

влияние оказывает вид микроструктуры материала. Наибольшая износостойкость наблюдается у наплавки с мелкоигольчатой структурой, включающей первичные карбиды [2].

4. Получены значения параметра интегральной износостойкости металла наплавки  $K_{\text{инт}}$  [5].

- Для исходного состояния  $K_{\text{инт}} = (1,05 \pm 0,04) \text{ г/см}^2 \cdot \text{час}$ .
- После отжига  $K_{\text{инт}} = 1,45 \text{ до } 2,89 \text{ г/см}^2 \cdot \text{час}$ .
- Закалка от  $900^\circ\text{C}$  не только благоприятно сказывается на структуре материала и его твердости, но и способствует существенному увеличению параметра интегральной износостойкости до уровня  $K_{\text{инт}} = 0,58 \text{ г/см}^2 \cdot \text{час}$ .

#### **Библиографический список**

1. Кусков В. Н., Мамадалиев Р. А., Обухов А. Г. Переход легирующих элементов в наплавленный металл при сварке стали 12Х18Н10Т // *Фундаментальные исследования*. – 2013. – № 11–9. – С. 1794–1797.
2. Структура и свойства высоколегированного наплавочного сплава, работающего в условиях термоциклирования / Д. М. Левин [и др.] // *Известия Тульского государственного университета. Серия: Физика*. – 2004. – С. 1–15.
3. Ремонт изношенных изделий с применением порошковых лент / В. Н. Кусков [и др.] // *Научный альманах*. – 2014. – № 1 (1). – С. 211–214.
4. Мамадалиев Р. А., Кусков В. Н., Галинский А. А. Влияние источника нагрева на легирование наплавленного металла при получении соединений высоколегированных сталей // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 11–3. – С. 515–518.
5. Прогнозирование химического состава металла, наплавленного электродами с рутиловым и ильменитовым покрытиями / И. К. Походня [и др.] // *Автоматическая сварка*. – 1976. – № 7. – С. 1–4.

#### **Сведения об авторах**

**Галинский Андрей Александрович**, ассистент кафедры технологии машиностроения, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 89199486170, e-mail: Don-Andre-1990@yandex.ru

**Прошин Владимир Спартакович**, студент кафедры технологии машиностроения, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 89324782388, e-mail: v.s.proshin@gmail.com

**Кусков Виктор Николаевич**, д. т. н., профессор кафедры технологии машиностроения, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 89129239950, e-mail: vnkuskov@yandex.ru

#### **Information about the authors**

**Galinsky A. A.**, Assistant at the Department of Technology of Mechanical Engineering, Industrial University of Tyumen, phone: 89199486170, e-mail: Don-Andre-1990@yandex.ru

**Proshin V. S.**, Student at the Department of Technology of Mechanical Engineering, Industrial University of Tyumen, phone: 89324782388, e-mail: v.s.proshin@gmail.com

**Kuskov V. N.**, Doctor of Engineering, Professor at the Department of Technology of Mechanical Engineering, Industrial University of Tyumen, phone: 89129239950, e-mail: vnkuskov@yandex.ru

УДК 621.438:622.691.4.052.006

### **АДАПТИВНАЯ ПРИВЕДЕННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАГНЕТАТЕЛЕЙ ПРИРОДНОГО ГАЗА ADAPTIVE REDUCED CHARACTERISTIC OF CENTRIFUGAL BLOWERS OF NATURAL GAS**

**С. И. Перевошиков**

S. I. Perevoschikov

*Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень*

*Ключевые слова: центробежные нагнетатели; приведенные характеристики; параметрическая диагностика*

*Key words: centrifugal blowers; reduced characteristic; parametric diagnostics*

Центробежные нагнетатели являются основным средством доставки природного газа его многочисленным потребителям, и от эффективности их эксплуатации существенно зависят надежность и результативность работы как отдельных газовых магистралей, так и газотранспортных систем в целом.

Эффективность работы данных машин достигается различными средствами, но главным образом эксплуатацией в соответствии с их техническими характеристиками. Для этого используются приведенные характеристики нагнетателей, пред-

ставляющие зависимость основных эксплуатационных показателей машин, какими являются их степень сжатия  $\varepsilon_n$ , относительная приведенная внутренняя мощность  $[N_i/\rho_{го}]_{пр}$  и политропический КПД  $\eta_{пол}$ , от параметров, определяющих режимы работы нагнетателей, — приведенной производительности  $[Q]_{пр}$  и приведенного числа оборотов роторов нагнетателей  $[n_n/n_{но}]_{пр}$ .

Используемые в настоящее время приведенные характеристики в полной мере отвечают только потребностям проектной практики, применение их в эксплуатационной сфере связано с рядом сложностей. Сложности вызывает в первую очередь их «статичность», то есть соответствие только определенному техническому состоянию машин, а именно исходному, новому состоянию, при котором их получают. Ориентация на такие характеристики при эксплуатации нагнетателей, в ходе которой машины подвергаются износу, и их характеристики изменяются, что делает управление транспортом газа достаточно проблематичным. Другой, также существенный недостаток приведенных характеристик — их графический вид. Он не допускает использование характеристик в автоматических системах управления технологическими процессами (АСУ ТП) газотранспортных систем, несмотря на значимость содержащейся в них информации для управленческого процесса. Для АСУ ТП, базирующихся на цифровых технологиях, требуется аналитическая версия характеристик.

Таким образом, для более полного использования приведенных характеристик, особенно в эксплуатационной сфере, необходимо решить две задачи. Первая заключается в переводе характеристик из их исходного графического вида в вид аналитический, вторая — в придании аналитической форме адаптивных свойств, то есть способности изменяться в зависимости от износа машин. Данные задачи в некоторой степени решены в работах [1, 2], где рассматриваемым характеристикам придается адаптивный вид. При этом в первой работе перевод основной зависимости  $\varepsilon_n = f([Q]_{пр}; [n_n/n_{но}]_{пр})$  из графического вида в аналитический производится с погрешностью в 1,48 % для неполнонапорных нагнетателей и 2,00 % — для полнонапорных машин. В работе [2] перевод  $\varepsilon_n = f([Q]_{пр}; [n_n/n_{но}]_{пр})$  уточняется с достижением погрешности 0,9 и 1,5 % для указанных типов нагнетателей при одном способе уточнения и до десятых долей процента для обеих разновидностей машин — при другом, также рассмотренном в работе [2].

Согласно исследованиям [4], степень сжатия неполнонапорных нагнетателей в ходе эксплуатации машин может изменяться на 0,79 %, а полнонапорных — на 1,55 % (при снижении политропического КПД машин в результате их износа на 3 %). Полученные в работах [1, 2] аналитические выражения для характеристик  $\varepsilon_n = f([Q]_{пр}; [n_n/n_{но}]_{пр})$  имеют погрешность, соизмеримую с отмеченными цифрами. Это обстоятельство делает выражения [1, 2] малопригодными для АСУ ТП газотранспортных систем в связи с приблизительным отражением ими текущих значений степени сжатия нагнетателей. Необходимо получение более точной аналитической зависимости  $\varepsilon_n = f([Q]_{пр}; [n_n/n_{но}]_{пр})$ . Для этого следует обратиться к теории компрессорных машин. В частности, к выражению (1) для определения внутренней мощности нагнетателя  $N_i$  и к методике<sup>1</sup> для расчета этого же параметра с использованием приведенной внутренней мощности  $[N_i/\rho_{го}]_{пр}$ .

$$N_i = \frac{M \cdot L}{\eta_{пол}}, \quad (1)$$

$$L = \frac{k \cdot \eta_{пол}}{(k-1)} \cdot z_{н1} \cdot R_{н1} \cdot T_{н1} \cdot (\varepsilon_n^{\frac{(k-1)}{k \cdot \eta_{пол}}} - 1),$$

<sup>1</sup> ОНТП 51-1-85. Общесоюзные нормы технологического проектирования. Магистральные трубопроводы. Часть 1. Газопроводы. — Введ. 1986-01-01. — М., 1986. — 222 с.

где  $M$  — массовый расход газа через нагнетатель;  $L$  — удельные затраты энергии на сжатие 1 кг газа;  $T_{н1}$  — абсолютная температура газа на входе нагнетателя;  $Z_{н1}$  — коэффициент сжимаемости газа при условиях на входе в нагнетатель;  $R_{н1}$  — газовая постоянная компримируемого газа;  $k$  — показатель адиабаты компримируемого газа.

По методике<sup>2</sup> внутренняя мощность нагнетателя  $N_i$  находится с использованием приведенной внутренней мощности  $[N_i/\rho_{zo}]_{np}$ .

$$N_i = \left[ \frac{N_i}{\rho_{zo}} \right]_{np} \cdot \rho_{н1} \cdot \left[ \frac{n_n}{n_{но}} \right]_{np}^3, \quad (2)$$

где  $\rho_{н1}$  — плотность компримируемого газа при условиях на входе нагнетателя;  $[n_n/n_{но}]_{np}$  — приведенное число оборотов ротора нагнетателя;  $n_n$  и  $n_{но}$  — текущее и номинальное число оборотов ротора нагнетателя.

Подставим в (2) вместо  $[N_i/\rho_{zo}]_{np}$  значение данного параметра по зависимости (3) [1, 2], аппроксимирующей кривую  $[N_i/\rho_{zo}]_{np} = f(Q_{np})$  приведенной характеристики нагнетателя, а плотность газа  $\rho_{н1}$  раскроем через уравнение состояния газа. В результате получим (4).

$$\left[ \frac{N_i}{\rho_{zo}} \right]_{np} = [a_N \cdot Q_{np}^2 + b_N \cdot Q_{np} + c_N], \quad (3)$$

где  $Q_{np}$  — приведенная производительность нагнетателя;  $a_N$ ,  $b_N$  и  $c_N$  — коэффициенты аппроксимации.

$$N_i = [a_N \cdot Q_{np}^2 + b_N \cdot Q_{np} + c_N] \cdot \frac{P_{н1}}{Z_{н1} \cdot R_{н1} \cdot T_{н1}} \cdot \left[ \frac{n_n}{n_{но}} \right]_{np}^3. \quad (4)$$

По (1) мощность  $N_i$  равна

$$N_i = \frac{k}{(k-1)} \cdot P_{н1} \cdot Q_v \cdot (\epsilon_n^{\frac{(k-1)}{k \cdot \eta_{пол}}} - 1). \quad (5)$$

При получении (5) массовый расход газа  $M$ , содержащийся в (1), представлялся произведением  $(\rho_{н1} \cdot Q_v)$ , где  $Q_v$  — объемная производительность нагнетателя при условиях на его входе, а плотность  $\rho_{н1}$  раскрывалась с использованием уравнения состояния газа.

Зависимости (4) и (5) дают определение одной и той же величины, поэтому их правые части равны

$$[a_N \cdot Q_{np}^2 + b_N \cdot Q_{np} + c_N] \cdot \frac{P_{н1}}{Z_{н1} \cdot R_{н1} \cdot T_{н1}} \cdot \left[ \frac{n_n}{n_{но}} \right]_{np}^3 = \frac{k}{(k-1)} \cdot P_{н1} \cdot Q_v \cdot (\epsilon_n^{\frac{(k-1)}{k \cdot \eta_{пол}}} - 1). \quad (6)$$

Решение (6) относительно  $\epsilon_n$  дает искомый аналитический вид характеристики  $\epsilon_n = f([Q]_{пр}; [n_n/n_{но}]_{np})$ . При этом данная характеристика может быть представлена в нескольких вариантах.

$$\epsilon_n^{\frac{(k-1)}{k \cdot \eta_{пол}}} = 1 + \frac{(k-1)}{k} \cdot \frac{[a_N \cdot Q_{np}^2 + b_N \cdot Q_{np} + c_N]}{Q_v \cdot (Z_{н1} \cdot R_{н1} \cdot T_{н1})} \cdot \left[ \frac{n_n}{n_{но}} \right]_{np}^3; \quad (7)$$

$$\epsilon_n^{\frac{(k-1)}{k \cdot \eta_{пол}}} = 1 + K_{нк} \cdot \frac{[a_N \cdot \bar{n}_n \cdot Q_v^2 + b_N \cdot \bar{n}_n^2 \cdot Q_v + c_N \cdot \bar{n}_n^3]}{Q_v \cdot (Z_{н1} \cdot R_{н1} \cdot T_{н1})^{2,5}}, \quad (8)$$

<sup>2</sup> Там же.

$$\varepsilon_n^{(k-1)} = 1 + \frac{(k-1)}{k} \cdot \frac{[a_N \cdot Q_{np}^2 + b_N \cdot Q_{np} + c_N]}{Q_{np} \cdot \frac{(Z_{n1} \cdot R_{np} \cdot T_{n1})^{2,5}}{(Z_{np} \cdot R_{np} \cdot T_{np})^{1,5}}} \cdot \left(\frac{n_n}{n_{no}}\right)^2, \quad (9)$$

$$K_{nk} = \frac{(k-1)}{k} \cdot (Z_{np} \cdot R_{np} \cdot T_{np1})^{1,5}; \bar{n}_n = \frac{n_n}{n_{no}},$$

где  $Z_{np}, R_{np}$  и  $T_{np1}$  — приведенные значения коэффициента сжимаемости газа, газовой постоянной и температуры газа на входе нагнетателя (даются на приведенных характеристиках).

Все варианты характеристики  $\varepsilon_n = f([Q]_{np}; [n_n/n_{no}]_{np})$ , то есть (7)–(9), обладают адаптивными свойствами — изменяются адекватно износу нагнетателей. Эти свойства придаются присутствующему в них политропическому КПД  $\eta_{пол}$ , который зависит от износа машин [3], и его текущие значения поддаются оценке по методике [4].

На основе совокупных сведений по  $\eta_{пол}$ , содержащихся в работах [3, 4], получается зависимость (10) для расчета  $\eta_{пол}$  по результатам параметрической диагностики нагнетателей [1, 2].

$$\eta_{пол} = a_\eta \cdot Q_{np}^2 + b_\eta \cdot Q_{np} + c_\eta - (\eta_{пол.о} - \eta_{пол}^*), \quad (10)$$

где  $a_\eta, b_\eta$  и  $c_\eta$  — коэффициенты аппроксимации зависимости  $\eta_{пол} = f(Q_{np})$  приведенной характеристики нагнетателя;  $\eta_{пол.о}$  и  $\eta_{пол}^*$  — паспортное и оценочное значения политропического КПД нагнетателя.

Оценочное значение КПД  $\eta_{пол}^*$  находится по результатам параметрической диагностики нагнетателя, методика которой изложена в работе [4].

Приведенные характеристики нагнетателей в их адаптивном аналитическом виде представляют зависимости (3), (7)–(9) и (10), из которых (3) и (10) можно получить с помощью программного продукта Microsoft Excel.

Как показывают расчеты, выполненные для нагнетателей 370-14-1/370-15-1, 520-12-1, PCL-1002 и 235-21-1, представляющих почти все разновидности используемых в газовой промышленности технологических компрессорных машин, выражения (3) и (10) полностью соответствуют их графическим прототипам. Более сложные зависимости (7)–(9) также обладают этим качеством. Оно достигается за счет регулируемой погрешности (7)–(9). Необходимая точность этих выражений достигается за счет аппроксимирования зависимостей  $[N_i/\rho_{zo}]_{np} = f(Q_{np})$  с требуемой достоверностью. Для этого достаточно оперировать возможно большим количеством данных по  $[N_i/\rho_{zo}]_{np}$  и  $Q_{np}$ .

Таким образом, практическая идентичность зависимостей (3), (7)–(9) и (10) по количественным показателям приведенным характеристикам нагнетателей позволяет использовать эти зависимости в АСУ ТП газотранспортных систем.

Для соблюдения в (7)–(9) единства размерности всех содержащихся в них величин характеристики  $\left[\frac{N_i}{\rho_{zo}}\right] = f(Q_{np})$  и  $\eta_{пол} = f(Q_{np})$  должны аппроксимироваться с использованием  $\left[\frac{N_i}{\rho_{zo}}\right]$  и  $Q_{np}$  в размерностях, отличных от тех, в которых они присутствуют на исходных приведенных характеристиках: отношение  $\left[\frac{N_i}{\rho_{zo}}\right]$  — в размерности Вт/(кг/м<sup>3</sup>), производительность  $Q_{np}$  — в м<sup>3</sup>/с. Остальные параметры в (7)–(9) имеют следующие размерности: объемная производительность нагнетателя при условиях на его входе  $Q_v$  — м<sup>3</sup>/с; газовая постоянная компримируемого газа и ее приведенное значение  $R_{n1}$  и  $R_{np}$  — Дж/(кг·К); давление газа на входе нагнетателя  $P_{n1}$  — Н/м<sup>2</sup>; температура компримируемого газа на входе нагнетателя и ее приведенное значение  $T_{n1}$  и  $T_{np}$  — К; комплексный показатель адиабаты компримируемого газа  $(k-1)/k$  согласно данным <sup>3</sup> равен 0,235.

<sup>3</sup> ОНТП 51-1-85.

#### Библиографический список

1. Перовощиков С. И. Адаптация приведенных характеристик нагнетателей природного газа к техническому состоянию машин // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2018. – № 1. – С. 100–105.
2. Перовощиков С. И. Уточнение приведенных характеристик центробежных нагнетателей в их аналитическом виде // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2018. – № 2. – С. 94–100.
3. Перовощиков С. И. Коррекция приведенных характеристик центробежных нагнетателей по результатам параметрической диагностики машин // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2015. – № 6. – С. 78–83.
4. Перовощиков С. И. Параметрическая диагностика технического состояния центробежных нагнетателей природного газа // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2011. – № 3. – С. 97–104.

#### Сведения об авторе

**Перовощиков Сергей Иванович**, д. т. н., консультант кафедры прикладной механики, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 8(3452)467480, e-mail: perevoschikovsi@tyuiu.ru

#### Information about the author

**Perevoschikov S. I.**, Doctor of Engineering, Consultant at the Department of Applied Mechanics, Industrial University of Tyumen, phone: 8(3452)467480, e-mail: perevoschikovsi@tyuiu.ru

## Материаловедение и технологии конструкционных материалов

УДК 669

### ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ КАРБИДООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ОТПУСКЕ ВАНАДИЕВЫХ СТАЛЕЙ

THERMODYNAMIC CONDITIONS OF CARBIDE FORMING DURING  
TEMPERING OF VANADIUM STEELS

**А. В. Афонаскин, А. Н. Венедиктов, И. М. Ковенский**

A. V. Afonaskin, A. N. Venediktov, I. M. Kovenskiy

Курганский государственный университет, г. Курган  
Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

*Ключевые слова: термодинамика; кинетика; отпуск; ванадиевая сталь; карбид ванадия*  
*Key words: thermodynamics; kinetics; temper; vanadium steel; vanadium carbide*

Ванадий широко используется для легирования стали. Он оказывает существенное влияние на ее свойства, образуя специальный карбид  $VC_{0,88}$ , который обеспечивает вторичную твердость в улучшаемых ванадиевых сталях. В связи с этим представляет значительный интерес рассмотрение термодинамических условий выделения карбида  $VC_{0,88}$  при отпуске закаленной стали (0,85 ат.% С и 0,65 ат.% V).

Исследуемую сталь закаливали с 1 260 °С 5 часов и подвергали изотермическому отпуску (700 °С) различной длительности. Преципитаты, выделяющиеся в процессе отпуска, идентифицировали с помощью электронно-графического и рентгенографического анализа карбидных осадков и с помощью электронной микроскопии тонких фольг. Результаты показывают, что в начале отпуска выделяется цементит, затем цементит растворяется, и на электронно-микроскопических снимках тонких фольг видны выделения, разрешаемые только по деформационному контрасту ферритной матрицы. Рефлексов, отвечающих каким-либо карбидным фазам, не обнаружено. Эти факты свидетельствуют о том, что в рассматриваемый период отпуска в стали образуются зоны атомов ванадия типа зон Гинье — Престона (зон ГП). При длительности отпуска 1,25 часа зоны ГП не фиксируются, и обнаруживаются тонкодисперсные карбиды ванадия  $VC_{0,88}$ . По-видимому, углерод, поступающий из растворяющегося цементита, насыщает зоны ГП, и последние превращаются в карбиды  $VC_{0,88}$ .