

УДК 621.438:622.691.4.052.006

**Анализ методик параметрической диагностики
технического состояния центробежных нагнетателей природного газа**

С. И. Перевощиков

Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия
e-mail: perevoschikovsi@tyuiu.ru

Аннотация. Проведен качественный и количественный анализ ряда методик параметрической диагностики технического состояния центробежных нагнетателей природного газа. Выявлены достоинства и недостатки методик. Определено направление устранения основного недостатка методик — их невысокой точности.

Ключевые слова: центробежные нагнетатели; параметрическая диагностика; анализ методик

**Analysis of parametric diagnostics techniques of the technical condition
of centrifugal blowers of natural gas**

Sergey I. Perevoschikov

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia
e-mail: perevoschikovsi@tyuiu.ru

Abstract. In the article, the author conducts a qualitative and quantitative analysis of parametric diagnostics techniques of the technical condition of centrifugal blowers of natural gas. He reveals the advantages and disadvantages of the techniques. In addition, he determines the direction of eliminating the main drawback of the techniques; it is their low accuracy.

Key words: centrifugal blowers; parametric diagnostics; analysis of parametric diagnostics techniques

Введение

Текущее техническое состояние центробежных нагнетателей природного газа (ЦБН) определяется, как правило, параметрическими методами — на основе показаний штатных приборов газоперекачивающих агрегатов (ГПА), в состав которых они входят. В качестве диагностического параметра при этом используется политропический КПД машин $\eta_{пол}$.

С помощью $\eta_{пол}$ (наряду с изотермическим и адиабатным КПД) оценивается совершенство процессов сжатия газа в компрессорных машинах. Поэтому $\eta_{пол}$ позволяет диагностировать не техническое состояние нагне-

тателей в целом, а только отдельных элементов машин, в которых сжатие газа непосредственно протекает, а именно — их проточных частей.

Из всех конструктивных составляющих нагнетателей проточная часть наиболее подвержена износу, так как открыта для внешних воздействий, в первую очередь — постоянному воздействию газовых масс, содержащих различные механические включения и движущихся в проточных частях со значительными скоростями. Такие узлы, как подшипники и уплотнения, наиболее изнашиваемые во всех машинах, у нагнетателей выполняются закрытыми и оснащаются либо системами смазки, либо герметизирующими системами «масло — газ».

Несмотря на тщательную очистку газа на газовых промыслах и на компрессорных станциях (КС) магистральных газопроводов, добиться полного извлечения из него механических включений не удастся. Это приводит к тому, что со временем, даже при незначительной концентрации механических примесей в газе, проточные части машин оказываются подверженными эрозионному износу. Вследствие этого политропический КПД $\eta_{\text{пол}}$ снижается, а расход энергии на привод нагнетателей возрастает.

Единичная мощность современных ЦБН составляет порядка $16 \div 25$ МВт, а политропический КПД данных машин не превышает 0,86. Фактически, при практикуемых режимах работы, $\eta_{\text{пол}}$ находится в пределах $0,8 \div 0,86$. Из приведенных цифр следует, что даже небольшое снижение $\eta_{\text{пол}}$ способно вызвать ощутимый перерасход энергии на привод нагнетателей и столь же заметное повышение затрат на транспорт газа. Поэтому одной из задач эксплуатационных служб КС является отслеживание значений политропических КПД с определением рациональных сроков вывода нагнетателей в ремонт. Эффективное решение данной задачи в значительной степени зависит от методики определения $\eta_{\text{пол}}$.

Объект и методы исследования

На настоящий момент для расчета $\eta_{\text{пол}}$ предложен ряд методик. Наиболее известные из них изложены в работах [1–4], из которых следует, что всем методикам свойственны особенности, непосредственно влияющие на достоверность получаемых по ним результатов. Анализ данных особенностей дает возможность выбрать наиболее действенный подход к определению $\eta_{\text{пол}}$ и наметить пути дальнейшего совершенствования параметрической диагностики нагнетателей.

В отмеченных выше работах, по существу, приводятся две методики — одна оригинального содержания (методика ВНИИГАЗ) и несколько однотипных методик (условно — *вторая методика*), незначительно отличающихся в некоторых второстепенных деталях.

1. Методика ВНИИГАЗ, представленная в [1], предлагает находить политропический КПД по известной зависимости

$$\eta_{\text{пол}} = \frac{n_n}{n_n - 1} \cdot \frac{k_n - 1}{k_n}, \quad (1)$$

где $\frac{n_n}{n_n - 1} = \frac{\ln \varepsilon}{\ln(T_{n2}/T_{n1})}$; n_n — показатель политропического сжатия газа в нагнетателе; k_n — показатель адиабаты для газа в нагнетателе;

$T_{н1}$ и $T_{н2}$ — температура газа на входе и выходе нагнетателя, К;
 ε — степень сжатия нагнетателя, равная отношению $P_{н2}/P_{н1}$;
 $P_{н1}$ и $P_{н2}$ — абсолютное давление газа на входе и выходе нагнетателя, МПа.

Оригинальной составляющей данной методики является выражение для расчета комплекса $(k_n - 1)/k_n$:

$$\frac{k_n}{k_n - 1} = \frac{1}{Z_{н1}} \cdot \left[\frac{k_0}{k_0 - 1} + \frac{\Delta C_p}{R} - Z_{н1} \cdot x \cdot \frac{n_n}{n_n - 1} \right],$$

где

$$Z_{н1} = 1 - \left[\frac{0,41}{\tau^3} - \frac{0,061}{\tau} \right] \cdot \pi - \frac{0,04}{\tau^3} \cdot \pi^2;$$

$$\tau = \frac{T_{н1}}{T_{кр}}; T_{кр} = 162,8 \cdot (0,613 + \Delta); \pi = \frac{P_{н1}}{P_{кр}}; P_{кр} = 0,0981 \cdot (47,9 - \Delta);$$

$$\frac{k_0}{k_0 - 1} = \frac{5,15 + (5,65 + 0,017 \cdot t_{ср}) \cdot \Delta}{\bar{R}};$$

$T_{кр}$ и $P_{кр}$ — критическая температура (К) и критическое давление (МПа) газа, находящегося в нагнетателе; Δ — относительная плотность газа по воздуху; $\bar{R}$ — универсальная газовая постоянная, равная 1,9858 ккал/(моль·К); $t_{ср}$ — средняя температура газа в нагнетателе, °С, равная $(t_{н1} + t_{н2})/2$; $t_{н1}$ и $t_{н2}$ — температура газа на входе и выходе нагнетателя, °С;

$$\frac{\Delta C_p}{R} = \frac{6 \cdot \pi}{\tau^3} \cdot (0,41 + 0,02 \cdot \pi); x = \frac{\pi}{\tau \cdot Z_{н1}} \cdot \left[\frac{1,23}{\tau^2} - 0,061 + \frac{0,12 \cdot \pi}{\tau^2} \right].$$

2. Вторая методика заключается в расчете $\eta_{пол}$ через отношение потенциальной работы сжатия газа в нагнетателе ω_{12} к разности энтальпий газа в машине Δh .

$$\eta_{пол} = \frac{\omega_{12}}{\Delta h}. \quad (2)$$

В [2–4] для определения ω_{12} и Δh используются незначительно отличающиеся однотипные зависимости. Эти отличия не оказывают заметного влияния на результаты расчетов $\eta_{пол}$. Поэтому ниже приводится определение ω_{12} и Δh и, соответственно, $\eta_{пол}$ по одному из предложенных в [2–4] вариантов, а именно по варианту [4]. По нему ω_{12} находится следующим образом:

$$\omega_{12} = \frac{P_{н1} \cdot \vartheta_1 + P_{н2} \cdot \vartheta_2}{2} \cdot \ln \varepsilon.$$

Произведения $P_{н1} \cdot \vartheta_1$ и $P_{н2} \cdot \vartheta_2$, содержащиеся в предшествующем выражении и имеющие размерность (кДж/кг), предлагается определять по зависимостям:

$$P_{H1} \cdot \vartheta_1 = (0,9 \cdot r + 0,108) \cdot [(0,017 \cdot P_{H1} + 0,555) \cdot t_{H1} - 2,73 \cdot P_{H1} + 139,4];$$

$$P_{H2} \cdot \vartheta_2 = (0,9 \cdot r + 0,108) \cdot [(0,017 \cdot P_{H2} + 0,555) \cdot t_{H2} - 2,73 \cdot P_{H2} + 139,4],$$

где r — содержание метана в газе в долях единицы; ϑ_1 и ϑ_2 — удельные объемы газа в условиях на входе и выходе нагнетателя, м³/кг.

Разность энтальпий Δh (кДж/кг) рассчитывается по зависимости:

$$\Delta h = C_{pm1} \cdot \Delta t - (C_p D_i)_{m2} \cdot \Delta P_H, \quad (3)$$

где

$$C_{pm1} = (0,647 + 0,35 \cdot r) \cdot [(0,00344 - 9 \cdot 10^{-4} \cdot P_{H1}) \cdot t_{cp} + 0,11 \cdot P_{H1} + 2,06];$$

$$(C_p D_i)_{m2} = [(1,2 \cdot 10^{-5} \cdot t_{H2}^2 - 1,35 \cdot 10^{-3} \cdot t_{H2} + 0,0298) \cdot P_{cp} - \\ - 0,0463 \cdot t_{H2} + 11,188] \cdot (1,98 - r);$$

P_{cp} — среднеарифметическое давление газа в нагнетателе, МПа;

ΔP_H — разность давления на входе и выходе нагнетателя, МПа;

$$t_{cp} = \frac{t_{H1} + t_{H2}}{2}; P_{cp} = \frac{P_{H1} + P_{H2}}{2}; \Delta P_H = P_{H2} - P_{H1}.$$

* *

Представленные методики имеют много общего. В них в качестве диагностического параметра используется одна и та же физическая величина — политропический КПД нагнетателей. Объединяет методики и то обстоятельство, что $\eta_{пол}$ в них находится без использования сведений о расходе газа через каждый нагнетатель в отдельности. Это является заметным достоинством, так как не все дожимные компрессорные станции газовых промыслов и КС оснащены соответствующими средствами измерений.

Общим у методик является и подход к формированию диагностического вывода. Последний выносится по результату сравнения полученного $\eta_{пол}$ с паспортными значениями КПД нагнетателей $\eta_{пол п}$, то есть по коэффициенту технического состояния машин K_H .

$$K_H = \frac{\eta_{пол}}{\eta_{пол п}}. \quad (4)$$

В методике [4] $\eta_{пол п}$ находится по эмпирической зависимости

$$\eta_{пол п} = \sum_{j=1}^n a_j \cdot \Delta h_{пр}^{j-1},$$

где значения коэффициентов a_j принимаются по приведенной в [4] таблице, а $\Delta h_{пр}$ представляет собой ранее определенную по (3) разность энтальпий газа в нагнетателе Δh , пересчитанную с фактических оборотов ротора нагнетателя n'_c на номинальное число оборотов ротора машины n'_{co} .

$$\Delta h_{\text{пр}} = \Delta h \cdot \left(\frac{n'_{\text{св}}}{n'_c} \right)^2.$$

Методика ВНИИГАЗ, в изложении [1], не дает определения $\eta_{\text{пол п}}$. Однако в [1] приводится возможный вариант нахождения $\eta_{\text{пол п}}$ по приведенным характеристикам нагнетателей на основе приведенной производительности машин $Q_{\text{пр}}$.

Между рассматриваемыми методиками имеются и существенные различия. Одно из них состоит в том, что методики, аналогичные [4], позволяют формировать диагностический вывод без каких-либо сведений о расходе газа через объект диагностирования, что является их достоинством. Методика ВНИИГАЗ таким качеством не обладает, так как для нахождения $\eta_{\text{пол п}}$ по ней необходимо знать расход газа через каждую машину. Это существенно сужает область практического применения данной методики.

К недостаткам анализируемых методик следует отнести их преимущественно эмпирический характер и двухступенчатое формирование диагностического вывода на основе коэффициента технического состояния машин $K_{\text{н}}$.

Эмпирический характер свидетельствует о недостаточности положенной в их основу теоретической базы и, соответственно, о неполноте отражаемой ими физической картины. Это создает предпосылки к повышению погрешности диагностики. Кроме того, эмпирическое происхождение расчетных зависимостей сужает область их уверенного применения той эмпирической базой, которая лежит в их основе.

Эмпирический характер наиболее свойственен методикам вида [4]. По ним $\eta_{\text{пол}}$ и $\eta_{\text{пол п}}$ находятся по однотипным эмпирическим зависимостям. При этом для определения $\eta_{\text{пол п}}$ даются значения эмпирических коэффициентов для ограниченного круга нагнетателей (Н-300-1,23; 520-12-1; 370-18-1; 370-17-1). Это дополнительно сужает область применения подобных методик.

Методике ВНИИГАЗ эмпирический подход присущ в меньшей мере. Однако погрешность диагностики по ней достаточно высока, так как нахождение $\eta_{\text{пол п}}$ по приведенным характеристикам на основе эксплуатационных данных по ε и $\bar{n}'_{\text{с пр}}$ сопряжено с большой погрешностью. Погрешность возникает из-за износа проточной части машин, вследствие чего реальные характеристики $\varepsilon = f(\bar{n}'_{\text{с пр}})$ отличаются от тех, которые нанесены на приведенные характеристики, используемые для нахождения $Q_{\text{пр}}$. Это приводит к ошибочной оценке $Q_{\text{пр}}$. Определение $\eta_{\text{пол п}}$ на основе приведенных характеристик по ошибочным значениям $Q_{\text{пр}}$ создает дополнительную погрешность и позволяет находить $\eta_{\text{пол п}}$ достаточно приблизительно.

В целом практикуемый в анализируемых методиках подход к диагностике на основе отношения $\eta_{\text{пол}}/\eta_{\text{пол п}}$ сопряжен с повышенной погрешностью, так как диагностический вывод делается с суммарной погрешностью определения $\eta_{\text{пол}}$ и $\eta_{\text{пол п}}$.

Еще одно обстоятельство снижает качество диагностирования по рассматриваемым методикам. Оно заключается в том, что диагностический вывод по ним делается на основе единичных и разрозненных значений $K_{\text{н}}$. Увеличение точности и достоверности диагностирования при таком подходе

де за счет увеличения количества значений K_n невозможно. Это следует из известных положений методики обработки опытных данных, основанных на теории вероятности.

Экспериментальная часть

Более обоснованный вывод о практической приемлемости рассматриваемых методик позволяют сделать результаты количественного анализа. В качестве базы для такого анализа были приняты паспортные характеристики нагнетателей 370-18-1, ГПА-Ц-16/76 и RF2BB-30. Данные нагнетатели являются представителями всех разновидностей, используемых в газовой промышленности машин подобного типа, которые отличаются по степени сжатия (неполнонапорные, полнонапорные), конструктивно (с одним или двумя рабочими колесами) и по принадлежности к различным типам ГПА (табл. 1). Принятие к рассмотрению паспортных характеристик этих машин обоснуется их высокой достоверностью, так как они являются результатом испытаний машин на специальных стендах заводов-изготовителей этого оборудования.

Таблица 1

Краткая характеристика нагнетателей

Тип нагнетателя	Характеристика нагнетателя		Тип ГПА
	Количество рабочих колес	Развиваемый напор	
370-18-1	1	Неполнонапорный	ГТК 10-4, стационарный
ГПА-Ц-16/76	2	Полнонапорный	ГПА-Ц-16/76, авиационный
RF2BB-30	2	Полнонапорный	Каберра-182, импортный

На основе паспортных данных нагнетателей по методикам [1] и [4] были выполнены расчеты политропического КПД машин при их номинальных режимах работы $-\eta_{пол о}$. Результаты расчетов сравнивались с паспортными значениями $\eta_{пол}$, соответствующими номинальным режимам (табл. 2).

Таблица 2

Сравнение расчетных и паспортных значений политропических КПД

Тип нагнетателя	Паспортный КПД $\eta_{пол}$	Расчетные значения $\eta_{пол о}$ и погрешность их определения по рассматриваемым методикам	
		ВНИИГАЗ [1]	[4]
370-18-1	0,850	0,830	0,802
		-2,38 %	-6,05 %
ГПА-Ц-16/76-1,45	0,830	0,843	0,878
		+1,53 %	+5,73 %
Н-300-1,23	0,830	0,716	0,737
		-15,9 %	-12,6 %

Из таблицы 2 следует, что анализируемые методики имеют погрешность одного порядка, и она высока. Если принять во внимание, что расчеты касаются параметра, непосредственно определяющего (прямо пропорционально) энергозатраты на привод нагнетателей, то наблюдаемую погрешность можно оценить как достаточно высокую. Она достаточно высока и для диагностирования оборудования, так как в ходе эксплуатации нагнетателей при смене режимов их работы $\eta_{\text{пол}}$ изменяется в интервале $0,8 \div 0,86$, то есть — на 6 %, а погрешность определения $\eta_{\text{пол}}$ по рассматриваемым методикам составляет $1,53 \div 15,9$ %.

Анализ полученных результатов и выводы

Результаты количественного анализа подтверждают выводы анализа качественного — отмеченные особенности методик придают результатам расчетов $\eta_{\text{пол}}$ повышенную погрешность.

Любые расчеты выполняются с определенной погрешностью, которая объективно неустранима. Возможно лишь, теми или иными средствами, добиться ее уменьшения. Одно из действенных средств снижения погрешности — увеличение количества «измерений» или «расчетных определений» искомой величины. Последующая обработка полученных расширенных данных известными методами позволяет снизить погрешность. В данном случае это невозможно, так как рассматриваемые методики, как отмечалось выше, оперируют «единичными» значениями $\eta_{\text{пол}}$, которые соответствуют определенным режимам работы нагнетателей. Даже при наличии нескольких расчетных значений $\eta_{\text{пол}}$, каждое из которых отвечает определенному режиму работы оборудования, из них невозможно образовать *ряд независимо определенных значений одной и той же величины*. И в последующем обработать данные этого ряда вероятностными методами. Погрешностью в данном случае можно было бы «управлять», в доступных пределах, увеличением количества обрабатываемых данных.

Осуществить отмеченный подход для находящихся в эксплуатации нагнетателей достаточно сложно в связи с тем, что условия работы машин непостоянны и каждое определение $\eta_{\text{пол}}$ оказывается «индивидуальным». Из таких «индивидуальных» $\eta_{\text{пол}}$ невозможно сформировать вышеотмеченный ряд.

Несмотря на это воспользоваться вероятностными методами обработки результатов расчетов и добиться снижения погрешности диагностических выводов возможно. Для этого диагностирование необходимо основывать не на «единичных» значениях диагностического параметра $\eta_{\text{пол}}$, а на зависимости «диагностический параметр — определяющие его факторы». При этом в качестве определяющих факторов рассматривать параметры, характеризующие условия работы нагнетателей и определяющие значения $\eta_{\text{пол}}$. В этом случае появляется возможность воспользоваться вероятностными методами (методом наименьших квадратов) и снижать погрешность определения $\eta_{\text{пол}}$ увеличением количества вовлекаемых в обработку данных. Такой подход реализован в работах [5–7].

Библиографический список

1. Козаченко, А. Н. Эксплуатация компрессорных станций магистральных газопроводов / А. Н. Козаченко. – Москва : Нефть и газ, 1999. – 463 с. – Текст : непосредственный.
2. Поршаков, Б. П. Термодинамика и теплопередача (в технологических процессах нефтегазовой промышленности) / Б. П. Поршаков, Р. Н. Бикчентай, Б. А. Романов. – Москва : Недра, 1987. – 349 с. – Текст : непосредственный.
3. Повышение эффективности эксплуатации энергопривода компрессорных станций / Б. П. Поршаков, А. С. Лопатин, А. М. Назарьина, А. С. Рябченко. – Москва : Недра, 1992. – 206 с. – Текст : непосредственный.
4. Эксплуатация газопроводов Западной Сибири / Г. В. Крылов, А. В. Матвеев, О. А. Степанов, Е. И. Яковлев. – Ленинград : Недра, Ленингр. отд-ние. 1985. – 288 с. – Текст : непосредственный.
5. Перевозищев, С. И. Параметрическая диагностика технического состояния центробежных нагнетателей природного газа / С. И. Перевозищев. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2011. – № 3. – С. 97–104.
6. Перевозищев, С. И. Методика параметрической диагностики газоперекачивающих агрегатов с турбоприводом / С. И. Перевозищев. – DOI 10.31660/0445-0108-2016-5-101-108. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2016. – № 5. – С. 101–108.
7. Перевозищев, С. И. Параметрическая диагностика газоперекачивающих агрегатов с турбоприводом : учебное пособие / С. И. Перевозищев ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Тюменский индустриальный университет. – Тюмень : ТИУ, 2016. – 236 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Kozachenko, A. N. (1999). Ekspluatatsiya kompressornykh stantsiy magistral'nykh gazoprovodov. Moscow, Neft' i gaz Publ., 463 p. (In Russian).
2. Porshakov, B. P., Bikchentay, R. N., & Romanov, B. A. (1987). Termodinamika i teploperedacha (v tekhnologicheskikh protsessakh neftegazovoy promyshlennosti). Moscow, Nedra Publ., 349 p. (In Russian).
3. Porshakov, B. P., Lopatin, A. S., Nazar'ina, A. M., & Ryabchenko, A. S. (1992). Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii energoprivoda kompressornykh stantsiy. Moscow, Nedra Publ., 206 p. (In Russian).
4. Krylov, G. V., Matveev, A. V., Stepanov, O. A., & Yakovlev, E. I. (1985). Ekspluatatsiya gazoprovodov Zapadnoy Sibiri. Leningrad, Nedra Publ., Leningradskoe otdelenie, 288 p. (In Russian).
5. Perevoschikov, S. I. (2011). Parametric diagnostics of technical state of centrifugal superchargers of natural gas. Higher Educational Institutions News. Neft' I Gas, (3), pp. 97-104. (In Russian).
6. Perevoschikov, S. I. (2016). Procedure of parametric diagnostics of gas pumping units with turbine drive. Oil and Gas Studies, (5), pp. 101-108. (In Russian). DOI: 10.31660/0445-0108-2016-5-101-108
7. Perevoschikov, S. I. (2016). Parametricheskaya diagnostika gazoperekachivayushchikh agregatov s turboprivodom. Tyumen, Industrial University of Tyumen Publ., 236 p. (In Russian).

Сведения об авторе

Перевозищев Сергей Иванович, д. т. н.,
консультант кафедры прикладной механики,
Тюменский индустриальный университет,
г. Тюмень, e-mail: perevoschikovsi@tyuiu.ru

Information about the author

Sergey I. Perevoschikov, Doctor of Engineering,
Consultant at the Department of Applied Mechanics,
Industrial University of Tyumen, e-mail: perevoschikovsi@tyuiu.ru