УДК 629.735.083.03.004.58:004.801.3(045) DOI 10.33042/2522-1809-2021-1-161-274-279

Б.С. Ільченко[1], О.В. Єфімов[2], О.В. Ромашко[1], Р.Б. Ткаченко[1]

[1]Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна
[2]Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна

МЕТОД НАБЛИЖЕНОГО РОЗРАХУНКУ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ

Описано метод наближеного розрахунку функціональних характеристик газоперекачувальних агрегатів та параметричного діагностування величини зносу ущільнення робочого колеса відцентрових нагнітачів магістральних газопроводів. Отримано залежності впливу зносу ущільнення на продуктивність, потужність та ККД нагнітачів. Описана архітектура комплексу програм, необхідні загальносистемні і технічні засоби для проведення обчислень за розробленим методом у складі АСК ТП газотранспортної системи.

Ключові слова: *АСК ТП, газотранспортна система, параметрична діагностика, газоперекачувальний агреат, відцентровий нагнітач, потужність, продуктивність ГПА.*

Постановка проблеми

Економічність роботи компресорних станцій, обсяги перекачуємого газу, виконання планів постачань газу споживачам і безпечне функціонування газотранспортної системи (ГТС) України значною мірою залежить від функціонально-технічного стану (ФТС) газоперекачувального обладнання. Тому особливого значення набувають розроблення і впровадження нових методів і засобів діагностування, здатних забезпечити об'єктивну оцінку фактичного ФТС обладнання. На підставі даних про фактичний стан обладнання можлива його подальша ефективна експлуатація завдяки переходу від традиційного технічного обслуговування до ресурсозбережувального. Такий підхід істотно зменшить витрати на підтримку обладнання у працездатному стані завдяки об'єктивній інформації для формування плану ремонтів і реновації устаткування компресорних станцій (КС) магістральних газопроводів України, дозволить оптимізувати технологічні процеси і підвищити надійність транспортування газу.

За результатами аналізування можливих постановок задачі визначення ФТС ВЦН для рішення режимно-технологічних задач на рівні КС установлено, що найточніші достовірні оцінки можна отримати завдяки визначенню залежностей впливу зносу конструктивних елементів проточної частини на фактичні параметри режимів роботи ВЦН.

Експериментальними дослідженнями встановлено, що під час транспортування газу, який не містить абразивних домішок, переважний вплив на погіршення показників ФТС здійснює збільшення проміжку в ущільненні покривного диску. Збільшення проміжку спричиняє збільшення перетікання газу з області високого тиску в область низького тиску, що відповідним чином змінює значення параметрів режиму роботи – витрати, міри стискання, потужності і ККД.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Розглянуто найбільш значимі роботи і результати принципового характеру в частині методів і моделей параметричної діагностики ВЦН і ГТУ.

У відомих роботах викладено цілісну концепцію діагностування ГПА з газотурбінним приводом, що охоплює різні аспекти параметричного контролю і багатофакторного діагностування технічного стану ГПА. Згідно з цією концепцією, параметричний контроль передбачає оцінювання ефективності функціонування ГПА за зміною його основних вихідних показників, зумовленою інтегральним впливом усіх можливих дефектів структурних елементів ГПА. Оцінювання стану проточної частини ВЦН запропоновано реалізувати на підставі експериментально виявленого взаємозв'язку зміни ККД нагнітача із зсувом його витратно-напірної характеристики.

Задачу багатофакторного діагностування з розпізнаванням дефектів проточних частин запропоновано вирішувати за допомогою діагностичних моделей згідно з [1,2,3] у вигляді матриць. Однак, слід зазначити, що рішення задачі багатофакторного діагностування вимагає збільшення наборів заміряних параметрів ВЦН і ГТУ, а запропоновані методи параметричного контролю визначають зміну режимів експлуатації ГПА. У багатьох випадках такі зміни режимів досить складні.

Підхід [4,5] до визначення технічного стану ГПА пов'язаний з визначенням коефіцієнтів

 © Ільченко Б.С., Єфімов О.В., Ромашко О.В., Ткаченко Р.Б.

технічного стану ВЦН і ГТУ на основі термогазодинамічної моделі ГПА, що враховує різні види дефектів елементів компресорів, турбін і нагнітача. Фактичні параметри розраховують відповідно до запропонованої однопараметричної моделі. Обчислення коефіцієнтів потребує додаткової інформації про об'ємну продуктивність ВЦН. У штатних умовах експлуатації ГПА на КС вимірювання таких показників виконується з великими похибками.

Більш деталізований підхід до визначення вихідних показників стану ГПА, що відповідає вимогам стандарту ISO 5389-1992 представлено у методичних вказівках ВНДІГАЗ. Відмінною рисою методичних указівок є обчислення ефективної потужності ГТУ через внутрішню потужність нагнітача, що у свою чергу розраховують з використанням інформації датчика перепаду тиску газу на звужувальному пристрої нагнітача і густини газу. Велика похибка обчислення масової витрати газу на вході нагнітача (10%–20%) не дозволяє використовувати ці методичні вказівки для оцінювання ФТС ГПА безпосередньо в умовах КС. Крім того у методичних вказівках немає аналізу впливу похибок каналів вимірювання параметрів ВЦН і ГТУ на визначені характеристики і не розглянуто питання оцінки достовірності отриманих результатів.

Для підвищення точності результатів діагностування ФТС ГПА, виходячи з максимуму вірогідності, вирішена задача вибору виду оцінок ВЦН і ГТУ. Запропоновано поняття сукупності узагальнених дефектів проточної частини ВЦН, що встановлює однозначну відповідність між значенням кожного виду узагальненого дефекту з цієї сукупності і положенням розрахункових приведених характеристик ВЦН і ГТУ щодо відповідних паспортних характеристик.

У роботі обґрунтована необхідність використання загальних системних принципів синтезу методів і моделей оцінювання фактичного ФТС ГПА.

Системні принципи разом із прийнятими розрахунковими умовами регламентують реалізацію необхідної сукупності взаємно скоординованих методів і моделей у вигляді єдиної методології. Регламентація розробок реалізована на рівні вимог, обмежень і критеріїв синтезу кожного методу і кожної моделі.

За результатами виконаного аналізу методів параметричної діагностики ГПА слід зазначити такі обставини:

- немає методології, що дозволяє визначати фактичний ФТС ГПА з достовірністю, необхідною для рішення технологічних задач керування і технічного обслуговування за параметрами ГПА, виміряними приладами агрегатної і цехової автоматики, якщо не виконують вимірювання комерційної продуктивності ВЦН і потужності ГТУ;
- комерційну продуктивність ВЦН розраховують за перепадом тиску газу на звужувальному пристрої з ненормованою похибкою (більше 10 %), що зумовлює значні похибки визначення фактичних характеристик ВЦН;
- немає розвинутого програмно-математичного забезпечення моделювання газодинамічних процесів у ВЦН і ГТУ, верифікованого за результатами експериментальних досліджень на КС.

Виклад основного матеріалу

Для визначення величини зносу ущільнення δ і відповідних йому фактичних характеристик ВЦН розроблено метод, що ґрунтується на газодинамічному розрахунку ступеня проточної частини по перерізах, що обмежують її основні вузли: за вхідним напрямним апаратом, на вході і виході робочого колеса і лопаткового/безлопаткового дифузора.

У газодинамічному розрахунку використано рівняння збереження маси, збереження імпульсу і моменту імпульсу, збереження енергії. Теплофізичні властивості природного газу визначають за модифікованим рівнянням Бенедикта-Вебба-Рабіна.

Запропонований авторами метод передбачає наступне визначення коефіцієнтів втрат енергії у робочому колесі і лопатковому дифузорі з використанням паспортних характеристик та газодинамічного розрахунку проточної частини. Задачу вирішують одноразово для кожного типу нагнітача.

На підставі цього визначаються проміжки в ущільненні покривного диску й обчислюються фактичні характеристики ВЦН за виміряними параметрами нагнітача з використанням розрахованих коефіцієнтів втрат. Цю задачу вирішують періодично для кожного конкретного нагнітача. Дані зі штатних каналів вимірювання агрегатної автоматики використовують як вхідну оперативну інформацію.

Задачу визначення коефіцієнтів втрат запропоновано вирішувати в два етапи. На першому етапі визначають значення базових коефіцієнтів втрат у робочому колесі і лопатковому дифузорі на номінальному режимі роботи ВЦН. На другому етапі визначають залежність втрат від нерозрахункового кута натікання у робочих лопатках і нерозрахункового кута в дифузорних лопатках для всієї області допустимих режимів роботи нагнітача.

Послідовність вирішення задачі визначення коефіцієнтів втрат передбачає:

1. Вибір розрахункових вузлів у всій області допустимих режимів роботи ВЦН з рівномірним інтервалом по лініях однакової міри стискання і приведеної частоти обертання валу ВЦН:

$$\{\varepsilon_l\},\ l = \overline{0, NE}$$

та $\left\{\left[\frac{n}{n_н}\right]_{пр\ j}\right\}, j=\overline{0, NN}$,

де *NE* – кількість інтервалів за мірою

NN – кількість інтервалів за приведеною частотою обертання.

2. Розрахунок значення функціонала і визначення коефіцієнтів втрат. Коефіцієнти втрат $\zeta_{рк}, \zeta_{лд}$ визначають з умови мінімуму функціонала F_n:

$$F_n=\sum_{l=0}^{l=NE}\sum_{j=0}^{j=NN}\left(\begin{array}{l}\left(k_1\cdot(Q_{пр}^{р}(\zeta_{рк},\zeta_{лд},\varepsilon_l,\left[\frac{n}{n_н}\right]_{пр\ j})-Q_{пр}^{П}(\varepsilon_l,\left[\frac{n}{n_н}\right]_{пр\ j}))^2+\right.\\ \left.+k_2\cdot(\eta_{пол}^{р}(\zeta_{рк},\zeta_{лд},\varepsilon_l,\left[\frac{n}{n_н}\right]_{пр\ j})-\eta_{пол}^{П}(\varepsilon_l,\left[\frac{n}{n_н}\right]_{пр\ j}))^2\right)\end{array}\right)$$

де $Q_{пр}^{П}(\varepsilon_l,\left[\frac{n}{n_н}\right]_{пр\ j})$, $\eta_{пол}^{П}(\varepsilon_l,\left[\frac{n}{n_н}\right]_{пр\ j})$, – параметри режиму роботи ВЦН, отримані за допомогою паспортних характеристик нагнітача для вузла сітки з координатами *l, j*;

$Q_{пр}^{р}(\zeta_{рк},\zeta_{лд},\varepsilon_l,\left[\frac{n}{n_н}\right]_{пр\ j})$,

$Q_{пр}^{р}(\zeta_{рк},\zeta_{лд},\varepsilon_l,\left[\frac{n}{n_н}\right]_{пр\ j})$,

$Q_{пр}^{р}(\zeta_{рк},\zeta_{лд},\varepsilon_l,\left[\frac{n}{n_н}\right]_{пр\ j})$

– розрахункові значення параметрів режиму роботи ВЦН, отримані з застосуванням газодинамічного розрахунку для вузла сітки з координатами *l, j*;

k_1, k_2, k_3 – вагові коефіцієнти.

При мінімізації функціонала F_n на номінальному режимі роботи нагнітача коефіцієнти втрат $\zeta_{рк}, \zeta_{лд}$ визначають значення коефіцієнтів базових втрат $\zeta_{В\ рк}$, $\zeta_{В\ лд}$. На неномінальних режимах ці коефіцієнти визначають значення коефіцієнтів втрат від нерозрахункового кута натікання $\zeta_{i\ рк}, \zeta_{i\ лд}$.

Втрати енергії у поворотних колінах, напрямних апаратах, безлопаткових дифузорах, а також втрати, що характеризуються газодинамічними критеріями подоби, визначають за відомими емпіричними залежностями.

Величини зносу ущільнення й відповідні йому фактичні значення параметрів режиму визначають з газодинамічного розрахунку шляхом покрокової зміни величини проміжку в ущільненні покривного диску до збігання розрахункової температури газу на виході ВЦН із заміряною.

Аналіз достовірності визначення ФТС ВЦН за допомогою розробленого методу проводився:

- в умовах КС за інформацією від штатних засобів вимірювання шляхом порівняння розрахованих обсягів комерційної продуктивності ВЦН зі заміряними значеннями. Для ГПА, що вводять в експлуатацію, крім порівняння значень комерційної продуктивності, аналіз достовірності передбачав також порівняння значень розрахункової потужності нагнітача зі значеннями потужності, обчисленими за характеристиками ГТУ, отриманими під час приймальних випробувань;

- під час проведення теплотехнічних випробувань порівнянням розрахованої за параметрами ВЦН величини проміжку в ущільненні покривного диску із виміряною на розкритому нагнітачі.

Дослідження залежності впливу збільшення проміжків в ущільненнях покривних дисків на характеристики ВЦН, що відрізняються за кількістю ступінів стискання, при $n=n_{ном}$ і $Q_{пр}=Q_{пр\ ном}$ виконано для більшості типів ВЦН, що знаходяться в експлуатації. Установлено, що при номінальному значенні витрати газу зміна міри стискання,що викликана зносом ущільнення на 1 мм, у середньому становить: для одноступінчатого ВЦН– 0,2 %, для двоступінчатого – 0,4 %, для триступінчатого – 1,3 %, а зміна ККД – 1,3 %, 1,8 %, 3,8 % відповідно.

Як приклад на рис. 1–3 наведені залежності впливу збільшення проміжків в ущільненнях покривних дисків на характеристики ВЦН типу 520-12-1, Demag655 P2 і Ц-6,3С/41-1,7 у функції відносного збільшення проміжків ущільнень покривних дисків.

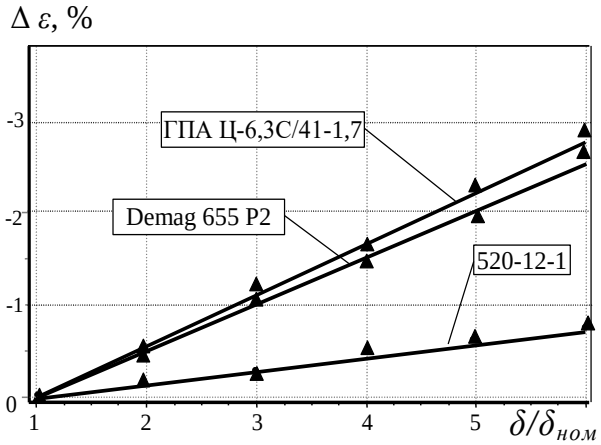

Рис. 1. Залежність зміни міри стискання від величини відносного збільшення проміжків ущільнень

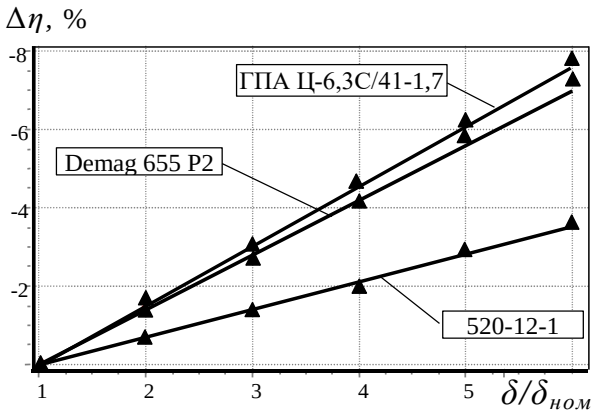

Рис. 2. Залежність зміни ККД від величини відносного збільшення проміжків ущільнень

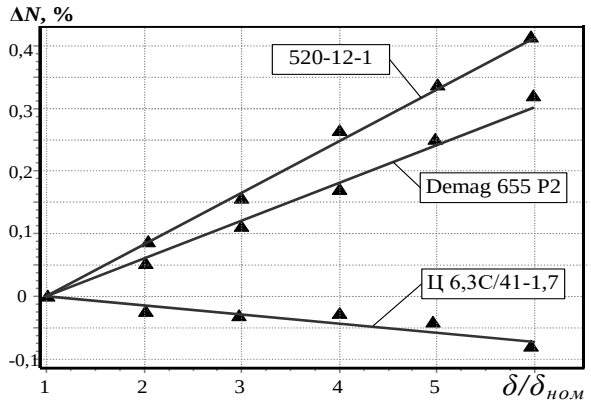

Рис. 3. Залежність зміни потужності від відносного збільшення проміжків

Отримані результати свідчать, що розрахунок фактичних характеристик ВЦН за допомогою запропонованого методу дозволяє врахувати вплив зносу ущільнень на фактичні параметри режиму на всьому діапазоні робочих навантажень одноступінчатих та багатоступінчатих нагнітачів.

Описаний метод реалізований комплексом програм, що дозволяють проводити розрахунок основних показників функціонально-технічного стану ВЦН ГПА: витратно-напірної, потужностної, політропного ККД характеристик. Ці показники використовуються для визначення сукупності питомих показників енергоефективності роботи кожного ГПА: ефективної потужності ГТУ, питомих витрат паливного газу з урахуванням обґрунтованого завантаження ГПА, що відображує реальні потреби в паливному газі.

Комплекс програм виконує наступні функції:

- обмін інформацією БД «Експерт»;
- розрахунок фактичних характеристик ВЦН і коефіцієнтів технічного стану за серією вимірювань;
- розрахунок показників режимів роботи ВЦН і ГТУ ГПА;
- відображення результатів розрахунків в графічному і табличному вигляді;
- контроль вірогідності вхідної інформації і результатів розрахунків.

Для функціонування програмного комплексу необхідні наступні вимоги.

Місце встановлення програмного комплексу: ПК;
CPU – 3000 Мгц ; RAM - 2000 Мбайт; HDD – 1000 Гбайт.

Необхідне програмне забезпечення:

- операційна система – Windows не нижче версії 7.0;
- зберігання даних – MS SQL Server версії 7.0;
- платформа – Net framework версії 1,1;
- драйвер – Microsoft Visual FoxPro Driver.

Архітектура програмного комплексу.

Розроблений програмний комплекс складається з наступних частин:

- програми організації обчислень;
- блоку розрахунку діагностичних параметрів;
- бази даних в середовищі MS SQL;
- блоку занесення розрахункової інформації по ВЦН в БД “Експерт”;
- блоку розрахунку режимних параметрів КЦ і фактичних характеристик ВЦН;
- блоку графічного і табличного відображення результатів.

Програмний комплекс «Розрахунок основних показників функціонально-технічного стану ВЦН ГПА» не функціонує в мережевій версії. І сервер БД, і сам програмний комплекс розміщені на одній робочі станції. На рисунку 4 наведено архітектуру програмного комплексу.

Висновки

Розроблено метод діагностування ФТС ВЦН на рівні КС, що ґрунтується на газодинамічному розрахунку проточної частини нагнітача та ідентифікації коефіцієнтів втрат у робочих та дифузорних лопатках нагнітача за паспортними характеристиками ВЦН. Виконано дослідження та отримано залежності впливу зносу ущільнення робочого колеса на фактичні характеристики одно-, дво- і триступінчатих ВЦН.

Порівняння залежностей міри стискання і ККД від величини проміжку покривного диска, отриманих розрахунковим шляхом, з даними експериментальних досліджень для ВЦН типу 520-12-1 показало розбіжність не більше 5 %. Експериментально підтверджено точність визначення радіального проміжку в ущільненнях робочого колеса на прикладі нагнітачів типу "Demag" 655 P2. Відхилення розрахованих величин проміжків від результатів їхніх прямих вимірювань на розкритій проточній частині не перевищили 0,15 мм. Відхилення розрахункових значень витрат перекачуємого газу ВЦН від виміряних системами комерційного обліку газу,

точність яких не нижче за 1,5 %, становить 1,5 ÷ 3,0 % залежно від типу ВЦН та режиму його роботи.

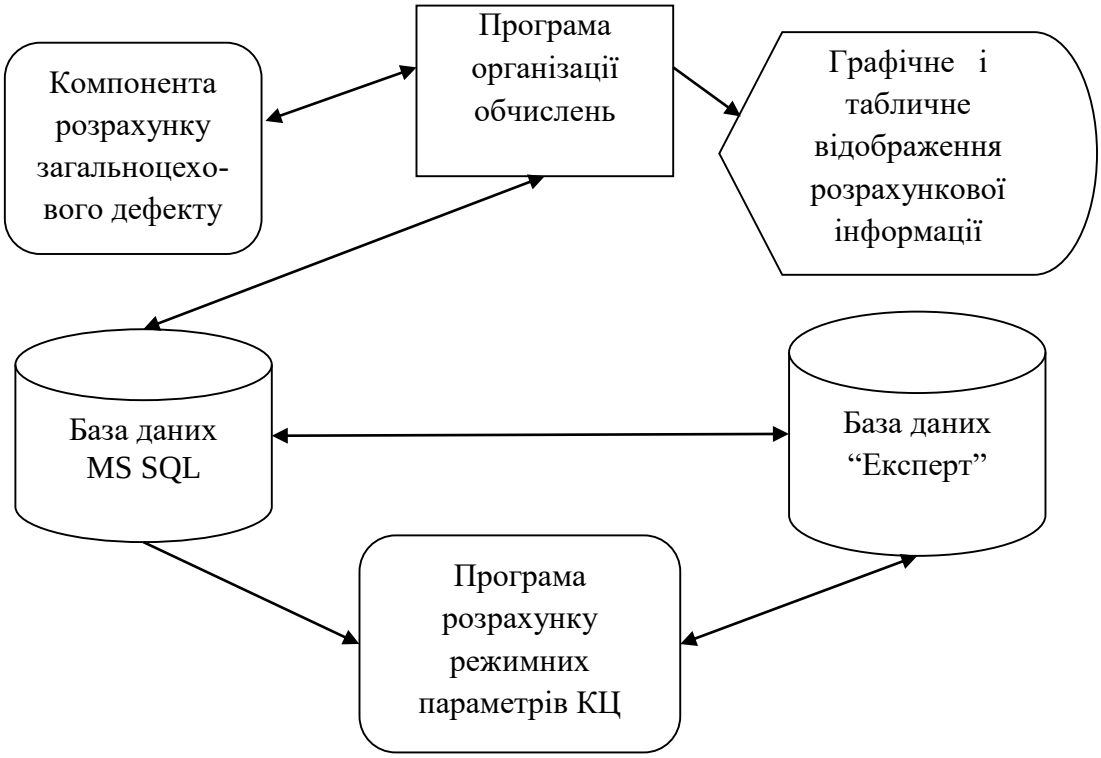

Рис. 4. Архітектура ПК

Література

1. *Дубровський В.В., Ільченко Б.С., Хрітін А.Г. Метод діагностування зношення проточної частини відцентрового нагнітача ГПА на основі газодинамічної моделі // Методи та прилади контролю якості. – 2004. – № 12. – С. 7–11.*
2. *Зарицкий С. П. Диагностика газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом. – М.: Недра, 1987. – 198 с.*
3. *Метод диагностирования технического состояния нагнетателя / Парафейник В.П., Хорошенко А.М., Королев С.К., Минько В.М. // Газовая промышленность, 1985. – № 8. – С. 22–25.*
4. *Ільченко Б.С., Ізмалков Б.І., Шатаєв О.В. Определение коэффициентов технического состояния ЦБН и ГТУ ГПА по данным штатных измерений // Вестник науки и техники, 2004. – Вып. 2(17). – С. 10 – 17.*
5. *Ільченко Б.С., Прищепо О.О., Тумаркін О.Л., Фролов Б.І. Визначення фактичних характеристик нагнітачів ГПА в умовах експлуатації методом імітаційного моделювання // Нафтова і газова промисловість, 1999. – № 6. – С. 44–47.*

References

1. Dubrovski V.V, Ilchenko B.S., Khritin A.G. Method for diagnosing wear of the flowing part of the centrifugal supercharger GPA based on the gas-dynamic model // Methods and devices of quality control. – 2004. – № 12. – P. 7–11.
2. Zaritski S.P. Diagnosis of gas pumping units with gas turbine drive. M.:NEDRA, 1987. – 198 p.
3. Parafeynik V.P., Khoroshenko A.M., Korolyov S.K,, Minko V.M. Method for diagnosing the technical condition of the supercharger // Gas industry, 1985. – № 8. – P. 22–25.
4. Ilchenko B.S., Ismalkov B.I., Shatayev O.V. Determination of the coefficients of technical condition of CBN and GTU GPA according to standard measurements // Bulletin of Science and Technology. – 2004. – 17. – P. 10–17.
5. Ilchenko B.S, Prischepo A.A., Tumarkin O.L., Frolov B.I. Determination of the actual characteristics of GPA superchargers in the conditions of operation by the method of simulation modeling // Oil and gas industry 1999. – № 6. – P. 44–47.

Рецензент: д-р техн. наук, професор С.С. Душкін, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна.

Автор: ІЛЬЧЕНКО Борис Самуілович
доктор технічних наук, професор
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – borisilch1951@gmail.com

Автор: ЄФІМОВ Олександр Вячеславович
доктор технічних наук, професор
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
E-mail – AVEfimov22@gmail.com

Автор: РОМАШКО Олександр Васильович
кандидат технічних наук, доцент
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – oleksandr.romashko@kname.edu.ua

Автор: ТКАЧЕНКО Роман Борисович
кандидат технічних наук, доцент
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – Roman.Tkacenko@kname.edu.ua

METHOD FOR APPROXIMATE CALCULATION OF FUNCTIONAL CHARACTERISTICS OF GAS PUMPING UNITS

B. Ilchenko[1], O. Efimov[2], A.Romashko[1], R. Tkachenko[1]
[1]O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine
[2]National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Ukraine

Is described the method of approximate calculation of the functional characteristics of gas-pumping units and the method of diagnostics of the value of the impairment of the working wheel of the central center of the main gas pipelines is described. It is clear that the deposits are inflated with the impairment of productivity and productivity, and that is efficiency factor of superchargers. The architecture of the program complex is described, as well as the necessary system and technical facilities for carrying out the transfer for fragmentation at the warehouse of the automatic transmission system of the gas transmission system. Experimentally, the accuracy of the value of the radial prominence in the gaps of the working wheel on the buttstock of the "Demag" 655 P2 type was verified. The revision of the growth rates from the results of the straight lines to the open flow part was not shifted 0.15 mm. Descriptions of the method of implementation by a complex of programs, allow to carry out the development of the main indicators of the functional and technical mill of the VCN GPA: vitreous-pressure, forceful, polytropic KKD characteristics. These indicators are used for the purpose of determining the overall performance of the energy efficiency of the robotic skin GPU: the effective effort of the gas turbines, the vitrates of the fired gas from the of the coated gas pump, which is displayed in the real demand. The economics of the robotics of compressor stations, the supply of the pumped gas, the confirmation of the plans for the supply of gas to the residents and the safe functioning of the gas transportation system (GTS) of Ukraine, a significant world of possessing the functional To this, it is of particular importance to build up the development of new methods and to provide diagnostics, to ensure that the actual FCS possesses an assessment. At present, there is evidence of the actual state of possession of a more efficient operation of the plant in the transition from a traditional technical service to a resource-saving one. The obtained results show that the calculation of the actual characteristics of the VCN using the proposed method allows to take into account the influence of seal wear on the actual parameters of the regime over the entire range of workloads of single-stage and multistage superchargers.

Keywords: *the gas-transportation system, parametric diagnostics, gas pumping unit, centrifugal supercharger, power, gas compressor unit capacity.*