови $Q(D_0)=1$ і $T_0(D_0=1)=T_0$. Середньоквадратична похибка апроксимування виявилася рівною в середньому 3 % – для $T_0(D_0, t_m)$ і 5 % – для $Q(D_0)$.



1 — ймовірність відмов елемента у міжконтрольному періоді;
 2 — ймовірність попереджувальної заміни за результатами діагностування
Рисунок 1 – Функція розподілу ресурсу наробітку до першого відмовлення елемента при $D \neq u_n$

Зі зменшенням D_0 ймовірність відмов $Q(D_0, T_0)$ знижується до величини $0,5^\alpha$, після чого залишається постійною. Сталість $Q(D_0, T_0)$ спостерігається в інтервалі $0 \leq D_0 \leq 0,5^\alpha$, тобто $Q(D_0 < 0,5^\alpha) = Q(D_0 = 0,5^\alpha)$. Зі зменшенням міжконтрольного наробітку t_m і збільшенням T_0 ймовірність відмовлення зменшується. Середній фактично використовуваний ресурс складової знижується зі зменшенням D_0 .

Мета та завдання досліджень

Вдосконалення методів прогнозування ймовірності безвідмовної роботи багато цехових компресорних станцій системи магістрального транспорту газу в умовах їх неповного завантаження.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Запропоновано графоаналітичний метод визначення ймовірностей відмов елемента за параметром у кожному міжконтрольному періоді, а також сумарної ймовірності відмов за увесь термін служби елемента. Метод придатний для будь-яких законів розподілу при плавній зміні параметра і постійних t_m і u_n .

Для цього будується звичайна крива розподілу безупинної випадкової величини чи ресурсу наробітку до відмови при $D=u_n$ (рис. 1). Вертикальними лініями на графіку відзнача-

ються моменти контролю (діагностування) з наробітком $t_m, 2t_m, \dots, it_m$. Відтак проводяться вертикальні лінії через праві границі інтервалів у i -х міжконтрольних періодах, де спостерігаються відмови елементів, що мали при контролі відхилення параметра більше допустимого.

З парних точок перетину вертикальних ліній з абсцисами it_m і t_{i-1} із кривої розподілу проводяться вліво горизонталі до перетину з віссю ординат. Утворений на цій осі відрізок 1 буде характеризувати ймовірність відмови елемента в i -му міжконтрольному періоді. Сума цих відрізків складе ймовірність відмови елемента за весь термін його служби.

Інші відрізки 2 будуть характеризувати відповідні ймовірності попереджувальних заміन елементів у міжконтрольних періодах, що обумовлюють дискретність кривої розподілу при $D \neq u_n$.

При варіації t_m і u_n $Q(D_0)$ суттєво не змінюється, тобто не чинить впливу на значення ймовірності відмов. Отже, постійна ймовірність відмов зберігається в інтервалі

$$0 \leq D_0 \leq 0,3^\alpha \quad (2)$$

При тих самих вихідних показниках зміни параметра збільшення коефіцієнта варіації міжконтрольного наробітку на 0,1 у діапазоні 0...0,4 підвищує ймовірність виникнення відмов у середньому на 0,04, а фактично використовуваний ресурс – на 3,5% при $0,4 \leq D_0 \leq 0,7$. При

$D_0 > 0,7$ збільшення коефіцієнта варіації істотно не впливає на ці величини.

Якщо при варіації граничного відхилення допустиме відхилення параметра дорівнює математичному сподіванню граничного його відхилення ($D_0 = u_n = 1$), то імовірність відмови менша 1. Зі збільшенням T_0 значення $Q(D_0)$ зменшується від 1,0 до 0,65, тому залежність імовірності виникнення відмови від допустимого відхилення параметра можна апроксимувати рівнянням

$$Q(D_0, T_0) = Q_1 D_0^d,$$

де Q_1 — імовірність відмови при $D_0 = 1$.

Максимальну імовірність безвідмовної роботи чи мінімальну імовірність відмови можна установити, змінюючи не міжконтрольний наробіток, а допустиме відхилення параметра. У цьому випадку використовуються асимптотичні властивості функції допустимого відхилення параметра. Ці властивості, зокрема, проявляються за умови $v = 0,45 \dots 0,6$, $1,5 \leq T_0 \leq 2,5 (A_0 \geq 3)$ і $1,5 \leq T_0 \leq 3 (A_0 \geq 5)$. Тоді мінімальне значення імовірності відмови спостерігатиметься при $D = 0,5 u_n$ або $D = 0,5^\alpha u_n$, де $\alpha \neq 1$. Якщо U_m , чи U_n , чи U_z не дорівнює 0, то таке значення зменшується до $D = 0,3^\alpha u_n$. Існують і інші апроксимуючі функції для визначення максимальної імовірності безвідмовної роботи, для яких застосовуються такі рівняння

- для степеневі функції $D = 0,5^\alpha u_n + \Delta\Pi$;
- для експонентної

$$u_1(t) = a e^V c^t - \Delta\Pi \quad D = a(u_n / a)^{0,5} - \Delta\Pi. \quad (3)$$

Ці рівняння справедливі при $t_m = const$.

Якщо ж міжконтрольний наробіток t_m збігається з міжремонтним ресурсом, причому він виявляється меншим доремонтного

$$t_\delta \left(q = \frac{t_m}{t_\delta} < 1 \right),$$

то уводять відповідне виправлення. При лінійних реалізаціях зміни параметра (базовий варіант) і $t_m = t_\delta$ максимальна імовірність безвідмовної роботи елемента визначається за простим співвідношенням

$$D_0 = \frac{D}{u_n} = \frac{t_m}{2t_m} = \frac{1}{2} = 0,5. \quad (4)$$

У випадку $t_m \neq t_\delta$ таке співвідношення має вигляд

$$D_0 = \frac{t_\delta}{t_\delta + t_m} = \frac{1}{\frac{t_\delta + t_m}{t_\delta}} = \frac{1}{1 + q}. \quad (5)$$

Недоліком описаного підходу до мінімізації імовірності відмов є відносно велика імовірність попереджувальної заміни елементів, що відбувається на зменшенні їх фактично використовуваного ресурсу. Одним з ефективних способів усунення цього недоліку служить застосування декількох допустимих значень за одним параметром стану, що залежать від порядкового номера діагностування. З огляду на те, що в міру наробітку відмовляють елементи зі зменшуваною швидкістю зношування, можна вивести формулу відхилення параметрів, що допускається, при i -тій перевірці з огляду на те, що у ході експлуатації першими відмовляють елементи, що зношуються швидше, для визначення допустимих відхилень їх параметрів при i -й перевірці можна вивести формулу

$$D_{0i} = \left(\frac{i}{i+1} \right)^\alpha; \quad \Pi_{Di} = \left(\frac{i}{i+1} \right)^\alpha u_n + \Delta\Pi. \quad (6)$$

Неважко побачити, що при $i=1$ рівняння (6) перетворюється в рівняння (5) при використанні одного допустимого значення параметра. При першій перевірці відношення в круглих дужках дорівнює 0,5, при другій — 0,66, при третій — 0,75, при четвертій — 0,80. Таким чином, з кожною подальшою перевіркою допустиме відхилення підвищується, а, значить, наближається термін попереджувальної заміни елементів.

Описаний спосіб має безсумнівну перевагу через більш повне використання ресурсу при максимальній безвідмовності у випадку реалізації параметра стану. Недоліком такого способу є необхідність уведення декількох значень допустимого параметра та постійного обліку порядкового номера перевірки кожного елемента, що в організаційному відношенні є дуже складним.

Більш простий шлях зменшення імовірності попереджувальної заміни елемента при даних реалізаціях полягає в обліку його наробітку, тобто у використанні рівняння

$$D_{0t} = \left(\frac{t}{t+t_m} \right)^\alpha \quad \text{чи} \quad \Pi_{Dt} = \left(\frac{t}{t+t_m} \right)^\alpha u_n + \Delta\Pi, \quad (7)$$

де t_m — майбутній міжконтрольний наробіток.

У цьому випадку отриманий результат наближається до отриманого у випадку застосування методу прогнозування за реалізацією.

На практиці часто виникає необхідність установити імовірність виникнення відмови чи безвідмовної роботи за визначений період, наприклад за міжконтрольний. У цьому випадку середню імовірність відмови за міжконтрольний період можна визначити за формулою

$$q(D, t_m) = \frac{Q(D, t_m)}{T_0(D, t_m)} = \frac{Q(D, t_m)t_m}{T_{cp}(D, t_m)}, \quad (8)$$

а середню імовірність безвідмовної роботи за формулою

$$p(D, t_m) = 1 - q(D, t_m)$$

чи, використовуючи (1), -

$$p(D, t_m) = 1 - D_0^{d-n} / T_0.$$

При відмові елемента за кількома незалежними параметрами машини, ресурсними параметрами (зміна одного з них не залежить від іншого) імовірність безвідмовної роботи за міжконтрольний наробіток елемента машини становитиме

$$P_c = \prod_{i=1}^k p_i(D, t_m) = \prod_{i=1}^k \left[1 - \frac{Q_i(D, t_m)}{T_{0i}(D, t_m)} \right]. \quad (9)$$

Висновки

Наведені у статті формули зазвичай застосовують у випадку стаціонарного сталого потоку відмов. У початковий період роботи імовірності відмов і безвідмовної роботи системи, що складається з декількох елементів, визначають у кожному міжконтрольному періоді, наприклад, за формулою (9).

Установлюючи залежність взаємозалежного виникнення відмов елементів враховується те, що вона може бути обумовлена загальним режимом і умовами роботи газоперекачувальних агрегатів як елементів системи чи/та зміною умов роботи одного елемента при відмові іншого, сполученого з ним.

Література

1. Руднік А. А. Методика узагальненого оцінювання та підвищення ефективності функціонування систем трубопровідного транспорту газу. *Нафтова і газова промисловість*. 2000. № 6. С. 36 – 38.
2. Настенко Є. А., Павлов В. А., Городецка О. К., Корнієнко Г. А. Методи моделювання складних систем і процесів: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 144 с.
3. Пасічник В. В., Вykлюк Я. І., Камінський Р. М. Моделювання складних систем: посібник. Львів: Новий Світ, 2017. 404 с.
4. Грудз В. Я., Грудз В. Я. (мол.). Удосконалення методу діагностування витоків з газопроводу на основі дослідження процесу розповсюдження збурень. *Прикарпатський вісник НТШ. Число*. 2017. № 1 (37). С. 217.

5. Грудз В. Я., Грудз Я. В., Костів В. В. Технічна діагностика трубопровідних систем. Івано-Франківськ: Лілея-НВ, 2012. 512 с.
6. Грудз Я. В. Енергоефективність газотранспортних систем. Івано-Франківськ: Лілея-НВ, 2012. 186 с.
7. Грудз В. Я., Грудз Я. В., Костів В. В. Аналітичні дослідження витоків газу з газопроводу. *Матеріали міжнарод. наук.-техн. конф. «Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу»*. м. Івано-Франківськ, 15-18 травня 2012. С.66-67.
8. Сусак О.М., Касперович В.К., Андрішин М.П. Трубопровідний транспорт газу: підручник. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2013. 345 с.
9. Яковлев Є. І., Казак О. С., Михалків В. Б. Режими газотранспортних систем. Львів: Світ, 1992. 170 с.
10. Ковалко М. П., Грудз В. Я., Михалків В. Б. Трубопровідний транспорт газу. Київ: АренаЕКО, 2002. 600 с.
11. Grudz V.Ya., Grudz V.Ya. (junior), Zapukhlyak V.B., Kyzymyshyn Ya.V. Non-stationary processes in the gas transmission systems at compressor stations shut-down. *Journal of hydrocarbon power engineering*. 2018. Vol. 3 Iss. 1. P. 22-28.
12. Filipchuk O., Grudz V., Marushchenko V., Myndiuk V., Savchuk M. Development of cleaning methods complex of industrial gas pipelines based on the analysis of their hydraulic efficiency. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2018. № 2(8). С. 62-71. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2018_2%288%29_9

References

1. Rudnik A. A. Metodyka uzahalnenoho otsiniuvannia ta pidvyshchennia efektyvnosti funktsionuvannia system truboprovidnoho transportu hazu. *Naftova i hazova promyslovist*. 2000. No 6. P. 36 – 38. [in Ukrainian]
2. Nastenko Ye. A., Pavlov V. A., Horodetska O. K., Korniienko H. A. Metody modeliuвання skladnykh system i protsesiv: navchalnyi posibnyk. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2022. 144 p. [in Ukrainian]
3. Pasichnyk V. V., Vykliuk Ya. I., Kaminskyi R. M. Modeliuвання skladnykh system: posibnyk. Lviv: Novyi Svit, 2017. 404 p. [in Ukrainian]
4. Hrudz V. Ya., Hrudz V. Ya. (mol.). Udoskonalennia metodu diahnostuvannia vytokiv z hazoprovodu na osnovi doslidzhennia protsesu

rozpovsiudzhennia zburen. *Prykarpatskyi visnyk NTSh. Chyslo*. 2017. No 1 (37). P. 217. [in Ukrainian]

5. Hrudz V. Ya., Hrudz Ya. V., Kostiv V. V. *Tekhnichna diahnostryka truboprovodnykh system*. Ivano-Frankivsk: Lileia-NV, 2012. 512 p. [in Ukrainian]

6. Hrudz Ya. V. *Enerhoefektyvnist hazotransportnykh system*. Ivano-Frankivsk: Lileia-NV, 2012. 186 p. [in Ukrainian]

7. Hrudz V. Ya., Hrudz Ya. V., Kostiv V. V. *Analitychni doslidzhennia vytokiv hazu z hazoprovodu. Materialy mizh narod.nauk.-tekhn. konf. «Problemy i perspektyvy transportuvannia nafty i hazu»*. m. Ivano-Frankivsk, 15-18 travnia 2012. P. 66-67. [in Ukrainian]

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

9. Iakovliev Ye. I., Kazak O. S., Mykhalkiv V. B. *Rezhymy hazotransportnykh system*. Lviv: Svit, 1992. 170 p. [in Ukrainian]

10. Kovalko M. P., Hrudz V. Ya., Mykhalkiv V. B. *Truboprovodnyi transport hazu*. Kyiv: ArenaEKO, 2002. 600 p. [in Ukrainian]

11. Grudz V.Ya., Grudz V.Ya. (junior), Zapukhlyak V.B., Kyzymyshyn Ya.V. Non-stationary processes in the gas transmission systems at compressor stations shut-down. *Journal of hydrocarbon power engineering*. 2018. Vol. 3 Iss. 1. P. 22-28.

12. Filipchuk O., Grudz V., Marushchenko V., Myndiuk V., Savchuk M. Development of cleaning methods complex of industrial gas pipelines based on the analysis of their hydraulic efficiency. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. No 2(8). C. 62-71. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2018_2%288%29_9