

## Электротехника

УДК 62-83:622(075)

### **АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ УСТАНОВОК ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ**

*А.М. Абакумов, С.В. Алимов, Л.А. Мигачева*

Самарский государственный технический университет  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244  
E-mail: abakumov-am@yandex.ru

*На основе аналитических и экспериментальных исследований разработана модель для расчетов оптимальных стационарных режимов работы установок охлаждения газа. Проанализированы результаты, достигаемые при использовании различных алгоритмов управления частотой вращения двигателей вентиляторов аппаратов воздушного охлаждения.*

**Ключевые слова:** *установки охлаждения газа, оптимизация, электропривод вентиляторов.*

В условиях дефицита электроэнергии важное место в повышении экономической эффективности предприятий Газпрома занимают мероприятия по энергосбережению на всех стадиях транспортировки газа.

Современная технология транспортировки газа по магистральным трубопроводам требует его охлаждения до определенной температуры. С этой целью на газотранспортных предприятиях – на установках комплексной подготовки газа, на компрессорных станциях магистральных газопроводов, дожимных компрессорных станциях, станциях подземного хранения газа и т.д. – широкое применение нашли аппараты воздушного охлаждения (АВО) газа. На компрессорных станциях магистральных газопроводов с газотурбинным приводом нагнетателей до 60...70% потребляемой электроэнергии расходуется на охлаждение газа, что определяет актуальность проблемы повышения энергоэффективности работы АВО.

Для разработки математической модели, ориентированной на оптимизацию алгоритмов управления АВО, целесообразно провести декомпозицию объекта управления, представив его в виде взаимосвязанных подсистем: процессов теплообмена, аэродинамических процессов и электромеханических процессов в электроприводах вентиляторов.

При проведении исследований рассматривалась схема АВО в виде двух последовательно включенных секций (частей теплообменника) 1 и 2 (см. рисунок) с возможностью независимого регулирования частоты вращения  $n_1$ ,  $n_2$  вентиляторов (В1,

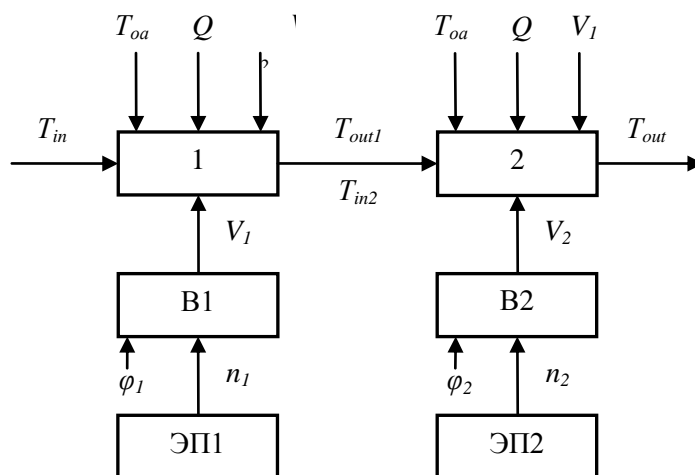
---

*Александр Михайлович Абакумов – д.т.н., профессор.  
Сергей Викторович Алимов – аспирант.  
Людмила Алексеевна Мигачева – к.т.н., доцент.*

В2), приводимых в движение электроприводами (ЭП1, ЭП2). В стационарном режиме перепад температуры в частях теплообменника  $\Delta T_i$  является функцией следующих параметров: температуры газа  $T_{in}$  на входе, температуры наружного воздуха  $T_{oa}$ , расхода газа  $Q$ , расхода или скорости потока  $V_i$  охлаждающего воздуха  $i$ -й секции теплообменника, скорости потока воздуха смежной секции. Последнее объясняется тем обстоятельством, что во вторую часть теплообменника поступает газ, частично охлажденный в первой части теплообменника.

Общий перепад температуры на АВО

$$T_{in} - T_{вых} = \Delta T_1 + \Delta T_2 = \Delta T .$$



Расчетная схема АВО

Известно, что при постоянном угле атаки лопастей  $\varphi$  потребляемая мощность на валу вентилятора зависит от относительной скорости в третьей степени

$$P_c = P_{c.nom} \left( \frac{n}{n_{nom}} \right)^3, \quad (1)$$

где  $n_{nom}$  – номинальная частота вращения,  $P_{c.nom}$  – номинальная мощность на валу вентилятора при номинальной частоте вращения.

Экспериментальные исследования, выполненные для аппаратов воздушного охлаждения газа типа 2АВГ-75, оборудованных двумя вентиляторами, приводимыми в движение электродвигателями типа ВАСО-16-14-24, подтверждают справедливость соотношения (1).

Управление аэродинамическими процессами осуществляется за счет изменения частоты вращения  $n$  вентиляторов с помощью частотно регулируемого привода. Результаты экспериментального исследования аэродинамических характеристик свидетельствует о возможности представления взаимосвязи скорости потока охлаждающего воздуха  $V$  и частоты вращения  $n$  (или частоты  $f$  напряжения на двигателе) в виде линейной зависимости

$$V_i = k_{bv} n_i, \quad (2)$$

где  $k_{bv}$  – коэффициент передачи вентилятора по частоте вращения двигателя.

При экспериментальных исследованиях тепловых процессов рассматривались обобщенные характеристики АВО, устанавливающие взаимосвязь между регули-

рующим воздействием – частотой напряжения, подаваемого на двигатель, и выходной переменной – перепадом температуры  $\Delta T$  на АВО.

В процессе экспериментов исследовались зависимости перепада температур от регулирующего воздействия как при синхронном регулировании частоты вращения обоих вентиляторов, так и при отключении одного из вентиляторов и регулировании частоты другого.

На основе анализа полученных данных перепад температуры на АВО для управляющих воздействий  $f$  и  $V$  представлен в виде

$$\Delta T = \begin{cases} C + k'_{f1}f_1, & \text{при } f_2 = 0 \\ C + k_{f1}f_1 + k_{f2}f_2, & \text{при } f_2 > 0. \end{cases} \quad (3)$$

$$\Delta T = \begin{cases} C + k'_{v1}V_1, & \text{при } V_2 = 0 \\ C + k_{v1}V_1 + k_{v2}V_2, & \text{при } V_2 > 0. \end{cases} \quad (4)$$

где  $C$  – перепад температуры при отключенных двигателях вентиляторов;  $k'_{f1}$ ,  $k_{f1}$ ,  $k_{f2}$ ,  $k'_{v1}$ ,  $k_{v1}$ ,  $k_{v2}$  – коэффициенты передачи для управляющих воздействий в виде частоты  $f$  напряжения и скорости потока воздуха  $V$  первого и второго вентиляторов соответственно.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что коэффициенты передачи для управляющих воздействий  $f_i$  и  $V_i$  на первую часть теплообменника отличаются от соответствующих коэффициентов передачи для управляющих воздействий  $f_2$  и  $V_2$  на вторую часть теплообменника. При этом возникает задача отыскания оптимальных значений управляющих воздействий.

В типовой установке охлаждения газа (УОГ) содержится  $n$  параллельно включенных АВО. При допущении о равномерном распределении потока газа по отдельным АВО и однородности их тепловых характеристик общий температурный перепад на УОГ совпадает с температурным перепадом на отдельном аппарате воздушного охлаждения.

В соответствии с требованиями технологического задания перепад температуры на УОГ с учетом некоторой погрешности  $\zeta$  должен быть равен заданному  $\Delta T_{zd}$  значению

$$\Delta T \pm \zeta = \Delta T_{zd}. \quad (5)$$

При этом на частоту вращения вентиляторов и скорость потока воздуха наложены ограничения

$$n_{\min i} < n_i < n_{\max i}; \quad V_{\min i} < V_i < V_{\max i}; \quad i=1, 2. \quad (6)$$

При определенных значениях параметров  $T_{in}$ ,  $T_{ov}$ ,  $Q_g$  и номинальных значениях частоты  $n_{nomi}$  вращения вентиляторов и, соответственно, номинальных значениях скорости потока воздуха  $V_{nomi}$  УОГ обеспечивает некоторое максимальное значение перепада температуры

$$C + k_{v1}V_{nom1} + k_{v2}V_{nom2} = \Delta T_{\max}. \quad (7)$$

С учетом соотношения (1) выражение для мощности на валу вентиляторов можно записать в виде

$$P_{\Sigma} = P_{nom1} \left( \frac{V_1}{V_{nom1}} \right)^3 + P_{nom2} \left( \frac{V_2}{V_{nom2}} \right)^3. \quad (8)$$

Дополнительно будем считать номинальные мощности вентиляторов и номинальные значения скорости воздуха одинаковыми:

$$P_{nom1} = P_{nom2} = P_{nom}; V_{nom1} = V_{nom2} = V_{nom}. \quad (9)$$

Для получения обобщенных результатов перейдем к относительным единицам. За базовые значения примем: температуры – максимальное значение перепада температуры  $\Delta T_{max}$ , мощности –  $P_{nom}$ ; скорости воздуха –  $V_{nom}$ .

Введем обозначения для относительных величин:

$$\Delta\tau = \frac{\Delta T}{\Delta T_{max}}; c = \frac{C}{\Delta T_{max}}; k_1 = \frac{k_{v1}}{\Delta T_{max}}; k_2 = \frac{k_{v2}}{\Delta T_{max}}; k_1' = \frac{k_{v1}'}{\Delta T_{max}};$$

$$v_1 = \frac{V_1}{V_{nom}}; v_2 = \frac{V_2}{V_{nom}}; p = \frac{P}{P_{nom}}; f = \frac{f}{50}; n = \frac{n}{n_{nom}}; f^* = n^* = v^*.$$

После преобразований соотношений (4), (5), (6), (8) в относительных единицах будем иметь

$$\Delta\tau = \begin{cases} c + k_1' v_1, & \text{при } v_2 = 0 \\ c + k_1 v_1 + k_2 v_2, & \text{при } v_2 > 0. \end{cases} \quad (10)$$

$$\Delta\tau = \Delta\tau_{mp} \pm \xi; \quad (11)$$

$$v_{\min i} \leq v \leq v_{\max i}; \quad (12)$$

$$c + k_1 + k_2 = 1; \quad (13)$$

$$p_{\Sigma} = v_1^3 + v_2^3. \quad (14)$$

При этом задача оптимизации стационарного режима работы УОГ может быть сформулирована как задача минимизации целевой функции (14) при выполнении требований технологического задания (11), уравнений связи (10), (13) и ограничений (12). Сформулированная задача представляет собой многопараметрическую задачу нелинейного программирования, и для её решения могут использоваться известные методы [1].

При принятой упрощенной постановке задача может быть решена аналитически. Рассмотрим общий случай, когда  $v_1 > 0, v_2 > 0$ .

Используя соотношения (11) и приняв  $\xi = 0$ , найдем с учетом выражения (10) переменную

$$v_2 = \frac{\Delta\tau_{mp} - c}{k_2} - \frac{k_1}{k_2} v_1. \quad (15)$$

Введем обозначения:

$$a = \frac{\Delta\tau_{mp} - (c_1 + c_2)}{k_2}; b = \frac{k_1}{k_2}, \quad (16)$$

представим (15) в виде

$$v_2 = a - b v_1. \quad (17)$$

После подстановки выражения для  $v_2$  в соотношение для целевой функции (14) будем иметь

$$\begin{aligned} p_{\Sigma} &= v_1^3 + v_2^3 = v_1^3 + (a - b v_1)^3 = v_1^3 + a^3 - 3a^2 b v_1 + 3ab^2 v_1^2 - b^3 v_1^3 = \\ &= v_1^3 (1 - b^3) a^3 - 3a^2 b v_1 + 3ab^2 v_1^2 \end{aligned} \quad (18)$$

В результате исследования выражения (18) на экстремум найдены соотношения для оптимального значения переменных:

$$v_{1opt} = \frac{a(b^2 - \sqrt{b})}{b^3 - 1}; \quad v_{2opt} = a - bv_{1opt}. \quad (19)$$

Соотношения (19) справедливы для  $b \neq 1$ . Значение  $b=1$  соответствует частному случаю, когда  $k_1=k_2$

$$v_{1opt} = v_{2opt} = \frac{a}{2}. \quad (20)$$

Из изложенного следует, что в случае  $k_1 \neq k_2$  оптимальное решение, соответствующее минимуму мощности  $p_{opt}$ , достигается при неравных значениях управляющих воздействий. Как показывает анализ, при уменьшении отношения  $k_1/k_2 < 1$  оптимальное значение  $v_{1opt}$  уменьшается, а  $v_{2opt}$  возрастает.

С использованием разработанной методики решены задачи оптимизации алгоритмов управления при наличии запаса тепловой мощности АВО.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование / Д. Химмельблау. – М.: Мир, 1975. – 534 с.

*Статья поступила в редакцию 3 сентября 2010 г.*

UDC 62-83:622(075)

## OPTIMIZATION OF COOLING UNITS STATIONARY OPERATING MODES OF MAIN GAS PIPELINES COMPRESSOR STATIONS

**A.M. Abakumov, S.V. Alimov, L.A. Migacheva**

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

*On the basis of analytical and experimental researches the model is developed for calculations of optimum stationary operating modes of gas cooling units. The results were reached using of various rotation frequency managing algorithms of air cooling units fans engines, that were analyzed. The results reached at use of various rotation frequency management algorithms of air cooling units fans drives are analyzed.*

**Keywords:** *gas cooling units, optimization, fan electric drive.*

---

*Alexsander M. Abakumov – Doctor of Technical Sciences, Professor.*

*Sergey V. Alimov – Postgraduate student.*

*Luidmila A. Migacheva – Candidate of Technical Sciences, Associate professor.*