

Функциональные испытания аппарата воздушного охлаждения масла модульной конструкции

И.И. Хабибуллин, Р.М. Низамутдинов, И.В. Николаенко

(АО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа», Группа ГМС, г. Казань)

В статье рассмотрены функциональные испытания опытного образца аппарата воздушного охлаждения масла (АВОМ) модульной конструкции, при проектировании которого учтены характерные проблемы, возникающие при их эксплуатации на различных объектах химической, нефтяной и газодобывающей отрасли, такие как обмерзание секций, увеличенные транспортные габаритные размеры и высокие энергетические затраты в эксплуатации [1]. Конструкция АВОМ защищена авторским правом [2].

В целом статья представляет собой краткий обобщающий отчёт о процессе функциональных испытаний аппарата воздушного охлаждения масла в условиях производства. Функциональные испытания проводились с целью подтверждения теплогидравлических параметров, заданных, согласно технического задания.

Представлены основные стадии испытаний и доводки теплообменного аппарата с учетом его особенностей конструкции, основным изменяемым параметром являлся расход теплоносителя. Полученные результаты функциональных испытаний подтверждают работоспособность опытного образца автоматического аппарата воздушного охлаждения масла модульной конструкции, согласно технического задания. На данный момент ведутся подготовительные работы для проведения ресурсных испытаний опытного образца АВОМ и дальнейшее внедрение в серийное производство.

Ключевые слова: аппарат воздушного охлаждения масла, компрессорная установка, теплогидравлические характеристики, интенсификация теплообмена, оребрённая труба, полноразмерный эксперимент.

Functional tests f the automatic air-cooled oil heat exchanger

Khabibullin I.I., Nizamutdinov R.M., Nikolaenko I.V

(JSC «Nilturbocompressor named after V.B. Shnep», HMS Group, Kazan)

The article considers functional tests of a prototype of an oil air-cooled heat exchanger (OACHE) of a modular design, the design of which takes into account the characteristic problems that arise during their operation at various facilities of the chemical, oil and gas industry, such as freezing of sections, increased transport dimensions and high energy costs in operation [1]. The OACHE design is protected by copyright [2].

In general, the article is a summary on the functional tests process of the oil air-cooled heat exchanger in manufacturing conditions. The functional tests were carried out to confirm certain thermohydraulic parameters according to the technical specification.

The main stages of the heat exchanger testing and debugging are presented, taking into account its design features. The main variable parameter was the flow rate of the oil refrigerant. The obtained functional tests results confirm the prototype operability of the modular automatic oil air-cooled heat exchanger, the parameter values correspond to the technical specification. At the moment, preparatory work is underway to conduct resource tests of the OACHE prototype to introduce it into serial production.

Keywords: air-cooled heat exchanger, compressor unit, thermohydraulic characteristics, heat transfer intensification, finned pipe, full-sized experiment.

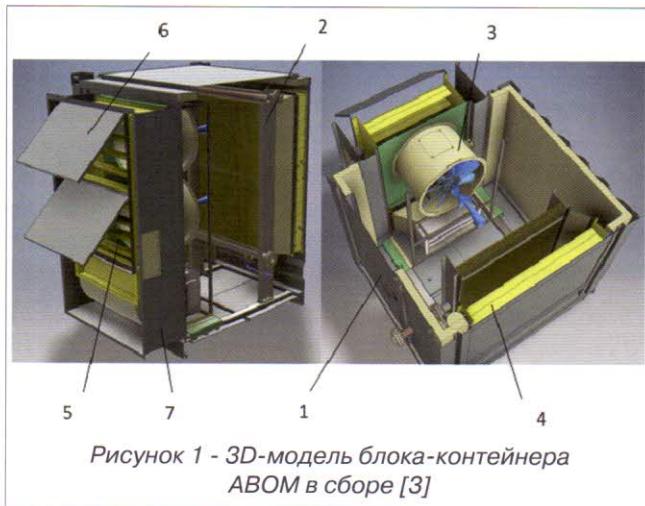
Введение

При работе компрессорной установки (КУ) магистрального газопровода температура масла в узлах трения, как компрессора, так и приводного двигателя (независимо от типа последнего, в случае применения масляных опор) неизбежно повышается, особенно, на интенсивных режимах работы. С целью обеспечения, заявленного ресурса эксплуатации КУ, температуру масла необходимо поддерживать на оптимальном уровне, за счёт применения теплообменного оборудования, в том числе, аппаратов воздушного охлаждения масла (далее – АВОМ).

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ. Конструкция АВОМ

Рассматриваемый в данной статье АВОМ (рис.1), конструктивно представляет собой утеплённый блок-контейнер (1), состоящий, из опорной металлоконструкции, на которой размещаются: маслоохладитель (МО) на раме (2), вентиляторы (3), направляющая перегородка (4), клапаны воздушные (5), транспортные маркизы (6), рециркуляционный канал с канальным нагревателем (7), сопутствующее электрооборудование, КИП. Управление работой АВОМ на различных режимах осуществляется от шкафа управления [2].





Согласно техническому заданию, в рамках проектных и научно-исследовательских работ, обозначены теплогидравлические параметры экспериментального АВОМ, представленные в таблице 1.

Параметры теплогидравлических
характеристик АВОМ (ТЗ)

Тип охлаждаемого теплоносителя	Масло ТП-22с ТУ 38.101821
Температура на входе в маслоохладитель, °C	90
Температура на выходе из маслоохладителя, °C	70
Объёмный расход, кг/с (л/мин)	5,6 (400)
Потери давления охлаждаемого теплоносителя, МПа (кГс/см ²)	
0,2 (2)	
Тип охлаждающего теплоносителя	Воздух
Температура окружающего воздуха (на входе), °C	24

Проектирование АВОМ основано на применении уравнения теплового баланса, увязывающего процессы теплообмена, как с масляной, так и с воздушной стороной [4]:

$G_p \cdot C_{p,n} \cdot (T_{1ABO} - T_{2ABO}) = G_v \cdot C_{p,v} \cdot (T_2 - T_1)$, (1)
где G_p - массовый расход охлаждаемого продукта в АВО, кг/с; $C_{p,n}$ - удельная теплоемкость охлаждаемого продукта, кДж/(кг·К); T_{1ABO} - температура охлаждаемого продукта на входе в АВО, К; T_{2ABO} - температура охлаждаемого продукта на выходе из АВО, К. G_v - массовый расход воздуха, кг/с; $C_{p,v}$ - удельная теплоемкость воздуха, кДж/(кг·К); T_2 - температура воздуха после прохождения АВО, К; T_1 - температура воздуха на входе в АВО, К.

Определяющую роль в расчёте, проектировании, изготовлении, доводке и последующей эксплуатации АВОМ, относящейся к масляной стороне уравнения (1), играет теплообменная секция, так как её особенности определяют конструкцию всего аппарата в

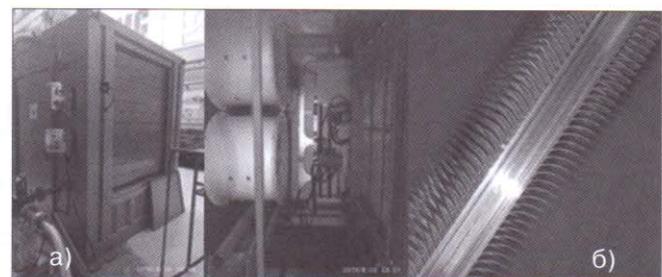


Рисунок 2 - Маслоохладитель (а)
и плоско-оребренная труба (б)

целом. В настоящей работе описывается АВОМ, имеющий в своём составе теплообменную секцию в единой раме (рис. 2, а) с плоско-оребрёнными трубами из алюминиевого сплава (рис. 2, б).

Применение плоско-оребрённых труб данной конструкции обусловлено проведенными экспериментами, в результате которых получены теплогидравлические зависимости, позволяющие интенсифицировать теплообмен на площади, меньшей по сравнению с аналогами АВОМ, применяемыми в нефтегазовой промышленности [5].

Испытательный стенд

Функциональные испытания, проводившиеся с целью определения фактической тепловой мощности рабочего прототипа АВОМ и получения первичных параметров, входящих в уравнение теплового баланса (1), с целью сопоставления полученных значений с проектными, проходили в составе маслосистемы рабочего винтового компрессора (ВК) с сопутствующим измерением теплогидравлических и аэродинамических параметров потоков, как охлаждаемой среды (масла), так и охлаждающей (воздуха).

На рисунке 3 представлены: схема измерения аэродинамических параметров (рис.3, а) и схема измерения теплогидравлических параметров (рис. 3, б).

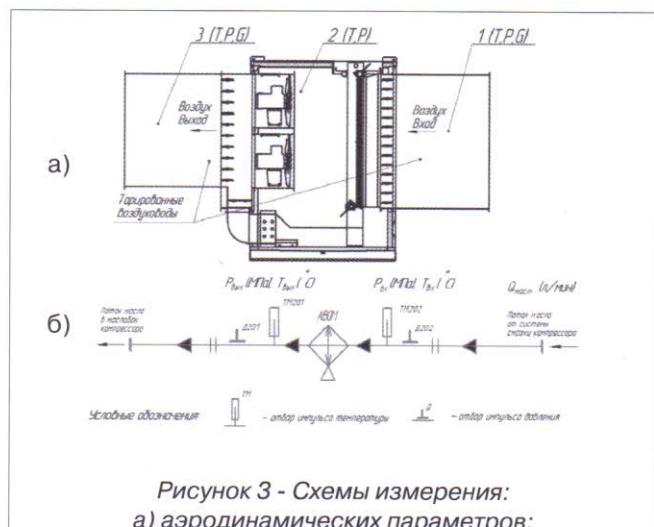


Рисунок 3 - Схемы измерения:
а) аэродинамических параметров;
б) теплогидравлических параметров



Для определения теплогидравлических характеристик измерялись: температуры воздуха на входе и выходе маслоохладителя датчиками ТСП; температуры масла на входе (ТМ202) и выходе маслоохладителя (ТМ201); расход масла в подводящем коллекторе с помощью расходомера «Эмис»; давление масла на входе (Д202) и выходе маслоохладителя (Д201) датчиками «Метран»; температура стенок маслоохладителя датчиками ТСП.

Для определения фактического значения расхода воздуха через АВОМ производилось измерение значений скорости на входе и выходе АВОМ анемометром «Testo 416», с условной разбивкой точек отбора по площади входных и выходных жалюзийных клапанов, используя (для выравнивания потока) тарированные сечения, обязательные при подобного рода измерениях, в виду большой неравномерности воздушного потока. Аэродинамическое сопротивление производились манометром цифровым дифференциальным ДМЦ-01М с трубкой напорной Пито.

Результаты функциональных испытаний

Согласно технического задания (таблица 1), АВОМ предназначен для системы смазки КУ с объемным расходом масла 400 л/мин и перепадом температур охлаждения от 90°C до 70°C с тепловым потоком, равным 230 КВт, при этом, измеренное значение потерь давления на маслоохладителе составило 1-1,3 кгс/см². В связи с этим, особый интерес представлял режим, соответствующий объемному расходу масла, согласно ТЗ. Каждый режим воспроизводился неоднократно с целью обеспечения условий удовлетворительной повторяемости результатов.

В ходе испытаний конструкция опытного образца подверглась доработкам, с целью соответствия ТЗ, а именно - изменялась конструкция теплообменной секции, отличающейся площадью теплообмена и схемой течения теплоносителя в маслоохладителе (МО) (рис. 4).

Результаты испытаний представлены на рисунках 5, 6, в виде зависимостей теплового потока и ги-

дравлического сопротивления в масляном тректе от расхода масла, для выбора наиболее оптимального варианта, обеспечивающего увеличение интенсивности теплообмена (тепловой мощности) и, одновременно, уменьшение гидравлических потерь при течении теплоносителя (значения тепловой мощности и гидравлические потери в ограниченных габаритных размерах указаны ТЗ, таблица 1).

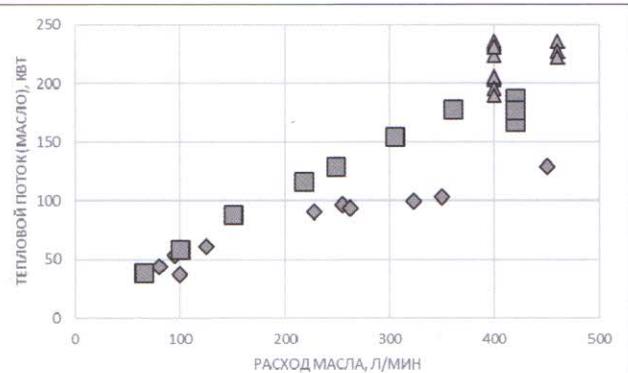


Рисунок 5 - Зависимость теплового потока от расхода масла: ◊- однорядный одноходовой; □- двухрядный трехходовой; Δ- двухрядный двухходовой

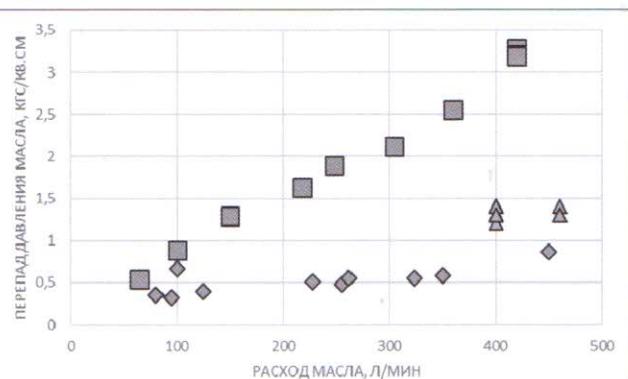


Рисунок 6 - Зависимость гидравлического сопротивления от расхода масла: ◊- однорядный одноходовой; □- двухрядный трехходовой; Δ- двухрядный двухходовой

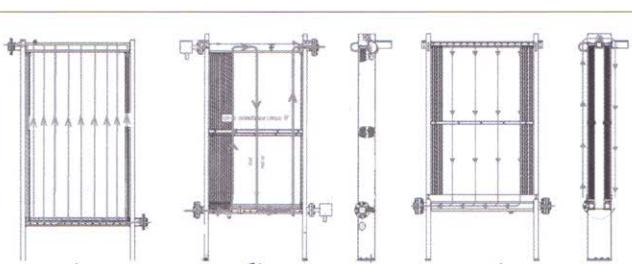


Рисунок 4 - Различные варианты исполнения маслоохладителя: а - однорядный одноходовой; б - двухрядный трехходовой; в - двухрядный двухходовой

Замена МО в составе экспериментального АВОМ позволила поднять фактическое значение теплового потока, однако, привела к значительному увеличению общего гидравлического сопротивления. Поскольку АВОМ рассматривается в качестве необходимой составной части маслосистемы компрессорной установки, оборудованной винтовым компрессором, потери давления на аппарате – это весьма значимый параметр, который не должен превышать, оговоренное в таблице 1, предельное значение. Увеличение площади охлаждающей поверхности более, чем в два раза (по сравнению с значением площади, охлаждающей поверхности одноходового однорядного МО рис.4, а), тепловой поток на режиме, близком к рабочему (порядка 400 л/мин), оказался достаточным,

чтобы обеспечить значение температуры масла на выходе из АВОМ, требуемое для обеспечения работы, участующего винтового компрессора. При этом измеренное аэродинамическое сопротивление составило порядка 240 Па.

Установленные на входе и выходе воздуховоды с тарированными сечениями (рис. 3, а) позволили провести измерения скорости охлаждающего воздуха на входе и выходе АВОМ, по осреднённым значениям которых, затем, посчитать расход воздуха. Измерение скоростей производилось при «холодной» продувке АВОМ и при «горячих» испытаниях, при прокачке холодного и горячего масла, соответственно. Профили графиков скоростей при «холодной» и «горячей» продувках не имели значительных отличий. В то же время, ввиду удовлетворительной повторяемости результатов измерений, удалось определить фактический расход воздуха через АВОМ, который превышал расчётное значение, оговоренное ТЗ (таблица 1).

Анализ результатов испытаний АВОМ с двурядным трёхходовым МО (рис. 4, б) позволил сделать вывод о наличии некоторого запаса по возможностям охлаждения воздухом, создаваемым уже установленными осевыми вентиляторами, и перейти к следующему этапу доводки – модернизации конструкции МО с сохранением рядности, но изменением схемы ходов «по маслу», без замены вентиляторов на более мощные. Таким образом, после доработки МО до двурядного двухходового (рис. 4, в) в той же раме, были произведены тепло-гидравлические испытания АВОМ с двурядным двухходовым МО. Результатами испытаний аппарата, имеющего в своём составе двурядный двухходовой МО, подтверждена способность экспериментального АВОМ выполнять свои функции в составе компрессорной установки с винтовым компрессором, с заданными значениями параметров (таблица 1).

Двухходовая схема позволила осуществить наиболее эффективное охлаждение масла, за счёт использования всей теплообменной поверхности первого ряда МО, омываемой поступающим извне воздухом, с последующим остаточным охлаждением во втором ряду уже подогретым воздухом, прошёдшим первый ряд. Самым высоким значением среднего температурного напора характеризуется именно однорядный одноходовой МО (рис. 4, а). Для случая двурядного двухходового МО срабатывает тот же принцип: весь массив охлаждающего воздуха подаётся на первый ряд теплообменных секций, полностью задействованный под первый ход масла, реализуя, в какой-то степени, ступенчатое охлаждение.

В первой ступени которой, фактически, является первый ряд МО, срабатывает максимальный температурный перепад, а во второй ступени – втором ряду МО – дорабатывается оставшийся, используя остаточную охлаждающую способность, уже подогретого в первой ступени, воздуха. В данном случае, двухходовая (двухступенчатая) (рис. 4, в) схема работает более эффективно, чем трёхходовая (рис. 4, б), при которой средний температурный напор имеет

наименьшее значение для исследованных вариантов МО. Аэродинамическое сопротивление двурядного двухходового МО, практически, не отличается от двурядного трёхходового МО. Кроме того, потери давления «по маслу», при использовании в составе экспериментального АВОМ двурядного двухходового МО, не превышают допустимого значения (таблица 1).

Заключение

Таким образом, функциональные испытания АВОМ в составе маслосистемы КУ подтвердили соответствие данной конструкции техническому заданию. По результатам анализа испытаний, выбран оптимальный вариант, при заданной тепловой мощности, габаритах и гидравлическом сопротивлении в каналах теплоносителя (масла), соответствующий конструкции, представленной на рис. 4, в. Такая конструкция МО, с двурядным расположением теплообменных секций и двухходовым течением масла, обтекающего за один ход первый ряд секций и перетекающего во второй ряд, имеет наиболее оптимальные значения гидравлического сопротивления и тепловой мощности с аэродинамическими параметрами, соответствующими ТЗ.

Испытаны три варианта теплообменной секции с разным ходом течения масла. Полученные опытные данные, позволяют скорректировать численную модель и спроектировать ряд АВОМ, различных по тепловой мощности. На данный момент опытный образец аппарата воздушного охлаждения масла модульной конструкции проходит ресурсно-эксплуатационные испытания.

Список литературы

1. Кадыров, Р.Г. Аппараты воздушного охлаждения масла для компрессорных установок. Повышение эффективности / Р.Г. Кадыров, И.И. Хабибуллин, Р.М. Низамутдинов, Ю.А. Паранин // Компрессорная техника и пневматика. 2019. - №1. – С. 35-42.
2. Пат. 190872 U1 Российская Федерация, МПК F16N 39/04 Аппарат воздушного охлаждения масла [текст]/ Низамутдинов Р.М., Хабибуллин И.И., Кадыров Р.Г.; заявитель и патентообладатель АО «НИИтурбокомпрессор». - № 2019109961; заявл. 04.04.2019; опубл. 16.07.2019. Бюл. №20. - 4 с.
3. Хабибуллин, И.И. Численное моделирование процессов теплообмена в аппарате воздушного охлаждения масла / И.И. Хабибуллин, Р.М. Низамутдинов (к.т.н.), Р.Г. Кадыров, И.В. Николаенко, М.В. Гуреев, С.В. Тиунов // Газовая промышленность - 2019. - №2. – С. 84-90.
4. Методика теплового и аэродинамического расчёта аппаратов воздушного охлаждения. – М.: ВНИИнефтемаш, 1971. – 102 с.
5. Тиунов, С.В. Экспериментальные и численные исследования теплогидравлических характеристик монометаллических плоско-оребренных труб из алюминиевого сплава / С.В. Тиунов, Р.М. Низамутдинов, И.И. Хабибуллин // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2020, №12. – С. 27-32.

