

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ РОЗРАХУНКУ ЕФЕКТИВНОГО КОЕФІЦІЄНТА КОРИСНОЇ ДІЇ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТИВ

В. Я. Грудз, Р. Б. Стасюк*, Я. Т. Крупняк, С. В. Ткачівський, Р. В. Хай

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

Порівняльний аналіз різних методів розрахунку коефіцієнта корисної дії відображає переваги та недоліки даних обчислень. Деякі методи можуть бути більш точними, але вимагати складних обчислень або додаткової інформації, тоді як інші можуть бути менш точними, але більш простими у використанні. Порівняння таких методів допомагає вибрати найбільш підходящий для конкретних умов. Розглянуто різні способи для розрахунку ККД, включаючи традиційні та сучасні, методологія енергетичного балансу та термодинамічні підходи та методи, що базуються на математичних моделях. Кожен метод аналізувався з точки зору його точності, складності в застосуванні та придатності для реальних умов експлуатації газоперекачувальних агрегатів. Розроблені методи розрахунку ефективного ККД можуть бути успішно застосовані в практиці газотранспортних систем для оцінки роботи газоперекачувальних агрегатів, що дадуть змогу оптимізувати її роботу з урахуванням технічних та експлуатаційних факторів. Результати дослідження характеризують точність розрахунків ефективного коефіцієнта корисної дії та визначають переваги та недоліки кожного методу. Визначаючи найбільш ефективні методи розрахунку ККД для газоперекачувальних агрегатів, робота робить цінний внесок у розвиток науки та практики енергозбереження в промисловості. Загальний аналіз результатів дослідження дозволить сформулювати рекомендації щодо вибору оптимальних методів розрахунку ефективного коефіцієнта корисної дії для газоперекачувальних агрегатів, що сприятиме підвищенню їхньої продуктивності та зниженню енерговитрат.

Ключові слова: компресорна станція, коефіцієнт корисної дії, ресурс, газоперекачувальні агрегати, оптимізація.

A comparative analysis of different methods of calculating efficiency shows their advantages and disadvantages. Some methods may be more accurate but require complex calculations or additional information, while others may be less accurate but easier to use. Comparing such methods helps to select the most appropriate one for specific conditions. Different approaches to calculating efficiency are considered, including traditional and modern methods such as energy balance methodology, thermodynamic approaches and methods based on mathematical models. Each method has been analysed in terms of its accuracy, complexity of application and suitability for real operating conditions of gas pumping units. The developed methods of calculating the effective efficiency can be successfully applied in practice of gas transportation systems to evaluate the operation of gas pumping units. Their application allows to ensure the effective functioning of the system and to optimise its operation taking into account technical and operational factors. The results of the study provide a detailed insight into the field of effective efficiency calculations and reflect the advantages and disadvantages of each method. By determining the most effective methods of calculating the efficiency of gas pumping units, the work makes a valuable contribution to the development of the science and practice of energy saving in industry. The general analysis of the research results will make it possible to formulate recommendations regarding the selection of optimal methods for calculating the effective efficiency of gas pumping units, which will contribute to increasing their productivity and reducing their energy consumption.

Key words: compressor station, efficiency factor, resource, gas pumping units, optimization.

Вступ

У сучасному світі ефективність енерговитрат та оптимізація роботи газоперекачувальних агрегатів є важливим завданням, яке привертає увагу дослідників та промислових підприємств. У цій роботі проведено порівняльний аналіз різних методик розрахунку ефективного коефіцієнта корисної дії та їх застосовність до газоперекачувальних агрегатів різних типів. Пред-

ставлено результати дослідження, яке базується на комплексному аналізі наукової літератури та практичних даних з експлуатації газоперекачувальних агрегатів.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Розрахунок ефективної потужності та ККД агрегату виконано для шести газоперекачува-

льних агрегатів за методиками відомих учених Зарицького С.П., Лопатіна А.С., Поршаківа Б.П., Степанова О.В., Шабарова А.Б. Розрахунок проводиться з метою якісного порівняння існуючих методик визначення N_e , η_e і виявлення їх застосовності на практиці для діагностування газоперекачувальних агрегатів. У розрахунковій схемі вказано основні конструктивні елементи газоперекачувального агрегата та параметри, виміряні на агрегатах за допомогою штатних і спеціально встановлених вимірювальних приладів, необхідних для отримання достатньої первинної інформації, використовуваної в розрахованих методиках.

Мета та завдання досліджень

Дослідити та порівняти різні методики розрахунку ефективного коефіцієнта корисної дії газоперекачувальних агрегатів типу ГТК-10 з метою визначення їхньої точності, простоти в застосуванні та придатності для реальних умов експлуатації ГПА.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

З повітрязабірної камери повітря відбирається з параметрами T_a і P_a , які реєструються штатними приладами. Перед першою ступінню осьового компресора внаслідок всмоктування температура та тиск повітря дещо змінюються до величини T_0 і P_0 . В осьовому компресорі повітря стискається і на виході з переходить у T_c , P_c . Стиснене повітря надходить у теплообмінник і підігрівається до температури T_v , а тиск становить при цьому P_v . Стиснене і підігрите повітря прямує в камеру згоряння, де змішується з паливним газом, який подається окремим паливопроводом. Параметри паливного газу T_b , P_b , ΔP реєструються додатковою апаратурою. Продукти згоряння надходять у турбіну високого тиску із параметрами T_z і P_z , а при цьому T_z розраховується, а P_z реєструється штатною апаратурою. Розраховується максимальна кількість продуктів між турбіною високого тиску і турбіною низького тиску. Продукти згоряння на виході з турбіни низького тиску мають параметри T_s і P_s . Додатково встановлений витратомір продуктів згоряння реєструє ΔP як на лівому, так і на правому газоходах. З нагнітанням температури реєструються параметри газу T_1 , P_1 і T_2 , P_2 , а також частота обертання ротора нагнітача $n = n_{ТНД}$ і ротора осьового компресора ($n_{OK} = n_{ТВД}$).

Опишемо розрахунок ефективної потужності, заснований на методиці Степанова О.А., Чекардовського М.М., Чекардовського С.М.

Температура продуктів згоряння перед ТВД:

$$T_Z = \frac{0,98 \cdot Q_H^P + C_{PB} \cdot (\alpha \cdot L_0 \cdot T_V + T_0)}{C_{PB} \cdot (\alpha \cdot L_0 + 1)}. \quad (1)$$

Потужність осьового компресора:

$$N_{OK} = M_B \cdot C_{PB} \cdot (T_C - T_0). \quad (2)$$

Потужність турбіни високого тиску за умови, що турбіна та осьовий компресор розміщені на одному валу:

$$N_e = 10000 \cdot \left(\frac{4300}{4800} \right)^3 = 6913,152 \text{ кВт}. \quad (3)$$

Температура продуктів згоряння за ТВД:

$$C_{P_{ПС}} = 0,9796 + 0,000283 \cdot \frac{T_S + T_C}{2}; \quad (4)$$

$$T_S = T_Z - \frac{N_{ТВД}}{M_{ПС} \cdot C_{P_{ПС}}}. \quad (5)$$

Ефективна потужність ГПА:

$$N_e = M_{ПС} \cdot C_{P_{ПС}} \cdot (T_S - T_S). \quad (6)$$

Ефективний ККД ГПА:

$$\eta_e = \frac{N_e}{B \cdot Q_H^P}. \quad (7)$$

При розрахунку ефективної потужності за першою методикою, ефективний ККД розраховуються таким чином:

$$N_e = N_{eНОМ} \cdot \left(\frac{n}{n_{НОМ}} \right)^3; \quad (8)$$

$$\eta_e = \frac{N_e}{B \cdot Q_H^P}; \quad (9)$$

Наступна методика, яка ґрунтується на напрацюваннях Шабарова А.Б.

Ступінь розширення продуктів згоряння в турбіні:

$$\pi_T = \frac{P_T}{P_T}. \quad (10)$$

Для розрахунку температури продуктів згоряння перед ТВД приймається $\kappa = 1,33$:

$$T_T = \frac{T_T}{1 - \left(1 - \pi_T^\kappa \right) \cdot \eta_L}. \quad (11)$$

Для розрахунку відносної витрати палива та витрати повітря знаходимо теплоємності повітря та продуктів згоряння C_{P_6} та C_{P_2} відповідно, при температурах T_p та T_z ,

$$g_m = \frac{C_{P_T} \cdot T_T - C_{P_6} \cdot T_P}{Q_H^P \cdot G_m - (C_{P_T} \cdot T_T - C_{P_T} \cdot T_0)}; \quad (12)$$

Таблиця 1 – Результати розрахунків ефективної потужності для шести газоперекачувальних агрегатів за різними методиками

Агрегат №		1	2	3	4	5	6
Величина	Размірність	Значення					
Методика 1, варіант 1А							
N_e	кВт	7895	7882	7263	7422	8585	9763
η_e		0,287	0,289	0,268	0,227	0,266	0,285
Методика 1, варіант 1В							
N_e	кВт	7189	6990	6232	6795	7290	10000
η_e		0,26	0,255	0,23	0,244	0,225	0,292
Методика 2							
N_e	кВт	6471	5856	6184	6724	8521	9282
η_e		0,234	0,214	0,228	0,241	0,263	0,271
Методика 3							
N_e	кВт	7279	7235	6545	6317	7126	9104
η_e		0,236	0,237	0,23	0,24	0,244	0,256
Методика 4А							
N_e	кВт	7510	6916	7560	7280	9473	9859
η_e		0,272	0,253	0,279	0,261	0,293	0,287
Методика 4В							
N_e	кВт	9077	8335	8430	8471	8885	9164
η_e		0,329	0,305	0,311	0,304	0,275	0,267

$$M_B = \frac{G_m}{g_m} \quad (13)$$

Для визначення питомих робіт компресора та турбін знаходимо теплоємності повітря та продуктів згоряння C_{P_6} і C_{P_2} відповідно, в заданому інтервалі температур: T_C, T_a (для повітря в компресорі) і T_T, T_S (для продуктів згоряння в турбінах):

$$L_K = C_{P_6} \cdot (T_K - T_a); \quad (14)$$

$$L_T = C_{P_T} \cdot (T_T - T_T). \quad (15)$$

Ефективна потужність ГПА:

$$N_e = L_T \cdot (G_m + G_B) \cdot \eta_M - L_K \cdot G_B. \quad (16)$$

Для розрахунку ефективного ККД ГПА визначаються питома потужність та питома витрата палива:

$$N_{e,yd} = \frac{N_e}{M_B}; \quad (17)$$

$$C_e = \frac{3600 \cdot g_m}{N_{e,yd}}; \quad (18)$$

$$\eta_e = \frac{3600}{C_e \cdot Q_H^P}. \quad (19)$$

Розрахунок ТПП, що ґрунтується на методиках Зарицького С.П. Методика № 4А та № 4В.

При варіанті 4А ступінь розширення продуктів згоряння в турбінах, необхідний для визначення потужності параметра Б, становить:

$$\varepsilon_T = \frac{P_Z}{P_S}. \quad (20)$$

За даними Зарицького С. П. визначається параметр Б залежно від ε_T і розраховується ефективна потужність:

$$N_e = B \cdot P_S \cdot 101971 \cdot \sqrt{T_S}. \quad (21)$$

При варіанті розрахунку 4В коефіцієнт К матиме вигляд:

$$K = 1,0164 \cdot \left(\frac{P_a}{P_{НОМ}} \right)^{1,5} \cdot \left(\frac{T_a}{T_{НОМ}} \right)^{0,5}; \quad (22)$$

$$N_e = A \cdot K \cdot (101936 \cdot \Delta P_K)^{1,5}; \quad (23)$$

$$\eta_e = \frac{N_e}{B \cdot Q_H^P}. \quad (24)$$

На основі даних методик було проведено ряд розрахунків ефективної потужності для шести газоперекачувальних агрегатів, а результати подані у таблиці 1. Порівняльний розрахунок відхилень значень ефективної потужності подано в таблиці №2 та коефіцієнт корисної дії газоперекачувальних агрегатів подано відповідно у таблиця №3.

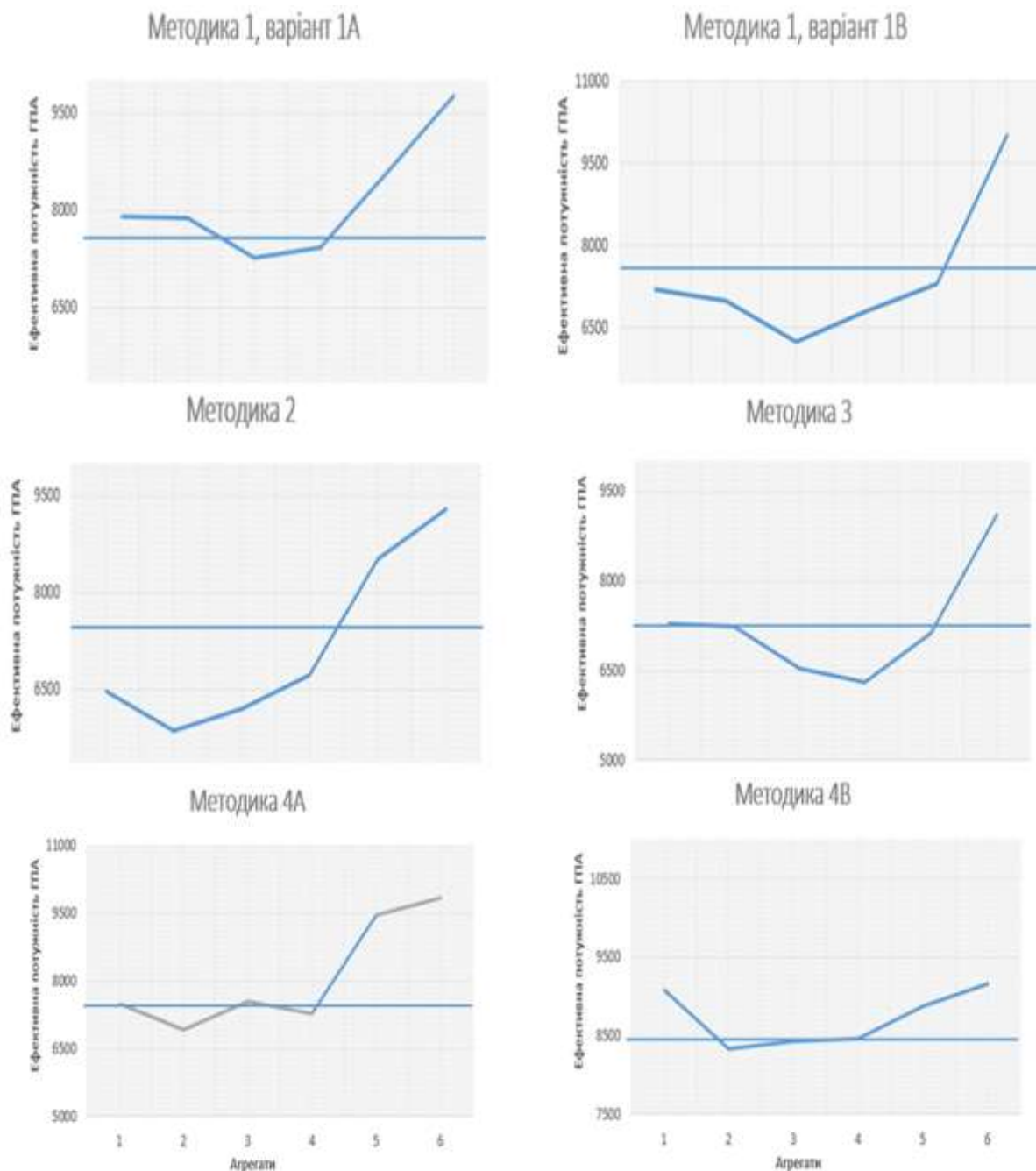


Рисунок 1 – Результати розрахунку ефективної потужності ГПА за різними методиками для шести агрегатів

Таблиця 2 – Відхилення розрахункових значень ефективної потужності ГПА (кВт) від середньостатистичного значення

Методики	Агрегат					
	1	2	3	4	5	6
1А	1,64	2,95	1,02	-2,65	0,43	0,84
1В	-0,91	-0,31	-2,78	-0,88	-3,57	1,53
2	-3,52	-4,46	-2,96	-1,14	0,24	-0,56
3	-3,38	-2,2	-2,73	-1,32	-1,66	-2,03
4А	0,24	-0,58	2,12	0,85	3,19	1,12
4В	5,93	4,61	5,33	5,14	1,36	-0,9
Середнє значення	27	25,9	25,8	25,3	26,2	27,7

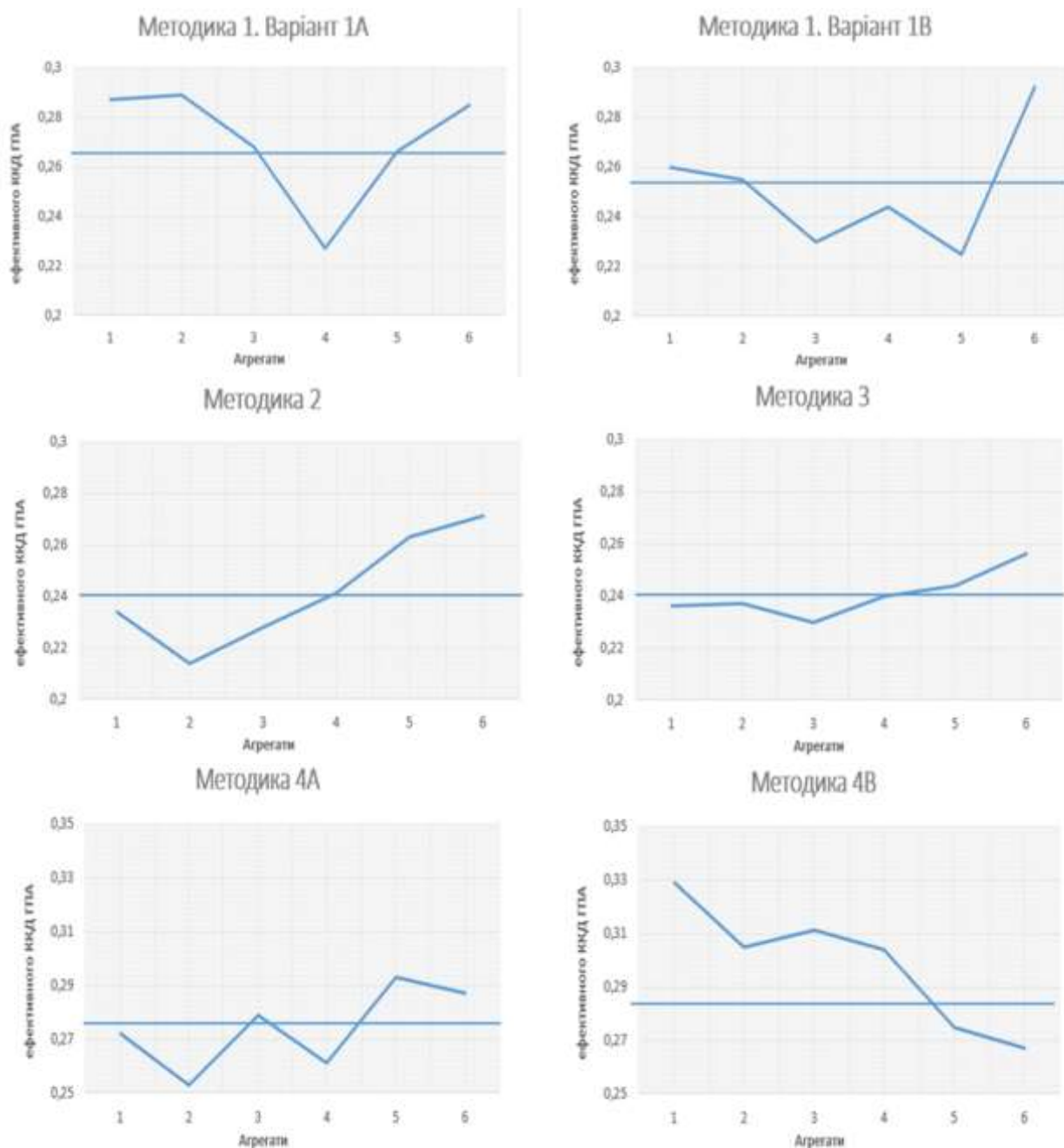


Рисунок 2 – Результати розрахунку ефективного ККД ГПА за різними методиками для шести агрегатів

Таблиця 3 – Відхилення розрахункових значень ефективного ККД ГПА(%) від середньостатистичного значення

Методики	Агрегат					
	1	2	3	4	5	6
1А	1,64	2,95	1,02	-2,65	0,43	0,84
1В	-0,91	-0,31	-2,78	-0,88	-3,57	1,53
2	-3,52	-4,46	-2,96	-1,14	0,24	-0,56
3	-3,38	-2,2	-2,73	-1,32	-1,66	-2,03
4А	0,24	-0,58	2,12	0,85	3,19	1,12
4В	5,93	4,61	5,33	5,14	1,36	-0,9
Середнє значення	27	25,9	25,8	25,3	26,2	27,7

Висновки

Методи розрахунку ефективного ККД газоперекачувальних агрегатів мають свої переваги та недоліки, залежно від точності, складності реалізації та придатності до реальних умов експлуатації.

У роботі порівняно традиційні та сучасні підходи, включаючи методологію енергетичного балансу, термодинамічні моделі та математичні методи, що дозволило виявити найефективніші підходи.

Запропоновані підходи можуть бути інтегровані в газотранспортні системи, забезпечуючи стратегічне планування обслуговування, покращення технічного стану обладнання та довготривалу економічну ефективність.

Проведений аналіз та рекомендації сприятимуть підвищенню енергоефективності у промисловості, роблячи внесок у розвиток енергозбереження в галузі.

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: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 144 с.
3. Пасічник В.В., Виклюк Я., 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»*. 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 [Text]. *Journal of hydrocarbon power engineering*. 2018. No 1(5). 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 (92). P. 62-71.

References

1. Rudnik A.A. Metodyka uzahalnenoho otsiniuvannya ta pidvyshchennia efektyvnosti funktsionuvannya system truboprovidnoho transportu hazu. *Naftova i hazova promyslovist*. 2000. No 6. P. 36 – 38.
2. Nastenko Ye.A., Pavlov V.A., Horodetska O.K., Korniienko H.A. Metody modeliuvannya skladnykh system i protsesiv: navch. posib. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2022. 144 p.
3. Pasichnyk V.V., Vykliuk Ya.I., Kaminskyi R.M. Modeliuvannya skladnykh system: posibnyk. Lviv: Novyi Svit, 2017. 404 p.
4. Hrudz V.Ya., Hrudz V.Ya. (molodshyi). Udoskonalennia metodu diahnostuvannya vytokiv z hazoprovodu na osnovi doslidzhennia protsesu rozpovsiudzhennia zburien. *Prykarpatskyi visnyk NTSh. Chyslo*. 2017. No 1 (37). S. 217.
5. Hrudz V.Ya., Hrudz Ya.V., Kostiv V.V. Tekhnichna diahnostyka truboprovodnykh system. Ivano-Frankivsk: Lileia-NV, 2012. 512 p.
6. Hrudz Ya.V. Enerhoefektyvnist hazotransportnykh system. Ivano-Frankivsk: Lileia-NV, 2012. 186 s.
7. Hrudz V.Ya., Hrudz Ya.V., Kostiv V.V. Analychni doslidzhennia vytokiv hazu z hazoprovodu. *Materialy mizhnarod. nauk.-tekh. konf. «Problemy i perspektyvy transportuvannya nafty i hazu»*. Ivano-Frankivsk, 15-18 travnia 2012. P. 66-67.
8. Susak O.M., Kasperovych V.K., Andriishyn M.P. Truboprovidnyi transport hazu: pidruchnyk. Ivano-Frankivsk: IFNTUNH, 2013. 345 p.

9. Iakovliev Ye. ., Kazak O.S., Mykhalkiv V.B. Rezhymy hazotransportnykh system. Lviv: Svit, 1992. 170 p.

10. M.P. Kovalko, V.Ia. Hrudz, V.B. Mykhalkiv. Truboprovidnyi transport hazu. Kyiv: ArenaEKO, 2002. 600 p.

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 [Text]. *Journal of hydrocarbon power engineering*. 2018. No 1(5). 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 (92). P. 62-71.