

УДК 629.7.036.3

РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТЕНДОВОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОТРАБОТКИ РЕЖИМОВ ВЛАЖНОЙ ОЧИСТКИ ПРОТОЧНОГО ТРАКТА ГТД

© 2011 Б. М. Силаев¹, Е. Н. Мальцев²

¹Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

²ОАО «КУЗНЕЦОВ», г. Самара

Приведена разработанная авторами конструктивная и пневмогидравлическая схема малогабаритной стендовой установки, позволяющей проводить отработку режимов влажной очистки проточного тракта ГТД в заводских (цеховых) условиях взамен опытно-промышленных испытаний реальных двигателей. Получены соотношения, позволяющие обоснованно расчетным путем определять необходимые конструктивные, геометрические и кинематические параметры установки.

Стендовая установка, отработка режимов влажной очистки, конструктивная схема, пневмогидравлическая схема, параметры установки.

В [1,2] разработаны концептуальная (обобщенная), математическая и расчетная модели системы влажной очистки проточного тракта газотурбинного двигателя (ГТД). Полученные соотношения позволяют рассчитать геометро-кинематическую схему устройства для очистки и его параметры, согласованные с геометрическими характеристиками воздухозаборника и рабочими параметрами воздушного потока на входе в двигатель. Для расчета процесса очистки необходимо решить уравнение, определяющее интенсивность разрушения (изнашивания) I_h пленки загрязнений на деталях проточной части двигателя:

$$I_h = K_S \left[\left(\pi_{cm}^{\frac{*k-1}{k}} - 1 \right) (1 - \eta_{cm}) \frac{0,5 T_{ex}^*}{\eta_{cm} \Delta T_{cm}} \right]^{a_S}. \quad (1)$$

В соответствии с (1) параметры, находящиеся в скобках, известны по паспортным данным двигателя (π_{cm} - степень повышения давления в ступени компрессора; k - показатель изоэнтропы; η_{cm} - КПД ступени компрессора; $\Delta T_{cm} = T_{cm}^* - T_{ex}^*$, здесь T_{ex}^* и T_{cm}^* - температура перед и за ступенью соответственно). Коэффициент K_S и показатель степени a_S , отражающие ряд неучтенных факторов при выводе формулы (1), таких как химические реакции и др., должны быть определены экспериментально. При экспериментальной оценке этих величин возможно два варианта: первый вариант – это получение данных при опытно-промышленных испытаниях

реального двигателя и второй путь – это отработка режимов влажной очистки и получение необходимых данных при экспериментальных испытаниях на специальной стендовой установке в заводских (цеховых) условиях, по специально разработанной методике.

Первый вариант решения вопроса является достаточно сложным, трудоемким и дорогостоящим. **В** настоящее время маловероятно, что моторостроительные фирмы будут решать указанные вопросы таким образом. Поэтому второй вариант решения проблемы – это отработка режимов очистки на экспериментальном, малогабаритном устройстве - значительно предпочтительней по всем показателям. Из краткого сравнительного анализа можно видеть, насколько актуально решение рассматриваемой проблемы.

Для реализации экспериментального метода отработки режимов влажной очистки проточного тракта ГТД разработан малогабаритный экспериментальный стенд. **В** основу работы и конструктивной схемы стендовой установки принят принцип физического моделирования, т.е. отработка режимов очистки должна проводиться на реальных деталях проточной части двигателя, например на секторе, вырезанном из направляющего аппарата как наиболее подверженном загрязнению, с определенным числом лопаток, при этом рабочие параметры воздушного потока должны соответствовать реальным, имеющим место на конкретном двигателе.

Стендовая установка должна удовлетворять следующему основному требованию – обеспечивать влажную очистку деталей на режимах, имитирующих реальные режимы работы двигателя, на которых предполагается проведение очистки, например на режиме

холодных прокруток от пусковой турбины, на режиме «малый газ», на номинальном режиме работы.

Принципиальная конструктивная и пневмогидравлическая схема стенда представлена на рис.1.

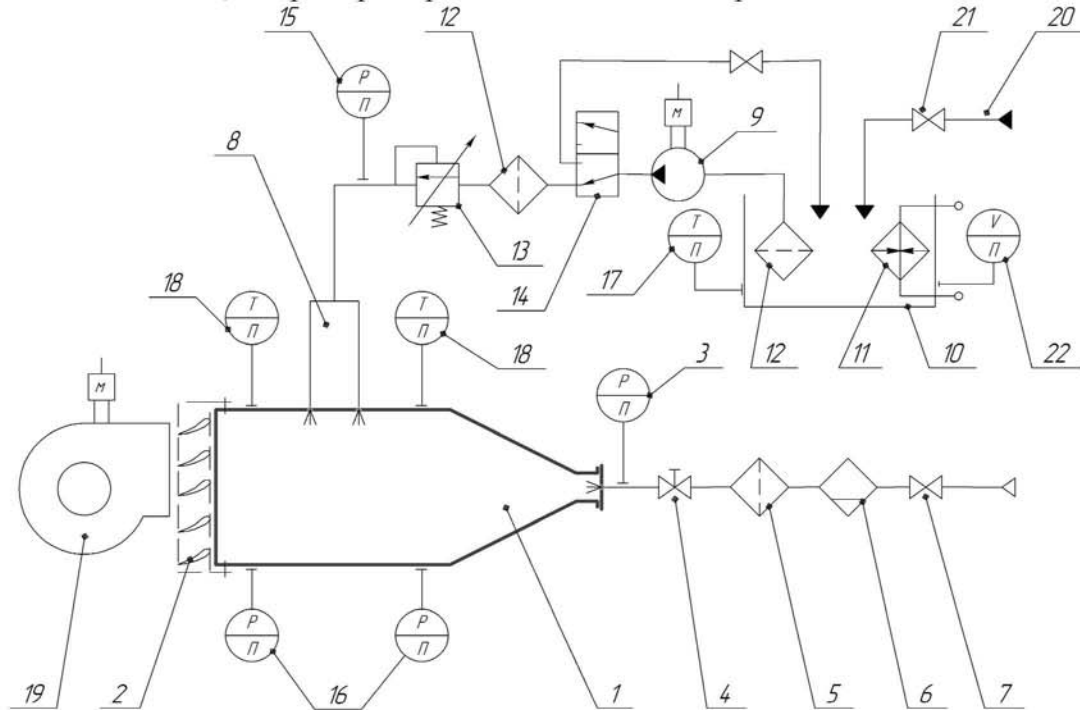


Рис.1. Пневмогидравлическая схема стенда

Стендовая установка состоит из следующих основных узлов и систем: смесительной камеры 1 с кассетой образцов направляющих лопаток 2, закрепленных на торце камеры; с другого ее торца подводится сжатый воздух через трубопровод с измерительно-регулирующей аппаратурой, включающей датчик давления 3, кран регулировочный 4, фильтр 5, влагомаслоотделитель 6 и кран перекрывной 7; на стенке камеры 1 крепятся форсунки 8 для подвода в камеру жидкости-очистителя через гидросистему, состоящую из насоса 9, бака 10 с жидкостью, электронагревателя 11, фильтров 12, редукционного клапана 13 и двухпозиционного крана 14; контроль давления жидкости перед форсунками осуществляется манометром 15, контроль давления в камере на входе и перед лопатками – образцовыми манометрами 16. Контроль температуры жидкости в баке 10 производится датчиком 17, воздуха и воздушно-жидкостного потока – датчиками 18. Воздушно-жидкостная среда с частицами пленки загрязнений в процессе очистки удаляется вентилятором 19.

Разрушение (изнашивание) и удаление пленки загрязнений с поверхности образцов лопаток оценивается по уменьшению их веса за определенный цикл испытаний, а также измерением их размеров до и после испытаний и визуально с помощью лупы 4-кратного увеличения. Время испытаний определяется по секундомеру.

Стендовая установка должна обеспечивать изменение подачи количества жидкости-очистителя, подаваемой в смесительную камеру 1, в зависимости от расхода воздуха, имитирующего три режима работы двигателя: холодные прокрутки, «малый газ» и номинальный режим. При этом сама стендовая установка должна работать на четырех режимах: заполнение бака водой, циркуляция, градуировка и испытание.

При заполнении бака 10 водой-разбавителем концентрата моющей жидкости к штуцеру 20 подключается шланг с водой, открывается кран 21 и вода поступает в бак. При достижении необходимого уровня воды в баке по сигналу датчика уровня 22 происходит закрытие крана 21. При отсутствии трубопровода подачи воды бак 10 можно

заполнить ручным способом, сняв его крышку.

Режим циркуляции используется для перемешивания при приготовлении жидкости-очистителя. В этом режиме жидкость из бака 10 через кран 14, установленный в положение «Кольцо», перекачивается насосом 9 обратно в бак.

Градуировка установки проводится перед испытанием с целью экспериментального подтверждения расхода жидкости через форсунки 8 на всех режимах работы. При градуировке установки кран 14 переводится в положение «Магистраль», редукционный клапан 13 настраивается на необходимое давление и жидкость из бака 10 перекачивается насосом 9 через фильтр 12 к форсункам 8.

При работе установки в режиме испытания жидкость из бака 10 прокачивается насосом 9 через фильтр 12 и кран 14, установленный в положение «Магистраль», к форсункам 8. Расход жидкости через форсунки настраивается с помощью редукционного клапана 13 и контролируется датчиком давления 15.

При разработке стендовой установки по известным рабочим параметрам воздушного потока на входе в двигатель необходимо определить геометрические и кинематические параметры воздушной и гидравлической систем установки. Опираясь на расчетные соотношения, полученные в [1,2], и преобразовывая их соответствующим образом, найдем указанные параметры.

Исходя из площади поперечного сечения смесительной камеры, определяемой принятой гребенкой образцов лопаток и задавшись диаметром d_e трубопровода подвода воздуха, находим давление воздуха $p_{e(i)}$ в нем, соответствующее i -му режиму работы двигателя:

$$p_{e(i)} = \frac{16G_{e(i)}^2}{2\mu_\phi^2 \pi^2 d_e^4 \rho_e} + p_k, \quad (2)$$

где $G_{e(i)}$ - массовый расход воздуха на i -м режиме работы двигателя, ρ_e - плотность воздуха, μ_ϕ - коэффициент расхода, p_k - давление в смесительной камере установки.

Определяем параметры в гидросистеме установки, обеспечивающие подачу жидкости-очистителя в смесительную камеру под

определенным давлением в необходимом количестве:

- угол α_v между направлениями векторов скорости $V_{жс}$ жидкости-очистителя и скорости воздушного потока V_e , определяющий положение оси форсунки:

$$\alpha_v = \pm 90^\circ - \arctg \frac{h_T}{l_T}, \quad (3)$$

где h_T и l_T - высота омываемой поверхности образца-лопатки и расстояние от гребенки лопаток до оси форсунки соответственно;

- диаметр форсунки d_ϕ и количество форсунок i :

$$\left. \begin{aligned} d_\phi &= \sqrt{\frac{4F_s F_e \rho_e t_d}{\pi \mu_\phi k_n i G_e \sin(\arctg h_T / l_T)}} \\ i &= \gamma_z / \gamma_\phi, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где F_s - площадь поперечного сечения смесительной камеры установки; F_e - площадь поперечного сечения воздухозаборника двигателя; t_d - динамический слой жидкости-очистителя [1]; k_n - экспериментально определяемый коэффициент торможения воздушного потока в камере, в первом приближении $k_n = 0,65 \div 0,95$; γ_z - угол сектора лопаток гребенки, $\gamma_\phi = 10^\circ \div 20^\circ$ - угол распыла струйной форсунки; μ_ϕ - коэффициент расхода;

- давление жидкости $p_{жс}$ в коллекторе перед форсунками и перепад давления Δp_ϕ на форсунках:

$$\left. \begin{aligned} p_{жс} &= \frac{k_n \rho_{жс} G_e^2 \sin^2(\arctg h_T / l_T)}{2F_e^2 \rho_e^2} + p_k \\ \Delta p_\phi &= p_{жс} - p_k. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Таким образом, при проектировании, решая систему уравнений (2)...(5), можно обоснованно расчетным путем получить все основные параметры стендовой установки, обеспечивающие проведение физически подобных модельных экспериментов.

Проведение указанных экспериментов позволит провести отработку режимов влажной очистки практически для любого из принятых режимов работы двигателя. При этом решается уравнение (1) в части опреде-

ления коэффициента K_s и показателя степени a_s , что позволит в дальнейшем расчетным путем оценивать основные параметры рабочего процесса влажной очистки для каждого принятого режима работы двигателя: время проведения очистки и расход жидкости-очистителя.

Разработка метода расчета и проектирования малогабаритной стендовой установки для отработки режимов влажной очистки проточного тракта ГТД устранил проблему получения данных по очистке путем проведения дорогостоящих опытно-промышленных испытаний натурных двигателей, что в

конечном счете принесет помимо технического, существенный экономический эффект.

Библиографический список

1. Силаев, Б.М. Теоретическое обоснование конструктивной схемы устройства для промывки газоздушного тракта ГТД [Текст] / Б.М. Силаев, Е.Н. Мальцев // Вестн. СГАУ. - Самара: 2009. - №3(19). - Ч.2. - С.167-171.
2. Силаев, Б.М. К вопросу об оценке параметров системы влажной очистки проточного тракта ГТД [Текст] / Б.М. Силаев, Е.Н. Мальцев // Газотурбинные технологии. - 2011. - №2. - С. 32-34.

DEVELOPMENT OF THE METHOD OF CALCULATION AND DESIGN STAND INSTALLATION FOR TESTING MODES WET CLEANING DUCT GTE

© 2011 В. М. Silaev¹, Е. N. Malcev²

¹Samara State Aerospace University named after academician S.P. Koroljov
(National Research University)

²JSC «KUZNETSOV», Samara

Developed by the authors presented a constructive and small-sized circuit pneumohydraulic bench setup to enable a refinement of modes wet cleaning duct GTE factory terms instead of pilot tests of real engines. Relations are obtained that allow reasonably calculated to determine the necessary structural, geometric and kinematic parameters of the installation.

Poster installation, testing of wet cleaning regimes, structural scheme, pneumohydraulic scheme, the installation options.

Информация об авторах

Силаев Борис Михайлович, доктор технических наук, профессор кафедры основ конструирования машин, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет), Тел.: (846) 267-46-09, 263-67-22. Область научных интересов: конструкция двигателей летательных аппаратов; трение и изнашивание деталей машин.

Мальцев Евгений Николаевич, ведущий инженер инженерного центра ОАО «КУЗНЕЦОВ», аспирант Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 227-36-94. E-mail: Malcev_e@rambler.ru. Область научных интересов: конструкция и испытания ГТД.

Silaev Boris Mihailovich, Doctor of Engineering Science, Professor of the principal machine construction Faculty. Samara State Aerospace University named after academician S.P. Koroljov (National Research University). Phone: (846) 267-46-09, 263-67-22. Area of research: friction and strain ageing of the machine elements.

Malcev Evgenij Nikolaevich, principal engineer of JSC ОАО «KUZNETSOV». Phone: (846) 227-36-94. E-mail: Malcev_e@rambler.ru. Area of research: testing gas turbine engine.