

УДК 536.24.083; 621.45.038.3; 621.452.3

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ ДЛЯ КАЛОРИМЕТРИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ТЕПЛОАПРЯЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ГТД

© 2018 Н.Л. Ярославцев, А.В. Викулин, С.С.Ремчуков

Московский авиационный институт
(Национальный исследовательский университет)

Статья поступила в редакцию 10.02.2018

При проведении калориметрических испытаний осуществляется оценка теплового состояния различных теплонапряженных деталей. При этом подвод охлаждающего воздуха через рабочий участок требует минимизации тепловых потерь с целью увеличения точности эксперимента. Исходя из этого, при экспериментальном исследовании каждого объекта необходима разработка индивидуального рабочего участка. В статье приведены конструкции рабочих участков для проведения исследований теплового состояния высокотемпературных лопаток ГТД в расплаве кристаллизующегося металла. Разработанные конструкции представленных рабочих участков позволяют уменьшить тепловые потери (теплорастоки) в системе «рабочий участок-объект контроля», повысить точность сравнительной оценки теплового состояния исследуемых объектов, сократить время подготовительных операций калориметрического метода контроля, имитировать эксплуатационные тепловые и газодинамические условия подвода охлаждающего воздуха к испытываемым лопаткам газовых турбин.

Ключевые слова: метод калориметрирования в жидкометаллическом термостате, охлаждаемые лопатки ГТД.

В настоящее время одним из наиболее информативных методов оценки теплового состояния теплонапряженных деталей ГТД, к которым можно отнести и охлаждаемые лопатки высокотемпературных газовых турбин, является метод калориметрирования в жидкометаллическом термостате [1].

Сущность метода (рис.1) заключается в том, что:

- высокочистый цинк марки Ц00 загружается в тигель, плавится в электрической печи и перегревается до температуры 725 ± 5 К (рис. 1а);

- тигель с цинком извлекается из печи и в расплав погружается (рис. 1б), специально подготовленная для проведения испытаний лопатка, которая через некоторое время вместе с расплавом в тигле приходит в равновесное температурное состояние;

- система «тигель - расплав - лопатка», за счет теплоотдачи к окружающему воздуху, охлаждается до температуры кристаллизации цинка $T_{кр} = 692,4$ К, что определяется по началу затвердевания цинка на внутренней поверхности тигля (рис. 1в);

- лопатка продувается охлаждающим воздухом (рис. 1г), в результате на наружной поверхности лопатки «намораживается» цинковая корка;

- лопатка извлекается из расплава металла после окончания продувки (рис. 1д);

- с лопатки снимается затвердевшая корка цинка (рис. 1е), по толщине которой в каждой точке поверхности лопатки, времени продувки и замеренной температуре воздуха на входе в лопатку определяется коэффициент теплопередачи ~ 293 К.

Одним из ответственных элементов технологической оснастки экспериментальной установки является рабочий участок, соединяющий объект исследования (охлаждаемую лопатку) с её воздушной магистралью стенда. Конструкция рабочего участка должна обеспечивать: возможность продувки лопатки охладителем при погружении ее в цинк с выпуском охладителя в атмосферу или использованием противодействия; минимальный теплоотвод от лопатки к рабочему участку; отсутствие массивных элементов соединительных узлов для обеспечения снижения теплоаккумуляционной способности конструкции; для лопаток со вставным дефлектором - возможность замены дефлектора лопатки в процессе проведения эксперимента без демонтажа рабочего участка.

Рабочий участок разрабатывается индивидуально для каждого объекта исследования с учетом его конструктивных особенностей с целью обеспечения полной имитации натуральных условий эксплуатации.

Ярославцев Николай Львович, кандидат технических наук, профессор кафедры «Технология производства и эксплуатации двигателей летательных аппаратов».
E-mail: yaroslavcevn1@mati.ru

Викулин Александр Викторович, кандидат технических наук, профессор кафедры «Технология производства и эксплуатации двигателей летательных аппаратов».
E-mail: vav106@yandex.ru

Ремчуков Святослав Сергеевич, аспирант.
E-mail: remchukov.sviatoslav@yandex.ru

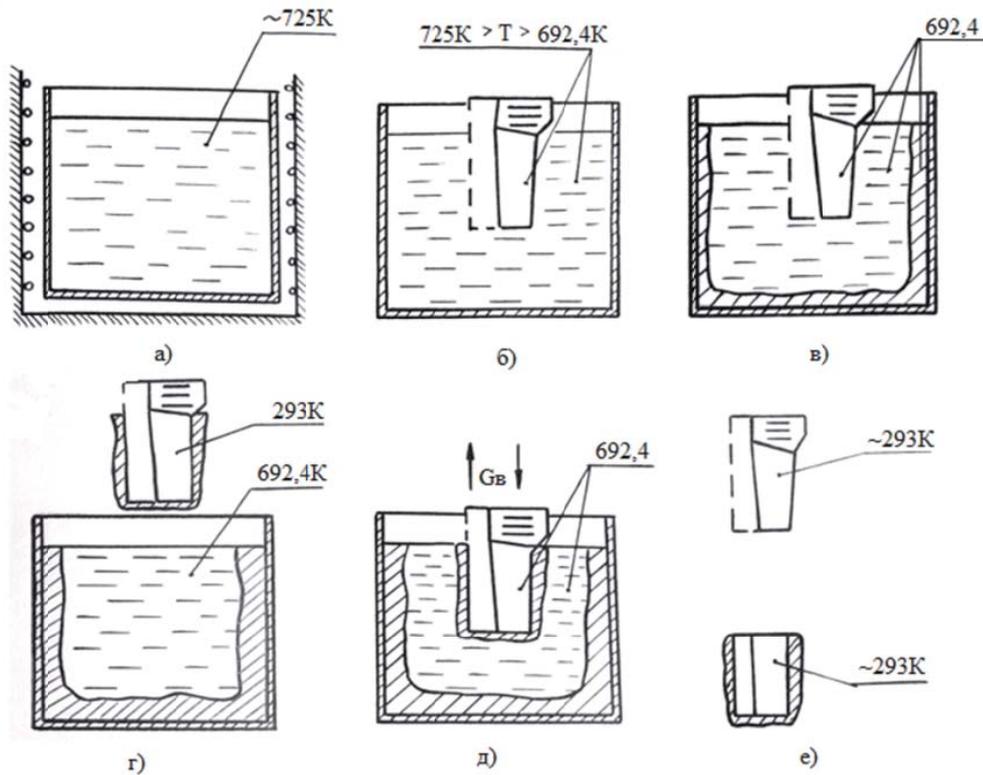


Рис. 1. Последовательность операций при исследовании теплового состояния охлаждаемых лопаток калориметрическим методом

Для стабилизации температуры охлаждающего воздуха на входе в испытуемый объект был спроектирован рабочий участок, конструктивная схема которого представлена на рис. 2.

Этот участок состоит из собственно воздухоподводящего коллектора (3) и коаксиально установленного по отношению к нему теплозащитного кожуха. Коллектор (3) выполнен из меди марки М1 с наружным диаметром $12 \cdot 10^{-3}$ м и предназначен для подачи охлаждающего воздуха непосредственно в исследуемый объект.

Коллектор устанавливается в воздухоподводящую магистраль, таким образом, чтобы его противоположный конец, имеющий вид соплового патрубка, геометрически подобный входу исследуемого объекта (6), находился от него на расстоянии $(5-10) \cdot 10^{-3}$ м. Установленная на срезе патрубка хромель-алюмелевая термопара (4) (в виде струны с раскатанным спаем) служит для измерения температуры воздуха на входе в испытуемый объект. Благодаря малой толщине термоэлектродов $0,2 \cdot 10^{-3}$ м и самого спаю такая система обладает пониженной теплоинерционностью и позволяет регистрировать температуру воздуха с высокой точностью.

Воздухоподводящий коллектор (3) закрыт теплоизолирующим кожухом, состоящим из цилиндрической трубки (1) диаметром $20 \cdot 10^{-3}$ м, выполненной из нержавеющей стали 1Х18Н9Т, на наружной поверхности которой установлен тепловой экран (2) из тонкой спирально свернутой нержавеющей фольги тол-

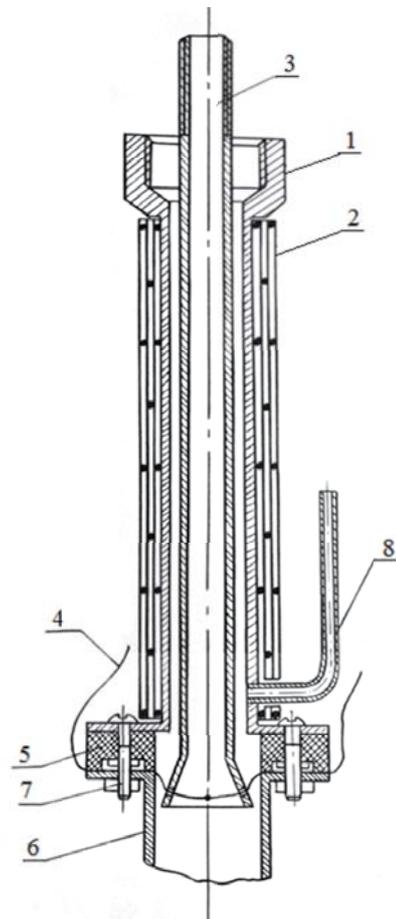


Рис. 2. Рабочий участок для стабилизации температуры охлаждающего воздуха на входе в испытуемый объект

щиной $0,1 \cdot 10^{-3}$ м с гарантированным зазором $(1,5-2,0) \cdot 10^{-3}$ м между ее слоями. Теплозащитные свойства кожуха определяются высоким термическим сопротивлением практически неподвижного тонкого воздушного слоя, находящегося между трубкой и слоями экрана, а, кроме того, его конструкция обеспечивает предохранение коллектора от теплового излучения расплавленного металла и муфеля электронагревательной печи.

Для снижения нестабильности температуры воздуха, поступающего в объект исследования, кроме перечисленных мероприятий используется тепловой разъем (5), представляющий собой шайбу с наружным диаметром $25 \cdot 10^{-3}$ м, внутренним диаметром $15 \cdot 10^{-3}$ м и толщиной $1 \cdot 10^{-2}$ м, выполненную из теплоизоляционного пресс-материала АГ-4В. Тепловой разъем установлен непосредственно на входе в исследуемый объект при помощи четырех болтов (7). Отбор статического давления осуществляется посредством трубки (8).

Указанные мероприятия обеспечивают повышение точности контроля теплового состояния исследуемых объектов методом калориметрирования

в жидкометаллическом термостате в среднем на 10%.

Для осуществления сравнительной оценки теплового состояния объектов [2] спроектирован и изготовлен рабочий участок, конструктивная схема которого приведена на рис. 3.

Испытуемые объекты (10), оснащенные фланцами (12), соединяются с рабочим участком, состоящим из подводящего (1) и отводящего (2) патрубков. Патрубки изготовлены из стальных труб (материал 12Х18Н9Т) толщиной 10^{-3} м. Подводящий патрубок имеет λ-образную форму.

Коллектор, к которому подсоединяется одна из испытываемых модификаций, изготовлен из трубы с несколько большим внутренним диаметром ($d = 11 \cdot 10^{-3}$ м), по сравнению с другим коллектором (внутренний диаметр которого составляет 10^{-2} м), что обеспечивает его большую пропускную способность. Выполнение этого условия дает возможность регулирования режимных параметров испытаний в широком диапазоне.

В верхней части подводящего патрубка имеется фланец (11) для крепления его к основной воздушной магистрали испытательного стенда. На выходе из коллекторов подводящего патрубка установлены две хромель-алюмелевые термопары (3) с диаметром термоэлектродов $0,2 \cdot 10^{-3}$ м и две трубки (4) с внутренним диаметром $3 \cdot 10^{-3}$ м для отбора давления охлаждающего воздуха, подсоединяемые к дифференциальному манометру или расходомерам.

В коллекторе с большим проходным сечением установлено регулировочное устройство, которое состоит из П-образного кронштейна (5), приваренного к внутренней поверхности разъемной секции коллектора (13), пластинчатой пружины клиновидной формы (6), приклепанной одним концом к секции коллектора. Противоположная суживающаяся сторона пружины вставлена в отверстие П-образного кронштейна (5). Под действием винта (7), вворачиваемого в приваренную бобышку на коллекторе, пружина (6) имеет возможность отклоняться и тем самым перекрывать проходное сечение канала. Для обеспечения герметичности соединения «бобышка-коллектор-винт» установлено фторопластовое уплотнение (8), поджимаемое контрольной гайкой (9). Постановка пластинчатой пружины вызвана тем, что находясь в потоке воздуха, она вызывает незначительную турбулизацию охладителя, по сравнению, например, с дросселем в виде простого винта. Такая конструкция рассматриваемого устройства позволяет выравнивать расходы охлаждающего воздуха через испытываемые объекты в процессе проведения эксперимента.

Стыковка охлаждаемой лопатки с узлами крепления патрубка осуществляется при помо-

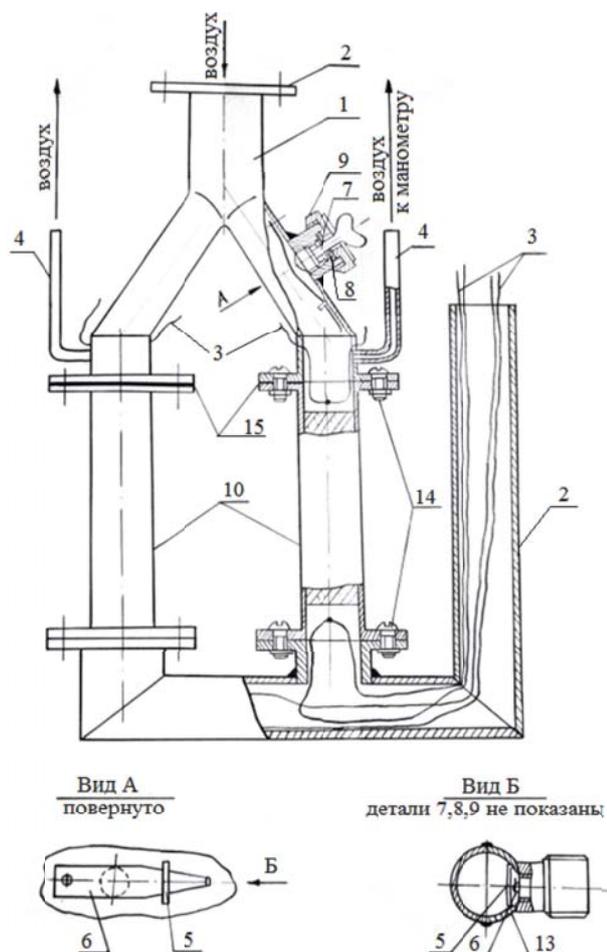


Рис. 3. Конструктивная схема рабочего участка для проведения сравнительных испытаний исследуемых объектов

щи болтового соединения (14) через тепловой разъем (15), выполненный из теплоизоляционного пресс-материала АГ-4В.

Герметичность разъемных соединений обеспечивается силиконовым герметиком ВГО-1 ТУ38.303-04-04-90.

В отводящем патрубке для замера температуры охлаждающего воздуха установлены две хромель-алюмелевые термопары (3) с диаметром термоэлектродов $0,2 \cdot 10^{-3}$ м. Показания термопар фиксируются контрольно-измерительной аппаратурой.

Конструктивная схема рабочего участка для исследования теплового состояния дефлекторных лопаток со вставным дефлектором представлена на рисунке 4. Она включает узел подвода воздуха к лопатке с тепловым разъемом, ограничивающим теплоотвод от испытываемой лопатки, собственно лопатку с фланцем и воздухоотводящим коллектором, термопары и трубку отбора статического давления.

Узел подвода охлаждающего воздуха представляет собой стальную трубку (1), на конце которой имеется накидная гайка (2) для соединения рабочего участка с магистралью стенда. С помощью фланца (3) трубка (1) стыкуется с переходником (4), выполняющим функцию «теплового разъема» и состоящим из трубки, приваренной к прямоугольному коробчатому фланцу, со стенками толщиной $0,5 \cdot 10^{-3}$ м. При сборке между соединительными фланцами переходника (4) и трубки (1) устанавливается теплоизоляционная прокладка (5).

С помощью шпилек переходник (4) через вторую прокладку (6) подстыковывается к фланцу (7) лопатки (8). Фланец (7) представляет собой прямоугольную пластину, по краям которой выполнены два ребра с теплоизоляционной прокладкой (6) между ними.

Принцип действия теплового разъема между лопаткой и воздухоподводящей системой заключается в том, что трубка (1), по которой поступает воздух, не контактирует с нагретой лопаткой и дополнительно экранирована от теплового излучения зеркала расплава цинка переходником (4).

Для уменьшения теплоаккумуляционной способности металл замковой части лопатки удаляется так, что толщина стенок на входе в перо составляет $(2-3) \cdot 10^{-3}$ м. Фланец (7) соединяется с лопаткой с помощью высокотемпературной пайки в вакууме. Торцевая часть лопатки выступает над фланцем (7), что обеспечивает доступ инструмента к дефлектору при его извлечении из пера. К выходной кромке лопатки с напуском не более 10^{-3} м припаивается тонкостенная трубка (толщина стенки $(0,4-0,8) \cdot 10^{-3}$ м) воздухоотводящего коллектора (9). Площадь поперечного сечения коллектора (9) должна быть больше пло-

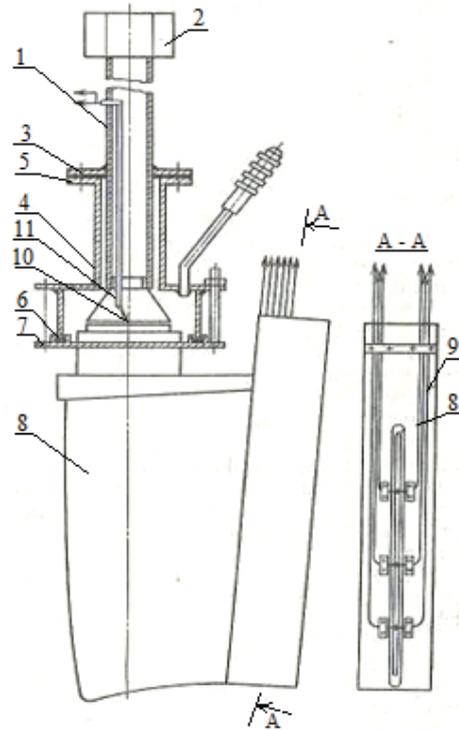


Рис. 4. Схема рабочего участка для испытания рабочих лопаток с дефлектором

щадки щели в выходной кромке лопатки.

Измерение температуры охлаждающего воздуха на входе в лопатку осуществляется кабельной хромель-алюмелевой термопарой (10), впаиваемой в трубку (1). Спай термопары устанавливается на входе в перо испытываемой лопатки. Для экранирования термопары (10) на срезе трубки (1) установлен диффузорный переходник (11), изготовленный из полированной медной фольги. Термопары устанавливаются в контролируемых сечениях пера, для чего трубка (9) разрезается вдоль продольной образующей. Electrodes термопар полосками фольги с помощью точечной сварки закрепляются на стенках трубки (9) таким образом, что спай находится напротив щели выходной кромки. После контроля правильности установки термопар половинки трубки (9) соединяются аргоно-дуговой сваркой. Штуцер отбора статического давления приварен к верхней стенке переходника (4). Трубка воздухоотводящего коллектора (9) и замковая часть лопатки покрываются теплоизоляционным лаком, что облегчает снятие цинковой корки.

Для моделирования подводящих магистралей в диске турбины разработан рабочий участок (рис. 5).

К лопатке (1) припаивается стакан (2), на который устанавливается фланец (3) с воздухоотводящей трубкой (4), оканчивающийся сектором (5). Стакан оборудован трубкой отбора давления (6) и соединен с магистралью

стенда (7). Угол установки трубки (4) и ее диаметр соответствуют геометрии каналов в диске турбины.

Конструктивное оформление представленных рабочих участков позволяет уменьшить тепловые потери (теплорастоки) в системе «рабочий участок-объект контроля», повысить точность сравнительной оценки теплового состояния исследуемых объектов, сократить время подготовительных операций калориметрического метода контроля, имитировать эксплуатационные тепловые и газодинамические условия подвода охлаждающего воздуха к испытуемым лопаткам газовых турбин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Викулин А.В., Попов В.Г., Ярославцев Н.Л. Тепловые испытания и доводка охлаждаемых лопаток газовых турбин. М.: ООО «КПД», 2012. 568 с.
2. Авторское свидетельство № 974845, Галкин М.Н., Попов В.Г., Ярославцев Н.Л. Способ контроля работы системы внутреннего охлаждения лопаток газовых турбин, 1982.

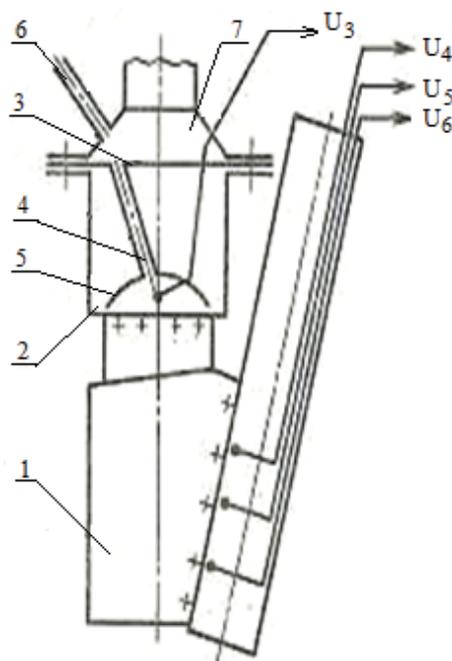


Рис. 5. Схема рабочего участка для испытания лопаток полупетлевого и петлевого типа

DESIGN FEATURES OF TOOLING FOR CALORIMETRIC TESTS OF HEAT-STRESSED GAS TURBINE ENGINE PARTS

© 2018 N.L. Yaroslavtsev, A.V. Vikulin, S.S. Remchukov

Moscow Aviation Institute
(National Research University)

During calorimetric tests are carried out to evaluate thermal condition of various heat-stressed parts. In this case the supply of cooling air through the working section requires minimization of heat losses to increase the precision of the experiment. For this reason, in the experimental study of each object is necessary to develop individual work area. The article describes the construction working areas for studies of the thermal state of high-temperature GTE blades in the melt crystallizing of the metal. The developed design presented to the working areas to reduce heat loss in the «work area-object of control», to improve the accuracy of comparative evaluation of the thermal state of the investigated objects, to shorten the time of the preparatory operations calorimetric method of control, to simulate the operating thermal and gas-dynamic conditions of a supply of cooling air to be tested to gas turbine blades.

Keywords: method of calorimetrically in thermostat with liquid metal, cooled blades of GTE.

Nikolay Yaroslavtsev, Candidate of Technics, Professor at the Department «Technology of Production and Operation of Aircraft Engines». E-mail: yaroslavcevn1@mati.ru
Alexander Vikulin, Candidate of Technics, Professor at the Department «Technology of Production and Operation of Aircraft Engines». E-mail: vav106@yandex.ru
Svyatoslav Remchukov, Postgraduate Student.
E-mail: remchukov.svyatoslav@yandex.ru