

УДК 629.7.036.34

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭРОЗИОННОГО ИЗНОСА НА ВЫСОТНО-СКОРОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРДДФ

М. Б. Абдельвахид¹, А. Н. Черкасов², Р. М. Федоров³, К. С. Федечкин⁴

¹mdballa66@yahoo.com, ²gliden@inbox.ru, ³r.m.fedorov@mail.ru, ⁴fedeconst@mail.ru

¹⁻³ Военный учебно-научный центр ВВС

«Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»

⁴ НПО «Сатурн»

Поступила в редакцию 29 апреля 2014 г.

Аннотация. Работа посвящена численному исследованию влияния эрозионного износа лопаток компрессора на высотно-скоростные характеристики ТРДДФ. В работе представлена методика оценки влияния эрозионного износа на характеристики компрессора и двигателя в целом. На основе полученных результатов был проведен анализ изменения газодинамических характеристик каскадов компрессора и высотно-скоростных характеристик двигателя РД33-2С в результате эрозионного износа.

Ключевые слова: эрозионный износ, высотно-скоростные характеристики, ТРДДФ.

Изменение характеристик двигателей при их длительной эксплуатации в условиях запыленной атмосферы является одним из актуальных вопросов технической эксплуатации самолетов и вертолетов и представляет интерес для производителей и организаций, использующих авиационную технику в таких условиях. Попадание песка (частиц пыли) наносит серьезный ущерб двигателю, вызывая эрозионный износ лопаток компрессора (в первую очередь), что приводит к значительному ухудшению его состояния и характеристик. Это становится причиной ухудшения параметров двигателя в целом и даже может привести к его полному отказу.

ВЛИЯНИЕ ЭРОЗИОННОГО ИЗНОСА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ

В работе [1] проводилось экспериментальное исследование влияния запыленности воздуха на элементы проточной части ТРДДФ (F100-PW-100) для определения уровня эрозионного износа и закономерности его изменения. По результатам данного исследования установлено, что основными элементами, которые более всего подвергаются изнашиванию, являются рабочие лопатки компрессоров низкого и высокого давления. Износ проявляется в виде изменения геометрической формы рабо-

чих лопаток и прежде всего в виде уменьшения хорды и толщины профилей в периферийной части лопаток, а также увеличения радиальных зазоров (и изменения их формы). При этом интенсивность износа возрастает от ступени к ступени. На рис. 1 показан пример эрозионного износа рабочих лопаток компрессора низкого (КНД) и высокого (КВД) давления после разборки двигателя.

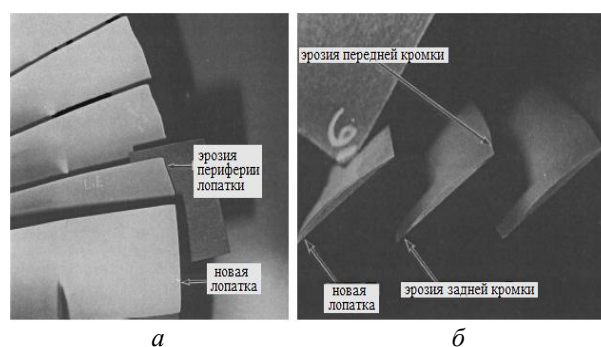


Рис. 1. Пример износа рабочих лопаток компрессора двигателя F 100-PW-100:
а – лопатки второй ступени КНД;
б – лопатки третьей ступени КВД

Авторами разработана методика учета влияния эрозионного износа на геометрические параметры и характеристики компрессора [2], а также проведено численное исследование влияния эрозионного износа на характеристики

КНД и КВД двигателя РД33-2С. Закономерность изменения формы лопаток рабочего колеса (РК) по ступеням КНД и КВД в результате их эрозионного износа была задана на основании результатов работы [1], так как двигатель F100-PW-100 по конструкции и параметрам рабочего процесса сопоставим с двигателем РД33-2С. Расчеты характеристик каскадов компрессора были выполнены с применением современных методов расчета трехмерного течения воздуха в компрессоре, основанных на численном решении уравнений Навье – Стокса, осредненных по Рейнольдсу, реализованном в программном комплексе NUMECA Fine/Turbo.

В табл. 1 и 2 представлены принятые в расчетах значения относительного уменьшения хорды (Δb , %) в периферийной части лопаток РК и величины радиального зазора у передней (Δr_1) и задней (Δr_2) кромок по ступеням КНД и КВД. При этом в средней части лопаток РК всех ступеней КНД было принято значение зазора 1 мм, а для КВД 0,6 мм. Исходное значение радиального зазора было принято равным 0,5 мм для КНД и КВД.

Таблица 1
Изменение хорды и радиальных зазоров у кромок лопаток РК КНД

№ ступени	Δb , %	Δr_1 , мм	Δr_2 , мм
1	5,3	1,81	1,92
2	6,8	1,84	2,0
3	8,3	2,1	2,18
4	9,7	2,23	2,41

Таблица 2
Изменение хорды и радиальных зазоров у кромок лопаток РК КВД

№ ступени	Δb , %	Δr_1 , мм	Δr_2 , мм
1	4,3	0,79	1,04
2	4,9	0,69	0,68
3	5,4	1,07	1,04
4	6,1	1,09	1,28
5	6,7	0,75	0,78
6	7,4	1,04	1,4
7	8,3	0,84	0,86
8	9,5	0,73	0,73
9	11,1	0,79	0,84

На рис. 2–5 представлены результаты расчетов влияния эрозионного износа на характеристики КНД и КВД в виде зависимости степени повышения давления каскадов компрессора π_k^* от относительной плотности тока на входе в них $q(\lambda_v)$ и их коэффициентов полезного дей-

ствия (КПД) η_k^* при различных значениях относительной приведенной частоты вращения $\bar{n}_{пр}$.

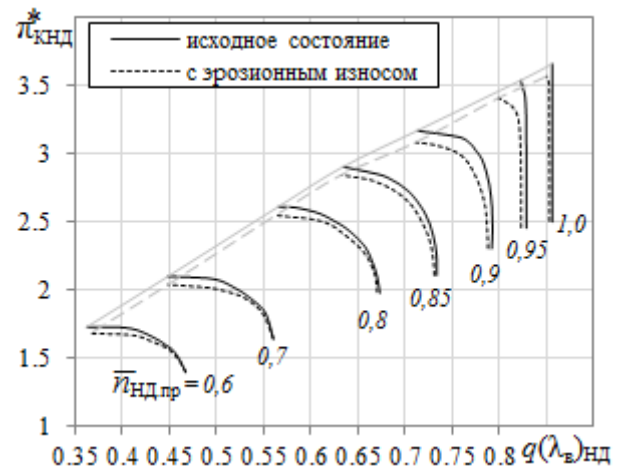


Рис. 2. Влияние эрозионного износа на положение напорных кривых КНД

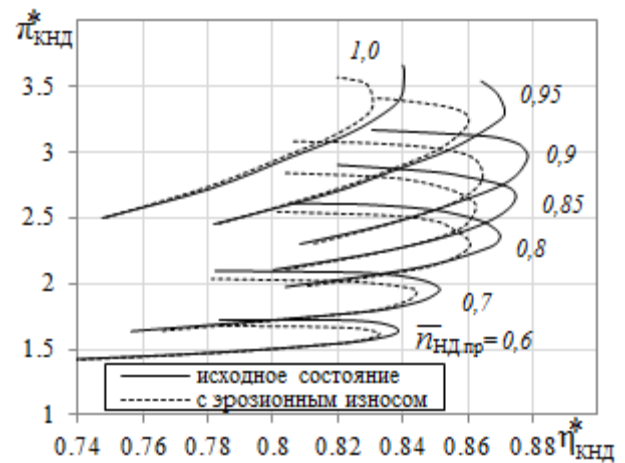


Рис. 3. Влияние эрозионного износа на зависимость $\pi_{кнд}^*$ от $\eta_{кнд}^*$

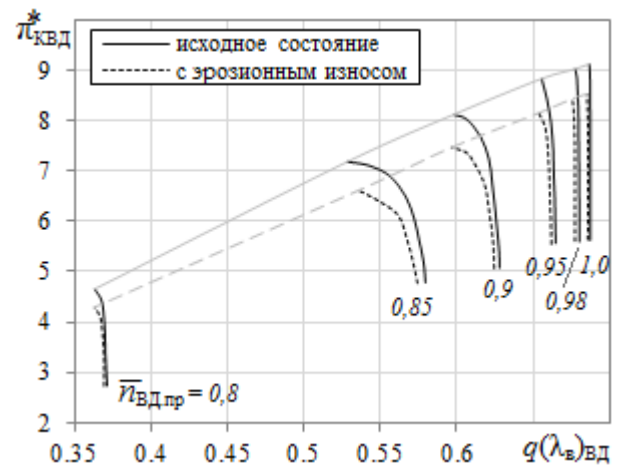


Рис. 4. Влияние эрозионного износа на положение напорных кривых КВД

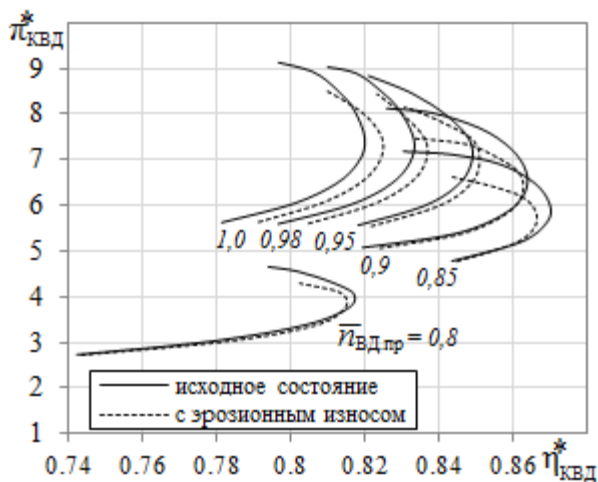


Рис. 5. Влияние эрозионного износа на зависимость $\pi_{квд}^*$ от $\eta_{квд}^*$

Из представленных на рис. 2 и 4 результатов расчетов следует, что влияние эрозионного износа проявляется в снижении значений π_k^* и $q(\lambda_{к.кнд})$ КНД и КВД (напорные кривые смещаются влево и вниз), а также приводит к смещению вниз положения границ устойчивости их работы.

Результаты расчетов также свидетельствуют (рис. 3), что из-за эрозионного износа существенно уменьшаются максимальные значения $\eta_{кнд}^*$ во всем диапазоне относительной приведенной частоты вращения $\bar{n}_{нд,пр}$, что связано с увеличением радиального зазора (и изменением его формы). Эрозионный износ рабочих лопаток КВД при значениях $\bar{n}_{вд,пр}$, близких к расчетному режиму, привел к некоторому увеличению $\eta_{квд}^*$, и только, начиная с $\bar{n}_{вд,пр} \leq 0,9$, отмечается снижение $\eta_{квд}^*$ (рис. 5).

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВЫСОТНО-СКОРОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРДДФ

Основу методики составляет разработанная программа расчета высотно-скоростных характеристик (ВСХ) ТРДДФ, в которой в качестве исходных данных используются расчетные характеристики новых или изношенных КНД и КВД. При этом учитываются особенности программы управления двигателя. Возможный износ элементов турбины не учитывается. Соответствующая программа расчета ВСХ ТРДДФ написана на языке Fortran-90.

Полученные при расчете характеристик КНД и КВД напорные кривые и кривые КПД

для разных значений $\bar{n}_{нд,пр}$ и $\bar{n}_{вд,пр}$ представляются в табличной форме и интерполируются функциями:

$$\left. \begin{aligned} \tau_{кнд}^* &= f(q(\lambda_{к.кнд}), \bar{n}_{нд,пр}); \\ \pi_{кнд}^* &= f(q(\lambda_{к.кнд}), \bar{n}_{нд,пр}); \\ \psi_{кнд} &= f(\pi_{кнд}^*, \bar{n}_{нд,пр}); \\ \psi_{кнд,гу} &= f(\bar{n}_{нд,пр}), \end{aligned} \right\} (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \pi_{квд}^* &= f(\psi_{квд}, \bar{n}_{вд,пр}); \\ \eta_{квд}^* &= f(\psi_{квд}, \bar{n}_{вд,пр}); \\ \psi_{квд,гу} &= f(\bar{n}_{вд,пр}), \end{aligned} \right\} (2)$$

где

$$\tau_{кнд}^* = \frac{\pi_{кнд}^* \frac{k-1}{k} - 1}{\eta_{кнд}^*}, \quad (3)$$

$$\psi_k = \frac{\pi_k^*}{q(\lambda_{к.кнд})}, \quad (4)$$

$$q(\lambda_{к.кнд}) = q(\lambda_{к.кнд}) \frac{F_{в}}{F_{кнд}} \frac{\sqrt{\tau_{кнд}^*}}{\pi_{кнд}^*}, \quad (5)$$

а $\psi_{кнд,гу}$, $\psi_{квд,гу}$ – значения коэффициента ψ_k на границе устойчивой работы КНД и КВД, при этом $F_{в}$ и $F_{кнд}$ – площади сечений на входе в КНД и выходе из него.

Программа включает следующие основные этапы:

а) определение параметров воздуха на входе в двигатель;

б) определение (в первом приближении) параметров КНД и КВД в данных условиях полета;

в) определение параметров газогенератора в данных условиях полета с учетом того, что характеристика КВД изменилась (в результате износа), а параметры ТВД остались прежними (как у нового двигателя);

г) определение режима турбокомпрессорного модуля в данных условиях полета с учетом условий совместной работы его элементов и возможного изменения параметров ТНД;

д) уточнение параметров КНД в данных условиях полета;

е) определение параметров газа в камере смешения, форсажной камере сгорания и реактивном сопле;

ж) определение параметров двигателя на максимальном и полном форсажном режимах.

При этом учитывается, что программа регулирования двигателя РД33-2С на максимальном и полном форсажном режимах поддерживает (в зависимости от T_B^*):

– частоту вращения КВД $\bar{n}_{ВД} = f(T_B^*)$;

– степень понижения давления в турбине $\pi_T^* = f(T_B^*)$;

– расход топлива в форсажной камере сгорания $G_{т.ф}/p_k^* = f(T_B^*)$.

На рис. 6 представлена соответствующая блок-схема программы расчета ВСХ ТРДДФ.

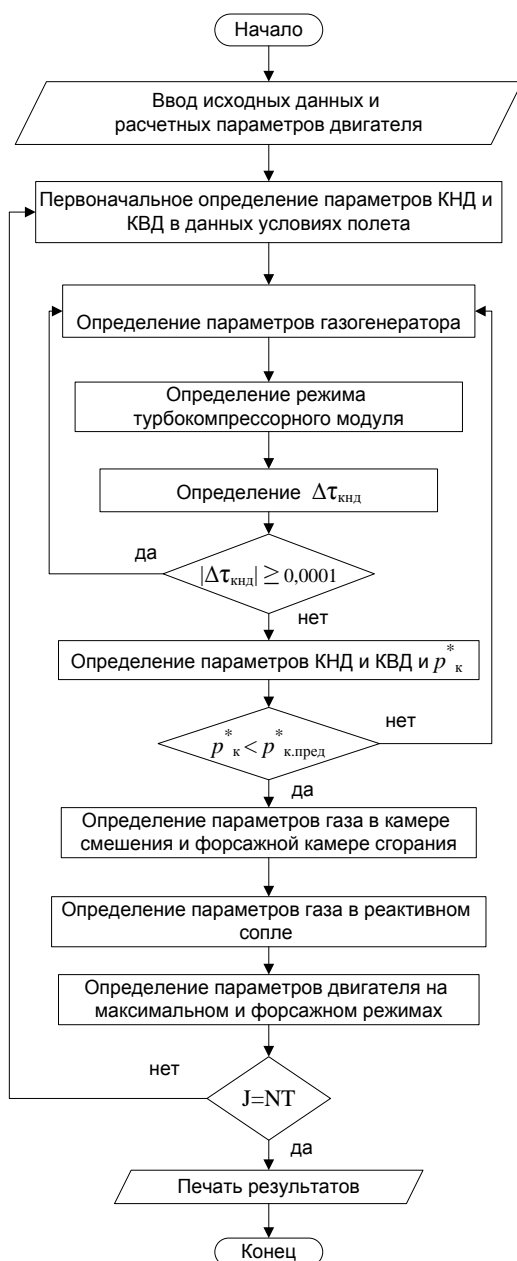


Рис. 6. Блок-схема программы расчета ВСХ ТРДДФ

Здесь p_k^* – давление за КВД; $p_{к.пред}^*$ – предельное значение давления (допустимое); NT – количество рассчитанных точек.

ВЛИЯНИЕ ЭРОЗИОННОГО ИЗНОСА НА ВСХ ДВИГАТЕЛЯ РД33-2С

Двигатель РД33-2С – это двухвальный, двухконтурный турбореактивный двигатель с форсажной камерой сгорания с малой степенью двухконтурности, со смешением потоков перед общей форсажной камерой и с регулируемым сверхзвуковым реактивным соплом. Стоит на вооружении 25 стран мира в составе истребителей МиГ-29, в том числе и в странах Северной Африки (Судан, Алжир). Схема двигателя с характерными сечениями газоздушного тракта приведена на рис. 7. Для оценки адекватности расчета ВСХ ТРДДФ с помощью разработанной методики был проведен расчет ВСХ двигателя РД33-2С при указанной выше программе управления и отсутствии эрозионного износа. На рис. 8–11 приведены результаты расчета в сравнении с данными, указанными в техническом описании двигателя [3].

Как видно из представленных графиков, наблюдается удовлетворительная сходимость результатов расчета с характеристиками двигателя, приведенными в его описании, во всем диапазоне чисел M_H и высот полета H (на максимальном и форсажном режимах). Однако на режиме полного форсажа значения удельного расхода топлива для ряда условий пролета заметно отличаются (примерно на 3–4 %) от указанных в описании двигателя, что вероятнее всего связано с принятым в расчетах значением суммарного коэффициента полноты сгорания. Таким образом, полученные с помощью разработанной Fortran-программы характеристики данного двигателя можно считать достаточно достоверными для исследования влияния на них эрозионного износа.

На рис. 12 и 13 представлены результаты расчета (по описанной методике) характеристик двигателя РД33-2С при его исходном состоянии и при эрозионном износе лопаток каскадов компрессора, приведшем к изменению их характеристик (см. рис. 2–5).

Как видно из представленных результатов, эрозионный износ приводит к снижению ΔK_y , особенно существенному в КВД. В данном случае ΔK_y КНД снижается на 4–5 %, а ΔK_y КВД снижается на 7–9 %. Поэтому можно сделать вывод, что снижение ΔK_y является основным следствием влияния эрозионного износа [4].

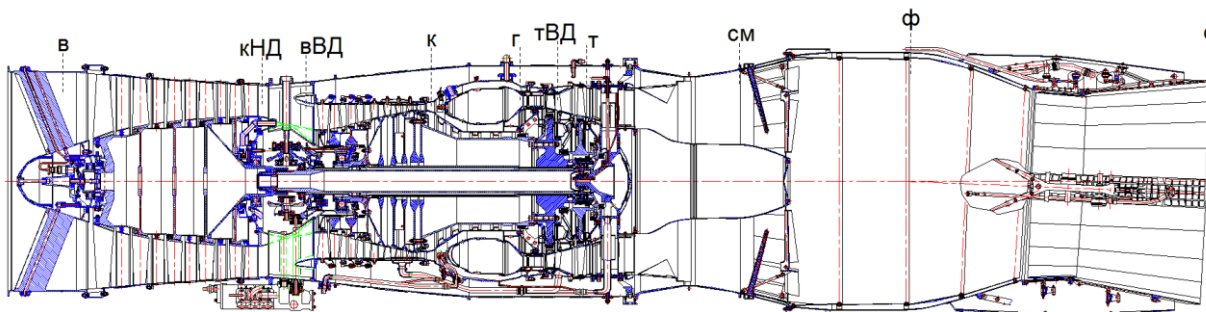


Рис. 7. Схема двигателя РД33-2С

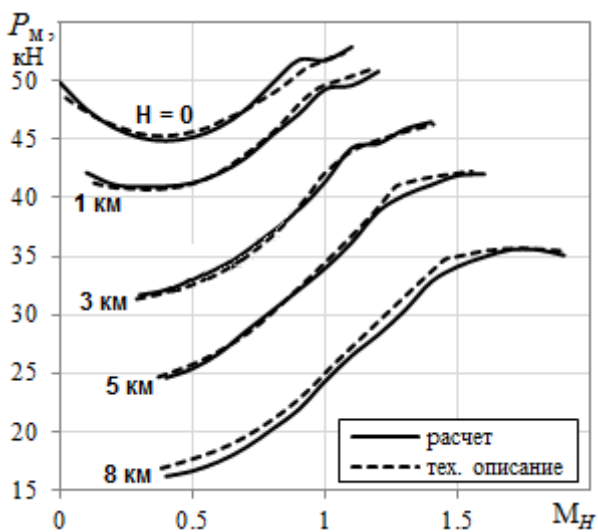


Рис. 8. Зависимость тяги двигателя от числа M_H для различных высот полета H (максимальный режим)

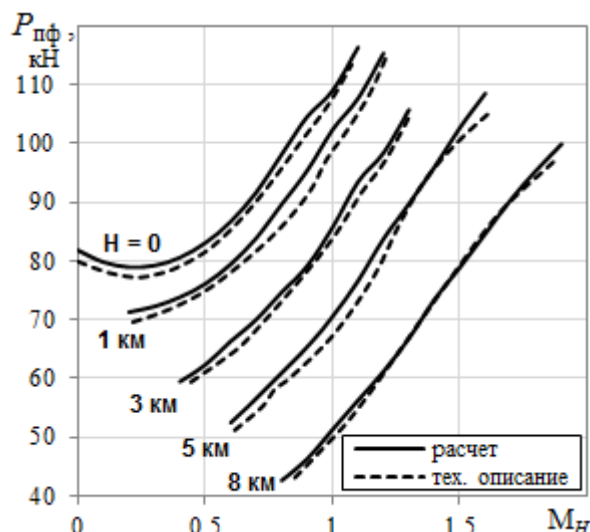


Рис. 10. Зависимость тяги двигателя от числа M_H для различных высот полета H (режим «полный форсаж»)

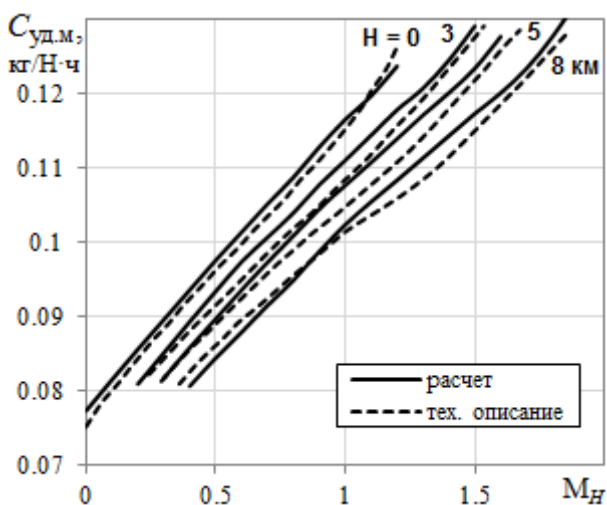


Рис. 9. Зависимость удельного расхода топлива от числа M_H для различных высот полета H (максимальный режим)

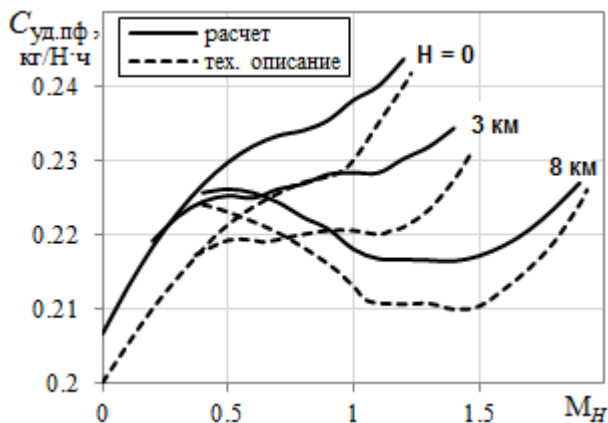


Рис. 11. Зависимость удельного расхода топлива от числа M_H для различных высот полета H (режим «полный форсаж»)

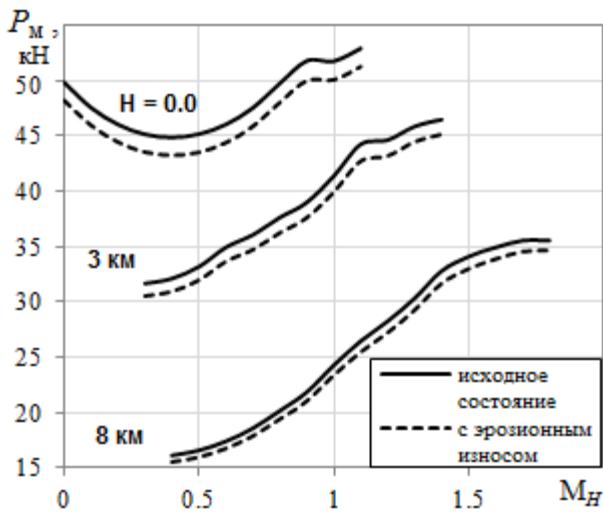


Рис. 12. Влияние эрозионного износа на тягу двигателя (максимальный режим)

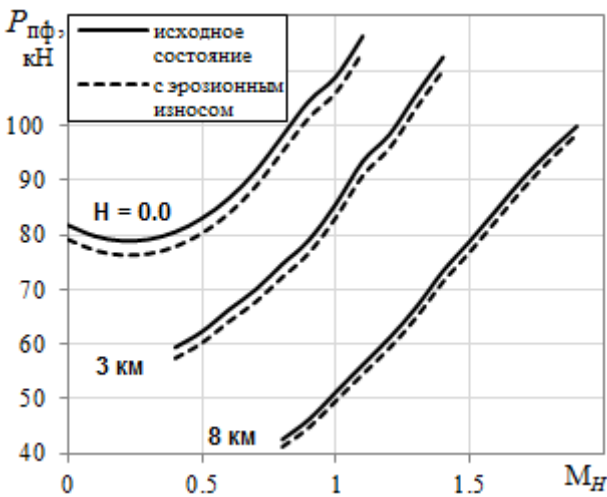


Рис. 13. Влияние эрозионного износа на тягу двигателя (режим «полный форсаж»)

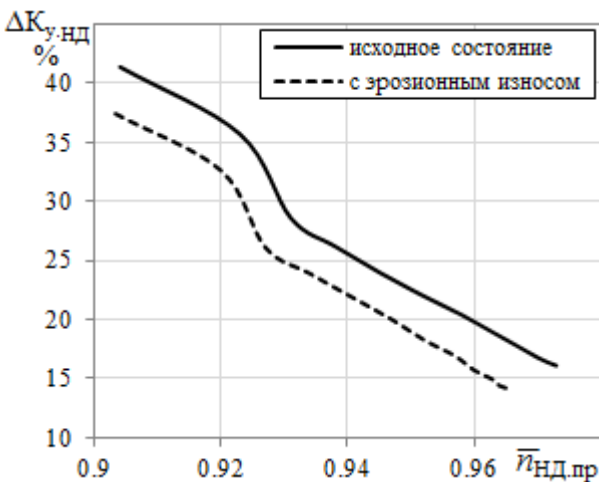


Рис. 14. Влияние эрозионного износа на ΔK_y КНД

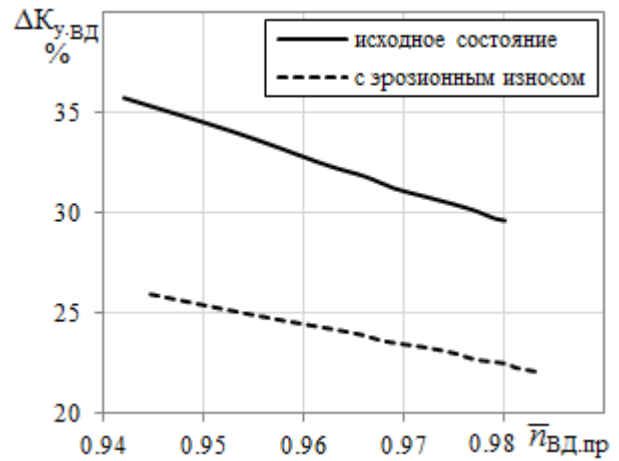


Рис. 15. Влияние эрозионного износа на ΔK_y КВД

Как показали результаты расчета, эрозионный износ приводит к снижению тяги двигателя во всем диапазоне чисел M_H и высот полета H . При этом снижение тяги составляет примерно 3,5–4 %.

Расчеты также показали, что при работе двигателя на максимальном режиме влияние эрозионного износа на удельный расход топлива (в данном случае) не существенно, а при работе двигателя на режиме полного форсажа удельный расход топлива возрастает примерно на 0,4 %.

Кроме того, как было показано выше на рис. 2 и 4, в результате эрозионного износа граница устойчивой работы каскадов компрессора смещается вниз, что ведет к уменьшению запаса газодинамической устойчивости ΔK_y данного каскада. На рис. 14 и 15 представлены соответственно результаты расчета влияния эрозионного износа на ΔK_y каскадов компрессора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты исследования показывают, что данный эрозионный износ лопаток каскадов компрессора двигателя РД33-2С приводит к снижению его тяги на максимальном и форсажном режимах на 3,5–4 % и незначительному увеличению удельного расхода топлива. При этом заметно снижаются запасы газодинамической устойчивости каскадов компрессора, что может привести к срыву или помпажу двигателя, особенно на переходных режимах его работы. Результаты настоящей работы целесообразно использовать для оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса при эксплуатации авиационных силовых установок в сложных климатических условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Michael G. D.** Performance Deterioration of an Operational F100 Turbofan Engine upon Exposure to a Simulated Nuclear Dust Environment: Technical Report. January 1991. [G. D. Michael, *Performance Deterioration of an Operational F100 Turbofan Engine Upon Exposure to a Simulated Nuclear Dust Environment*, Technical Report, January 1991.]

2. **Абдельвахид М. Б., Черкасов А. Н., Федечкин К. С.** Численное исследование влияния эрозионного износа на характеристики осевых компрессоров ТРДДФ // Компрессорная техника и пневматика. 2014. № 2. С. 28–33. [M. B. Abdelwahid, A. N. Cherkasov, C. S. Fedechkin, "Numerical investigation of erosion effect on characteristics of axial compressors of a turbojet engine," (in Russian), *Kompressorная техника i pnevmatika*, no. 2, pp. 28-33, 2014.]

3. **Турбореактивный** двухконтурный двигатель с форсажной камерой сгорания РДЗЗ-2С: учеб. пособие / Под ред. В. В. Кулешова. М.: ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1986. 328 с. [V. V. Kuleshov (Ed.), *Turbojet bypass engine with afterburner*, (in Russian). Moscow: VVIA named prof. N. E. Zhukovsky, 1986.]

4. **Шпилев К. М.** Эксплуатация летательных аппаратов в горно-пустынной местности. М.: Воениздат, 1991. 224 с. [K. M. Shpilev, *Operation of flying vehicles in mountain-desert locality*, (in Russian). Moscow: Voenizdat, 1991.]

ОБ АВТОРАХ

АБДЕЛЬВАХИД Мохаммед Балла, адъюнкт каф. авиац. двигателей. Дипл. инж.-мех. (Инж. академия «Караи», Респ. Судан, 2005). Готовит дис. о влиянии климатич. условий и эрозионного износа на характеристики ТРДДФ.

ЧЕРКАСОВ Александр Николаевич, нач. каф. авиац. двигателей. Дипл. инж.-мех. (ИВВАИУ, 1996). Канд. техн. наук по тепл. двиг. ЛА (ВВИА, 2000). Иссл. в обл. вторичных течений в компрессорах ГТД.

ФЕДОРОВ Роман Миронович, проф. каф. авиац. двигателей. Дипл. инж.-мех. (ВВИА, 1945). Канд. (ВВИА, 1950), д-р техн. наук (там же, 1960) по тепл. двиг. Иссл. в обл. теории авиац. ГТД и характ. их компрессоров.

ФЕДЕЧКИН Константин Сергеевич, вед. инж.-конст. Дипл. инж.-мех. (ВВИА, 1998), Канд. техн. наук по тепл. двиг. (ВВИА, 2002). Иссл. в обл. мат. моделирования течения в осевых компрессорах ГТД.

METADATA

Title: Numerical investigation of erosion effect on altitude-speed characteristics of a turbojet engine.

Authors: M. B. Abdelwahid¹, A. N. Cherkasov², R.M. Fedorov³, C. S. Fedechkin⁴.

Affiliation: Air Force Education and Research Center "Air Force Academy named Prof. N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin"; Scientific Production Association "Saturn", Russia.

Email: ¹mballa66@yahoo.com.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 18, no. 3 (64), pp. 16-22, 2014. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: This work devoted to numerical investigation of the effect of compressor blades erosion on the altitude-speed characteristics of a turbojet engine. In the work presented estimation methodology of erosion effect on the characteristics of compressor and engine as a whole. On basis of obtained results was conducted an analysis of the change of gas-dynamic characteristics of the compressor spools and altitude-speed characteristics of the engine due to the erosion effect.

Keywords: erosion; altitude-speed characteristics; turbojet engine.

About authors:

ABDELWAHID, Mohammed Balla, Graduate student, Dept. of Aircraft engines. Dipl. Mech. Eng. (Karary Academy, 2005).

CHEKASOV, Alexander Nikolaevich, Head of Aircraft Engines Dept., Dipl. Mech. Eng. (IVVAEU, 1996), Cand. of Tech. Sci. (VVEA, 2000).

FEDOROV, Roman Mironovich, Prof., Air Force Education and Research Center, Dipl. Mech. Eng. (VVEA, 1945), Cand. of Tech. Sci. (VVEA, 1950), Dr. of Tech. Sci. (VVEA, 1960).

FEDECHKIN, Constantin Sergeevich, Leading engineer, Scientific Production Association "Saturn", Mech. Eng. (VVEA, 1998), Cand. of Tech. Sci. (VVEA, 2002).