

УДК 629.7.036

Б. Р. АБДУЛЛИН, В. П. АЛАТОРЦЕВ, А. А. ВОЛИК, Х. С. ГУМЕРОВ

### К ОЦЕНКЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО В УСЛОВИЯХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ

Рассматривается методика оценки критического уровня загрязнения, определяющего необходимость промывки тракта двигателя в эксплуатации. Исследование основано на данных длительных степдовых испытаний авиационного ГТД 4-го поколения. *Авиационный двигатель; ухудшение; проточная часть; загрязнение; промывка*

Надежная работа газотурбинного двигателя, длительно работающего в условиях загрязненной атмосферы, обеспечивается применением воздухоочистительных устройств.

Тем не менее, загрязнение воздушно-газового тракта происходит, что приводит к изменению (ухудшению) параметров двигателя, и для их восстановления приходится прибегать к периодической промывке, в первую очередь, компрессора [1–9].

В общем случае при длительной работе эти изменения представляют комбинацию влияния таких физических факторов как эрозия и коррозия лопаточных венцов турбомашин, износ уплотнений тракта, загрязнение тракта, включающее образование отложений в каналах охлаждения лопаток турбин и т. п. [10].

Физическая картина загрязнения достаточно сложная, так как загрязнение затрагивает различные характеристики разных узлов двигателя: уменьшается расход воздуха, снижаются коэффициенты полезного действия. Вследствие этого изменяются такие характеристики двигателя как тяга (мощность), расход топлива, температура и давление газов в различных сечениях тракта [1].

Проблема оценки технического состояния двигателя с учетом упомянутых факторов заключается в том, чтобы четко представлять качественную сторону изменения всех контролируемых параметров, направления и количественные соотношения изменений параметров, по которым надо уметь оценивать критический уровень загрязнения, определяющий необходимость промывки. Необходимо оценить качество промывки для того, чтобы не просмотреть остаточное, не устраненное промывкой изменение параметров, свидетельствующее о таких явлениях, как эрозия

элементов проточной части, коррозия, износ и увеличение зазоров в лопаточных элементах и лабиринтах и т. д.

Картина изменения параметров в процессе длительной эксплуатации в широком диапазоне атмосферных условий может быть представлена для одного конкретного режима работы двигателя (например, максимального длительного или номинального) в параметрах, приведенных к стандартным атмосферным условиям (САУ) в зависимости от одного из регулируемых параметров ( $n_{1пр}$  или  $n_{2пр}$  — частот вращения роторов низкого и высокого давления для двухроторного двигателя).

Пример таких характеристик для двигателя, эксплуатировавшегося в диапазоне атмосферных температур  $\pm 30^\circ\text{C}$  приведен на графиках рис. 1–5.

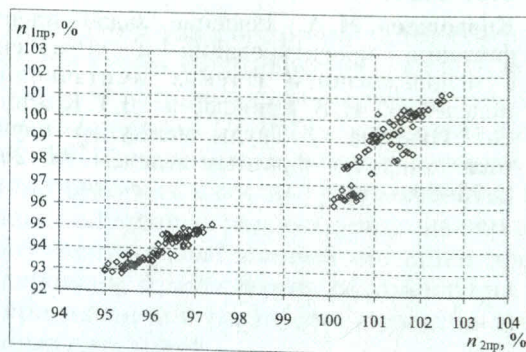


Рис. 1. Зависимость  $n_{1пр} = f(n_{2пр})$

Как следует из графиков, при определенной частоте вращения в зависимости от состояния двигателя (чистого или предельно загрязненного) расход воздуха варьируется в диапазоне до 3%, температура газа за турбиной до  $20^\circ\text{C}$  и т. д.



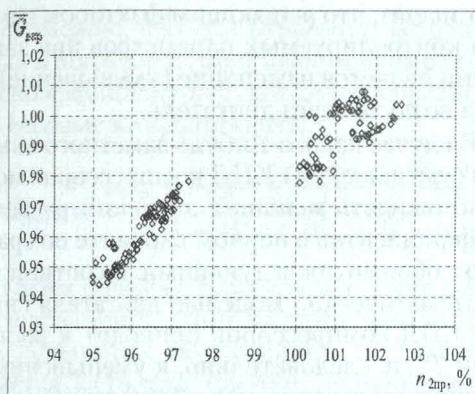


Рис. 2. Зависимость  $\bar{G}_{впр} = f(n_{2пр})$

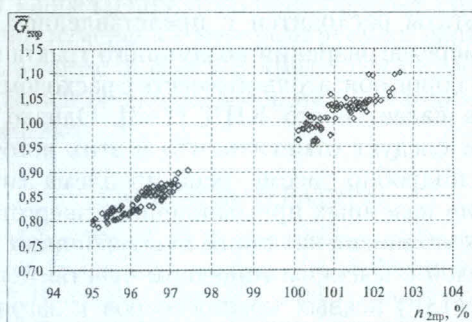


Рис. 3. Зависимость  $\bar{G}_{тпр} = f(n_{2пр})$

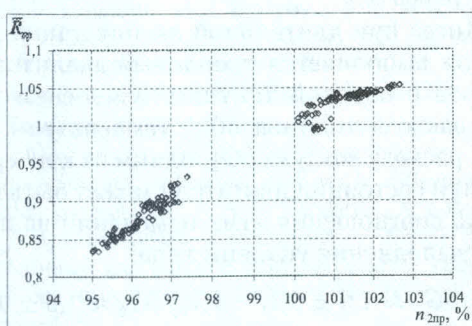


Рис. 4. Зависимость  $\bar{R}_{пр} = f(n_{2пр})$

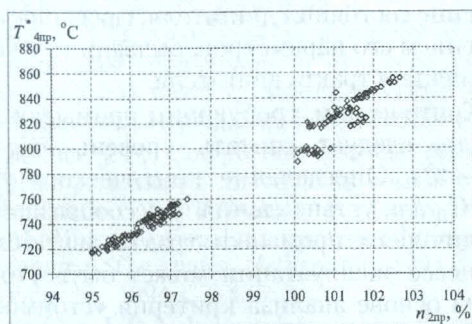


Рис. 5. Зависимость  $T_{4пр}^* = f(n_{2пр})$

Для выявления качественной и количественной картины взаимосвязи параметров при различном уровне загрязнения воздушно-газового тракта двигателя исследована их

взаимная корреляция. С этой целью каждый параметр относился к ближайшему целочисленному значению частоты вращения, вычислялась разность всех сочетаний одноименных параметров, избегая повтора перестановок, а затем проверялась корреляция с расходом воздуха. В качестве исходного принято положение, что загрязнение однозначно уменьшает расход воздуха.

Полученные при такой обработке корреляционные связи приведены на рис. 6–8.

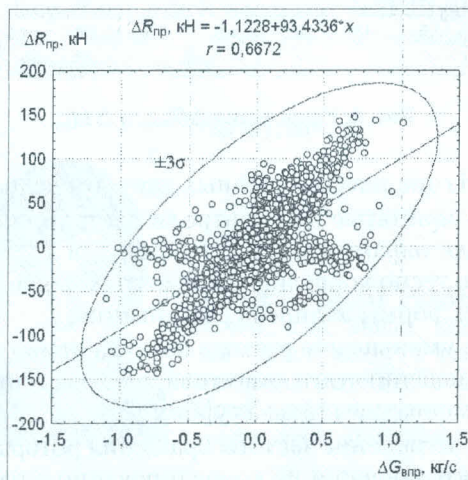


Рис. 6. Корреляция  $\Delta G_{впр}$  и  $\Delta R_{пр}$

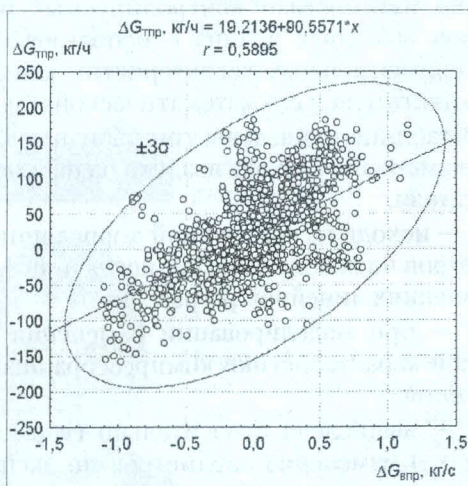


Рис. 7. Корреляция  $\Delta G_{впр}$  и  $\Delta G_{тпр}$

Следует иметь в виду, что в представленном виде отсчет отклонений параметров ведется как бы от «среднезагрязненного» состояния для данной статистической информации. При статистической обработке исключались значения параметров, не укладывающиеся в интервал с доверительной вероятностью  $P_0 = 0,99$ , исходя из нормального закона распределения.



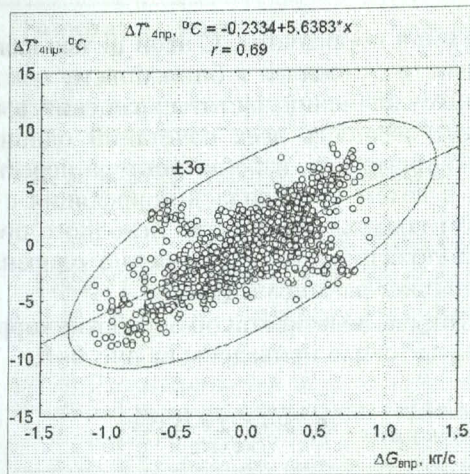


Рис. 8. Корреляция  $\Delta G_{впр}$  и  $\Delta T_{4пр}^*$

Из анализа полученных данных следует:

- принятые для контроля состояния двигателя параметры  $G_{впр}$ ,  $R_{цпр}$ ,  $G_{тпр}$  и  $T_{4пр}^*$  взаимно тесно коррелированы, что хорошо видно из формы эллипсов рассеивания;
- уменьшение расхода воздуха приводит к уменьшению тяги двигателя, расхода топлива и температуры газа за турбиной;
- изменение частоты вращения ротора высокого давления не коррелировано с расходом воздуха, что априорно не предвиделось.

Для объяснения полученной экспериментально взаимосвязи контролируемых параметров выполнен анализ с использованием экспериментальных характеристик конкретного двигателя и его математической модели.

В таблице приведены три варианта влияния изменения расхода воздуха на параметры двигателя:

- 1 — исходя из полученной корреляции параметров на основе коэффициента при  $G_{впр}$  в уравнениях линейной регрессии;
- 2 — при моделировании изменения расходной характеристики компрессора низкого давления;
- 3 — вычислено относительно (к расходу воздуха) изменение параметров по экспериментальным данным (рис. 1–5).

| Таблица                       |      |      |      |
|-------------------------------|------|------|------|
|                               | 1    | 2    | 3    |
| $\delta R / \delta G_{в}$     | 1,86 | 1,9  | 1,89 |
| $\delta G_{т} / \delta G_{в}$ | 1,82 | 2    | 2,01 |
| $\delta T_4^* / \delta G_{в}$ | 0,77 | 0,55 | 0,75 |
| $\Delta n_2 / \delta G_{в}$   | 0    | 0,3  | 0,57 |

Как следует из таблицы, значения всех коэффициентов влияния достаточно близки.

Это значит, что решающим фактором изменения контролируемых параметров при загрязнении является изменение (уменьшение) расхода воздуха через двигатель.

В случае какого-нибудь заметного изменения (уменьшения) КПД компрессоров можно было ожидать меньших значений расчетных коэффициентов в первом варианте по сравнению с обоими последующими. В соответствии с математической моделью двигателя снижение КПД компрессоров приводит к росту  $R$ ,  $G_{т}$  и  $T_4^*$ , и, следовательно, к уменьшению величины снижения этих параметров по мере падения расхода воздуха.

В определенной степени полученные результаты расходятся с представлением, что по мере загрязнения воздушного тракта компрессоров обязательно вместе с расходом воздуха падает и его КПД [1–3]. Однако при этом следует отметить, что в этих источниках подробно рассмотрена проблема загрязнения наземных промышленных энергетических установок на основе газотурбинных двигателей с высоким индексом чувствительности (ISF) осевых компрессоров к загрязнению. В нашем исследовании индекс чувствительности авиационного ТРДДФ к загрязнению равен 5,5.

Когда при длительной эксплуатации двигателя выполняется трендовый анализ параметров с оценкой текущих изменений тяги  $\delta R$ , расхода топлива  $\delta G_{т}$ , температуры газа  $\delta T_4^*$ , расхода воздуха  $\delta G_{в}$ , одним из критериев оценки состояния двигателя может быть проверка соотношения этих изменений на предмет выполнения условий типа:

$$\begin{aligned} \delta R / \delta G_{т} &\approx 1,9 \pm 0,1; & \delta G_{т} / \delta G_{в} &\approx 1,9 \pm 0,1; \\ \delta T_4^* / \delta G_{в} &\approx 0,8 \pm 0,1. \end{aligned}$$

В этом случае можно утверждать, что изменение состояния двигателя, связанное с изменением его параметров, вызвано только загрязнением тракта двигателя.

Критическим, требующим промывки двигателя, следует считать уровень  $\delta G_{в} = -3\%$ . Определение критического уровня  $\delta G_{в}$  для установления целесообразной периодичности промывки тракта двигателя в процессе эксплуатации может быть уточнено на основе анализа критерия «стоимость-эффективность» [9].

Саму критическую величину (для повышения точности) рекомендуется оценивать по эквивалентной величине

$$\delta G_{в\text{ЭКВ}} = \frac{\delta G_{в} + \frac{\delta R}{1,9} + \frac{\delta G_{т}}{1,9} + \frac{\delta T_4^*}{0,8}}{4}$$



Возможно, что при отработке метода контроля в последней зависимости кроме уточнения коэффициентов будет целесообразно ввести весовые коэффициенты

$$\delta G_{\text{взкв}} = \frac{\delta G_{\text{в}} + \frac{W_R \delta R}{1,9} + \frac{W_G \delta G_T}{1,9} + \frac{W_T \delta T_4^*}{0,8}}{1 + W_R + W_G + W_T}$$

Таким образом, в результате проведенных исследований по данным длительных стендовых испытаний двухвального ТРДДФ предлагается методика оценки технического состояния двигателя с учетом фактора загрязнения на основе статистического оценивания направления и количественных соотношений изменений контролируемых параметров, а также определен критический уровень загрязнения, определяющий необходимость промывки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Meher-Homji, С. В.** Gas turbine axial compressor fouling and washing / С. В. Meher-Homji, А. Bromley // Proc. of the thirty-third turbomachinery symposium. 2004. p. 163–191.
2. **Tarabrin, А. Р.** An analysis of axial compressor fouling and a blade cleaning method / А. Р. Tarabrin, А. I. Bodrov, V. A. Schurovsky, J. P. Stalder // ASME International gas turbine and aeroengine congress, Birmingham, United Kingdom. 1996. ASME Paper No. 96-GT-363.
3. **Tarabrin, А. Р.** Influence of axial compressor fouling on gas turbine, unit performance based on different schemes and with different initial parameters / А. Р. Tarabrin, А. I. Bodrov, V. A. Schurovsky, J. P. Stalder // ASME International gas turbine and aeroengine congress, Stockholm, Sweden. 1998. ASME Paper No. 98-GT-416.
4. **Jeffer, E.** Compressor washing on line for large gas turbines / E. Jeffer // Turbomachinery International. Sep/Oct, 1992. p. 49–51.
5. **Baker, J. D.** Analysis of the sensitivity of multi-stage axial compressors to fouling at various stages / J. D. Baker // Master of science in mechanical engineering, September, 2002.
6. **Stalder, J. P.** Compressor washing maintains plant performance and reduces cost of energy production / J. P. Stalder, P. van Oosten // ASME International gas turbine and aeroengine congress, The Hague, Netherlands. 1994. ASME Paper No. 1994-GT-436.
7. **Stalder, J. P.** Salt Percolation through gas turbine air filtration systems and its contribution to total contaminant level / J. P. Stalder, J. Sire // Proc. of the joint power generation conference, New Orleans, Louisiana, Paper JPGC2001/PWR-19148.
8. **Stalder, J. P.** Gas turbine compressor washing state of the art - field experiences / J. P. Stalder

// ASME International gas turbine and aeroengine congress, The Hague, Netherlands. 1998. ASME Paper No. 1998-GT-420.

9. **Андриец, А. Г.** О рациональной периодичности очистки проточной части ГТД от загрязнений / А. Г. Андриец // Материалы IX Международного конгресса двигателестроителей, 9-14 сентября 2004 г. Сб. «Авиационно-космическая техника и технология», № 7. Харьков - Рыбачье : ХАИ, 2004.
10. **Артемьев, В. В.** Исследования образования эксплуатационных отложений в охлаждаемых лопатках газовых турбин авиационных двигателей / В. В. Артемьев, И. В. Шевченко, В. С. Хронин // Авиационная промышленность. 2004. № 3. С. 14–18.

#### ОБ АВТОРАХ



**Абдуллин Булат Ринатович**, ассист. каф. авиац. двигателей. Дипл. магистр техники и технологии (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. проектир. и доводки авиац. двигателей



**Алаторцев Владимир Петрович**, доц. каф. авиац. двигателей. Дипл. инж.-мех. по авиац. двигателям (УАИ, 1964), канд. техн. наук по тепловым двигателям ЛА (УАИ, 1973). Иссл. в обл. проектир. и доводки авиац. двигателей



**Волик Андрей Александрович**, асп. каф. авиац. двигателей. Дипл. инженер по авиац. двигателям и энергоустановкам (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. проектир. и доводки авиац. двигателей



**Гумеров Хайдар Сагитович**, проф. каф. авиационных двигателей. Дипл. инж.-механик (УАИ, 1958). Д-р техн. наук по тепловым двигателям ЛА (УАИ, 1988), заслуж. деятель науки и техники РБ. Иссл. в обл. проектир. и доводки авиац. двигателей.