

УДК 629.7.036.3

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНОЙ СХЕМЫ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПРОМЫВКИ ГАЗОВОЗДУШНОГО ТРАКТА ГТД

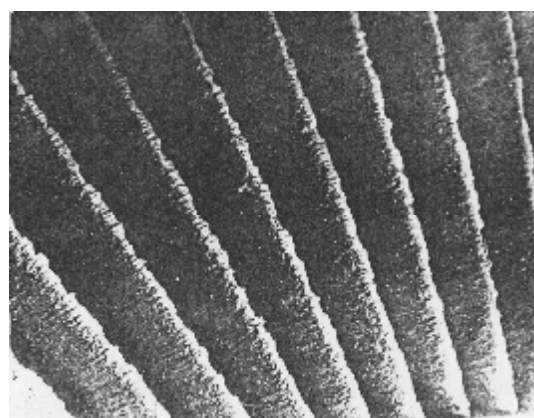
© 2009 Б. М. Силаев¹, Е. Н. Мальцев²¹ Самарский государственный аэрокосмический университет² Самарское конструкторское бюро машиностроения

Проведено теоретическое обоснование конструктивной схемы устройства для промывки газозвдушного тракта газотурбинного двигателя (ГТД). Показана взаимосвязь конструкции устройства с геометрическими параметрами входной части двигателя и параметрами воздушного потока, приведены расчетные соотношения для определения основных параметров устройства.

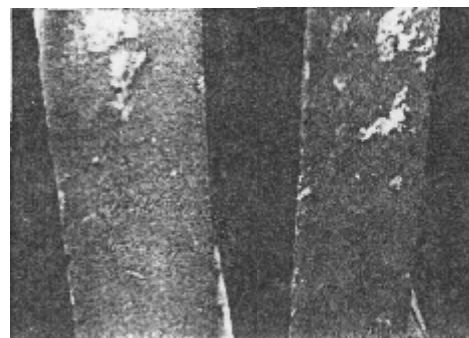
Устройство для промывки газозвдушного тракта газотурбинного двигателя, коллектор, форсунка, угол распыла

Газотурбинные двигатели (ГТД), эксплуатируемые как в авиации, так и в условиях наземного применения, подвержены загрязнению газозвдушного тракта. Это приводит к изменению геометрии проточной части двигателя и вызывает ухудшение его энергетических характеристик – снижение расхода воздуха через двигатель, давления за компрессором, мощности и к.п.д. Так, например, газотурбинные двигатели НК-12СТ, используемые в качестве привода нагнетателя газа в магистральных газопроводах нашей страны и за рубежом, после возвращения из эксплуатации без промывки газозвдушного тракта могут иметь отложения посторонних веществ на роторных деталях толщиной до 1 мм и на проточной части статора до 3 мм [1,2]. Для иллюстрации сказанного на рис.1 приведены фотографии элементов газозвдушного тракта ГТД НК-12СТ с отложением загрязняющих веществ.

Проведенный параметрический контроль работы двигателя НК-12СТ в составе газоперекачивающего агрегата ГПА-Ц-6,3 показал, что эксплуатация двигателя в указанных условиях обуславливает непрерывное снижение его топливно-энергетических характеристик до наработки 1500...2000 часов, после чего наступает стабилизация показателей экономичности. При этом максимальная потеря мощности может достигать 15%, эффективного к.п.д. 2,5%, а расход топливного газа, на котором работает двигатель, может возрасти до 10%.



а



б

Рис.1. Элементы газозвдушного тракта ГТД с отложением загрязняющих веществ:
а – на лопатках направляющего аппарата;
б – на лопатках ротора

Работа двигателя с отложением загрязняющих веществ на деталях проточной части кроме указанного приводит к дополнительному нагружению опор качения ротора и деталей газозвдушного тракта, а также вызывает коррозионно-механическое повреждение (изнашивание) его элементов. Все это обуславливает снижение надежности

указанных элементов конструкции и ресурса двигателя.

В настоящее время разработка и внедрение высокоэффективных средств и методов предотвращения загрязнений газоздушного тракта ГТД представляют собой значительные технические трудности из-за нерешенности ряда теоретических вопросов, требуют больших материальных затрат и не гарантируют полного эффекта. Поэтому для восстановления характеристик экономичности газотурбинного двигателя и снижения нагруженности его опор и элементов конструкции, а следовательно, повышения его надежности, признано целесообразным проведение периодической промывки тракта двигателя на режимной работе.

Известные технические решения по промывке газоздушного тракта ГТД, как показали эксперименты, не обеспечивают требуемой эффективности и приемлемой экономичности, т.к. выбор параметров процесса промывки и устройства для её проведения базируется на экспериментальном методе проб и ошибок. Так, известные устройства выполнены или в виде отдельной распылительной форсунки, подводящей промывочную жидкость на вход в ГТД [1], либо в виде кольцевого коллектора, расположенного снаружи входного диффузора и снабженного рядом форсунок для подвода жидкости в тракт двигателя [2]. Сопла форсунок для подвода промывочной жидкости в указанных устройствах расположены радиально или в направлении вдоль канала по потоку. Расположение сопел по потоку приводит к значительно неравномерному распылу промывочной жидкости по всему сечению тракта, при этом участки лопаток, расположенные ближе к втулочной части ротора, и сама втулочная часть остаются неочищенными. При расположении сопел радиально существенно возрастает давление подачи промывочной жидкости, что обуславливает повышенный расход её и не гарантирует требуемой эффективности промывки в смысле тщательного удаления загрязнений со всех участков промываемой поверхности тракта и сокращения времени проведения промывки.

Очевидно, решение по созданию эффективного и экономичного метода про-

мывки и устройства для его реализации лежит в сфере рассмотрения взаимосвязей основных параметров промывочной жидкости и воздушного потока на входе в ГТД и конструктивных характеристик его входной части и устройства для промывки. Указанные взаимосвязи получены на основе решения оптимизационной задачи по выбору оптимальных параметров процесса промывки – давления жидкости $P_{ж}$ в коллекторе 1 (см. рис.2) и перепада давления ΔP_{ϕ} на форсунке 2 – и основных параметров устройства для проведения промывки – диаметра форсунки d_{ϕ} и угла α_v (положения оси форсунки относительно образующей диффузора) – из условия минимизации вектора скорости $V_{ж}$ промывочной жидкости, обеспечивающей одновременно высокое качество промывки и экономичность в смысле тщательного удаления загрязнений со всех участков промываемой поверхности тракта, сокращения времени проведения промывки и общего расхода промывочной жидкости. Разработка метода промывки и устройства для его реализации проведено на базе а.с. №1244994 [3] и №1598535 [4].

Рассмотрим решение этой задачи. Найдем взаимосвязь скоростей жидкости $V_{ж}$ и воздушного потока V_v через угол β_v между вектором суммарной скорости V_{Σ} и вектором V_v (см. рис.2). Для этого из треугольника скоростей по теореме синусов выразим скорость $V_{ж}$ как функцию угла α_v , т.е.

$$V_{ж(\alpha_v)} = V_v \sin \beta_v / \sin(\alpha_v + \beta_v). \quad (1)$$

Выразив в (1) $\sin(\alpha_v + \beta_v)$ через тангенс половинного угла, получим

$$V_{ж(\alpha_v)} = V_v \frac{\sin \beta_v \left(1 + \operatorname{tg}^2 \left[\frac{(\alpha_v + \beta_v)}{2} \right] \right)}{2 \operatorname{tg} \left[\frac{(\alpha_v + \beta_v)}{2} \right]} \quad (2)$$

Найдем критические точки $V_{ж}(\alpha_v)$. Так как из выражения (2) имеем производную по углу α_v :

$$\frac{dV_{ж(\alpha_v)}}{d\alpha_v} = \frac{V_v \sin \beta_v \left(\operatorname{tg}^2 \left[\frac{(\alpha_v + \beta_v)}{2} \right] - 1 \right)}{4 \sin^2 \left[\frac{(\alpha_v + \beta_v)}{2} \right]},$$

то, решив уравнение $\operatorname{tg}^2\left[(\alpha_v + \beta_v)/2\right] - 1 = 0$, получим связь между углами треугольника скоростей α_v и β_v (см. рис.2) в виде

$$\alpha_v = \pm 90^\circ - \beta_v. \quad (3)$$

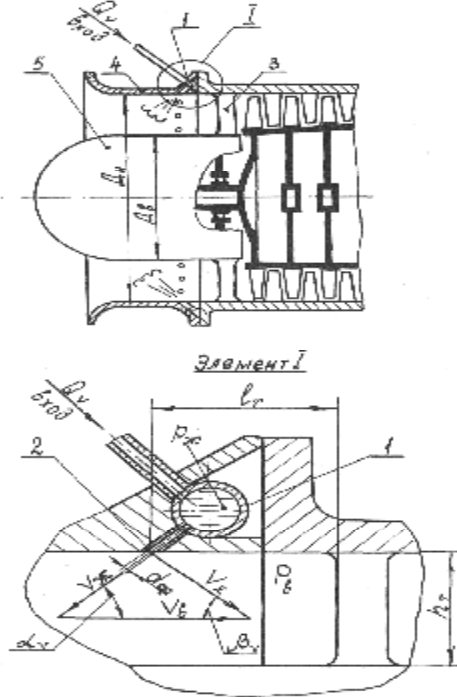


Рис.2. Конструктивная схема устройства для промывки проточной части газотурбинного двигателя

Отсюда можно видеть, что $dV_{ж}(\alpha_v)/d\alpha_v$ не существует в точках $\alpha_v = 0^\circ$ и $\alpha_v = 180^\circ$, т.к. в этих случаях направление вектора суммарной скорости V_Σ было бы параллельным направляющим лопаткам, т.е. угол β_v между скоростями V_Σ и $V_с$ должен бы равняться 90° , а это не имеет смысла. Таким образом, угол $\alpha_v = \pm 90^\circ - \beta_v$ является критической точкой функции $V_{ж}(\alpha_v)$, причем $\beta_v \neq 90^\circ$, поскольку $\alpha_v = 0^\circ$ и $\alpha_v = 180^\circ$ не входят в область определения данной функции.

$$\begin{aligned} \text{Из отношения (1) с учетом (3) получим} \\ V_{ж \min} = V_с \sin \beta_с / \sin(\pm 90^\circ - \beta_с + \beta_с) = \\ = V_с \sin \beta_v, \end{aligned} \quad (4)$$

т.е. для заданного угла β_v в точке $\alpha_v = \pm 90^\circ - \beta_v$ функция $V_{ж}(\alpha_v)$ имеет минимум для рассматриваемой конструктивной схемы, определяющей треугольник

скоростей на входе в двигатель. Угол β_v определяется направлением суммарной скорости V_Σ , т.е. $\beta_v = \operatorname{arctg} h_T / l_T$, где h_T - высота направляющего аппарата 3, l_T - расстояние от осей форсунок 2 на выходе до направляющего аппарата 3 (см. рис.2). Имея это в виду, зависимости (3) и (4) можно выразить как

$$\alpha_v = \pm 90^\circ - \operatorname{arctg} h_T / l_T, \quad (5)$$

$$V_{ж \min} = V_с \sin(\operatorname{arctg} h_T / l_T). \quad (6)$$

Все другие значения углов α_v и β_v приведут к тому, что некоторая часть тракта при найденном значении $V_{ж \min}$ останется непромытой, либо, чтобы этого не произошло, необходимо будет увеличивать $V_{ж}$ и, следовательно, увеличивать давление подачи промывочной жидкости и время промывки, что приведет к увеличению расхода жидкости.

Найдем давление жидкости $P_{ж}$ в коллекторе I (см. рис.2) и перепад давления ΔP_ϕ на форсунке 2, которые должны обеспечивать $V_{ж \min}$ согласно (6). Для этого выразим расход жидкости через форсунку по известной зависимости

$$Q_{V(\phi)} = \mu_\phi \frac{\pi d_\phi^2}{4} \sqrt{2(P_{ж} - P_с) / \rho}, \quad (7)$$

где μ_ϕ и d_ϕ - коэффициент расхода и диаметр отверстия форсунки, ρ - плотность промывочной жидкости при её фактической температуре.

В первом приближении можем записать также:

$$Q_{V(\phi)} = \mu_\phi V_{ж \min} \pi d_\phi^2 / 4. \quad (8)$$

Поставив в (8) значение скорости $V_{ж \min}$ из (6), и приравняв правые части (7) и (8), после преобразований получим

$$P_{ж \min} = \frac{\rho V_с^2 \sin^2(\operatorname{arctg} h_T / l_T)}{2} + P_с, \quad (9)$$

$$\Delta P_{\phi \min} = P_{ж \min} - P_с =$$

$$= \frac{\rho V_с^2 \sin^2(\operatorname{arctg} h_T / l_T)}{2}. \quad (10)$$

Далее найдем диаметр отверстия форсунки d_ϕ , который обеспечивал бы

$V_{ж\ min}$. Для этого из (8) с учетом (6) определим

$$d_\phi = \sqrt{\frac{4Q_{V(\phi)}}{\pi\mu_\phi V_\phi \sin(\arctg h_T / l_T)}}. \quad (11)$$

Выразим в (11) расход $Q_{V(\phi)}$ через форсунку как отношение общего расхода Q_V к числу форсунок i , т.е.

$$Q_{V(\phi)} = \frac{Q_\phi}{i}. \quad (12)$$

Общий расход Q_V найдем из предположения, что омываемую площадь поперечного сечения на входе в направляющий аппарат 3 (рис.2) непрерывно в течение всего времени промывки покрывает динамический слой промывочной жидкости, т.е. постоянно поддерживаемая в процессе промывки за счет подачи жидкости определенная ее толщина t_d в единицу времени (м/с) на всей промываемой площади поперечного сечения

$$A_T = \pi(D_H^2 - D_\phi^2),$$

где D_H - внутренний диаметр диффузора 4 двигателя, D_ϕ - диаметр обтекателя 5. С учетом этого можно записать:

$$Q_{V(\phi)} = \frac{\pi(D_H^2 - D_\phi^2) \cdot t_d}{4}. \quad (13)$$

Тогда соотношение для диаметра форсунки после постановки в (11) выражения (12) с учетом (13) и последующих преобразований будет иметь вид

$$d_\phi = \sqrt{\frac{(D_H^2 - D_\phi^2) \cdot t_d}{i\mu_\phi V_\phi \sin(\arctg h_T / l_T)}}. \quad (14)$$

Число форсунок i в (14) можно найти из соотношения $i = 360^\circ / \gamma_\phi$, где $\gamma_\phi = 10^\circ \div 20^\circ$ - угол распыла струйной форсунки [5]. Коэффициент расхода μ_ϕ выбирается в зависимости от отношения длины l_ϕ цилиндрической части отверстия форсунки к диаметру d_ϕ . Так, при $l_\phi / d_\phi = 0,5 \div 1$ коэффициент $\mu_\phi = 0,6 \div 0,65$; при $l_\phi / d_\phi > 2$ коэффициент $\mu_\phi = 0,75 \div 0,85$.

Толщина динамического слоя t_d определяется экспериментально, так для

двигателя НК-12СТ указанная толщина $t_d = (0,8 \div 1,5) \cdot 10^{-3}$ м/с. Остальные параметры в (14) известны, они находятся как геометрические и кинематические параметры во входной части ГТД.

В процессе промывки двигателя промывочная жидкость подается под оптимальным расчетным давлением в коллекторе 1 $P_{ж}$, определенным по зависимости (9), откуда она под расчетным перепадом давления ΔP_ϕ через отверстия диаметром d_ϕ форсунок 2, найденном из соотношения (14), выбрасывается во входную зону двигателя под оптимальным углом α_v , определенным по (5). Указанные оптимальные параметры обеспечивают минимальную из возможных расчетную скорость струи жидкости $V_{ж\ min}$ согласно (6), обеспечивающую при этом полный охват распыляемой жидкостью всего поперечного сечения газозоудушно-го тракта двигателя, чем и достигается необходимая эффективность промывки.

Библиографический список

1. Акционерная заявка Японии №48 – 26083, МКИ F 0207/04. опубликовано 25.06.72
2. Патент Великобритании № 1258315, МКИ F 0207/04. опубликовано 30.09.71
3. А.С.1244994 СССР, МКИ F 0207/00. Устройство для промывки газо-воздушного тракта газотурбинного двигателя / Заров Г.З., Степанов Н.И., Силаев Б.М. и др. (СССР). - №3745626/25; заявлено 25.05.84; зарегистрировано 15.05.86. – 2с.
4. А.С.1598535 СССР, МКИ F 0207/00. Способ промывки газо-воздушного тракта газотурбинного двигателя / Силаев Б.М., Ермаков А.А., Степанов Н.И. и др. (СССР). - №4469895; заявлено 02.08.88; зарегистрировано 09.06.90 – 2с.
5. Васильев, А.П. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей / А.П. Васильев [и др.] . – М.: Высшая школа, 1967. – 675 с.

6. Синярев, Г.Б. Жидкостные ракетные двигатели / Г.Б. Синярев, М.В. Добровольский. – М.: Оборонгиз, 1957. – 580 с.

References

1. The joint-stock application of Japan №48 – 26083, МКИ F 0207/04. It is published 25.06.72
2. The patent of the Great Britain № 1258315, МКИ F 0207/04. It is published 30.09.71
3. The copyright certificate 1244994 USSR, МКИ F 0207/00. the air-gas tract rinsing device for gas turbine engine / Zarov G.Z., Stepanov N.I., Silaev B.M. и др. (USSR). -

№3745626/25; It is declared 25.05.84; it is registered 15.05.86. – 2p.

4. The copyright certificate 1598535 USSR, МКИ F 0207/00. Way of washing of an air-gas tract gas turbine engine / Silaev B.M., Ermakov A.A., Stepanov N.I. и др. (USSR). - №4469895; It is declared 02.08.88; it is registered 09.06.90 – 2p.

5. Vasil'ev A.P., Kudriavcev V.I., Kuznetsov V.A. Bases of the theory and calculation of liquid rocket engines. – М.: The higher school, 1967. – 675 p.

6. Siniarev G.B., Dobrovol'skii M.V. Liquid rocket engines. – М.: Oborongis, 1957. – 580 p.

THE ORETICAL SUBSTANTIATION OF THE CONSTRUCTIVE SCHEME OF THE AIR-GAS TRACT RINSING DEVICE FOR GTE

© 2009 B. M. Silaev¹, E. N. Mal'tsev²

¹Samara State Aerospace University

²SKBM

The theoretical substantiation of the constructive scheme of the air-gas tract rinsing device for gas turbine engine (GTE) is lead. The interrelation of device construction with geometrical parameters of engine entrance part and parameters of an air stream is shown, calculated proportion for evaluation of key parameters of the device are resulted.

The air-gas tract rinsing device for gas turbine engine, a collector, an atomizer, a spray angle

Информация об авторах

Силаев Борис Михайлович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Основы конструирования машин Самарского государственного аэрокосмического университета. Тел. (846) 263-67-22, 267-46-09. Область научных интересов: трение и изнашивание деталей машин.

Мальцев Евгений Николаевич, ведущий инженер Самарского конструкторского бюро машиностроения. Тел. (846) 227-37-93. E-mail: Malcev_e@rambler.ru. Область научных интересов: испытания ГТД.

Silaev Boris Mihailovich, Doctor of Engineering Science, professor of the principal machine construction Faculty of Samara State Aerospace University. Phone: (846) 263-67-22, 267-46-09. Area of research: friction and strain ageing of the machine elements.

Malcev Evgenij Nikolaevich, principal engineer of SKBM. Phone: (846) 227-37-93. E-mail: Malcev_e@rambler.ru. Area of research: testing gas turbine engine.