

МЕТОДИКА И АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА

¹Чекардовский С.М., ²Илюхин К.Н., ¹Петряков В.А., ¹Якубовская С.В.

¹ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», Тюмень, Россия, (625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д.38), e-mail: zemenkov@tsoгу.ru

²ФГБОУ ВО «Тюменский государственный архитектурно-строительный университет», Тюмень, Россия, (625001, Тюмень, ул. Луначарского, д. 2), e-mail: ktgv@tgasu.ru

Рассмотрен вопрос оперативного и достоверного определения технического состояния аппаратов воздушного охлаждения (АВО) природного газа на компрессорных станциях магистральных газопроводов. На основе технологической взаимосвязи технического состояния АВО с эффективностью работы основного оборудования компрессорных станций общими энергозатратами на транспорт газа, сделан вывод об актуальности данного вопроса. Проведён обзор и анализ существующих методик определения эффективности и технического состояния эксплуатируемых АВО. Определено, что применяемые методики не учитывают потери теплоты. Также определен ряд особенностей эксплуатации АВО не учитываемых в анализируемых методиках. Для устранения выявленных недостатков разработаны: схема измерения эксплуатационных параметров и алгоритм расчёта, что в совокупности составляет методику определения интегральной оценки тепловой эффективности работы АВО газа. На основе данных получаемых в результате применения разработанной методики становится возможным своевременное обслуживание АВО по техническому состоянию.

Ключевые слова: аппарат воздушного охлаждения, тепловая эффективность, теплообменный аппарат, теплоноситель, эксплуатация.

THE TECHNIQUE AND ALGORITHM FOR DETERMINING THE EFFECTIVENESS OF THE EXPLOITED AIR COOLERS OF NATURAL GAS

¹Chekardovskiy S. M., ²Ilyuhin K. N., ¹Petryakov V. A., ¹Yakubovskaya S. V.

¹Tyumen State Oil and Gas University Tyumen, Russia, (625000, Tyumen, Volodarskogostreet, 38), e-mail: zemenkov@tsoгу.ru.

²Tyumen State University of Architecture and Civil Engineering, Tyumen, Russia, (625001, Tyumen, Lunacharskogostreet, 2), e-mail: ktgv@tgasu.ru.

The article deals with the problem of rapid and reliable determination of the technical condition of the air coolers (AVO) of natural gas at compressor stations of main gas pipelines. On the basis of the technological relationship between the technical condition of the AVO with the efficiency of operation of main equipment of compressor stations total energy consumption for the transport of gas, the conclusion about the relevance of the issue. The review and analysis of existing methods of determining the efficiency and technical state of the exploited AVO. Determined that the methodology used does not take into account the loss of heat. Also defined a number of features of operation AVO is not considered in the analyzed methods. To address the identified deficiencies were developed: scheme measures operational parameters and algorithm of calculation, all of which is the method of determining the integral evaluation of thermal efficiency of AVO of gas. On the basis of data obtained from the application of the developed technique allows to timely service to the AVO on a technical condition.

Keywords: the air cooling device, heat efficiency, heat exchanger, coolant, operation.

Одним из важных элементов газотранспортных магистралей является система охлаждения транспортируемого газа, которая позволяет повысить надёжность её и сократить эксплуатационные затраты. При понижении температуры газа пропускная способность газопровода возрастает. Для охлаждения потока транспортируемого газа наибольшее или широкое распространение на КС получили АВО, которые имеют ряд преимуществ перед другими типами теплообменных аппаратов: не требуют предварительной подготовки

теплоносителей, надёжны в эксплуатации, экологически чисты, имеют простые схемы подключения. Современный магистральный транспорт природного газа развивается в энергоресурсосберегающем направлении с одновременной интенсификацией технологических процессов, связанных с увеличением объемов транспортируемого газа. В связи с этим при эксплуатации аппаратов воздушного охлаждения газа (АВО) [3] компрессорных станций (КС) происходит изменение перепадов давлений, градиентов температур, скоростей движения теплоносителей и т.п., что вызывает увеличение энергозатрат, особенно при неудовлетворительном техническом состоянии АВО. При этом требования к эффективности функционирования аппаратов постоянно растут. Аппараты воздушного охлаждения включают в себя следующие основные узлы и агрегаты: секции оребренных теплообменных труб различной длины (от 3 до 12 м), вентиляторы с электроприводом, диффузоры и жалюзи для регулировки производительности воздуха, несущие конструкции, в некоторых случаях механизма регулирования. Применяемые для охлаждения газа АВО имеют развитые наружные поверхности, что создаёт благоприятные условия для осаждения на них пыли и загрязнений растительного происхождения и песка. Процесс усугубляется: высокой температурой поверхности, применением осевых вентиляторов скорость охлаждающего воздуха в узком сечении в теплообменных секциях не высока ($w = 5-15$ м/с), а в сочетании с плохими теплофизическими свойствами воздуха обуславливает низкие значения коэффициента теплоотдачи ($\alpha = 30-90$ Вт/(м²*К)) и, как следствие, значительные габаритные размеры.

Исследования материалов различных авторов посвящённых загрязнению и очистке поверхности оребренных труб стало известно, что формируется на стадии изготовления вследствие использования смазочно-охлаждающей жидкости при накатке рёбер.

Основная часть предприятий - изготовителей АВО в настоящее время применяют устаревшую технологию промывки оребренных труб, заключающуюся в использовании отдельных ванн для обезжиривания, промывки и сушки. Однако этого недостаточно.

Отказы в работе аппаратов вызывают постоянное (во времени) снижение технико-экономических показателей работы газоперекачивающих агрегатов, не вызывая их аварийного останова. Поэтому оценка эффективности работы теплообменных аппаратов является актуальной задачей.

Исследование

На первом этапе исследований разрабатывалась методика, содержащая алгоритм, которая позволила определить эффективность эксплуатируемых АВО газа типа 2АВГ-75-С в результате адаптации существующих и разработки новых методов для расчета параметров теплообменных аппаратов. При проведении тепловых расчётов АВО применяются два

варианта расчётов: расчёты 1 рода (поверочные) и расчёты 2 рода (конструктивные). В условиях КС, как правило, приходится проводить расчёты 1 рода. При проведении этих расчётов исходными данными являются: расход теплоносителей, температура входа и выхода теплоносителей, тип теплообменного аппарата, его характеристика.

Был проведен анализ известных методов расчета АВО газа (2АВГ-75-С), которые были разработаны: в ВНИИНЕФТЕМАШ [4], ВТИ; ИТЦ «Оргтехдиагностика», РГУНГ им. И.М.Губкина, г. Москва (Зарицкий С.П., Поршаков Б.П.), ТюмГНГУ (Иванов В.А., Земенков Ю.Д.); ТюмГАСУ (Степанов О.А., Моисеев Б.В.) и др.

Анализ известных методик расчета АВО газа показал, что они основываются на совместном решении уравнений теплового баланса и теплопередачи без учета потерь теплоты ($\eta=1$) [5]:

$$M_1 \cdot C_{p1} \cdot (t_1 - t_2) \cdot \eta = M_2 \cdot C_{p2} \cdot (t_2 - t_1) = (KF) \cdot \Theta_m, \text{ кВт}, \quad (1)$$

где M_1 и M_2 - массовые расходы горячего (ГТ) и холодного теплоносителей (ХТ), кг/с; $M_1 \cdot C_{p1} = W_1$ - водяной эквивалент ГТ, кВт/К; $M_2 \cdot C_{p2} = W_2$ - водяной эквивалент ХТ, кВт/К; C_{p1} и C_{p2} - средние удельные теплоемкости теплоносителей, кДж/кгК; t_1 , t_1 - начальные температуры ГТ и ХТ, °С; t_2 , t_2 - конечные температуры горячего и холодного теплоносителей, °С; η - коэффициент полезного действия теплообменного аппарата; (KF) - комплекс, кВт/К; K - коэффициент теплопередачи, кВт/(м²К); F - поверхность теплообмена, м²; Θ_m - среднелогарифмическая разность температур теплоносителей, °С.

В результате анализа методики расчета АВО газа, используемой ИТЦ «Оргтехдиагностика» г. Москвы, установлено, что:

- при расчете теплофизических свойств теплоносителей (горячий – газ, холодный - воздух) в АВО газа используются табличные или графические зависимости свойств от температуры. Поэтому предложены полуэмпирические формулы, которые учитывают давление и температуру теплоносителей, что дает действительные значения критериев теплообмена;
- при выборе индекса противоточности (Р) для АВО газа следует выполнять его уточнение с помощью поправки на противоточность;
- при расчете коэффициента теплопередачи достаточно определить приведенный коэффициент теплоотдачи ($\alpha_{пр}$) от ребристой поверхности к воздуху; поэтому в методику внесено изменение по алгоритму расчета, для уточнения значения $\alpha_{пр}$ с учетом критерия Био.

Режимы работы теплообменных аппаратов (ТА) в зависимости от срока их эксплуатации, выполненных ремонтов, модернизации не всегда могут быть оценены существующими

методиками. Поэтому учеными разрабатываются и адаптируются существующие методики оценки эффективности работы ТА в зависимости от особенностей эксплуатации.

Каждый теплообменный аппарат имеет свои особенности в эксплуатации в зависимости от: места размещения в рабочем цикле и схеме; типа конструкции; вида теплоносителей; управляемости.

АВО газа имеют свои системы управления, которые позволяют изменять глубину охлаждения газа, поступающего после аппарата в газопровод. Эксплуатационные проблемы АВО газа связаны с уменьшением глубины охлаждения газа из-за ухудшения коэффициента теплопередачи по причине отложений различного рода на внутренней полости трубок и наружного загрязнения трубного пучка взвешенными пылевыми частицами из атмосферы, листьями и др.

В результате аналитических преобразований получена формула [1]:

$$(KF) = \frac{2W_1W_2[(t_1 - \tau_1) - \Theta_m]}{\Theta_m \cdot (W_1 + W_2)}, \text{ кВт/К} \quad (2)$$

Для определения коэффициента теплопередачи необходимо определить площадь поверхности теплообмена аппарата. Используя известные уравнения для определения потери напора (ΔP) теплоносителей с параметрами W_1 , W_2 , t_1 , t_2 , τ_1 , τ_2 , и, выполняя ряд математических преобразований получена новая формула для расчета средней скорости ГТ в теплообменнике:

$$w = \frac{8 \cdot W_1 \cdot W_2 [(t_1 - \tau_1) - \Theta_m] \cdot L}{(W_1 + W_2) \cdot Cp \cdot (t_1 - t_2) \cdot \rho \cdot F \cdot d}, \text{ м/с} \quad (3)$$

где L и d - длина пути ГТ и эквивалентный диаметр проходного сечения канала, м; ρ - плотность ГТ, кг/м³.

Формула (3) может быть использована для расчета средней скорости горячего или холодного теплоносителя любого теплообменного аппарата при условии, что известны $G_1 = M_1$, $G_2 = M_2$, t_1 , t_2 , τ_1 , τ_2 , ΔP , L/d , F .

Применительно к АВО газа из формулы (3):

$$F = \frac{8 \cdot W_1 \cdot W_2 [(t_1 - \tau_1) - \Theta_m] \cdot L}{(W_1 + W_2) \cdot Cp \cdot (t_1 - t_2) \cdot \rho \cdot \omega \cdot d}, \text{ м}^2 \quad (4)$$

Для расчета скорости газа в трубках используется известная формула

$$\omega_1 = \frac{M_1}{\rho_{\text{газ}} \cdot F_{\text{п.с.}}}, \text{ м/с} \quad (5)$$

где $F_{\text{п.с.}}$ - площадь поперечного сечения трубного пучка секции, м², $\rho_{\text{газ}}$ - плотность газа, м³/кг.

Применительно к аппаратам воздушного охлаждения газа типа 2АВГ-75-С выполнен расчет теплотехнических характеристик по заводским данным с помощью формул (3) ÷ (5). Расхождение составило 1,5 – 2,5%. [2]

Для исследований АВО газа АВГ-75-С использовалась штатная схема измерений (рисунок 1), где t_1 и t_2 – соответственно, температуры газа на входе и выходе АВО; P_1 и ΔP - давление газа на входе и потери давления газа.

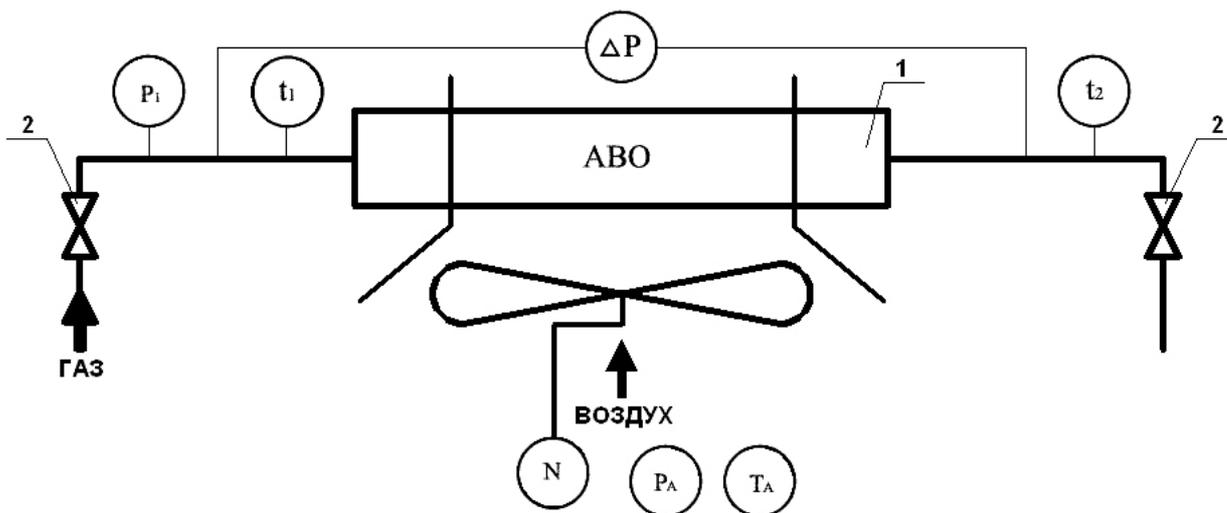


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема АВО

Разработанный алгоритм расчёта для интегральной оценки тепловой эффективности работы АВО газа содержит известные и полученные формулы [6]:

1. Средняя теплоёмкость газа, кДж/кг·°С

$$C_{p1} = 4,604 - 2,11 \cdot T \cdot 10^{-2} + 0,57 \cdot P_{cp}^2 - 0,17 \cdot T \cdot 10^{-2} \cdot P_{cp}^2 + 0,4584 \cdot T^2 \cdot 10^{-4} \quad (6)$$

2. Температура воздуха на выходе АВО, °С

$$\tau_2 = \frac{-1,0005 + \sqrt{1,0005^2 + 4 \cdot 1,1904 \cdot 10^{-4} \left[(1,0005 + 1,1904 \cdot 10^{-4} \cdot \tau_1) \cdot \tau_1 + \frac{Q}{M_2 \cdot (n_2 + 0,67n_1 + 0,06n_0)} \right]}}{2 \cdot 1,1904 \cdot 10^{-4}} \quad (7)$$

3. Водяной эквивалент воздуха, кВт/К

$$W_2 = C_{p2} \cdot M_2 (n_2 + 0,67 \cdot n_1 + 0,06 \cdot n_0) \quad (8)$$

4. Водяной эквивалент газа, кВт/К

$$W_1 = C_{p1} \cdot M_1 \quad (9)$$

5. Поправка на противоточность для перекрёстного тока теплоносителей:

$$\varepsilon = 1 - 0,022 \cdot 2,72^{\left(\frac{\Delta t}{t_1 - \tau_1}\right)} \quad (10)$$

6. Среднелогарифмическая температура теплоносителей, °C

$$\Theta_m = \varepsilon \left(\frac{\Theta_1 - \Theta_2}{\ln \frac{\Theta_1}{\Theta_2}} \right) \quad (11)$$

7. Средняя плотность газа, кг/м³:

$$\rho_1 = 45,63 - 39,41 \cdot T \cdot 10^{-2} + 23,19 \cdot P_{cp}^2 - 5,75 \cdot T \cdot 10^{-2} \cdot P_{cp}^2 + 8,35 \cdot T^2 \cdot 10^{-4} + 0,167 \cdot P_{cp}^2 \quad (12)$$

8. Скорость газа, м/с

$$\omega_1 = \frac{M_1}{f \cdot \rho_1 \cdot K_c} \quad (13)$$

9. Комплекс (KF), кВт / °C:

$$(KF) = \frac{2 \cdot W_1 \cdot W_2 \cdot (t_1 - \tau_1 - \Theta_m)}{\Theta_m (W_1 + W_2)} \quad (14)$$

10. Площадь поверхности, м²

$$F = \frac{16 \cdot W_1 \cdot W_2 \cdot [(t_1 - \tau_1) - \Theta_m] \cdot \frac{L_1}{2d_1}}{(W_1 + W_2) \cdot Cp \cdot (t_1 - t_2) \cdot \rho_1 \cdot \omega_1} \quad (15)$$

11. Коэффициент теплопередачи, кВт/м²К

$$K = \frac{(KF)}{F} \quad (15)$$

12. Эффективность теплообмена

$$\varepsilon = \frac{K}{0,0235} \quad (17)$$

Заключение. Выявлены недостатки существующих методик определения эффективности АВО в эксплуатационных условиях. Разработаны: схема измерения эксплуатационных параметров и алгоритм расчёта, что в совокупности составляет методику определения интегральной оценки тепловой эффективности работы АВО газа. На основе данных получаемых в результате применения разработанной методики становится возможным своевременное обслуживание АВО по техническому состоянию. Разработанная методика, также, позволит разрабатывать энергосберегающие мероприятия на основе мониторинга эффективности АВО.

Список литературы

1. ГОСТ Р 51364-99. Аппараты воздушного охлаждения. Общие технические условия.
2. М. Н. Чекардовский Разработка методов определения эффективности работы теплообменных аппаратов в системе теплоснабжения. М. Н. Чекардовский, С. М. Чекардовский, К. Н. Илюхин, В. Е. Ушаков. – Тюмень: Изд-во ТГСХА, 2009. - 145 с.
3. Методика теплового и аэродинамического расчета аппаратов воздушного охлаждения. М.: ВНИИНЕФТЕМАШ, 1982. - 97 с.
4. Чекардовский М.Н. Определение коэффициента рекуперации пластинчатых и трубчатых теплообменных аппаратов системы теплоснабжения /Чекардовский М.Н., Чекардовский С.М., Илюхин К.Н., Ушаков В.Е.// Приволжский научный журнал. 2009. № 4. С. 66-69.
5. Чекардовский М.Н. Тепловой расчет теплообменных аппаратов /Чекардовский М.Н., Иванов В.А., Хамидов А.С., Чекардовский С.М., Илюхин К.Н.// Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2008. № 1. С. 44-49.
6. Чекардовский С.М. Обоснование использования уточнённых формул теплового расчёта регенераторов ГТК-10-4/ Чекардовский С.М., Илюхин К.Н., Чекардовский М.Н. // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2010. № 2. С. 85-89.

Рецензенты:

Земенков Ю. Д., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Транспорт углеводородного сырья» ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», г. Тюмень;
Торопов С. Ю., д.т.н., профессор кафедры «Транспорт углеводородного сырья» ФГБОУ ВО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», г. Тюмень.