

ДІАГНОСТУВАННЯ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНОГО АГРЕГАТА З МЕТОЮ ПРОГНОЗУВАННЯ ЙОГО ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ

Р.Т. Мартинюк, Я.М. Дем'янчук, О.Р.Мартинюк

*ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727138,
e-mail: snp@nimg.edu.ua*

Сучасні методи діагностування можуть визначити як технічний стан обладнання компресорної станції, так і їх елементів (турбін, осевого компресора, камери згоряння). Визначення рівня рівня технічного стану обладнання компресорної станції свою чергу дає змогу прогнозувати залишковий ресурс агрегатів у ході подальшої експлуатації.

Елементи, для яких здійснюється прогнозування залишкового ресурсу, мають діагностичні параметри, що являють собою функції напрацювання. Мета прогнозування - визначити критичне (граничне) значення обладнання компресорної станції, а також визначити напрацювання системи до чергового ремонту. Знаючи функції зміни діагностичного параметра, можливо визначити залишковий ресурс системи, тобто термін експлуатації обладнання без заміни зношених деталей.

Ключові слова: діагностування, прогнозування, залишковий ресурс.

Современные методы диагностики могут быть определены как техническое состояние оборудования компрессорной станции, так и его отдельных элементов (турбин, осевого компрессора, камеры сгорания). Определение уровня уровня технического состояния оборудования компрессорной станции, свою очередь, позволяет прогнозировать остаточный ресурс агрегатов в процессе их дальнейшей эксплуатации.

Элементы, для которых осуществляется прогнозирование остаточного ресурса, имеют диагностические параметры, представляющие собой функции наработки. Цель прогнозирования – определить критическое (пороговое) значение оборудования компрессорной станции, а также наработки системы до очередного ремонта. По функции изменения диагностического параметра можно определить остаточный ресурс системы, то есть срок эксплуатации оборудования без замены изношенных деталей.

Ключевые слова: диагностирование, прогнозирование, остаточный ресурс.

The modern diagnostic techniques make it possible to define the technical state of the compressor plant equipment and its components (turbines, axial compressor, combustion chamber). The determination of the compressor plant equipment technical state makes it possible to forecast the residual life of units during their further operation.

The elements to be checked for the residual life have certain diagnostic parameters that are functions of operating time. The forecast objective is to determine the critical (threshold) value of the compressor plant equipment and define the operating time to the next repair. By applying the function of the parameter change, it is possible to estimate the system residual life, that is, the equipment service life without worn parts to be replaced.

Keywords: diagnostics, forecast, residual life.

Одним із напрямів діагностування є прогнозування залишкового ресурсу обладнання. Діагностування – процес науково обґрунтованого прогнозу конструктивно-технологічних і експлуатаційних властивостей конструкції спирається на конкретні критерії, вибір яких залежить від призначення цієї конструкції і поставлених вимог. Визначенню залишкового ресурсу присвячені праці вітчизняних та зарубіжних вчених, наприклад Березіна В.Л., Грудза В.Я., Ройзмана В.П. тощо. У них розроблено загальні методики діагностування, показано їх результати та встановлено характерні закономірності.

Газоперекачувальні агрегати і функціонально пов'язані з ними системи є складовою частиною системи експлуатаційної діагностики. Вибір методів і засобів технічного діагностування основних вузлів і систем газоперекачувальних агрегатів в умовах експлуатації визначає забезпеченість їх конструкцією і обладнанням, можливість отримання достовірної інформації, що необхідна для об'єктивної оцінки технічного стану обладнання.

Рішення основного завдання щодо діагностування газоперекачувального агрегата, визна-

чення його працездатності можуть бути здійснені на підставі аналізу параметрів, які характеризують працездатність агрегата та його елементів (таблиця 1).

Труднощі точного визначення параметрів діагностування полягає в тому, що кожному режиму роботи газоперекачувального агрегата відповідають свої параметри. Це пояснюється динамічністю взаємодії газових потоків в агрегаті, обертовими масами ротора і тепловою інерційністю агрегата. Тому особливо важливе значення в процесі діагностування технічного стану агрегата є розроблення ефективних методів оброблення результатів вимірювань.

Загалом, структуру діагностики технічного стану газоперекачувального агрегата можна подати таким чином:

- розроблення класифікації технічного стану;
- обґрунтування обраних критеріїв технічного стану та їх оцінка;
- вибір способу математичного опису газоперекачувального агрегата як об'єкта діагностування;
- обґрунтування методу діагностики.

Таблиця 1 – Технічна характеристика газотурбінних установок

Характеристика ГПА	Установка		
	ГТК-10	ГТК-10і	ГТК-25
Тиск паливного газу, кг/см ²	15	14	20
Температура газу перед турбіною, °С	780	925	900
Ступінь стискування в осьовому компресорі	4,4	7,2	12,5
Частота обертання, об/хв	7600	7800	8000
Температура повітря на вході в ГПА, °С	15	15	15
Витрата повітря, кг/год	310	280	630
Витрата палива, м ³ /кВт·год	0,360	0,416	0,347
Час запуску, хв.	15	15	15

Газотурбінний пристрій в процесі вироблення моторесурсу має багато станів. Тому при вирішенні завдань діагностування необхідно спочатку вибрати для аналізу кінцеве число характерних параметрів стану або характерні ознаки, які його характеризують. Наприклад, до одного класу стану можна віднести пошкодження деталей проточної частини агрегата сторонніми предметами, руйнування деталей мастильної системи тощо. У першому випадку за ознаку можна прийняти рівень вібрації, у другому – появу стружки в мастилі.

Часто практично неможливо встановити межі між різними класами станів, оскільки вони можуть характеризуватися однаковими ознаками. У процесі діагностування механізму не завжди можна об'єктивно вказати ознаки, що характеризують конкретний стан газоперекачувального агрегата, неможливо мати повну інформацію про випадкові стани.

Будь-який технічний стан газоперекачувального агрегата визначають за допомогою параметрів. Як правило, в процесі експлуатації більшість з них контролювати технічно складно і економічно невигідно. Тому зазвичай здійснюють контроль тільки тих параметрів, які характеризують ознаку стану. Наприклад, зношування лопаток компресора характеризують як зміна геометричних розмірів, безперервний контроль яких виконувати дуже важко. Такі параметри називають основними. До них відносяться: ефективна потужність, витрата палива, частота обертання роторів, температура газу перед турбіною, параметри функціонування основних систем газоперекачувального агрегата.

Досвід експлуатації газоперекачувального агрегата, що місце і момент появи несправності не завжди збігаються з місцем і моментом її виникнення. Наприклад, під час руйнування підшипника ротора газоперекачувального агрегата утворюються металеві частинки, які внаслідок циркуляції мастила в системі змащування осідають на фільтр. Їх можна виявити тільки під час огляду фільтра на неробочому агрегаті. Огляд фільтрів проводять, як правило, через значний проміжок часу роботи газоперекачувального агрегата. Крім того, виявлення металевих частинок на фільтрі не вказує на місце виникнення несправності. Однак, якщо в системі змащування безпосередньо за підшипником

встановлюють фільтр-сигналізатор, то час і місце виникнення несправності визначають досить точно.

Таким чином, діагностування технічного стану газоперекачувального агрегата значно спрощується, якщо місце і момент виникнення і несправності збігаються.

Несправність не мають змоги виявити, якщо не дотримані правила транспортування. Так, при незначному пошкодженні лопатки компресора стороннім предметом, що потрапив в механізм разом з повітрям, змінюється рівень вібрації, який можна визначити тільки монтування на газоперекачувальний агрегат спеціальних давачів, які працюють із системою фільтрів рівня вібрації. За відсутності такої системи контролю вібрації дефект практично не виявляється при роботі газоперекачувального агрегата і може викликати його відмову.

Так, для газоперекачувального агрегата важко проводити контроль пластичних деформацій і втомний руйнувань матеріалу. Тому в даний час проводять дослідження методів виявлення таких дефектів. Один з таких методів – метод емісії хвиль напружень. Даний метод базується на реєстрації та аналізі коливань поверхні дослідної деталі, що виникають у процесі вивільнення енергії під час пластичних деформацій і наявності між параметрами емісії хвиль напружень, що характеризують дефекти матеріалу і кінетику їх розвитку.

В даний час для прогнозування залишкового ресурсу обладнання компресорної станції застосовують два методи: метод побудови функції зміни діагностичного параметра і метод вибору діагностованого параметра.

Метод побудови функції зміни діагностичного параметра. Даний метод прогнозування залишкового ресурсу обладнання компресорної станції ґрунтується на спостереженні процесів експлуатації обладнання компресорної станції, а також на збиранні декількох статистичних параметрів експлуатації, відхилення яких можуть порушити встановлені норми безпеки систем компресорної станції.

Результати вимірювання параметра кожного агрегата заносять до таблиці 2.

Для побудови середньої кривої вимірюваного параметра необхідно вести спостереження

Таблиця 2 – Результати зміни значення ефективного к.к.д. за час експлуатації

№ з/п	Час експлуатації, тис. год.									
	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25
1	0,32	0,32	0,31	0,30	0,29	0,27	0,26	0,23	0,20	0,17
2	0,31	0,29	0,27	0,26	0,25	0,23	0,22	0,20	0,18	0,15
3	0,32	0,31	0,29	0,28	0,27	0,25	0,24	0,22	0,19	0,17
4	0,29	0,29	0,27	0,26	0,25	0,24	0,22	0,20	0,18	0,17
5	0,32	0,31	0,30	0,28	0,25	0,25	0,23	0,21	0,19	0,17
6	0,32	0,30	0,29	0,28	0,27	0,25	0,24	0,21	0,19	0,17
7	0,30	0,29	0,28	0,27	0,25	0,24	0,23	0,20	0,18	0,15
8	0,30	0,28	0,27	0,25	0,24	0,23	0,21	0,19	0,17	0,16
9	0,32	0,30	0,28	0,27	0,25	0,23	0,22	0,20	0,18	0,16
10	0,31	0,29	0,27	0,26	0,25	0,24	0,23	0,8	0,17	0,16
11	0,31	0,30	0,29	0,28	0,26	0,25	0,23	0,1	0,19	0,16
12	0,30	0,29	0,28	0,27	0,26	0,24	0,22	0,19	0,17	0,15
Значення к.к.д. за статичними змінами	0,31	0,30	0,28	0,27	0,25	0,22	0,22	0,20	0,18	0,16
Значення к.к.д. за ефективністю	0,31	0,30	0,28	0,27	0,25	0,24	0,22	0,20	0,17	0,16

за цілою групою агрегатів. Залежно від напрацювання кожного агрегата необхідно побудувати криві, які характеризують кожен агрегат. Отримані криві, що характеризують кожен вимірюваний параметр кожної машини, можна виправити шляхом збільшення періодичності зміни діагностованого параметра. Отже, необхідно побудувати середню криву для групи агрегатів, за якими проводять спостереження.

Зміна середньої кривої вимірюваного параметра в часі описуватиметься формулою

$$P = t \cdot (a_1, a_2 \dots a_n), \quad (1)$$

де t – час роботи агрегату, год.;

$a_1, a_2 \dots a_n$ – значення коефіцієнтів для кожного конкретного агрегата.

Критичне значення напрацювання визначають наступним чином. Для кожного агрегата встановлено критичне значення кожного параметра. Його встановлюють: на заводі-виробнику, або на основі спостереження та за досвідом експлуатації. Це означає, що кожен параметр має своє допустиме значення, яке відповідає безпечній роботі, яку визначають за формулою

$$P_{кр} = S_{кр} \cdot t \cdot (a_1, a_2 \dots a_3), \quad (2)$$

де $S_{кр}$ – критичне значення напрацювання, год.

За значенням $S_{кр}$, для кожного агрегату визначають критичне значення напрацювання $T_{кр}$. (рисунок 1).

Для m різних типів агрегатів встановлені різних значення $T_{кр}$

$$T_{1кр}, T_{2кр} \dots, T_{mкр}. \quad (3)$$

Напрацювання агрегата відповідає критичному значенню кривої, що знаходиться в межах

$$T_{1кр} \leq T_{сркр} \leq T_{mкр}. \quad (4)$$

Збільшення періодичності вимірювання дозволяє не лише більш точно побудувати статистичну криву вимірюваного параметра, але і

вирішити питання визначення критичного значення напрацювання до заміни. Але збільшення періодичності підвищує витрати на самі вимірювання.

Оптимальне значення періодичності вимірювання визначають в залежності від виду відновлення технічного стану. Існує два види відновлення технічного стану:

- відновлення без вимірювання (діагностування). Заміну проводять, тільки коли агрегат досягає критичного значення напрацювання;
- число і момент вимірювання вибирають з врахуванням максимального прибутку.

Найбільш економічним з цих двох пропозованих варіантів є періодичність вимірювання.

Досвід експлуатації показує на те, що між розрахунковим критичним значенням напрацювання і його статистичними вимірюваннями є відхилення. Це відхилення називають похибкою розрахунку, яку визначають наступним чином. Нехай для m досліджуваних агрегатів у загальній кількості N розраховане значення залишкового ресурсу до моменту τ є однаковим і рівним Δt . Тобто

$$T_{кр} - \tau = \Delta t. \quad (5)$$

За час експлуатації для m агрегатів значення напрацювання до заміни склали

$$\Delta t_1, \Delta t_2 \dots \Delta t_m. \quad (6)$$

Тоді середнє значення похибки критичного напрацювання визначаємо за формулою

$$E_{(\tau, t)} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m |\Delta t_i - \Delta t|, \quad (7)$$

де m – кількість досліджуваних агрегатів, для яких розраховують залишковий ресурс.

З формули (2.1) випливає, що функція похибки збільшується із збільшенням значення Δt при постійному моменті τ .

Функція $E_{(\tau, t)}$ зображено на рисунку 2.

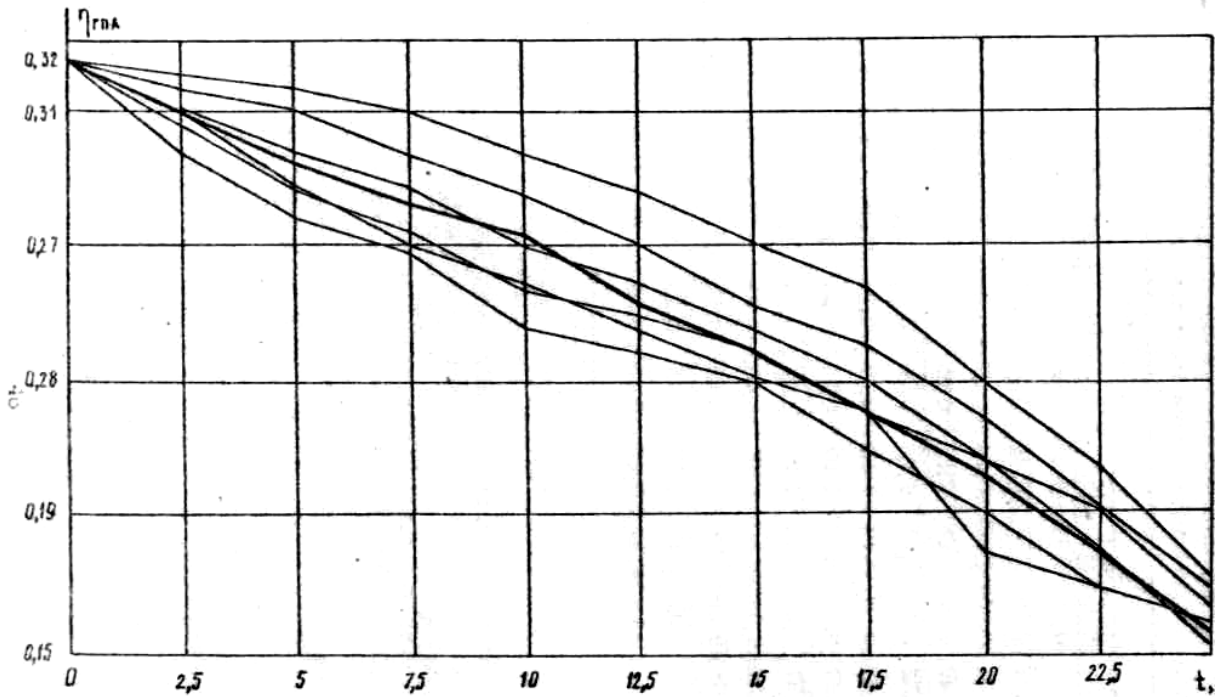
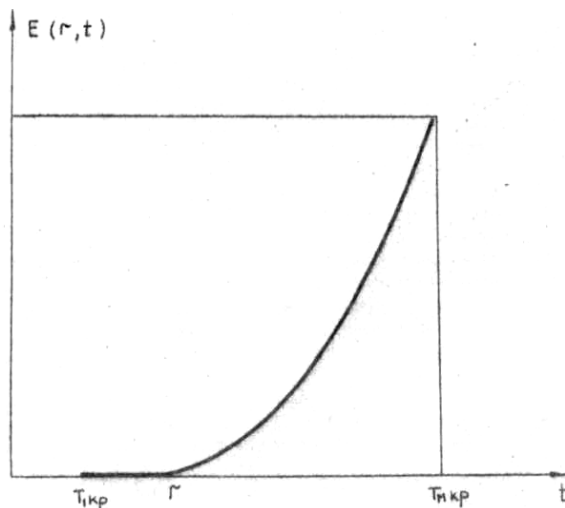


Рисунок 1 – Криві зміни ефективного к.к.д. групи газоперекачувальних агрегатів за напрацюванням



$T_{кр}$ – критичне значення напрацювання даного агрегата;

$T_{мкр}$ – критичне значення напрацювання m -го агрегата, за якими проводять спостереження

Рисунок 2 – Загальний вигляд функції похибки при розрахунку критичного напрацювання

Вибір діагностичного параметра. Серед всіх вимірюваних параметрів к.к.д. найбільш часто використовують для визначення технічного стану газотурбінних установок.

Економічність і досконалість турбоагрегату також оцінюють за к.к.д. Найбільш поширені термічний і ефективний к.к.д. Термічний к.к.д. може мати два значення: при $P=\text{const}$ і при $V=\text{const}$. Це пояснюється тим, що процес горіння може бути за постійного тиску або за постійного обсязі.

Термічний к.к.д. при $P=\text{const}$ для ідеального циклу газоперекачувального агрегата (без регенерації) визначаємо за формулою

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{E^{k-1}} = 1 - \frac{1}{\lambda_1^m}, \quad (8)$$

де E – ступінь адиабатного стискування повітря в осьовому компресорі;

k – коефіцієнт адиабати;

λ_1 – ступінь збільшення тиску при стисканні повітря в осьовому компресорі;

$m = \frac{k-1}{k}$ – кількість агрегатів за якими проводять спостереження, для яких розраховують залишковий ресурс.

Термічний к.к.д. при $V=\text{const}$ для ідеального циклу газоперекачувального агрегата визначаємо за формулою

$$\eta_t = 1 - \frac{k}{E^{k-1}} \cdot \frac{\lambda^{\frac{1}{k}} - 1}{\lambda - 1}, \quad (9)$$

де λ – ступінь підвищення тиску при згоранні палива.

Термічний к.к.д. регенеративного циклу визначаємо за формулою

$$\eta_t = \frac{(\lambda - 1) \cdot (\lambda_1^m - 1)}{\lambda_1^m \cdot (\lambda - 1) - G \cdot (\lambda - \lambda_1^m)}, \quad (10)$$

де G – ступінь регенерації.

Технічний стан газотурбінних установок можна також визначити і за допомогою к.к.д., який враховує механічні втрати турбоагрегата за формулою

$$\eta_{\text{мех.}} = \frac{h_e}{h_i} = \frac{N_e}{N_i}, \quad (11)$$

де h_e і h_i – теплота в турбіні;
 N_e – ефективна потужність вала турбіни, кВт;

N_i – внутрішня потужність турбіни, кВт.

Механічний к.к.д. для сучасних газотурбінних установок досить високий і становить від 0,9 до 0,96.

Внутрішній к.к.д. газотурбінних установок – відношення використаного в турбіні теплового перепаду до адиабатного теплового перепаду, визначаємо за формулою

$$\eta_{\text{вн.}} = \frac{h_i}{h_a}, \quad (12)$$

де h_a – адиабатний тепловий перепад.

Внутрішній к.к.д. характеризує ступінь досконалості машин, тобто наскільки робочий процес наближається до ідеального його величина становить від 0,92 до 0,96.

Відносна ефективність турбіни – відношення між теплою, що є в турбіні, до його перепаду і визначаємо за формулою

$$\eta_e = \frac{h_e}{h_0} = \frac{h_i \cdot \eta_{\text{мех.}}}{h_0} = \eta_{oi} \cdot \eta_{\text{мех.}}, \quad (13)$$

де η_{oi} – ефективний к.к.д., що визначаємо за формулою

$$\eta_{oi} = \frac{N}{3600 \cdot H_o \cdot G}, \quad (14)$$

N – потужність турбіни, кВт;

H_o – тепловий потік в турбіні;

G – витрата продуктів згоряння, кг/с.

Даний коефіцієнт характеризує теплові та механічні втрати в газотурбінній установці, що становлять: при циклі без регенерації – 0,22 і при циклі з регенерацією – 0,32.

Визначення залишкового ресурсу газоперекачувальних агрегатів і оцінка критичного значення к.к.д. Ресурси елементів газоперекачувального агрегата, такі як лопатка диска турбін, елементи камери згоряння осьового компресора, якого доцільно і допустимо використовувати агрегати в конкретних умовах експлуатації.

Критерій оцінки визначають шляхом визначення економічного ефекту від експлуатації і забезпечення функціонування агрегатів з допустимим рівнем надійності. Таким чином, техніко-економічний зміст поняття ресурсу газоперекачувального агрегата вимагає врахування багатьох факторів, у тому числі фізичних, що визначають зміну властивостей агрегатів в часі, і економічних, що визначають доцільність подальшого збільшення ресурсу за конкретних умов експлуатації, обслуговування і ремонту.

Найважливіший момент при встановленні ресурсу – взаємодія між ресурсом і надійністю. Критерії, що характеризують виконання газоперекачувальним агрегатом основних функцій,

і експлуатаційні витрати будуть визначати ефективність системи встановлення ресурсу. Величина ресурсу до ремонту, в свою чергу, впливає на рівень надійності агрегатів.

Процес визначення ресурсу до ремонту агрегату визначаємо за формулою

$$\int (\lambda, C, V, t) \rightarrow \max \text{ при } \eta_{\text{зна}}(t) \geq \eta_{\text{зна}}(T_{\text{кр}}), \quad (15)$$

де \int – критерій економічної ефективності збільшення ресурсу до ремонту;

λ – інтенсивність відмови;

C – вартість заміни деталей;

V – коефіцієнт варіації параметра функції зміни к.к.д. агрегата;

t – величина ресурсу;

$\eta_{\text{зна}}(t)$ – функція ефективного к.к.д.;

$\eta_{\text{зна}}(T_{\text{кр}})$ – критичне значення к.к.д., що

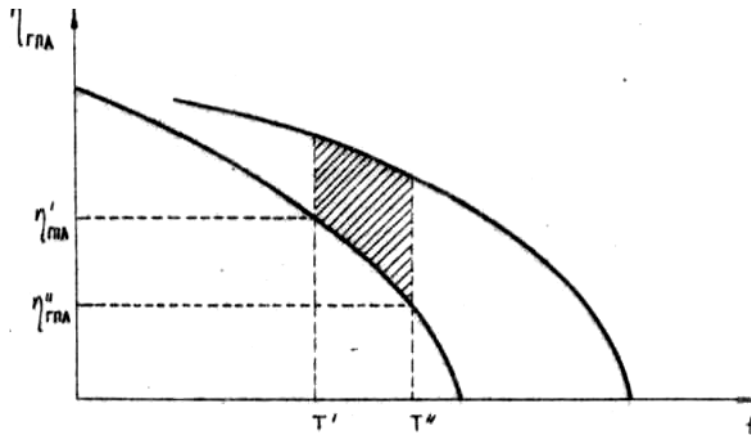
враховує безвідмовність у процесі експлуатації.

На початкових етапах експлуатації, коли надійність ще невелика, в багатьох випадках використовується система встановлення ресурсу газоперекачувального агрегата за ресурсом елемента, що працює в найбільш напружених умовах роботи. Така система називається системою встановлення фіксованих проміжків часу. Ці проміжки не залежать від стану агрегата.

Економічно така система не є оптимальною, але вона дає змогу контролювати стан всіх деталей агрегата після міжремонтного напруження. На цій основі розробляють заходи щодо підвищення надійності і ресурсу газоперекачувального обладнання. При подальшій експлуатації та нарощуванні ресурсу агрегата слід прагнути до використання систем встановлення диференційованого ресурсу. Ця система ґрунтується на обліку різних вузлів та елементів агрегатів, що впливають на надійність експлуатації та ефективності системи технічного обслуговування.

При диференційованому ресурсі вузлів, як правило, призначають фіксовані терміни контролю вузлів основної частини газоперекачувального агрегата (наприклад, елементи камери), які за необхідності замінюють. Ця альтернатива пов'язана з надійністю контролю стану кожного вузла. Як приклад, ресурсу елементів газоперекачувального агрегата в процесі експлуатації було встановлено, що при ресурсі дисків турбін від 14000 до 20000 год ресурс лопастей турбіни становив від 6000 до 15000 год, а труб камери згоряння – 8000 год. Використання методики оцінки еквівалентності режимів в різних умовах роботи агрегатів дозволяє визначити ресурс будь-якого агрегата, якщо відомі параметри експлуатації одного з них.

Гранична форма диференціації ресурсу – експлуатація газоперекачувального агрегату за станом. Під час експлуатації за станом і різними формами технічного обслуговування, заміна елементів і ремонту проводять залежно від фізичного стану кожного агрегата. Отже, і ресурс кожного конкретного газоперекачувального агрегата визначаємо за його фактичним станом. Ця форма експлуатації забезпечує максимальне



1 і 2 – криві, що змінюються від початку експлуатації до і після заміни зношених елементів

Рисунок 3 – Графічне зображення втрати ефективного к.к.д агрегату від напрацювання

використання агрегатів залежно від їх конструктивних можливостей. Дану форму застосовують за великих значень ресурсу та індивідуальними термінами ремонту конкретного агрегата.

Отже, при великому ресурсі напрацювання та з урахуванням фактичного стану більшість газоперекачувальних агрегатів будуть ремонтувати значно раніше терміну. Критичне значення ефективного к.к.д. характеризує граничний стан агрегатів. Висновок про критичне значення ефективного к.к.д. базується на критеріях: забезпечення мінімальних затрат або забезпечення безпеки роботи.

Оптимальне критичне значення ефективного к.к.д. визначають напрацюванням. При напрацюванні сума втрат від вартості недовиконаного обсягу робіт буде вищою вартості заміни зношених елементів. На рисунку 3 показано приклад втрати продуктивності через несвоєчасну заміну зношених елементів.

Метод визначення залишкового ресурсу газоперекачувальних агрегатів компресорної станції полягає в зміні ефективного к.к.д. агрегата з врахуванням його реального стану а також визначає характер змін, що виявлені і впливають на залишковий ресурс.

Висновок. Впровадження методів діагностування дає змогу достовірно визначити залишковий ресурс газоперекачувальних агрегатів компресорної станції та дає високий техніко-економічний ефект.

Завданням наступних досліджень є впровадження отриманих результатів в практичне використання на компресорних станціях.

Література

- 1 Грудз В.Я. Типові розрахунки показників надійності систем газонафтопостачання. Комплексна галузева методика / В. Я. Грудз, Л.Т. Гораль, М.Д. Степ'юк, Р.Т. Мартинюк, В.Б. Запухляк, Я.Р. Порада // Оцінка надійності компресорної станції. – Івано-Франківськ, 2009.
- 2 Грудз В.Я. Обслуживание газотранспортных систем / В.Я. Грудз, Д.Ф. Тымкив, Е.И. Яковлев. – К.: УМК ВО, 1991. – 160 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії
24.01.14

Рекомендована до друку
професором **Грудзом В.Я.**
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
д-ром техн. наук **Говдяком Р.М.**
(ІК «Машиекспорт», м. Київ)