УДК 622.691.4.052.012

МЕТОД ПРОГНОЗУВАННЯ РЕСУРСУ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ ЗА ІНТЕГРАЛЬНИМИ ДІАГНОСТИЧНИМИ ОЗНАКАМИ

М. І. Горбійчук, О. А. Скріпка, С. Т. Самуляк

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, тел. (80342)504708

Запропонований метод прогнозування залишкового ресурсу відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату за допомогою політропного коефіцієнта корисної дії та внутрішньої потужності, які визначені як функції від приведених об'ємної та масової продуктивності відповідно. Вказані залежності досить повно характеризують роботу нагнітача і є основою для визначення запропонованих діагностичних ознак його технічного стану.
Ключові слова: газоперекачувальний агрегат, прогнозування ресурсу, інтегральна діагностична ознака, граничний ресурс, вібрація, ідентифікація.

Предложен метод прогнозирования остаточного ресурса центробежного нагнетателя газоперекачивающего агрегата с помощью политропного коэффициента полезного действия и внутренней мощности, которые определены как функции от приведенных объемной и массовой продуктивностей нагнетателя соответственно. Указанные зависимости довольно полно характеризуют работу нагнетателя и являются основой для определения предложенных интегральных диагностических признаков его технического состояния.
Ключевые слова: газоперекачивающий агрегат, прогнозирование ресурса, интегральный диагностический признак, предельный ресурс, вибрация, идентификация.

A method for predicting a residual life of centrifugal blowers of gas pumping unit using the polytropic efficiency and internal power, which are defined as a functions of volume and mass productivity respectively, is proposed. Given dependencies quite fully characterize blower's operation and are the basis for determining the proposed integral diagnostic features of its technical condition.
Keywords: gas pumping aggregate, prognostication of resource, integral diagnostic sign, maximum resource, vibration, authentication.

Газоперекачувальний агрегат (ГПА) у процесі експлуатації знаходиться під дією інтенсивних навантажень, що зумовлює знос його вузлів і деталей. Тому виникає необхідність у плановій чи аварійній зупинці агрегату на виконання ремонту. Технічна діагностика дозволяє визначити технічний стан ГПА та його вузлів на основі показів інформаційно-вимірювальних систем і прогнозувати його технічний стан, що є актуальною науково-практичною задачею [1].

У роботі [2] запропоновано обчислювати діагностичні ознаки як відхилення степені підвищення тиску, політропного коефіцієнта корисної дії та внутрішньої потужності нагнітача від їх базових значень, що визначаються за відповідними приведеними характеристиками відцентрових нагнітачів (ВНЦ) природного газу. Недоліком такого підходу є його чутливість до шумів, що зумовлює значну невизначеність при інтерпретації результатів обстежень компресорних станцій (КС). На відміну від такого підходу в статті розглядається інший метод формування діагностичних ознак, які названі нами інтегральними.

Суть цього методу у тому, що за методикою роботи [2] обчислюються політропний коефіцієнт корисної дії $\eta_{пол}$ та внутрішня потужність нагнітача N_i за даними, які фіксуються інформаційно-вимірювальною системою. Отримані залежності $\eta_{пол} = f(Q_{пр})$ і $N_i = f(G)$ апроксимують поліномом другої степені

$$\mu(q) = a_0 + a_1 q + a_2 q^2, \qquad (1)$$

де $\mu(q) \in \{f(Q_{пр}), f(G)\}$, $q \in \{Q_{пр}, G\}$; $Q_{пр}$, G - приведена об'ємна і масова продуктивності нагнітача.

Коефіцієнти, що входять у модель (1),

обчислюються за методом найменших квадратів

$$\bar{a} = CF^T \bar{\mu},$$

де $\bar{a}^T = (a_0, a_1, a_2)$ – вектор параметрів моделі (1); $C = \left(FF^T\right)^{-1}$ – дисперсійна матриця; $F = \begin{bmatrix} 1 & q^{(1)} & \left(q^{(1)}\right)^2 \\ 1 & q^{(2)} & \left(q^{(2)}\right)^2 \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & q^{(N)} & \left(q^{(N)}\right)^2 \end{bmatrix}$ - матриця розміром $N \times 3$; N – кількість точок спостережень; $\bar{\mu}$ – вектор, компонентами якого є значення $\eta_{пол}$ чи N_i у точках спостережень.

У процесі роботи ВНЦ зміна його технічного стану відбувається під дією експлуатаційних факторів, що приводить до дрейфу статичних характеристик нагнітача відносно його початкової характеристики. Якщо тепер статичні характеристики $\eta_{пол} = f(Q_{пр})$ і $N_i = f(G)$ фіксувати через певні проміжки часу, то їх апроксимація рівнянням (1) породжує сімейство кривих (рис. 1).

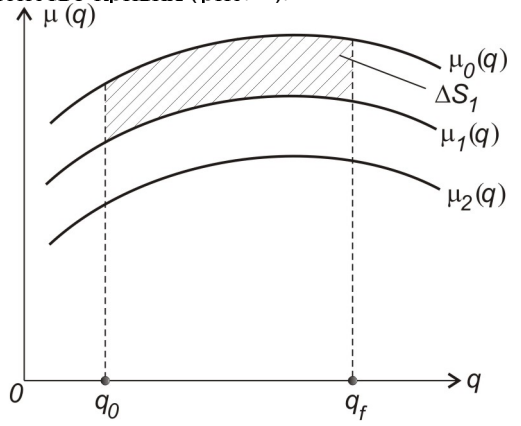


Рисунок 1 – До формування інтегральної діагностичної ознаки

Інтегральні діагностичні ознаки φ_i визначимо як відношення зміни площі ΔS_i до початкової площі S_0 (рис. 1):

$$\varphi_i = \frac{\Delta S_i}{S_0}.$$

Оскільки $\Delta S_i = S_0 - S_i$, то

$$\varphi_i = 1 - \frac{S_i}{S_0}. \qquad (2)$$

Величину S_i визначимо за формулою

$$S_i = \int_{q_0}^{q_f} \mu_i(q) dq. \qquad (3)$$

Враховуючи значення $\mu_i(q)$, отримаємо, що

$$S_i = a_0^{(i)}(q_f - q_0) + \frac{a_1^{(i)}}{2}\left(q_f^2 - q_0^2\right) + \frac{a_2^{(i)}}{3}\left(q_f^3 - q_0^3\right), \quad i = \overline{0,m}, \qquad (4)$$

де m - кількість періодів, на протязі яких здійснюється спостереження за роботою нагнітачів.

Оскільки інтервали інтегрування у формулі (3) для статичних характеристик $\eta_{пол} = f(Q_{пр})$ і $N_i = f(G)$, що отримані за кожний із m місяців, є різними, то для правомірного співставлення площ S_i інтервали інтегрування слід вибрати із умови

$$q_0 = \max_i(q_i), \; i = \overline{1,m},$$
$$q_f = q_0 + \Delta q,$$

де $\Delta q = \min_i(\Delta q_i)$; $\Delta q_i = \max(q_i) - \min(q_i)$; $q_0 \in \{G_0, Q_{пр,0}\}$; $q_f \in \{G_f, Q_{пр,f}\}$.

Із формули (4) випливає, що $0 \le \varphi_i < 1$. Якщо $\varphi_i = 0$ при $i \ge 1$, то це означає, що немає зміщення характеристики $\eta_{пол} = f(Q_{пр})$ або $N_i = f(G)$ і вичерпний ресурс ВНЦ дорівнюватиме нулю. Збільшення величини φ_i приводить до збільшення вичерпного ресурсу. Очевидно, що існують певні граничні значення $\varphi_{гр}^{(j)}$, $j = 1, 2$, коли залишковий ресурс дорівнюватиме нулю.

Ознака $\varphi_i^{(1)}$ - це діагностична ознака за політропним к. к. д. нагнітача, а ознака $\varphi_i^{(2)}$ - це діагностична ознака за внутрішньою потужністю ВНЦ.

Для оцінки вичерпного ресурсу ВНЦ у роботі [3] залежності $\varphi^{(1)} = f_1(t)$ і $\varphi^{(2)} = f_2(t)$ апроксимовані такими емпіричними моделями:

$$\varphi_1(t) = \alpha_1 t^{\beta_1}, \qquad (5)$$
$$\varphi_2(t) = \alpha_2\left(e^{\beta_2 t} - 1\right). \qquad (6)$$

Для даних, які відображені на рис. 1, були

отримані наступні коефіцієнти залежностей (5) і (6): $\alpha_1 = 0{,}0739$, $\beta_1 = 0{,}2572$ і $\alpha_2 = 3{,}8170 \cdot 10^{-10}$, $\beta_2 = 2{,}4480$.

Якщо відомі граничні $\varphi_{гр}^{(1)}$ і $\varphi_{гр}^{(2)}$, то із рівнянь (5) і (6) можна визначити $t_{гр}^{(1)}$ і $t_{гр}^{(2)}$ таким чином:

$$t_{гр}^{(1)} = \left(\varphi_{гр}^{(1)} / \alpha_1\right)^{1/\beta_1},$$

$$t_{гр}^{(2)} = \frac{1}{\beta_2} \ln\left(\frac{\varphi_{гр}^{(2)}}{\alpha_2} + 1\right).$$

Очевидно, що вичерпний ресурс нагнітача $t_{гр}$ визначиться як найменше із двох значень $t_{гр}^{(1)}$ і $t_{гр}^{(2)}$, тобто

$$t_{гр} = \min\left(t_{гр}^{(1)}, t_{гр}^{(2)}\right). \qquad (7)$$

Метою даної роботи є визначення граничних значень $\varphi_{гр}^{(1)}$ і $\varphi_{гр}^{(2)}$. ДСТУ 3761-95 визначає норми вібрації підшипників відцентрових нагнітачів (компресорів) у залежності від середніх квадратичних значень віброшвидкостей σ_v. Для жорсткого кріплення $\sigma_v^{(гр)}$=11,2 мм/с, а при установленні на віброізолятор ця величина дорівнюватиме 18 мм/с.

Для визначення граничних значень $\varphi_{гр}^{(1)}$ і $\varphi_{гр}^{(2)}$ необхідно знайти функціональні залежності $\varphi^{(1)} = \phi_1(\sigma_v)$ і $\varphi^{(2)} = \phi_2(\sigma_v)$. На рис. 2 наведені залежності інтегральних діагностичних ознак φ_1 і φ_2 у функції σ_v, які отримані в умовах Долинського лінійного управління магістральними газопроводами для відцентрового нагнітача ГП16С.

Апроксимуємо залежності $\varphi^{(1)} = \phi_1(\sigma_v)$ і $\varphi^{(2)} = \phi_2(\sigma_v)$ певним функціональним наближенням – емпіричною моделлю, а $\varphi \in \{\varphi^{(1)}, \varphi^{(2)}\}$. Побудова емпіричної моделі передбачає вибір деякої залежності на основі експериментально отриманих значень $\varphi_i^{(j)}$, $j = 1, 2$, $i = \overline{1, m}$, та оцінку коефіцієнтів (параметрів) моделі.

Отже, необхідно за даними $\varphi_i^{(1)}$ і $\varphi_i^{(2)}$, які залежать від змінної σ_v, визначити, який функціональний зв'язок існує між $\varphi_i^{(1)}$ (або $\varphi_i^{(2)}$) і середнім квадратичним значенням віброшвидкості σ_v. Як видно із рис. 2 функції $\phi_1(\sigma_v)$ і $\phi_2(\sigma_v)$ є нелінійними відносно аргументу σ_v. Залежності $\phi_1(\sigma_v)$ і $\phi_2(\sigma_v)$ можна описати поліномами n-ої степені виду:

$$\phi(\sigma_v) = \sum_{i=0}^{n} c_i \sigma_v^i,$$

де $\phi(\sigma_v) \in \{\phi_1(\sigma_v), \phi\varphi_2(\sigma_v)\}$; c_i - коефіцієнти поліному, $i = \overline{1, n}$ (у нашому випадку $n \le 4$).

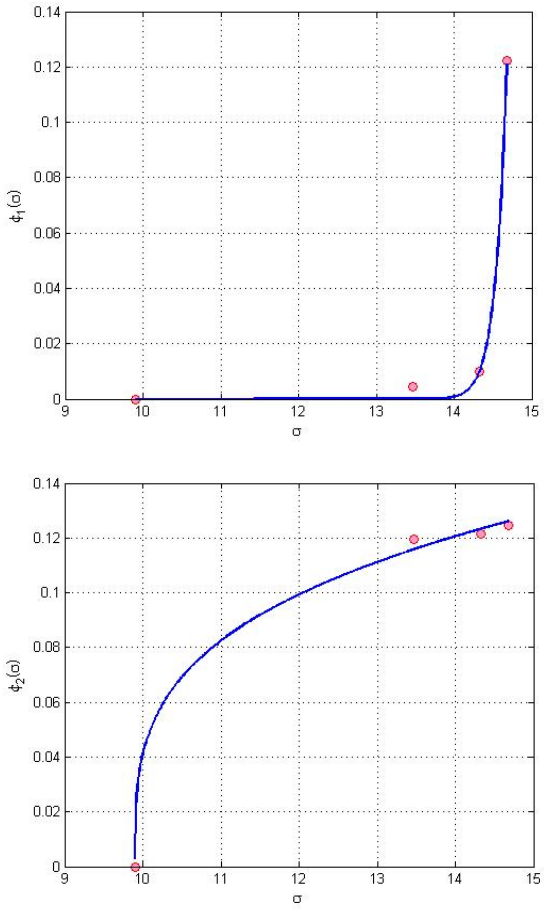


Рисунок 2 – Графічне відтворення залежностей $\varphi^{(1)} = \phi_1(\sigma_v)$ і $\varphi^{(2)} = \phi_2(\sigma_v)$

На цьому ж рисунку нанесені значення інтегральних діагностичних ознак (у вигляді кружків), які розраховані за формулою (2).

Були вибрані поліноми 2 – 4 степенів і для них знайдені коефіцієнти за методом найменших квадратів. Аналіз отриманих результатів показав, що поза вузлами апроксимації отримані криві не забезпечують плавну зміну ознак $\varphi^{(1)}$ і $\varphi^{(2)}$. Як альтернатива

були запропоновані залежності

$$\phi^{(i)}(\sigma_v) = \alpha_i\left(\sigma_v - \sigma_v^{(0)}\right)^{\beta_i},\ i = 1, 2, \qquad (8)$$

де α_i, β_i - параметри моделей (8); $\sigma_v^{(0)}$ - значення параметру віброшвидкості, коли $\varphi^{(i)} = 0$.

Логарифмуючи ліву і праву частини залежності (5) і увівши такі позначення: $Y_i = \ln\varphi^{(i)}$, $a_0^{(i)} = \ln\alpha_i$, $a_1^{(i)} = \beta_i$ і $X = \ln\left(\sigma_v - \sigma_v^{(0)}\right)$, отримуємо, що

$$Y_i = a_0^{(i)} + a_1^{(i)} X,\ i = 1, 2.$$

Для перевірки лінійного зв'язку між змінними X і Y_i коефіцієнт кореляції $\rho_{XY_i}^{(i)}$ обчислювався таким чином:

$$\rho_{XY_i}^{(i)} = \frac{\sum_{k=1}^{N}\left(X_k - \overline{X}\right)\left(Y_i^{(k)} - \overline{Y}_i\right)}{\sqrt{\sum_{k=1}^{N}\left(X_k - \overline{X}\right)^2 \sum_{i=1}^{N}\left(Y_i^{(k)} - \overline{Y}\right)^2}},$$

де N - число експериментальних точок; $\overline{X}$, $\overline{Y}_i$ - оцінки математичних сподівань випадкових величин X і Y_i.

Для експериментальних даних, які наведені на рис. 2, були отримані такі значення вибіркових коефіцієнтів кореляції: $\rho_{XY_1}^{(1)} = 0{,}9990$, $\rho_{XY_2}^{(2)} = 0{,}9644$. Оскільки значення $\rho_{XY_1}^{(1)}$ і $\rho_{XY_2}^{(2)}$ близькі до одиниці, то можна стверджувати, що між змінними X і Y_1 та X і Y_2 існує лінійний зв'язок, а це свідчить про те, що залежності $\phi_1(\sigma_v)$ і $\phi_2(\sigma_v)$ можна вибрати у формі (8).

Наступним кроком у процесі побудови емпіричних моделей (8) є оцінка їх параметрів, яка здійснюється за методом найменших квадратів:

$$J(\alpha_i, \beta_i) = \min_{\alpha_i, \beta_i} \sum_{k=1}^{N}\left(\varphi_k - \phi(z_k, \alpha_i, \beta_i)\right)^2, \qquad (9)$$

де $\varphi_k \in \left\{\varphi_k^{(1)}, \varphi_k^{(2)}\right\}$ - експериментально отримані значення інтегральних діагностичних ознак у k-му спостереженні; $\phi(z_k) \in \left\{\phi_1(z_k), \phi_2(z_k)\right\}$ - обчислені значення інтегральних діагностичних ознак за формулою (8) при $z = z_k$; $z_k = \sigma_v^{(k)} - \sigma_v^{(0)}$.

Задача (9) є задачею ідентифікації, метою розв'язку якої є визначення оцінок параметрів моделей (8). Ця задача є задачею нелінійного оцінювання параметрів α_i, β_i і ефективність її розв'язку залежить від топології функції нев'язки $J(\alpha_i, \beta_i)$.

Проведений аналіз показав [3], що топологія функцій, подібних до $J(\alpha_i, \beta_i)$, має вигляд «яру». Добре відомо [4, 5], що застосування методів локальної оптимізації не приводить до розв'язку задачі (9), оскільки градієнт функції $J(\alpha_i, \beta_i)$ різко змінює своє значення на дні «яру». Отже, локальний пошук приводить процес обчислень лише на дно «яру», а там практично зводить до мінімуму швидкість збіжності параметрів α_i і β_i до своїх оптимальних значень. Навіть, якщо використовувати спеціальні методи локальної оптимізації, то немає впевненості, що без достатньо доброго початкового наближення отримаємо розв'язок задачі (8). Такі обчислювальні труднощі можна подолати, якщо скористатися тією обставиною, що параметри α_i входять у рівняння (8) лінійно.

Для моделі (8) критерій апроксимації (9) набуде такого вигляду:

$$J(\alpha_i, \beta_i) = \min_{\alpha_i, \beta_i} \sum_{k=1}^{N}\left(\varphi_k - \alpha_i z_k^{\beta_i}\right)^2. \qquad (10)$$

Необхідні умови існування розв'язку задачі (10) породжують таку систему рівнянь:

$$\frac{\partial J(\alpha_i, \beta_i)}{\partial \alpha_i} = -2\sum_{k=1}^{N}\left(\varphi_k - \alpha_i z_k^{\beta_i}\right) z_k^{\beta_i} = 0,\ i = 1, 2, \qquad (11)$$

$$\frac{\partial J(\alpha_i, \beta_i)}{\partial \beta_i} = -2\alpha_i \sum_{k=1}^{N}\left(\varphi_k - \alpha_i z_k^{\beta_i}\right) z_k^{\beta_i} \ln z_k = 0. \qquad (12)$$

Розв'яжемо рівняння (11) відносно параметру моделі α_1:

$$\alpha_i = \sum_{k=1}^{N} \varphi_k z_k^{\beta_i} \Big/ \sum_{i=1}^{N} z_k^{2\beta_i}. \qquad (13)$$

Підставивши значення α_i у рівняння (12), отримуємо, що

$$\sum_{k=1}^{N} \varphi_k z_k^{\beta_i} \ln z_k - \frac{\sum_{k=1}^{N} \varphi_k z_k^{\beta_i}}{\sum_{k=1}^{N} z_k^{2\beta_i}} \sum_{k=1}^{N} z_k^{2\beta_i} \ln z_k = 0. \qquad (14)$$

Таким чином, розв'язок задачі (10)

зводиться до знаходження кореня рівняння (14) з наступною підстановкою знайденого значення β_i у формулу (13), із якої визначаємо параметр α_i. Рівняння (14) нелінійне і розв'язати його можна одним із методів пошуку нуля функції однієї змінної. Ми використали метод половинного ділення відрізка, оскільки інші методи потребують обчислення похідних (метод Ньютона) або не гарантують збіжності обчислювальної процедури (метод січних і хибного положення) [4].

Як приклад на рис. 3 показаний графік функції

$$Y(\beta_1)=\sum_{k=1}^{N}\varphi_k z_k^{\beta_1}\ln z_k-\frac{\sum_{k=1}^{N}\varphi_k z_k^{\beta_1}}{\sum_{k=1}^{N} z_k^{2\beta_1}}\sum_{k=1}^{N} z_k^{2\beta_1}\ln z_k,$$ із

якого видно, що функція має локальний нуль при $\beta_1>0$. Розв'язок задачі (9) дав такі результати: $\alpha_1=1{,}4511\cdot10^{-23}$, $\beta_1=32{,}2644$ і $J(\alpha_1,\beta_1)=1{,}9610\cdot10^{-5}$.

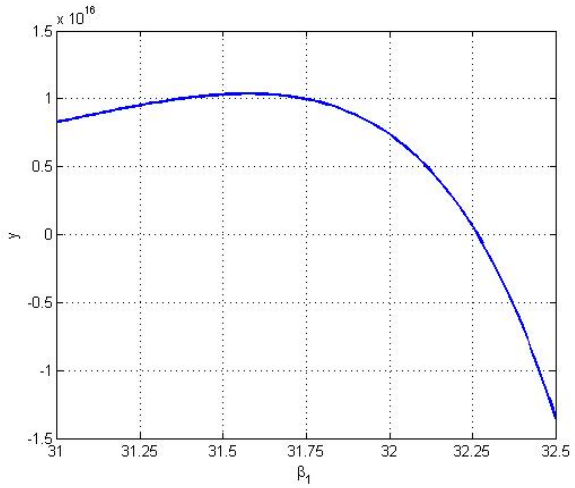


Рисунок 3 – Залежність $Y(\beta_1)$

Аналогічним чином були знайдені $\alpha_2=0{,}0802$, $\beta_2=0{,}2891$. При цьому $J(\alpha_2,\beta_2)=2{,}8076\cdot10^{-5}$.

Оскільки ДСТУ 3761-95 регламентує значення $\sigma_v^{(гр)}$, то із рівняння (8) знаходимо $\varphi_{гр}^{(1)}=\alpha_1\left(\sigma_v^{(гр)}-\sigma_v^{(0)}\right)^{\beta_1}$ і $\varphi_{гр}^{(2)}=\alpha_2\left(\sigma_v^{(гр)}-\sigma_v^{(0)}\right)^{\beta_2}$. Знаючи $\varphi_{гр}^{(1)}$ і $\varphi_{гр}^{(2)}$, із умови (7) знайдемо прогнозований час $t_{гр}$, який визначає ресурс газоперекачувальних агрегатів за рівнем середньої квадратичної швидкості підшипників ВЦН природного газу.

Для отриманих експериментальних даних при $\sigma_v^{(гр)}$=18 *мм/с* і $\sigma_v^{(0)}$=9,902 *мм/с* отримаємо, що $t_{гр}=8{,}075$ місяців.

ВИСНОВКИ

Розроблена методика дає можливість за інтегральними діагностичними ознаками і за граничним значенням середньоквадратичної віброшвидкості прогнозувати ресурс газоперекачувальних агрегатів, що відкриває можливості для переходу від планового ремонту ГПА до їх ремонту за технічним станом.

1. Копей Б. В. Прогнозирование ресурса газоперекачивающих агрегатов по уровню вибраций подшипников нагнетателя / Б.В. Копей, М. И. Горбийчук, А. Беллауар // Нафтогазова енергетика. – 2009. - № 1(10). – С. 45 – 55. 2. Горбійчук М. І. Інтегральні діагностичні ознаки технічного стану відцентрових нагнітачів природного газу / М.І. Горбійчук, С.Т. Самуляк, І. В. Щупак // Методи та прилади контролю якості. – 2009. – № 22. – С. 17 – 21. 3. Горбійчук М.І. Ідентифікація математичної моделі технічного стану нагнітачів природного газу / М.І. Горбійчук, С.Т. Самуляк, І.В. Щупак // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2009. – № 4/3 (40). – С. 34 – 38. 4. Растригин Г. Н. Системы экстремального управления / Г. Н. Растригин – М.: Наука, 1974. – 632 с. 5. Гилл Ф. Практическая оптимизация / Ф. Гилл, У. Мюррей, М. Райт: [пер. с англ. В.Ю. Лебедева]. – М.: Мир, 1985. – 509 с.

Поступила в редакцію 30.10.2009р.

Рекомендував до друку докт. техн. наук, проф. Заміховський Л.М.