УДК 681.327.12.001.362; 519.7; 519.81

ЕФЕКТИВНИЙ МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ВІДЦЕНТРОВИХ НАГНІТАЧІВ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ ЗА ОПЕРАТИВНИМИ ДАНИМИ

© Адаменко А. В., Адаменко В. А., 2000
Харківський державний технічний університет радіоелектроніки

© Тевяшева О. А., 2000
Харківський державний політехнічний університет

Описано ефективний метод оцінювання продуктивності відцентрових нагнітачів газоперекачувальних агрегатів, що дозволяє визначати адекватність вхідних даних і моделі відцентрового нагнітача. Практичне застосування запропонованого методу підтвердило можливість його використання в системах технічної діагностики реального часу.

Проблема оцінювання витрати газу, що транспортується, є найважливішою і найактуальнішою у газовій промисловості. Пропонується ефективний метод оцінювання продуктивності відцентрових нагнітачів (ВДН) газоперекачувальних агрегатів (ГПА) компресорних станцій магістральних газопроводів, який має такі переваги супроти існуючих: використання усіх існуючих результатів вимірювань змінних, що характеризують склад і стан газу і стан ГПА; врахування похибки засобів вимірювань; можливість додаткової перевірки міри адекватності вхідних даних і адекватності моделі ГПА. Усе це дозволило досягнути високої точності і надійності при обчисленні витрати газу.

Термодинамічна модель ВДН. Згідно [1], основними термодинамічними характеристиками ВДН є: залежності степеня стиснення $\varepsilon = P_k / P_н$, політропічного коефіцієнта корисної дії η і відносної приведеної внутрішньої потужності $\left(N/\gamma_н\right)_{пр}$ від приведеної об'ємної продуктивності $Q_{пр}$ ($м^3/хв$) і приведеного відносного числа обертів $\left(n/n_0\right)_{пр}$, де $P_н$, P_k - тиски газу на вході і на виході ВДН ($кгс/см^2$), n_0 — номінальне число обертів на ВДН ($об/хв$), n - оберти приводу на ВДН ($об/хв$). Степінь стиснення $\varepsilon\left(Q_{пр},\left(n/n_0\right)_{пр}\right)$ при $\left(n/n_0\right)_{пр}=1$ можна подати у вигляді такого многочлену другого степеня [2]:

$$\varepsilon_0\left(Q_{пр},1\right) = a_0 + a_1 Q_{пр} + a_2 Q_{пр}^2 . \qquad (1)$$

Функції $\eta\left(Q_{пр}\right)$ і $\left(N/\gamma_н\right)_{пр}\left(Q_{пр}\right)$ добре наближаються многочленами третього степеня [2]:

$$\eta\left(Q_{пр}\right) = d_0 + d_1 Q_{пр} + d_2 Q_{пр}^2 + d_3 Q_{пр}^3 , \qquad (2)$$

$$\left(N/\gamma_н\right)_{пр}\left(Q_{пр}\right) = c_0 + c_1 Q_{пр} + c_2 Q_{пр}^2 + c_3 Q_{пр}^3 . \qquad (3)$$

Формули приведення мають вигляд [2]:

$$\left(n/n_0\right)_{пр} = \frac{n}{n_0}\sqrt{\frac{Z_{пр}R_{пр}T_{пр}}{Z_н R_н T_н}} ,$$

$$\left(N/\gamma_н\right)_{пр} = \left(n_0/n\right)^3 \frac{N}{\gamma_н} , \qquad (4)$$

$$Q_{пр} = \frac{n_0}{n}\gamma_0 \frac{Z_н R_н T_н}{P_н \cdot 10^4}\frac{q\cdot 10^6}{1440} ,$$

де $Z_{пр}$, $R_{пр}$ ($\frac{кгс\cdot м}{кг\cdot K}$), $T_{пр}$ (K)— приведені значення коефіцієнта стиснення, газової постійної і температури газу; $Z_н$, $R_н$ ($\frac{кгс\cdot м}{кг\cdot K}$), $T_н$ (K)— коефіцієнт стиснення газу, газова постійна і температура на вході ВДН; $\gamma_н$ - питома вага газу перед ВДН ($кгс/м^3$); N - внутрішня потужність, яку споживає ВДН (кВт); q - комерційна витрата газу на ГПА (млн. $м^3/добу$), γ_0 - питома вага газу в нормальних умовах ($кгс/м^3$).

У формулах (1)…(3) a_0, a_1, a_2, c_0, c_1, c_2, c_3, d_0, d_1, d_2, d_3 — коефіцієнти апроксимації відповідних функцій.

Таким чином, основними термодинамічними характеристиками ВДН є приведені характеристики (1)…(3).

Формула для перерахування $\varepsilon\left(Q_{пр},(n/n_0)_{пр}\right)$ при зміні числу обертів на ВДН і фізичних параметрів газу має вигляд [2]:

$$\varepsilon=\left[1+\left(\frac{n}{n_0}\right)^2_{пр}\left(\varepsilon_0^{\frac{m-1}{m}}-1\right)\right]^{\frac{m}{m-1}}, \qquad (5)$$

де m - показник політропи.

Важливою характеристикою потоку газу в нагнітачеві є також його температура. Абсолютна температура газу на виході нагнітача T_k визначається через температуру на його вході $T_н$ таким чином [2]:

$$T_k=T_н\varepsilon^{\frac{m-1}{m}}. \qquad (6)$$

При оцінюванні продуктивності відцентрових нагнітачів газоперекачувальних агрегатів необхідно враховувати технологічні обмеження, що задаються у вигляді таких нерівностей:

$$Q_{пр.min}\le Q_{пр}\le Q_{пр.max}, \qquad (7)$$

$$n_{min}\le n\le n_{max},\ P_k\le P^{max},\ T_k\le T^{max}, \qquad (8)$$

де $Q_{пр.min}$, $Q_{пр.max}$ - мінімально і максимально допустимі значення приведеної об'ємної продуктивності ($м^3/хв$); n_{min}, n_{max} - мінімальна і максимальна частота обертання валу нагнітача ($об/хв$); P^{max} - максимальний тиск нагнітача, що визначається міцністю труб ($кгс/см^2$); T^{max} - обмеження зверху на температуру газу на виході ВДН, що залежить від властивостей ізоляційного покриття (К).

Для постановки і вирішення задачі оцінювання продуктивності ВДН за основні рівняння і нерівності моделі будемо використовувати формули (5)…(8). З метою розширення області зміни змінних моделі ВДН, забезпечення монотонності залежності кожною із цих змінних, підвищення стійкості моделі і забезпечення умов її розв'язання, ці рівняння і нерівності необхідно модифікувати таким чином, щоб в області зміни реальних значень змінних моделі початкові і модифіковані рівняння і нерівності моделі збігалися. Модифіковану систему рівнянь і нерівностей (5)…(8) моделі ВДН представимо у вигляді:

$$\varepsilon=\left[1+\left(\frac{n}{n_0}\right)^2_{пр}\left(\varepsilon_0^{\frac{m-1}{m}}-1\right)\right]^{\frac{m}{m-1}}, \qquad (9)$$

$$T_k=T_н\left(\frac{P_k}{P_н}\right)^{\frac{m-1}{m}}, \qquad (10)$$

$$Q_{пр.min}\le Q_{пр}\le Q_{пр.max}, \qquad (11)$$

$$n_{min}\le n\le n_{max},\ P_k\le P^{max},\ T_k\le T^{max}, \qquad (12)$$

де $\varepsilon=P_k/P_н$; $\varepsilon_0=a_0+a_1Q_{пр}+a_2Q_{пр}^2$; $m=\dfrac{k\,\eta}{k\,(\eta-1)+1}$; $\eta=d_0+d_1Q_{пр}+d_2Q_{пр}^2+d_3Q_{пр}^3$;

$$\frac{k}{k-1}=\frac{k_0}{k_0-1}\cdot\left(1+\frac{d_{Cp}}{R}\cdot\frac{k_0-1}{k_0}\right)\cdot\frac{1}{Z_{cp}\cdot(1+X\,\eta)}, \qquad (13)$$

де k - показник адіабати, $\dfrac{k_0}{k_0-1}=5.15+\dfrac{(5.65+0.017\cdot t_{cp})\Delta}{1.987}$; k_0 — показник "ізоентропи" газу в ідеальному стані; $Z_{cp}=(Z_н+Z_k)/2$ — середній приведений коефіцієнт стиснення газу; $Z_н=Z(P_н,T_н)$ — коефіцієнт стиснення газу на вході ВДН; $Z_k=Z(P_k,T_k)$ — коефіцієнт стиснення газа на виході ВДН; $\Delta=\rho_н/1{,}206$ — відносна густина газу по повітрю; $\rho_н$ — густина сухого газу при нормальних умовах ($кг/м^3$),

$Q_{пр}=\dfrac{n_0}{n}\gamma_0\dfrac{Z_н\cdot R_н\cdot In_{T_{min}}^{T_{max}}(T_н)}{P_н}\dfrac{q}{1440}10^2$; T_{min}, T_{max} - мінімально і максимально допустимі значення температури газу (К),

$$Z(P,T)=1-\left(\left(In_{P_{min}}^{P_{max}}(P)-6\right)\cdot\left(\frac{0.345\,\Delta}{10^2}-\frac{0.446}{10^3}\right)+0.015\right)\times$$
$$\times\left(1.3-0.0144\left(In_{T_{min}}^{T_{max}}(T)-283.2\right)\right)$$

- коефіцієнт стиснення газу; P_{min}, P_{max} — мінімально і максимально допустимі значення тиску газу;

$$In_{x_{min}}^{x_{max}}(x)=\begin{cases}x,\ x_{min}<x<x_{max},\\ x_{min},\ x\le x_{min},\\ x_{max},\ x\ge x_{max},\end{cases}$$

— функція проектування точки на область;

$$\left(\frac{n}{n_0}\right)^2_{пр}=\left\{\begin{array}{l}\dfrac{Z_{пр}R_{пр}T_{пр}}{Z_н\cdot R_н\cdot In_{T_{min}}^{T_{max}}(T_н)}\left(\dfrac{n}{n_0}\right)^2,\\ якщо\ Z_н In_{T_{min}}^{T_{max}}(T_н)>Z_{min}T_{min},\\ \left(\dfrac{n}{n_0}\right)^2,\ в\ інших.\ випадках.\end{array}\right\}$$

— приведені оберти ВДН; Z_{min} — мінімально допустиме значення коефіцієнту стиснення.

$X=\left(\dfrac{1.23+0.12\,P_{пр.ср}}{T_{пр.ср}^2}-0.061\right)\cdot\dfrac{P_{пр.ср}}{T_{пр.ср}\,Z_{ср}}$ - коефіцієнт ізобаричного стиснення газу;

$\frac{d_{Cp}}{R} = \frac{P_{пр.ср} \cdot (2.46 + 0.12\, P_{пр.ср})}{T_{пр.ср}{}^3}$ - середній приведений коефіцієнт теплоємкості газу;

$P_{пр.ср} = (P_{пр.н} + P_{пр.к})/\,2$ - середній приведений тиск; $T_{пр.ср} = (T_{пр.н} + T_{пр.к})/2$ - середня приведена температура; $P_{пр.н} = (\,P_н + 1.033\,)/\,P_{пк}$ - приведений тиск на вході нагнітача; $P_{пр.к} = (\,P_k + 1.033\,)/\,P_{пк}$ — приведений тиск на виході нагнітача;

$T_{пр.н} = T_н / T_{пк}$ — приведена температура на вході нагнітача, $T_{пр.k} = T_k / T_{пк}$ - приведена температура на виході нагнітача;

$P_{пк} = 30.168 \cdot (0.05993(26.831 - \rho_н) + N_{CO_2} - 0.392\, N_{N_2})$ - псевдокритичний тиск; N_{CO_2}, N_{N_2} - молярні концентрації вуглекислого газу і азоту у газі ,що транспортується у частках одиниці;

$T_{пк} = 88.25 \cdot (1.7591(0.56364 + \rho_н) - N_{CO_2} - 1.681\, N_{N_2})$ - псевдокритична температура;

$t_{ср} = (T_н + T_k)/2 - 273.15$ - середнє значення температури.

Метод оцінювання продуктивності ВДН ГПА. Задача оцінювання продуктивності ГПА зводиться до розв'язання системи рівнянь і нерівностей моделі ВДН (9)…(12) відносно невідомої змінної q. Останні усі змінні моделі ВДН вважаються відомими. Система (9)…(12) буде перевизначеною. Тому її розв'язання можна знайти тільки у статистичному розумінні.

Нехай є набори вимірюваних значень тисків, температур і числа обертів на ВДН: $\widetilde{P}_н$, $\widetilde{P}_k$, $\widetilde{T}_н$, $\widetilde{T}_k$, $\widetilde{n}$. Значення тисків, температур, числа обертів ,що вимірюються, представимо у вигляді:

$$\widetilde{P}_н = P_н^{ист} + \xi_{P_н},\ \widetilde{P}_k = P_k^{ист} + \xi_{P_k},$$
$$\widetilde{T}_н = T_н^{ист} + \xi_{T_н},\ \widetilde{T}_k = T_k^{ист} + \xi_{T_k}, \qquad (14)$$
$$\widetilde{n} = n^{ист} + \xi_n,$$

де $P_н^{ист}$, $P_k^{ист}$, $T_н^{ист}$, $T_k^{ист}$, $\widetilde{n}^{ист}$ — істинні значення тисків, температур і числа обертів; $\xi_{P_н}$, ξ_{P_k}, $\xi_{T_н}$, ξ_{T_k}, ξ_n — помилки вимірювань відповідних змінних.

Вважається, що помилки вимірювань є випадковими величинами, які розподілені за нормальним законом із нульовим математичним очікуванням і відомими дисперсіями, тобто

$$\xi_{P_н} \sim N(0, \sigma^2_{P_н}),\ \xi_{P_k} \sim N(0, \sigma^2_{P_k}),$$
$$\xi_{T_н} \sim N(0, \sigma^2_{T_н}),\ \xi_{T_k} \sim N(0, \sigma^2_{T_k}),\ \xi_n \sim N(0, \sigma^2_n).$$

Прийнято вважати, що помилки вимірювань тисків, температур, числа обертів статистично незалежні один від одного [3]. У цьому випадку сумісна функція щільності розподілу помилок буде дорівнювати добутку функцій щільності розподілу помилок змінних моделі. Функція максимальної правдоподібності з урахуванням статистичних властивостей помилок змінних моделі ВДН і з урахуванням формули (14) буде мати такий вигляд:

$$F = (2\pi)^{-\frac{6}{2}} \cdot \sigma^{-1}_{P_н} \cdot \sigma^{-1}_{P_k} \cdot \sigma^{-1}_{T_н} \cdot \sigma^{-1}_{T_k} \cdot \sigma^{-1}_n \cdot exp\left(-\frac{1}{2}\frac{(\widetilde{P}_н - P_н)^2}{\sigma^2_{P_н}}\right) \cdot exp\left(-\frac{1}{2}\frac{(\widetilde{P}_k - P_k)^2}{\sigma^2_{P_k}}\right) \times$$
$$\times exp\left(-\frac{1}{2}\frac{(\widetilde{T}_н - T_н)^2}{\sigma^2_{T_н}}\right) exp\left(-\frac{1}{2}\frac{(\widetilde{T}_k - T_k)^2}{\sigma^2_{T_k}}\right) exp\left(-\frac{1}{2}\frac{(\widetilde{n} - n)^2}{\sigma^2_n}\right). \qquad (15)$$

Прологарифмуємо (15) і одержемо логарифмічну функцію максимальної правдоподібності:

$$ln\,F = -3\,ln(2\pi) - ln\,\sigma_{P_н} - ln\,\sigma_{P_k} - ln\,\sigma_{T_н} - ln\,\sigma_{T_k} - ln\,\sigma_n -$$
$$-\frac{1}{2}\frac{(\widetilde{P}_н - P_н)^2}{\sigma^2_{P_н}} - \frac{1}{2}\frac{(\widetilde{P}_k - P_k)^2}{\sigma^2_{P_k}} - \frac{1}{2}\frac{(\widetilde{T}_н - T_н)^2}{\sigma^2_{T_н}} - \frac{1}{2}\frac{(\widetilde{T}_k - T_k)^2}{\sigma^2_{T_k}} - \frac{1}{2}\frac{(\widetilde{n} - n)^2}{\sigma^2_n}.$$

Функції F і lnF досягають екстремуму при однакових значеннях аргументів (наслідок монотонно зростаючого характеру функції lnF), що дозволяє формулювати початкову задачу як задачу максимізації функції lnF або як задачу мінімізації функції (-lnF). У цьому випадку задача оцінювання фактичних параметрів моделі ВДН буде мати вигляд:

$$\frac{(\widetilde{P}_н - P_н)^2}{\sigma^2_{P_н}} + \frac{(\widetilde{P}_k - P_k)^2}{\sigma^2_{P_k}} + \frac{(\widetilde{T}_н - T_н)^2}{\sigma^2_{T_н}} +$$
$$+ \frac{(\widetilde{T}_k - T_k)^2}{\sigma^2_{T_k}} + \frac{(\widetilde{n} - n)^2}{\sigma^2_n} \xrightarrow[P_н, P_k, T_н, T_k, n, q \in \Omega]{} min, \qquad (16)$$

де область обмежень Ω описується рівняннями і нерівностями моделі ВДН (9)…(12).

Задача (16) є задачею умовної мінімізації. Перехід від задачі умовної мінімізації до задачі безумовної мінімізації можна здійснити, якщо визначити змінну P_k із рівняння (9), а змінну T_k - із рівняння (10) і підставити отримані аналітичні формули в (16). Але знайти аналітичні формули для P_k і T_k в явному вигляді неможливо. Однак, якщо знехтувати залежність показника адіабати k від змінних P_k, T_k у формулах (9) і (10), то тоді можна отримати аналітичні формули для P_k із рівняння (9) і для T_k із рівняння (10). З урахуванням вищевказаного пропонується такий алгоритм розв'язання задачі умовної мінімізації виду (16).

Задаються початковими наближеннями змінних $P_н$, $T_н$, n, що дорівнюють їх вимірюваним значенням ($P_н^{(0)} = \widetilde{P}_н$, $T_н^{(0)} = \widetilde{T}_н$, $n^{(0)} = \widetilde{n}$), задається початкове наближення змінній q ($q^{(0)}$) і обчислюється значення для показника адіабати k ($k^{(0)}$) за формулою (13) з урахуванням значень $P_н^{(0)}$, $T_н^{(0)}$, $n^{(0)}$, $\widetilde{P}_k$, $\widetilde{T}_k$.

i-а ітерація алгоритму вирішення задачі умовної мінімізації ($i = \overline{1, КИ}$, де *КИ* - кількість ітерацій) є такою:

1) знаходяться аналітичні формули для P_k із рівняння (9) і для T_k із рівняння (10) у припущенні, що показник адіабати k є постійною величиною (значення для k отримується на попередньої ітерації: $k = k^{(i-1)}$);

2) знайдені аналітичні формули для P_k і T_k підставляються у функцію цілі (16) і, таким чином, обмеження на рівності (9) і (10) вилучаються. Відповідно, вилучаються змінні P_k, T_k. В результаті отримуємо задачу безумовної мінімізації (обмеження на нерівності (11) і (12) при вирішенні задачі безумовної мінімізації не ураховуються, їх необхідно перевірити після розв'язання задачі). Змінними отриманої задачі безумовної мінімізації будуть: $P_н$, $T_н$, n, q;

3) розв'язання задачі безумовної мінімізації здійснюється будь-яким відомим методом безумовної мінімізації (наприклад, квазіньютоновським методом). Початковим наближенням для вирішення цієї задачі є розв'язання задачі безумовної мінімізації, що отримано на попередній ітерації: $P_н^{(i-1)}$, $T_н^{(i-1)}$, $q^{(i-1)}$, $n^{(i-1)}$. Нехай розв'язанням задачі безумовної мінімізації є: $P_н^{(i)}$, $T_н^{(i)}$, $q^{(i)}$, $n^{(i)}$;

4) за аналітичними формулами, які отримано у п. 1, і з урахуванням значень $P_н^{(i)}$, $T_н^{(i)}$, $q^{(i)}$, $n^{(i)}$ обчислюються значення для P_k, T_k: $P_k^{(i)}$, $T_k^{(i)}$;

5) за знайденими значеннями $P_н^{(i)}$, $T_н^{(i)}$, $q^{(i)}$, $n^{(i)}$, $P_k^{(i)}$, $T_k^{(i)}$ обчислюється значення для показника адіабати k($k^{(i)}$) за формулою (13);

6) перевіряється критерій виходу із умовної мінімізації. Якщо він не виконується, то здійснюється перехід до п. 1. Якщо він виконується, то ітераційний процес завершено.

Таким чином, розв'язання задачі умовної мінімізації виду (16) зводиться до розв'язання послідовності задач безумовної мінімізації. При цьому зневажається залежність показника адіабати *k* від змінних P_k, T_k у формулах (9) і (10) на кожній ітерації, тобто показник адіабати *k* приймається рівним константі на кожній ітерації (значення його на кожній ітерації береться із попередній ітерації). Такий підхід є цілком обгрунтованим, оскільки показник адіабати *k* слабо залежить від P_k і T_k.

Після того, як отримано розв'язок задачі (16), необхідно провести його аналіз. Позначимо розв'язок задачі (16) через $P_н^*$, P_k^*, $T_н^*$, T_k^*, n^*, q^*.

Якщо виконуються умови

$$\left|P_н^* - \widetilde{P}_н\right| \le \delta_{max}^{(P_н)},\ \left|P_k^* - \widetilde{P}_k\right| \le \delta_{max}^{(P_k)},$$
$$\left|T_н^* - \widetilde{T}_н\right| \le \delta_{max}^{(T_н)},\ \left|T_k^* - \widetilde{T}_k\right| \le \delta_{max}^{(T_k)}, \tag{17}$$
$$\left|n^* - \widetilde{n}\right| \le \delta_{max}^{(n)},$$

де $\delta_{max}^{(P_н)}$, $\delta_{max}^{(P_k)}$, $\delta_{max}^{(T_н)}$, $\delta_{max}^{(T_k)}$, $\delta_{max}^{(n)}$ — максимальні похибки вимірювань початкового тиску, кінцевого тиску, початкової температури, кінцевої температури, числа обертів відповідно, то вважається, що помилок у вимірюваннях немає і що модель ВДН ГПА є адекватною. Якщо хоча б одна із умов не виконується, то тоді можливими є два варіанти: або були помилки у процесі передачі результатів вимірювань параметрів на вхід запропонованого алгоритму, або мали місце інші помилки, що призвели до неадекватності вхідних даних (тоді необхідно перевірити правильність введення початкових даних і, якщо була помилка, спробувати знову розв'язати задачу); або модель ВДН ГПА не є адекватною, тобто присутні помилки моделі, і, можливо, деякі параметри моделі потребують корегування (але це вже є окремою задачею).

Приклад розв'язання задачі оцінювання продуктивності відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату. Наведемо результати розв'язання задачі оцінювання продуктивності відцентрового нагнітача газоперекачувального агрегату. При вирішенні цієї задачі було використовано такі значення змінних моделі: $Q_{min} = 150 \ м^3/хв$, $Q_{max} = 450 \ м^3/хв$, $Z_{min} = 10^{-10}$, $R_{пр} = 50 \ \frac{кгс \cdot м}{кг \cdot K}$, $R_н = 49 \ \frac{кгс \cdot м}{кг \cdot K}$, $T_{пр} = 288$ К, $Z_{пр} = 0.91$, γ_0=0.70511 $кгс/м^3$, $T_{гр} = 278$ К, $\rho_н$=0.7236 $кг/м^3$, $N_{CO_2} = 0.003$, N_{N_2}=0.044, $a_0 = 1.21226$, $a_1 = 0.00084532$, $a_2 = -2.589934 \cdot 10^{-6}$, $d_0 = 0.4546676$, $d_1 = 0.00237$, $d_2 = -7.69645 \cdot 10^{-7}$, $d_3 = -8.18505 \cdot 10^{-9}$. Значення тисків, температур, числа обертів, що вимірюються: $\widetilde{P}_н = 46 \ кгс/см^2$, $\widetilde{P}_k = 53.1752 \ кгс/см^2$, $\widetilde{T}_н = 288$ K, $\widetilde{T}_k = 298.051$ K, $\widetilde{n} = 4320$. Дисперсії тисків, температур, числа обертів: $\sigma^2_{P_н} = 0.09$, $\sigma^2_{P_k} = 0.1681$, $\sigma^2_{T_н} = 0.14$, $\sigma^2_{T_k} = 0.09$, $\sigma^2_n = 857 \cdot 10^{-7}$. Максимальні похибки вимірювань тисків, температур, числа обертів: $\delta^{(P_н)}_{max} = 0.6 \ кгс/см^2$, $\delta^{(P_k)}_{max} = 0.82 \ кгс/см^2$, $\delta^{(T_н)}_{max} = 0.75$ K, $\delta^{(T_k)}_{max} = 0.6$ K, $\delta^{(n)}_{max} = 7$. Алгоритм вирішення задачі умовної мінімізації виду (16), наведений у п.2, було програмно реалізовано. Результати розв'язання задач, що виникають на кожній ітерації умовної мінімізації, наведено у табл. 1.

Таблиця 1 - Ітераційний процес розв'язання задачі умовної мінімизації.

№ іте-рації, i	$P_н^{(i)}$, $кгс/см^2$	$T_н^{(i)}$, K	$q^{(i)}$, млн. $м^3/добу$	$n^{(i)}$	$P_k^{(i)}$, $кгс/см^2$	$T_k^{(i)}$, K	Значення функції цілі
1	45.5811	288.7	20.6817	4320	53.8403	297.611	10.225
2	45.5775	288.706	20.6565	4320	53.8458	297.607	10.403
3	45.5776	288.706	20.6572	4320	53.8456	297.608	10.398
4	45.5776	288.706	20.6572	4320	53.8456	297.608	10.398

Як бачимо із табл. 1, ітераційний процес швидко сходиться і результатом розв'язку задачі умовної мінімізації виду (16) буде:

$P_н^* = 45.5776 \ кгс/см^2$, $P_k^* = 53.8456 \ кгс/см^2$, $T_н^* = 288.706$ K, $T_k^* = 297.608$ K, $n^* = 4320$, $q^* = 20.6572$ млн. $м^3/добу$.

Перевіряємо умови згідно (17):

$$\left|P_н^* - \widetilde{P}_н\right| = 0.422 \le \delta^{(P_н)}_{max}, \ \left|P_k^* - \widetilde{P}_k\right| = 0.671 \le \delta^{(P_k)}_{max},$$

$$\left|T_н^* - \widetilde{T}_н\right| = 0.706 \le \delta^{(T_н)}_{max}, \ \left|T_k^* - \widetilde{T}_k\right| = 0.444 \le \delta^{(T_k)}_{max},$$

$$\left|n^* - \widetilde{n}\right| = 342 \cdot 10^{-7} \le \delta^{(n)}_{max}.$$

Умови (17) виконуються. Отже помилок у процесі передачі вимірювань параметрів на вході запропонованого алгоритму немає і модель ВДН ГПА є адекватною.

1. Альбом характеристик центробежных нагнетателей природного газа. - М.: Министерство газовой промышленности СССР, 1985. – 86 с.
2. Евдокимов А. Г., Тевяшев А. Д. Оперативное управление потокораспределением в инженерных сетях. - Харьков: Издательство при Харьковском государственном университете издательского объединения "Вища школа", 1980. - 144 с.
3. А. Тевяшев, С. Козыренко, А. Адаменко. Статистически устойчивая идентификация состояния модели стационарного режима транспорта газа в магистральном газопроводе // Транспортування, контроль якості та облік енергоносіїв. - Львів: Державний університет "Львівська політехніка". - 1998. - С. 48-57.