

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ МАСЛА ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ НА БАЗЕ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ ГТН-16

А.М. Неволин, П.Н. Плотников

Представлены результаты численного и экспериментального исследований аппарата воздушного охлаждения масла газотурбинной установки. Экспериментальное исследование проведено в условиях эксплуатации на газокompрессорной станции магистрального газопровода. Численное моделирование проведено методом конечных элементов в программе STAR-CCM+. В качестве объекта исследования выбран теплообменник венгерского производства, охлаждающий масло газоперекачивающих агрегатов на базе газотурбинной установки ГТН-16. Цель исследования – оценить количество теплоты, переданное в маслоохладителе до и после модернизации его воздушного такта. Модернизация заключалась в установке выравнивающего устройства, равномерно распределяющего поток воздуха перед трубным пучком. Проектирование и оптимизация конструкции направляющего устройства были проведены при помощи верифицированной численной конечно-элементной модели.

Приведено описание принципа работы и конструкции аппарата, указаны недостатки конструкции, послужившие причиной для данного исследования. Описаны схема и методика проведения натурных испытаний. В качестве результатов исследования приведены примеры полей скоростей потока воздуха на входе в теплообменную секцию до и после модернизации. Показано повышение удельного теплосъема секции маслоохладителя после выравнивания поля скоростей воздуха.

Ключевые слова: маслоохладитель ГТУ, аппарат воздушного охлаждения, аэродинамика, распределение потока теплоносителя, направляющий аппарат.

Введение

Одним из ключевых моментов, определяющих надежность работы ГТУ, является надежность работы системы смазки турбоустановки, основным элементом которой являются маслоохладители. В качестве последних в газотранспортной отрасли активно применяются аппараты воздушного охлаждения масла (АВОм). Наряду с неоспоримыми достоинствами (отсутствие затрат на водоподготовку, минимальное воздействие на экологию), данный тип теплообменников имеет существенный недостаток – низкий коэффициент теплоотдачи с воздушной стороны. Это обуславливает высокую чувствительность АВОм к загрязнению оребрения, изменению параметров атмосферного воздуха и равномерности его подвода по фронту трубного пучка.

Неравномерность подвода воздуха, особенно при повышении его температуры в летний период, даже при условии чистой оребренной поверхности может являться причиной недостаточной глубины охлаждения масла [1].

Недостаточная глубина охлаждения масла приводит к уменьшению его вязкости, снижению толщины масляного клина и, как следствие, к возможности перехода жидкостного трения в подшипниках к полужидкостному, что снижает КПД турбины и приводит к преждевременному износу оборудования. Кроме этого, уменьшение вязкости масла ведет к существенному увеличению вибрации на опорах турбоагрегатов с изношенными подшипниками. Таким образом, эффективность и

надежность работы АВОм предопределяет эффективность и надежность работы турбоустановки.

Экспериментальное и численное исследование аэродинамики АВОм

Объектом исследования в данной работе был АВОм венгерского производства с типом теплообменной секции 06-10, используемый для охлаждения масла системы смазки газоперекачивающих агрегатов на базе турбоустановки ГТН-16 (рис. 1). Данный АВОм служит для охлаждения масла низкого давления (до 0,6 МПа), которое проходит внутри трубок теплообменника. Снаружи через оребренные поверхности рядов трубок вентиляторами просасывается охлаждающий воздух. Теплообменная секция расположена горизонтально, представляет собой теплообменник Форго. Над трубным пучком установлены горизонтально два осевых вентилятора, работающие «на просос». Производительность одного вентилятора – 49000 м³/ч при температуре воздуха 30 °С, мощность приводного двигателя – 5,5 кВт.

Недостатком данной конструкции является поворот потока воздуха на 90° во входном тракте теплообменника. При этом даже с учетом того, что трубный пучок находится на всасывающей стороне вентилятора и, являясь составляющей частью общего аэродинамического сопротивления, несколько выравнивает поток воздуха на входе, воздух распределяется неравномерно с образованием зон с низкими скоростями потока в начале, конце и середине трубного пучка.



Рис. 1. Трехсекционный АВОм ГТН-16

Во время летнего периода эксплуатации АВОм работают в наиболее тяжелых условиях. Для севера Свердловской области наиболее неблагоприятный режим работы АВОм приходится на июль при приближении температуры окружающего воздуха к 30°C. При данной температуре, теплообменник теряет запас по охлаждению масла.

Одним из возможных путей повышения эффективности работы теплообменника является выравнивание поля скоростей охлаждающего воздуха перед входом в трубный пучок, что создает наиболее благоприятные условия для теплообмена.

Для исследования поля скоростей потока воздуха в плоскости непосредственно перед входом в теплообменную секцию были проведены ряд численных расчетов и натурных экспериментов в условиях эксплуатации.

Численное моделирование аэродинамики АВОм было проведено в инженерном пакете ко-

нечно-элементного анализа STAR-CCM+. Симметричность конструкции маслоохладителя относительно продольной и поперечной вертикальных плоскостей симметрии позволила использовать для моделирования только четверть АВОм. Все элементы конструкции воздушного тракта аппарата, за исключением трубного пучка, моделировались полноразмерными, в явном виде. Трубный пучок маслоохладителя для минимизации вычислительных ресурсов был смоделирован в неявном виде посредством пористого тела с теми же размерами и эквивалентными гидравлическими характеристиками. Подобный подход при корректном задании характеристик пористого тела, замещающего реальный элемент, позволяет получить результат с приемлемой точностью решения при несравнимо меньших вычислительных затратах.

Результаты численного моделирования (рис. 2, а), так же, как и результаты экспериментальных ис-

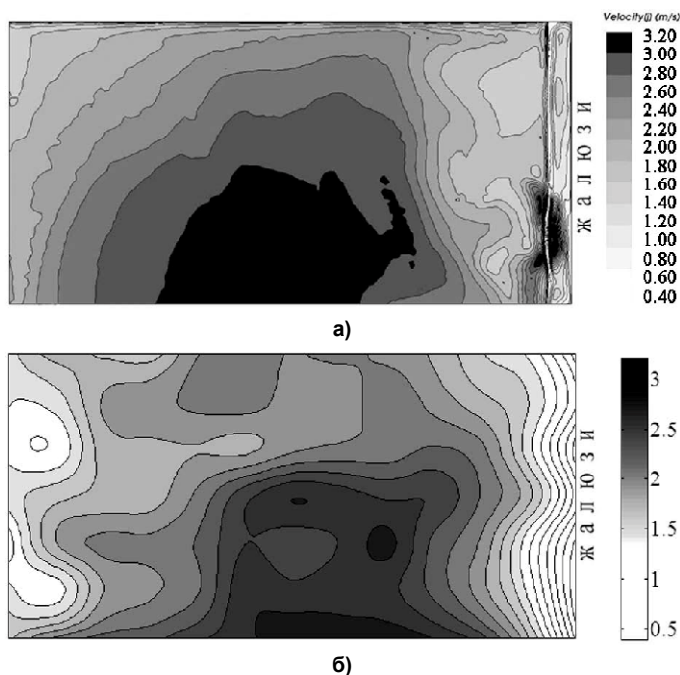


Рис. 2. Поля скоростей воздуха на входе в теплообменную секцию серийного АВОм: а – результат моделирования; б – результат экспериментального исследования на АВОм

следований в условиях эксплуатации на натурном маслоохладителе (рис. 2, б), выявили достаточно большую неравномерность потока на входе в теплообменную секцию. Минимальные и максимальные значения скоростей воздуха для различных участков секции аппарата различаются в 3,5–4 раза. В начале теплообменной секции была отмечена «застойная» зона со скоростями потока 0,3–0,9 м/с. Максимальная скорость воздуха составила 2,8 м/с, она фиксировалась по центру трубного пучка в зоне оси вентилятора [2]. Необходимо также отметить, что сопоставление результатов испытаний АВОм и результатов его моделирования показало как качественно, так и количественно хорошее совпадение результатов. Это позволило в дальнейшем с помощью численного моделирования на верифицированной модели проводить расчеты по поиску более рациональной системы подвода воздуха с целью ее модернизации.

Проектирование и апробация конструкции направляющего аппарата

Для изменения имевшегося поля скоростей АВОм был спроектирован и проверен верифицированной численной моделью направляющий аппарат (рис. 3), позволяющий максимально выровнять поле скоростей воздуха на входе в теплообменную секцию [3].

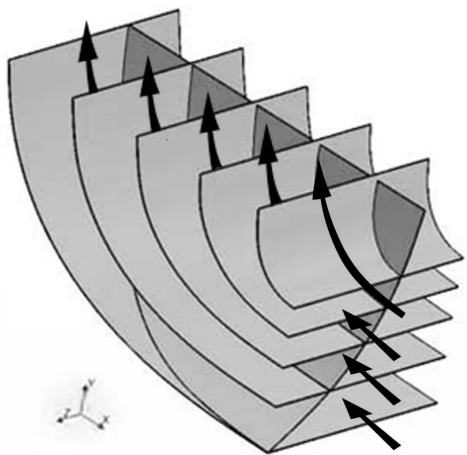


Рис. 3. Модель четверти направляющего аппарата

Разработка геометрии направляющего аппарата производилась при помощи вариантных численных расчетов. В качестве критерия улучшения работы АВОм рассматривалось снижение неравномерности поля скоростей на входе в теплообменную секцию. Особое внимание уделялось простым технологичным конструкциям, позволяющим максимально размыть ядро потока воздуха и поднять скорость в застойных зонах при минимальных гидравлических потерях. В результате вариантных расчетов была выбрана конструкция, состоящая из пяти направляющих, загнутых по потоку, и одной поперечной разделяющей перегородки, цель которой – оттеснение части потока к

периферии трубного пучка (см. рис. 3). Геометрия направляющих хорошо описывается при помощи полиномов четвертой степени.

Спроектированный и изготовленный направляющий аппарат (рис. 4 и 5) прошел испытания в условиях эксплуатации на АВОм Карпинского ЛПУ МГ (ООО «Газпромтрансгаз Югорск»). Во время испытаний газоперекачивающий агрегат работал на режиме перекачивания газа в магистральном газопроводе. В качестве опытного прототипа исследовалась упрощенная модель направляющего аппарата, не имеющая поперечной перегородки, изготовленная из листового сотового поликарбоната (рис. 5). Упрощенная конструкция, согласно модельным исследованиям, имеет относительно хорошую эффективность и значительно проще в изготовлении и монтаже.

Основными целями испытаний являлись исследование работы аппарата воздушного охлаждения масла (АВОм) ГПА типа ГТН-16, сравнение теплосъема секции с паспортными данными, исследование эффективности экспериментальной конструкции направляющего аппарата, установленного под теплообменной секцией АВОм (см. рис. 5).

Во время испытаний определялись температуры теплоносителей на входе и выходе АВОм до и после установки направляющего аппарата, расходы воздуха и масла, и поле скоростей воздуха в плоскости, расположенной непосредственно перед обребрением. Температура масла измерялась термометрами лабораторными, установленными в гильзы, вваренные во входной и выходной маслопроводах теплообменной секции.

Температура воздуха измерялась термопарой термоанемометра testo 425 в нескольких точках на входе (перед системой жалюзи) и на выходе (после вентилятора) и далее усреднялась. Расход воздуха рассчитывался на основании средней скорости потока за вентилятором, полученной усреднением данных, измеренных в нескольких точках сечения. Полученное значение расхода сопоставлялось с паспортными данными вентилятора, максимальное отклонение составило 2,7%. Значение расхода масла для дальнейших расчетов было взято из паспортных данных насоса и проверено ультразвуковым расходомером.

Скорость воздуха измерялась с помощью термоанемометра, с датчиком на телескопической рукояти. Ввиду нестационарности набегающего потока в каждой точке производились многократные измерения (10 измерений за 5 с на каждую точку) с последующим усреднением результатов. Замеры скорости перед обребрением проводились по узлам контрольной сетки, предварительно закрепленной на нижней поверхности трубного пучка.

Измерения проводились при температуре окружающего воздуха $-1...+5^{\circ}\text{C}$ и температуре масла перед АВОм $+40...+47,5^{\circ}\text{C}$.

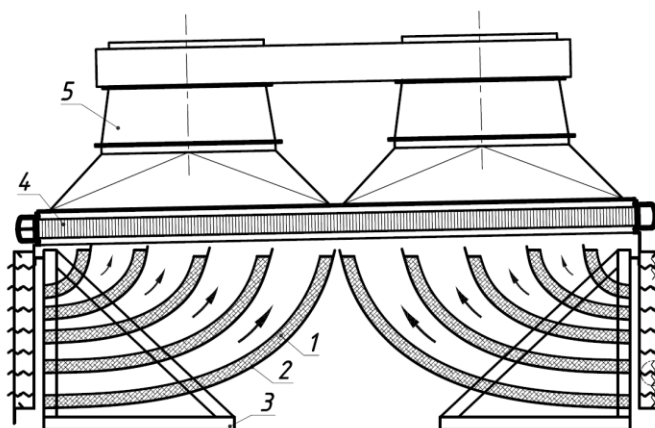


Рис. 4. Схема направляющего аппарата: 1 – направляющие; 2 – рабочие поверхности; 3 – опорная рама; 4 – трубный пучок; 5 – вентилятор



Рис. 5. Направляющий аппарат (половина), смонтированный в подсекционном пространстве АВОм

Проведенные исследования выявили следующие результаты:

1. Измеренное поле скоростей до и после установки направляющего аппарата как качественно, так и количественно соответствует данным, полученным при моделировании (рис. 2 и 6).

До установки направляющего аппарата поток воздуха, пройдя входные жалюзи и совершив поворот на 90° , разделяется на ярко выраженное ядро, зону со средними скоростями и периферию (см. рис. 2). По данным эксперимента, на внутреннем радиусе поворота потока, сразу за жалюзи, наблюдается застойная зона со средней скоростью $0,7$ м/с. В ядре потока средняя скорость воздуха составляет $2,6$ м/с (см. рис. 2, б).

После установки направляющего аппарата ядро потока разделяется на 4 (5 – в случае моделирования) составляющие, градиент скорости по фронту оребрения снижается (рис. 6). На внутреннем радиусе, сразу за жалюзи, средняя скорость воздуха в застойной зоне повышается до $1,3$ м/с. Средние скорости воздуха в отдельных субъядрах остаются на уровне $2,55$ – $2,65$ м/с (рис. 6, б).

По сравнению с экспериментом моделирование показало больший градиент скорости. В част-

ности, в ядре потока средняя модельная скорость больше экспериментальной на 12 и 19% (до и после установки направляющего аппарата соответственно).

2. В ходе исследования АВОм, при измерении параметров до установки направляющего аппарата, было выявлено, что теплообменник работает согласно паспортной характеристике (рис. 7, столбец 1). Данная характеристика получена отношением теплосъема секции к разности температур теплоносителей на входе в теплообменник:

$$Q = Q_c / (t_{m1} - t_{в1}) \text{ [Вт/}^\circ\text{C]},$$

где Q_c – теплосъем секции АВОм, Вт.

Отклонение удельного теплосъема от паспортных данных [4] составило $1,8\%$.

3. С установленным направляющим аппаратом удельный теплосъем секции увеличился на 4 – 9% (в зависимости от температуры начальных температур теплоносителей) по сравнению со значением, полученным без направляющего аппарата (рис. 7, столбцы 2 и 3). В первом измерении температура воздуха составляла $-0,2$ $^\circ\text{C}$, температура масла – $+47,5$ $^\circ\text{C}$, во втором – $2,6$ и $40,2$ $^\circ\text{C}$ соответственно.

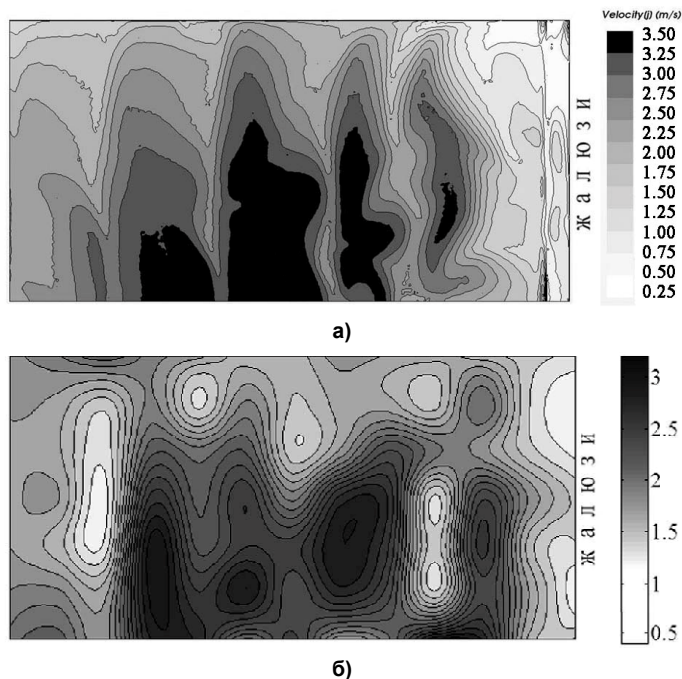


Рис. 6. Поле скоростей воздуха на входе в теплообменную секцию с установленным направляющим аппаратом: а – результат моделирования; б – результат измерения

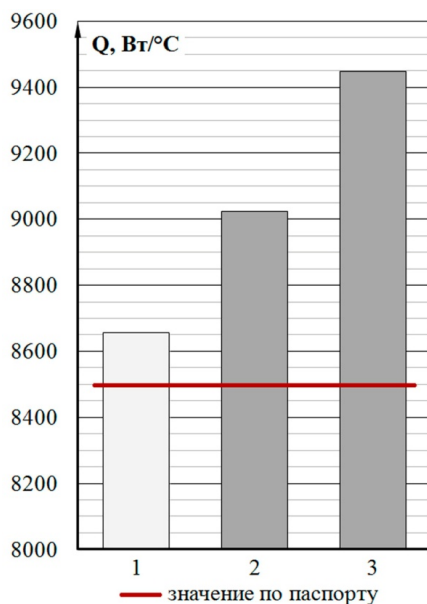


Рис. 7. Удельный теплосъем секции АВОм: 1 – результат измерения до установки направляющего аппарата; 2 – результат измерения после установки направляющего аппарата, $t_{в1} = 2,6\text{ }^\circ\text{C}$, $t_{м1} = 40,2\text{ }^\circ\text{C}$; 3 – результат измерения после установки направляющего аппарата, $t_{в1} = -0,2\text{ }^\circ\text{C}$, $t_{м1} = 47,5\text{ }^\circ\text{C}$

Заключение

1. Установлено, что использование сравнительно простой конструкции направляющего аппарата, выравнивающего поток на входе в теплообменную секцию, способствует повышению надежности эксплуатации газотурбинной установки за счет увеличения эффективности работы маслоохладителя.

2. Сопоставление результатов эксперимен-

тального исследования и результатов численного моделирования работы АВОм показало их хорошее совпадение, что позволяет рассматривать методику численного моделирования АВО, предполагающую замену трубного пучка пористым телом с эквивалентными гидравлическими характеристиками, как верифицированную и дает возможность ее обоснованного применения на аппаратах воздушного охлаждения другого типа.

3. По нашему мнению, применение направляющего аппарата в воздушном тракте АВОм в летний период эксплуатации можно рекомендовать и для АВО другого типа, в первую очередь, для АВО газа с вентиляторами, работающими в режиме «нагнетание».

Литература

1. Идельчик, И.Е. *Аэрогидродинамика технологических аппаратов. (Подвод, отвод и распределение потока по сечению аппаратов) / И.Е. Идельчик.* – М.: Машиностроение, 1983. – С. 38.
2. Неволин, А.М. *Исследование эффективно-*

сти работы аппаратов воздушного охлаждения масла ГТУ / А.М. Неволин, П.Н. Плотников // Тяжелое машиностроение. – 2012. – № 4. – С. 26–29.

3. Неволин, А.М. *Совершенствование аэродинамики аппаратов воздушного охлаждения масла ГТУ / А.М. Неволин, П.Н. Плотников // Фундаментальные и прикладные проблемы науки: материалы VIII Междунар. симпозиума.* – М.: РАН, 2013. – Т. 2. – С. 46–50.

4. *Техническое описание и инструкция по монтажу, эксплуатации и уходу за группой маслоохладителей зимнего исполнения типа 06-10.* – Будапешт: Институт энергетики, 1979.

Неволин Александр Михайлович, старший преподаватель кафедры «Турбины и двигатели», Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург; alexandr_nevolin@mail.ru.

Плотников Петр Николаевич, д-р техн. наук, профессор кафедры «Турбины и двигатели», Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург; plot24@mail.ru.

Поступила в редакцию 5 августа 2014 г.

**Bulletin of the South Ural State University
Series “Power Engineering”
2014, vol. 14, no. 4, pp. 11–17**

EFFICIENCY ENHANCEMENT OF OIL AIR COOLERS IN GTN-16 GAS-COMPRESSOR UNITS

A.M. Nevolin, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation, alexandr_nevolin@mail.ru,

P.N. Plotnikov, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation, plot24@mail.ru

The paper deals with the results of numerical and experimental studies of gas-turbine unit oil air cooler. The experimental study was performed under operating conditions of main pipeline gas-compressor station. The numerical simulation was carried out by means of finite element method in STAR-CCM+ program. The Hungarian heat exchanger cooling oil of the gas-compressor unit based on gas-turbine unit GTN-16 was chosen as the research object. The aim of the study was to evaluate oil cooler heat transfer rate before and after its air circuit modernization. The modernization was to install a leveling apparatus that distributes the air flow uniformly in front of the tube bank. Design and optimization of the leveling apparatus geometry were made by means of the verified finite element model.

The paper describes cooler design and operation principle. The design shortcomings that were the reason for the study are presented. The measuring scheme and field test methods are described. The author gives the examples of the air flow velocity field in front of the finning before and after modernization as results of the study. The paper states the enhancement of the oil cooler heat flux after the air flow velocity field leveling.

Keywords: gas-turbine unit oil cooler, air cooler, aerodynamics, heat carrier flow distribution, guide apparatus.

References

1. Idelchik I.E. *Aerogidrodinamika tekhnologicheskikh apparatov* [Aerodynamics of Technological Devices]. Moscow, Mashinostroenie, 1983. 38 p.
2. Nevolin A., Plotnikov P. [Gas-Turbine Unit Oil Air Cooler Operating Efficiency Research]. *Tyazheloe mashinostroenie* [Heavy Engineering], 2012, no. 4, pp. 26–29. (in Russ.)
3. Nevolin A.M., Plotnikov P.N. [Improving the Aerodynamics of Air-Cooling Oil Gas Turbine Installation], *Fundamental'nye i prikladnye problemy nauki. Materialy VIII Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Fundamental and Applied Problems of Science. Proceedings of the VIII International Symposium]. Moscow, Russian Academy of Sciences, 2013, vol. 2, pp. 46–50. (in Russ.)
4. *Tekhnicheskoe opisanie i instruktsiya po montazhu, ekspluatatsii i ukhodu za gruppoy maslookhladiteley zimnego ispolneniya tipa 06-10* [Technical description and user installation, operation and maintenance of a group of oil coolers winter performance type 06-10]. Budapest, Engineering Institute, 1979.

Received 5 August 2014