

де a_{ij} - емпіричні коефіцієнти (значення коефіцієнтів для $n=5$ наведені в таблиці); $-P_{kr}, T_{kr}$ - відповідно критичний тиск та критична температура газу, що подається на вхід автомобільної газонаповнювальної компресорної станції (АГНКС). Критичні значення можна знайти за допомогою виразу:

$$P_{kr} = \left[\frac{2.4}{0.49} \cdot \left(\frac{\rho}{1.125} - 0.05 \right) + 47.1 \right] \cdot 10^5 \text{ та } T_{kr} = \left[\frac{114.9}{0.49} \cdot \left(\frac{\rho}{1.125} - 0.05 \right) + 190.5 \right]$$

Значення емпіричних коефіцієнтів a_{ij}
для підрахунку коефіцієнта стисливості ($n=5$)

i	0	1	2	3	4	5
0	1	-0.19937006	0.002622636	-1.42574791e-4	2.55984578e-5	2.98493046e-6
1	0	1.01356983	0.02218448	-0.00164639	2.24602598e-4	-1.5121861e-5
2	0	-1.14995527	-0.09512994	0.00270123	-6.50090398e-4	-2.22677972e-5
3	0	-0.90465742	0.02958585	0.00631562	1.68265469e-4	1.21774319e-4
4	0	1.31053197	0.20305347	0.00806618	-0.00166027	-3.38990831e-5
5	0	-0.38435373	-0.18719865	0.01154491	-0.00149075	6.28396519e-5

Представлення коефіцієнту стисливості у вигляді полінома п'ятого степеня дозволяє отримати для тисків 0...32МПа і температур -25...180°C середньоквадратичну похибку обчислення коефіцієнту стисливості на рівні 0,0005. До того ж представлення коефіцієнту стисливості у вигляді полінома дозволяє замінити чисельні методи диференціювання і інтегрування на аналітичні, виключивши при цьому похибки чисельних методів обчислення. Так, теплоємність газової суміші та термічний коефіцієнт адіабати процесу стискання обчислюються за формулами:

$$C_p = C_{p_{i0}} - T \cdot \int_0^p \left(\frac{\partial^2 V}{\partial T^2} \right)_p dP = \frac{1.315 \cdot R}{1.315 - 1} \cdot R \cdot \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^n \left[\frac{a_{i,j} \cdot i \cdot (i-1)}{j} \cdot P_{ex}^j \cdot T_{ex}^{-i} \right],$$

$$k_m = \frac{C_p}{C_p - P \cdot \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p} = \frac{C_p}{C_p - R \cdot \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \left[a_{i,j} \cdot (i-1) \cdot P_{ex}^j \cdot T_{ex}^{-i} \right]}$$

Використання термічного показника адіабати пов'язане з тим, що на відміну від ізоборного показника зміною термічного показника під час циклу стискання в ступені можна нехтувати [1]. Теж саме відноситься і до показника політропи, який знаходиться за формулою:

$$n_m = \frac{\ln \left[\frac{P_{ex}}{P_{вых}} \right]}{\ln \left[\frac{T_{ex} \cdot P_{вых}}{P_{ex} \cdot T_{вых}} \right]}$$

Адіабатичний ККД визначається за допомогою виразу:

$$\eta_{ad} = \frac{l_{nol}}{l_{ad}},$$

де l_{nol}, l_{ad} - відповідно фактична та адіабатична робота ступеню стискання, що знаходяться за формулами:

$$l_{n.o.l} = R \cdot T_{ex} \cdot \frac{n_m}{n_m - 1} \cdot \left[\left(\frac{P_{aux}}{P_{ex}} \right)^{\frac{n_m - 1}{n_m}} - 1 \right] + 273.15 \cdot \Delta B_{n.o.l},$$

$$l_{ad} = R \cdot T_{ex} \cdot \frac{k_m}{k_m - 1} \cdot \left[\left(\frac{P_{aux}}{P_{ex}} \right)^{\frac{k_m - 1}{k_m}} - 1 \right] + 273.15 \cdot \Delta B_{ad}.$$

Відповідні політропічна $\Delta B_{n.o.l}$ та адіабатична ΔB_{ad} поправки на стисливість газу розраховуються за формулами:

$$\Delta B_{n.o.l} = \int_{P_{ex}}^{P_{aux}} \frac{T \cdot (Z - 1)}{273.15 \cdot P} dP = \frac{1}{273.15} \cdot \sum_{i=0}^5 \sum_{j=1}^5 \left[a_{i,j} \cdot \left(\frac{T_{ex}}{(P_{ex})^{\frac{n_m - 1}{n_m}}} \right)^{l-i} \cdot \frac{(P_{aux})^{\frac{n_m - 1}{n_m} \cdot (l-i) + j} - (P_{ex})^{\frac{n_m - 1}{n_m} \cdot (l-i) + j}}{\frac{n_m - 1}{n_m} \cdot (l-i) + j} \right],$$

$$\Delta B_{ad} = \int_{P_{ex}}^{P_{aux}} \frac{T \cdot (Z - 1)}{273.15 \cdot P} dP = \frac{1}{273.15} \cdot \sum_{i=0}^5 \sum_{j=1}^5 \left[a_{i,j} \cdot \left(\frac{T_{ex}}{(P_{ex})^{\frac{k_m - 1}{k_m}}} \right)^{l-i} \cdot \frac{(P_{aux})^{\frac{k_m - 1}{k_m} \cdot (l-i) + j} - (P_{ex})^{\frac{k_m - 1}{k_m} \cdot (l-i) + j}}{\frac{k_m - 1}{k_m} \cdot (l-i) + j} \right].$$

Холодильний коефіцієнт холодильників газу можна отримати за допомогою виразу:

$$\varepsilon_k = \frac{\frac{1.315 \cdot R}{1.315 - 1} - R \cdot \sum_{j=0}^5 \sum_{j=0}^5 \left[a_{i,j} \cdot b_{i,j} \cdot (P_{auxk})^j \cdot \frac{(T_{auxk+1})^{-i-1} - (T_{auxk})^{-i-1}}{-i-1} \right]}{R \cdot (Z_{auxk+1} \cdot T_{auxk+1} - Z_{auxk} \cdot T_{auxk})}$$

Коефіцієнти k та $k-1$ показують, що значення тиску або температури беруться відповідно до ступеня, що розташований перед холодильником газу та після нього.

Відносні втрати газу в міжступеневих просторах ступенів стискання δ знаходяться для кожного з просторів окремо в напрямку від останнього ступеня стискання до першого. Для простору між останнім та передостаннім $k \dots k-1$ ступенем стискання міжступеневі втрати обчислюються за допомогою виразу:

$$\delta_{k \dots k-1} = \frac{T_{k \ ax}}{T_{k-1 \ ax}} \cdot \frac{Z_{k \ ax}}{Z_{k-1 \ ax}} \cdot \frac{\lambda t_k}{\lambda t_{k-1}} \cdot (P_{k \ aux})^{\frac{n_k - 1}{n_k}} \cdot (P_{k-1 \ aux})^{\frac{n_{k-1} - 1}{n_{k-1}}} \cdot (P_{k \ ex})^{\frac{1-2 \cdot n_k}{n_k}} \times$$

$$\times (P_{k \ ax})^{\frac{1}{n_{k-1}}} \cdot e^{\frac{n_{k-1}}{n_{k-1} - 1} - 1}.$$

Наступні втрати визначаються за формулами:

$$\delta_{k-1 \dots k-2} = \frac{T_{k-1 \ ax}}{T_{k-2 \ ax}} \cdot \frac{Z_{k-1 \ ax}}{Z_{k-2 \ ax}} \cdot \frac{\lambda t_{k-1}}{\lambda t_{k-2}} \cdot (P_{k-1 \ aux})^{\frac{n_{k-1} - 1}{n_{k-1}}} \cdot (P_{k-2 \ aux})^{\frac{n_{k-2} - 1}{n_{k-2}}} \cdot (1 + \delta_{k \dots k-1})^{\frac{1-2 \cdot n_{k-1}}{n_{k-1}}}$$

$$\cdot (P_{k-1 \ ax})^{\frac{1}{n_{k-2}}} \cdot e^{\frac{n_{k-2}}{n_{k-2} - 1} - 1},$$

де λt_k , λt_{k-1} , λt_{k-2} , λt_{k-3} - відповідно термічний коефіцієнт IV, III, II та I ступенів стискання (в проведених розрахунках прийняті значення 0,99).

$$X_{i \text{ згл}} = X_{i-1 \text{ згл}} + \frac{X_i - X_{i-n}}{n}; \quad X_{0 \text{ згл}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n X_j;$$

$$X_{i \text{ згл}} = \alpha \cdot X_i + (1 - \alpha) \cdot X_{i-1 \text{ згл}},$$

де $X_{i \text{ згл}}$ - згладжене значення вихідного процесу; X_i - значення параметра вихідного процесу; $X_{0 \text{ згл}}$ - початкове згладжене значення вихідного процесу; α - коефіцієнт згладжування, значення якого встановлюється на рівні 10-20% ($\alpha = 0.2 \dots 0.1$).

Основа диференційного згладжування полягає в апроксимації n точок поліномами m -го порядку ($n > m$). Наприклад, для п'яти точок при апроксимації поліномом третього порядку формула згладжування для середньої точки має вигляд:

$$X_{i \text{ КС}} = \frac{1}{35} \cdot (-3 \cdot X_{i-2} + 12 \cdot X_{i-1} + 17 \cdot X_i + 12 \cdot X_{i+1} - 3 \cdot X_{i+2})$$

Метод медіанної оцінки полягає у визначенні внаслідок сортування середньої за ліком точки серед невеликої множини точок, що послідовно вибираються, як і в методі слизької смуги. Цей метод перешкодозахисний і використовується для згладжування даних вихідних процесів.

Реалізацію перелічених методів згладжування розглянуто на прикладі згладжування параметра міжступневих втрат газу між III та IV ступеннями (рис.2).

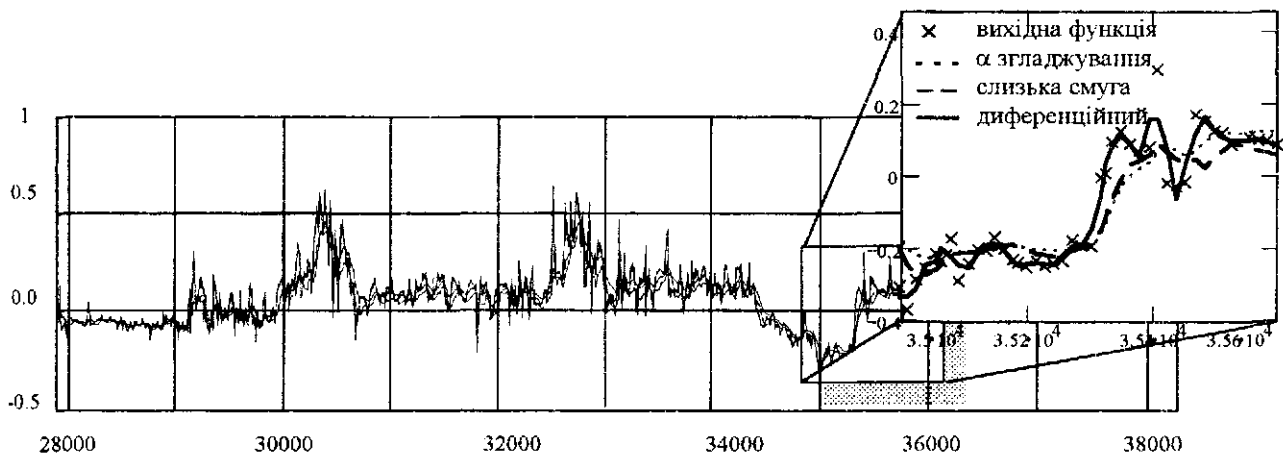


Рис.2. Використання методів згладжування на прикладі зміни відносних втрат газу в газових комунікаціях між III та IV ступеннями

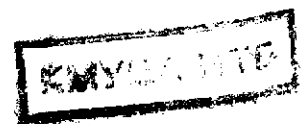
Для аналізу трендів параметрів використовується нормовані за ймовірністю відхилення параметрів від базових значень, останні з яких розраховуються по першим 10-20 точкам після ремонту компресора. Формули для обчислення цих нормованих параметрів мають вигляд [4]:

$$Y_i = \frac{Z_i - \bar{Z}}{S_z}, \quad Z_i = \frac{\Pi_i - \Pi_{БП}}{S_{БП}}$$

де

$$\bar{\Pi}_{БП} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Pi_i, \quad S_{БП} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Pi_i - \bar{\Pi}_{БП})^2};$$

$$\bar{Z} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k Z_i, \quad S_z = \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (Z_i - \bar{Z})^2}.$$



Перша формула для Z_i нормує параметри відносно їх базових значень, друга для Y_i - за ймовірністю. Це дає змогу встановити як допуски на параметри постійні значення. Для профілактичного допуску використовується рівень 1.5, для контрольного - 2, критичного -3. На рис 3. показані графіки зміни вихідних та нормованих комплексних параметрів I – IV ступенів, що дозволяють виявити несправності компресорної установки на ранній стадії їх розвитку.

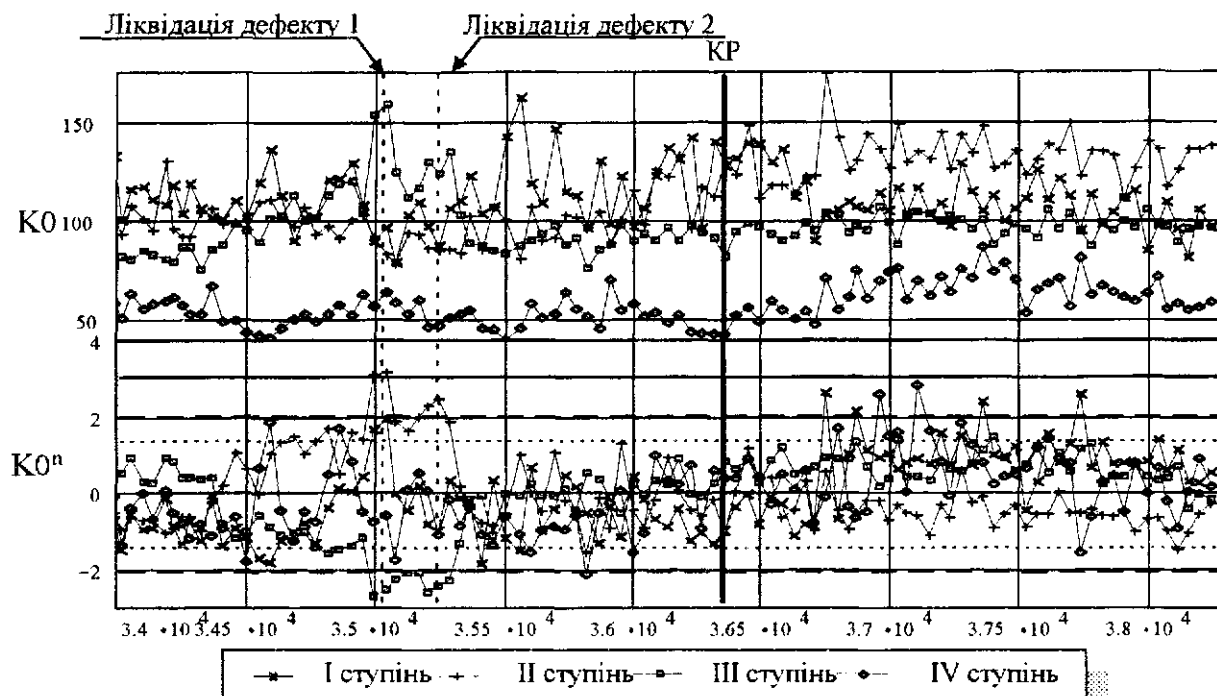


Рис. 3. Динаміка зміни вихідних та нормованих комплексних параметрів компресорної установки

Для оцінки динаміки зміни технічного стану компресора можна використовувати методи теорії розпізнавання образів, зокрема виділення інтервалів однорідності часового ряду. Для перевірки однорідності послідовно розраховується критерій однорідності множини розбивки сукупності за формулою:

$$U(p^2) = \frac{n-1}{n(n-l)l} \left\{ \frac{\left[(n-l) \sum_{i=1}^l x_i - l \sum_{i=l+1}^n x_i \right]^2}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \right\},$$

де x_i – значення параметру (або комплексного параметру); n – число точок в вибірці; l – номер точки, що розділяє дві множини точок, які перевіряються на однорідність.

Величина $U(p^2)$ розподілена по закону χ^2 з m степенями свободи. Нульова гіпотеза про однорідність вибірки приймається при $U(p^2) \leq \chi_m^2$. Це значення визначає границю між двома групами. Якщо нерівність не виконується, операція повторюється для першої, другої і

т.д. групи. до тих пір, поки нерівність стане виконуватись. Одержані таким чином множини точок перевіряються на статистичну сталість границь за формулою:

$$U(S_k, S_{k+1}) = \frac{n_k + n_{k+1} - 1}{n_k \cdot n_{k+1} (n_k + n_{k+1})} \times \left\{ \frac{n_{k+1} \sum_{i \in S_1} x_i - n_k \left(\sum_{i \in S_k} x_i \right)^2}{\sum_{i \in S_k \cup S_{k+1}} x_i^2 - \frac{1}{n_k + n_{k+1}} \left(\sum_{i \in S_k \cup S_{k+1}} x_i \right)^2} \right\}$$

У випадку статистично нестійких границь множини точок S_k і S_{k+1} об'єднуються в одну. Таким чином, для часового ряду можна встановити інтервали сталої і однорідної динаміки і точки, де однорідність порушується. На рис 4, як приклад наведено графік зміни критерію $U(p^2)$ – функції точки (l), що розділяє дві множини. Аналіз даних за допомогою цієї методики дозволив виявити обидва дефекти і капітальний ремонт компресора.

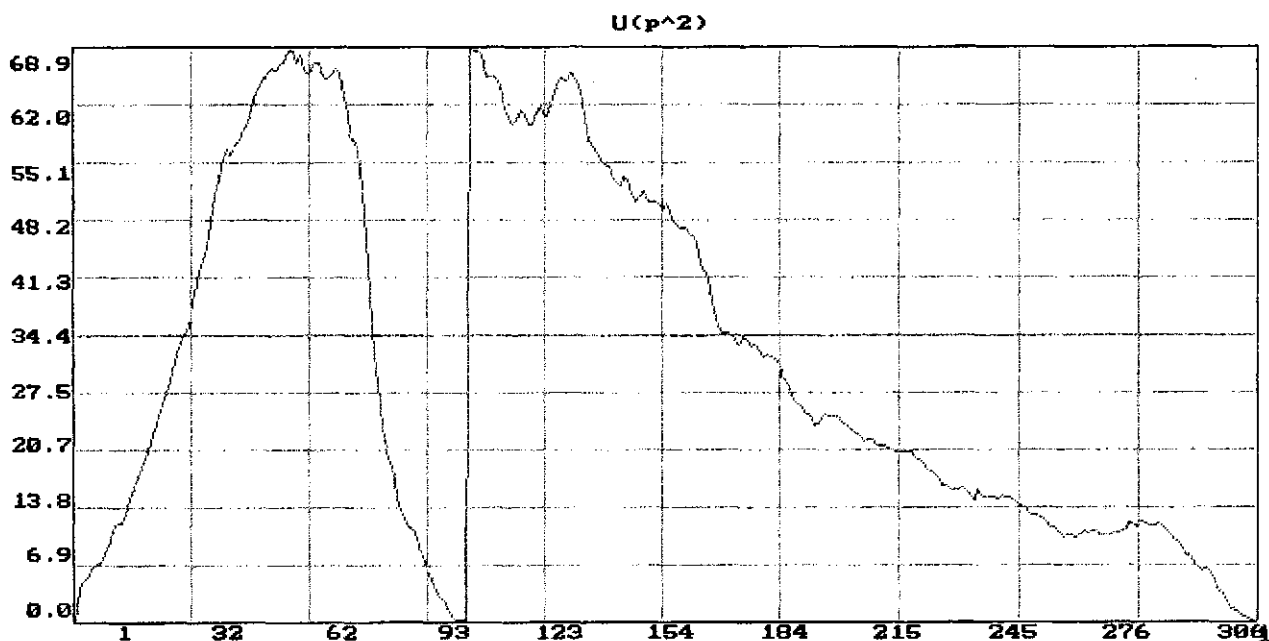


Рис. 4. Графік зміни критерію однорідності множини розбивки сукупності

Перевірка методики здійснювалась на АГНКС, яка обладнана компресорними установками типу 2ГМ4-1.3/12-250 виробництва заводу «Борець». Час аналізу охоплював період з липня 1997 року по квітень 1999 року. Аналіз проводився за 21 параметром, кожен з яких охоплював майже 800 точок експериментальних даних.

За 21 місяць компресорна установка напрацювала 7264 мотогодин. Експлуатація в цей період здійснювалась на нештатному режимі - вхідний тиск коливався в межах 0,15-0,24МПа (при штатному 0,6-1,2МПа). На установці були виконані роботи по формі ПР1 (поточний ремонт) та КР (капітальний ремонт), а також шість технічних обслуговувань по формі ТО1 та два – по формі ТО2.

Співставлення аналізу дефектних відомостей, записів робочих журналів та журналів виконання газо- та вибухонебезпечних робіт (ремонтний журнал) з отриманими, за розглянутою методикою параметрами дозволило зробити такі висновки:

- період роботи до поточного ремонту ПР1 характеризується рівномірним зменшенням адіабатичного ККД усіх ступенів компресора і збільшенням втрат газу в клапанах, що свідчить про рівномірний знос поршневих кілець та клапанів всіх ступенів. Заміна клапанів та поршневих кілець, яка проводилась при виконанні ПР1, показала великий, але не критичний знос поршневих кілець та клапанів всіх ступеней;

- період роботи в межах від ПР1 до КР характеризується появою великого зносу поршневих кілець IV ступеня та клапанів III та IV ступенів. Спочатку в липні 1997 року при наробітці 35020 год була проведена заміна клапанів III ступеня (рис.1, точка 2), а через місяць (через 314 мотогодин) проведена заміна клапанів та поршневих кілець IV ступеня (точка 3). На графіку (див. рис.1), окрім робіт по усуненню дефектів (точка 2 та 3), можна побачити також момент зароджування дефектів (точка 1) та оцінити ефективність виконаних заходів.

В період між ПР1 та точкою 1 відбувався процес припрацювання деталей (незначне падіння ККД та стабілізація втрат в клапанах). Починаючи з точки 1 (початок серпня за 620 мотогодин до заміни), починається збільшення ККД IV ступеню, зменшення втрат газу в клапанах 2, 3 та чотирьох ступенях. Відбувається падіння ступеня стиску IV ступеня та відповідне підвищення в II та III ступенях. Це пояснюється руйнуванням клапанів III та IV ступенів. Завдяки збільшенню нещільності в клапанах починається перетік газу з IV ступеня в холодильник III ступеня, що спричинить падіння тиску в IV ступені і завантаження III ступеня. Нещільність клапанів III ступеня призведе до аналогічного явища в II ступені.

Заміна клапана III ступеня в липні призвела лише до стабілізації падіння тиску в III та IV ступенях та стабілізації ККД IV ступеня. Втрати газу в міжступінчатому просторі III - IV ступенів продовжує зростати.

Тільки після заміни клапанів та кілець IV ступеня в серпні (після точки 3) параметри набули середніх значень.

Особливо яскраво процес зародження, розвитку та усунення дефектів проявляється на графіку комплексного параметру $K\theta$. Спостерігається чітке розмежування піків на комплексному параметрі III та IV ступенів. Зміна комплексного параметра за I та II ступенями майже не відбувається.

Останній період - після проведення КР характеризується відновленням працездатності компресорної установки: підвищення ККД ступенів стискування і зменшення втрат газу в клапанах.

На основі приведеного вище аналізу можна зробити висновок про можливість за допомогою представленої методики проводити виявлення дефектів в багатоступеневих компресорних установках на ранній стадії розвитку та робити висновки про якість виконаних ремонтних робіт.

Список літератури

1. Френкель М.И. Поршневые компрессора. Теория, конструкция и основы проектирования. -М.: Машиностроение, 1969, - 744 с.
2. Бухарин Н.Н. Моделирование характеристик центробежных компрессоров. - Л.: Машиностроение, 1983, - 214 с.
3. Беляев Н.М. Термодинамика. - К.: Вища шк. Головне вид, 1987, - 344с.
4. Кучер О.Г. Розробка методів та засобів контролю показників надійності та моніторингу ресурсу авіаційних ГТД в експлуатації: Автореферат дис.д-ра техн. наук. -К.: КМУЦА, 1998, - 36 с.