

# О способах предиктивной аналитики теплопередающей способности аппаратов воздушного охлаждения

Д. В. Гильмутдинов<sup>1</sup>, П. Г. Романенков<sup>2</sup>,  
М. В. Закирьянов<sup>3</sup>, Р. Р. Гайнетдинов<sup>4</sup>

ООО «Газпром трансгаз Уфа»

Уфа, Республика Башкортостан, Россия

<sup>1</sup>gilmutdinov.denis1995@yandex.ru, <sup>2</sup>promanenkov@ufa-tr.gazprom.ru, <sup>3</sup>mars.zakiryarov.1988@mail.ru,

<sup>4</sup>tor-92@mail.ru

Т. А. Бакиев

Уфимский государственный нефтяной технический университет» (УГНТУ)

Уфа, Республика Башкортостан, Россия

Itc-tbakiev@ufa-tr.gazprom.ru

**Аннотация.** Процессы старения производственных объектов нефтегазовой отрасли неизбежны. С увеличением срока эксплуатации технических устройств соединительные детали приходят в негодность, а на основном металле развиваются дефекты. Для предотвращения аварийных ситуаций и в связи с развитием технологий в нефтегазовую отрасль все чаще внедряется цифровизация и предиктивная аналитика. Кроме того, техническое диагностирование производственных объектов газотранспортной отрасли повышает темпы перехода в цифровое пространство. В связи с этим предлагается использовать предиктивную аналитику теплообменных аппаратов для определения технического состояния и его прогнозирования.

В результате проведенных исследований определены причины необходимости внедрения предиктивной аналитики, для АВО газа типа «Хадсон», «2АГВ-75», «Крезолуар» со сроком эксплуатации 20 лет проанализированы значения термических сопротивлений, разработана схема автоматизации теплообменных аппаратов на производстве.

**Ключевые слова:** предиктивная аналитика; цифровизация; термическое сопротивление; аппарат воздушного охлаждения; теплопередающая поверхность

## I. АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ДАННЫХ АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Опыт эксплуатации промышленных теплообменных аппаратов свидетельствует о том, что часто действительные коэффициенты теплопередачи в них оказываются значительно более низкими, чем расчетные значения. Объясняется это тем, что на теплопередающих поверхностях аппаратов в процессе эксплуатации отлагаются различные загрязнения, оказывающие дополнительное термическое сопротивление тепловому потоку. Оценка величина этого термического сопротивления имеет для исследователей важное, иногда решающее значение, так как часто именно оно определяет эффективный коэффициент теплопередачи рассматриваемого аппарата.

На сегодняшний день существует потребность в определении технического состояния аппаратов воздушного охлаждения газа в связи с большим количеством установок, выработавших свой амортизационный ресурс эксплуатации в соответствии с паспортными данными (рис. 1). Так, например, для одного из газотранспортных предприятий эта цифра составляет 89 %, при этом 88 % из них уже имеет срок

эксплуатации более 20 лет. Данный факт говорит нам о необходимости тщательного контроля их надежности и эффективности.

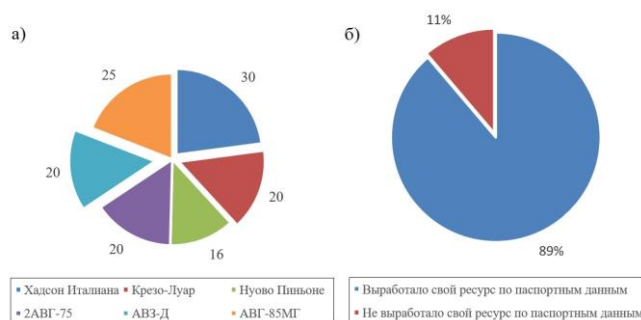


Рис. 1. Анализ паспортных данных АВО газа (а – срок эксплуатации, лет; б – количество, выработавших свой амортизационный ресурс по паспортным данным)

Загрязнения на теплопередающей поверхности создают дополнительные термические сопротивления процессу теплопередачи, в результате чего температурный перепад внутри труб и на поверхности загрязнений оказывается значительным. Чем больше толщина загрязнений, тем больше перепад температур (рис. 2). Очевидно, что ухудшение теплопередачи АВО приводит к увеличению экономических затрат на перекачку газа.

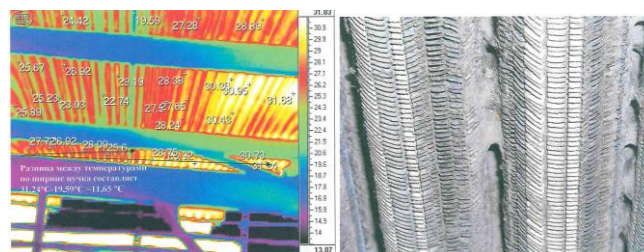


Рис. 2. Термографическое изображение части наружной загрязненной поверхности АВО типа «Крезолуар»

## II. ОЦЕНКА ТЕРМИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ, ВЛИЯЮЩИХ НА ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

Все отложения на пучке оребренных труб накапливаются постепенно, во многом они зависят от географии расположения, а также перекачиваемой среды. Например, при перекачке метана коэффициент теплопередачи остается постоянным на протяжении долгого времени. Для правильного учета состояния теплообменных аппаратов необходима информация,

позволяющая верно оценивать влияние термического сопротивления загрязнений.

Рекомендуемые сопротивления в соответствии с [1–3] сильно отличаются, загрязнения с внутренней стороны включают в себя конгломерат масла, попадающий из системы смазки нагнетателя ГПА, а внешние загрязнения – это растительный пух и пыль. Все это оказывает влияние на термические сопротивления и разрабатывать точные справочные данные для определения термических сопротивлений нужно для каждого конкретного случая, поэтому приведенные в них значения на данный момент не могут быть использованы применительно к АВО компрессорных станций магистрального газопровода.

Величиной, позволяющей судить об эффективности процесса охлаждения газа в АВО, является коэффициент теплопередачи (рис. 3). Данный коэффициент зависит от многих факторов [4]:

$$K = \frac{1}{\sum_{i=1}^n R_i} = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7}, \quad (1)$$

где  $R_1$  – термическое сопротивление теплоотдачи от газа к слою загрязнений на внутренней поверхности трубок,  $R_2$  – термическое сопротивление загрязнений на внутренней поверхности трубок,  $R_3$  – термическое сопротивление через стенку несущей трубы, которое находится как отношение толщины стенки трубы к коэффициенту теплопроводности материала,  $R_4$  – сумма термического сопротивления теплопроводности трубы к основания ребра,  $R_5$  – термическое сопротивление теплопроводности самого ребра,  $R_6$  – термическое сопротивление загрязнений на внешней оребренной поверхности трубок,  $R_7$  – термическое сопротивление теплоотдачи от загрязнений на внешней поверхности трубок к воздуху.

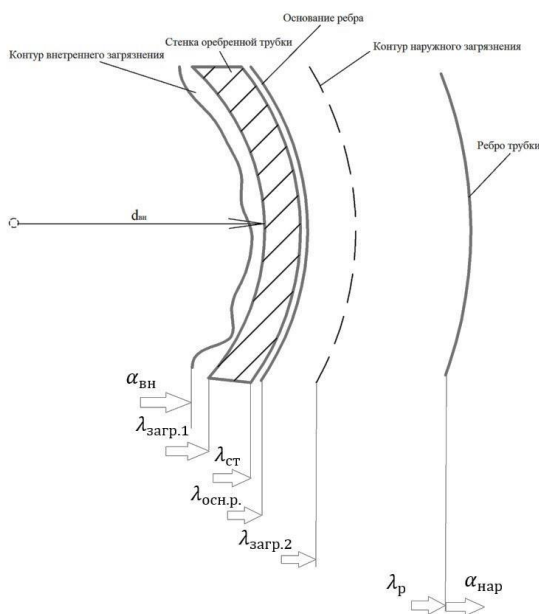


Рис. 3. Состав полного коэффициента теплопередачи

В ходе исследования термических сопротивлений были найдены средние значения сопротивлений и их процентное соотношения для аппаратов воздушного охлаждения типа «Крезо-Луар», «2АВГ-75», «Хадсон» (таблица 1). Данные исследования проводилось на базе дочернего газотранспортного общества ПАО «Газпром»

ООО «Газпром трансгаз Уфа» [5]. В соответствии с расчетами максимальное влияние на теплопередающую поверхность оказывают загрязнения на внешней поверхности оребренных труб, минимальное влияние оказывают геометрические параметры ребер.

ТАБЛИЦА 1 Влияние термических загрязнений на коэффициент теплопередачи АВО

Тип АВО	Тип термического сопротивления, $\frac{m^2 \cdot K}{W}$					
	$R_1$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_7$	$R_2 + R_6$
2АВГ-75	0,012	0,0012	0,002981	0,000004	0,0022	0,0071
Хадсон	0,0119	0,0012	0,003147	0,000003	0,0282	0,017
Крезо-Луар №1	0,012	0,001	0,0029	0,0000024	0,021	0,0272
Крезо-Луар №2	0,013	0,001	0,0029	0,000002	0,0025	0,0138
Крезо-Луар №3	0,014	0,001	0,0029	0,000002	0,026	0,0069
Ср. значение, %	24,68	2,11	5,81	0,0055	39,12	28,25

Обращаясь к результатам теплового расчета АВО газа можно заметить, что экспериментальные данные не соответствуют паспортным. Так, например, коэффициент теплопередачи АВО типа «Крезо-Луар» в соответствии с паспортом имеет значение  $24,93 \frac{kcal}{ч \cdot m^2 \cdot ^\circ C} = 28,99 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ , в ходе эксперимента это значение составило  $21,8 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ . Это связано как раз-таки с наличием загрязнений, а также реальными условиями эксплуатации аппаратов (расход воздуха, скорость ветра и температура газа).

### III. СПОСОБ ПРЕДИКТИВНОЙ АНАЛИТИКИ ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

В качестве первоначального этапа цифровизации производственных объектов можно рассматривать создание методик оценки ключевых параметров технического устройства (ТУ) с эталонными значениями, задание максимального и минимального параметра, характеризующего работоспособность. Такими параметрами в аппаратах воздушного охлаждения можно считать тепловую нагрузку на АВО, полный коэффициент теплопередающей поверхности оребренных труб, а также надежность всех узлов и соединительных деталей. В данной научно-исследовательской работе рассматривается методика, основанная на изменении тепловой нагрузки.

В соответствии с [6] для расчета тепловой нагрузки также можно использовать следующую формулу:

$$Q_{АВО} = G_{АВО} \cdot c_p^{НОМ} \cdot (t_{1АВО} - t_{2АВО}^P), \quad (2)$$

где  $c_p^{НОМ}$  – средняя удельная теплоемкость газа для расчетного режима работы АВО, кДж/(кг·К);  $t_{2АВО}^P$  – расчетная температура на выходе из АВО, °С.

В связи с наличием различий при проведении расчета тепловой нагрузки и теплотехническими характеристиками АВО из паспортных данных предлагается в формуле (2) использовать корректирующий коэффициент  $K_T$ :

$$Q_{АВО} = K_T \cdot G_{АВО} \cdot c_p^{НОМ} \cdot (t_{1АВО} - t_{2АВО}^P), \quad (3)$$

Коэффициент  $K_T$  определяется аналитическим способом в зависимости от эксплуатационных характеристик АВО.

Для более полной оценки состояния аппаратов воздушного охлаждения анализа только тепловой нагрузки для АВО недостаточно, в связи с этим в ходе научно-технического исследования были

проанализированы существующие методы диагностики теплопередающей поверхности АВО. В результате проведенного исследования предлагается осуществлять предиктивную аналитику с использованием коэффициента эффективности теплопередающей поверхности:

$$K_{\text{эф}} = \frac{K_{\text{экспл.}}}{K_{\text{чист.}}}, \quad (4)$$

где  $K_{\text{экспл.}}$  – эксплуатационное значение полного коэффициента теплопередачи с загрязнениями и дефектами,  $K_{\text{чист.}}$  – эксплуатационные значения полного коэффициента теплопередачи без загрязнений и дефектов.

Коэффициент  $K_{\text{эф}}$  находится в пределах от 0 до 1 и является безразмерной величиной. В случае, если  $K_{\text{эф}} \geq 0,8$ , то разрешается дальнейшая эксплуатация без проведения компенсирующих мероприятий. При  $0,8 < K_{\text{эф}} \leq 0,6$  – необходимы дополнительные мероприятия по улучшению теплопередачи, для  $0,6 > K_{\text{эф}}$  – нецелесообразна дальнейшая эксплуатация и рекомендуется вывод аппарата в резерв.

Вышеуказанный коэффициент предлагается анализировать для каждой оребренной трубки АВО в соответствии со схемой на рис. 4.

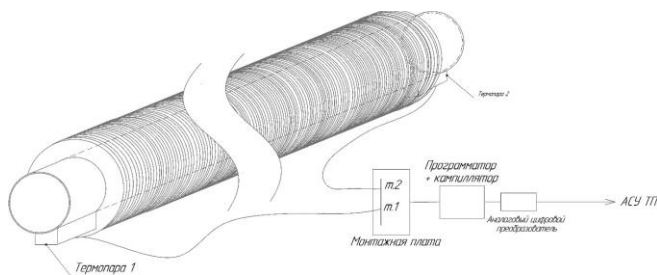


Рис. 4. Схема предиктивной аналитики температур оребренной трубки

В связи с необходимостью расчета среднего интегрального напора для расчета эксплуатационных значений полного коэффициента теплопередачи необходимо знать значение температуры на входе и на выходе оребренной трубки каждый момент времени  $t$ , для этого предлагается использовать термопару на концах оребренных труб, конец которой будет фиксировать температуру воздуха в начале и конце трубки, а запаянная часть фиксировать температуру трубки и, как следствие, температуру перекачиваемой среды (рис. 5) [7]. Данные с датчиков будут передаваться в аналоговый цифровой преобразователь (типа STM) и анализироваться.

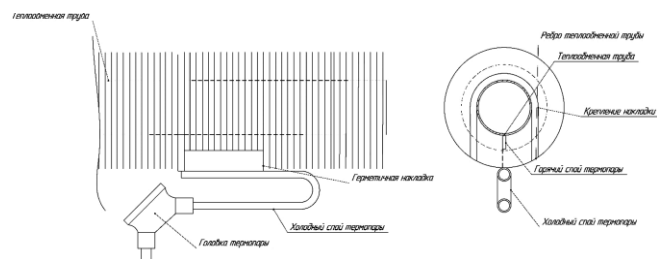


Рис. 5. Схема фиксации термодатчиков на оребренной трубке

Конечным результатом предиктивной аналитики будет тренд изменения температур газа и воздуха, значения полного коэффициента теплопередачи, анализ

коэффициента эффективности для каждой оребренной трубки и всей установки охлаждения, а также анализ тепловой нагрузки на АВО.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Благодаря достижениям развития цифровых технологий появилась возможность осуществлять предиктивную аналитику производственного оборудования во много раз увеличивающую эффективность технологических процессов и обеспечивать надежность технологических систем.

В ходе проведенного научного исследования:

- проанализировано техническое состояние аппаратов воздушного охлаждения газа на примере одного газотранспортного предприятия (88 % имеют срок эксплуатации более 20 лет, 89 % уже выработали свой амортизационный ресурс согласно паспортным данным);
- исследованы термические сопротивления, входящие в состав эмпирической формулы расчета полного коэффициента теплопередачи для двух секционных АВО газа, проанализировано процентное соотношение их влияние на теплопередающую способность;
- в связи с различиями при пересчете тепловой нагрузки и теплотехническими характеристиками аппаратов воздушного охлаждения по паспортным данным предложено применение корректирующего коэффициента для эмпирической формулы расчета  $K_T$ ;
- разработана схема предиктивной аналитики для теплообменных аппаратов с использованием термопары.

В дальнейшем планируется апробация и внедрение разработанной схемы предиктивной аналитики АВО газа на производстве.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Осипов В.А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена. Изд. 2-е, перераб. и дополн. М.: Энергия, 1969.
- [2] Кунтыш В.Б., Кузнецов Н.М. Тепловой и аэродинамический расчеты оребренных теплообменников воздушного охлаждения. СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербург. отд-ние, 1992. 280 с.
- [3] Кунтыш В.Б., Пиир А.Э., Федотова Л.М. Исследование контактного термического сопротивления биметаллических оребренных труб АВО // Изв. вузов. Лесной журнал. 1980. №5 с. 121-126.
- [4] Бакиев Т.А., Юсупов С.Т. К методике расчета аппаратов воздушного охлаждения газа на компрессорных станциях магистральных газопроводов. Уфа: ДизайнПолиграф Сервис, 2005. 300 с.
- [5] Камалетдинов И.М., Абузова Ф.Ф. Учебно-методическое пособие для проведения практических занятий на тему «Тепловой расчет промышленных аппаратов воздушного охлаждения газа по параметру эффективности». Уфа.: ФГБОУ ВО «УГНТУ», 2002. 31 с.
- [6] СТО Газпром 2-3.5-253-2008 Контроль качества оборудования при поставке и эксплуатации. Агрегаты газоперекачивающие с газотурбинным приводом. Аппараты воздушного охлаждения газа, а также использование лучевых характеристик из паспортных данных аппаратов для определения тепловой нагрузки АВО. М. ВНИИГАЗ, 2009. 63 с.
- [7] Р Газпром 2-2.3-745-2013 Повышение эффективности охлаждения газа и снижение энергозатрат аппаратов воздушного охлаждения для установок двухступенчатого воздушного охлаждения влажного газа. М. ОАО «Центральное конструкторское бюро нефтеаппаратуры», 2014. 20 с.