

УДК 629.7.036.34

## РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭРОЗИОННОГО ИЗНОСА НА ВЫСОТНО-СКОРОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРДДФ

М. Б. Абдельвахид<sup>1</sup>, А. Н. Черкасов<sup>2</sup>, Р. М. Федоров<sup>3</sup>, К. С. Федечкин<sup>4</sup>

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

<sup>1-3</sup> Военный учебно-научный центр ВВС

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

<sup>4</sup> 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.

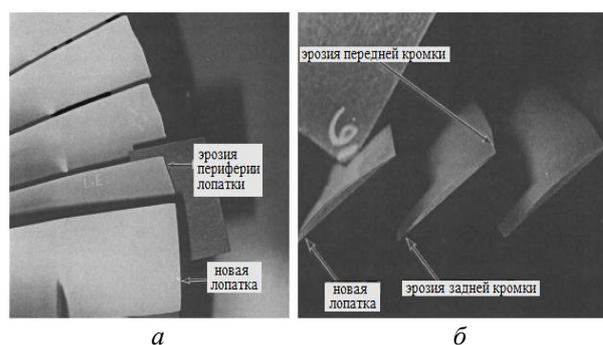
**Ключевые слова:** эрозионный износ, высотно-скоростные характеристики, ТРДДФ.

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 ( $\Delta b$ , %) в периферийной части лопаток РК и величины радиального зазора у передней ( $\Delta r_1$ ) и задней ( $\Delta r_2$ ) 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	$\Delta b$ , %	$\Delta r_1$ , мм	$\Delta r_2$ , 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	$\Delta b$ , %	$\Delta r_1$ , мм	$\Delta r_2$ , 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  $\pi_k^*$  от относительной плотности тока на входе в них  $q(\lambda_v)$  и их коэффициентов полезного дейст-

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

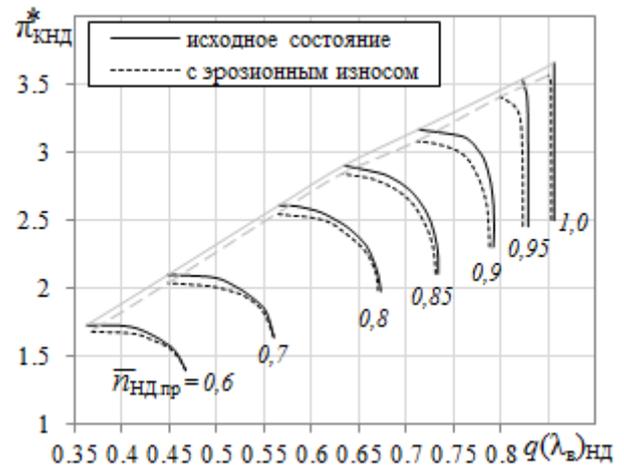


Рис. 2. Влияние эрозионного износа на положение напорных кривых КНД

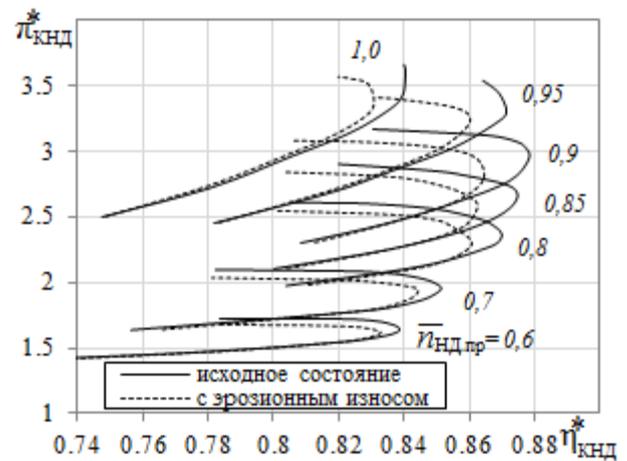


Рис. 3. Влияние эрозионного износа на зависимость  $\pi_{кнд}^*$  от  $\eta_{кнд}^*$

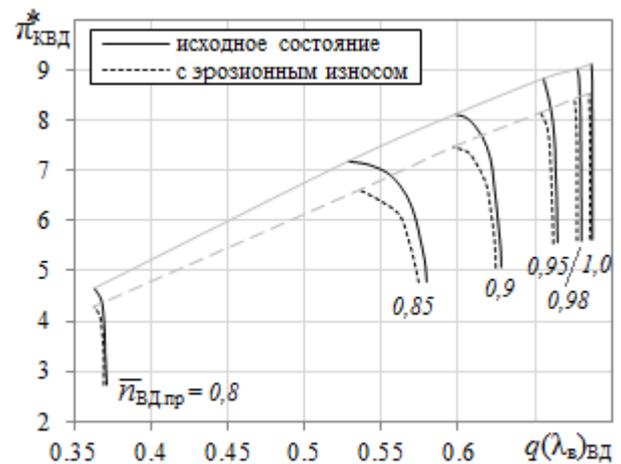


Рис. 4. Влияние эрозионного износа на положение напорных кривых КВД

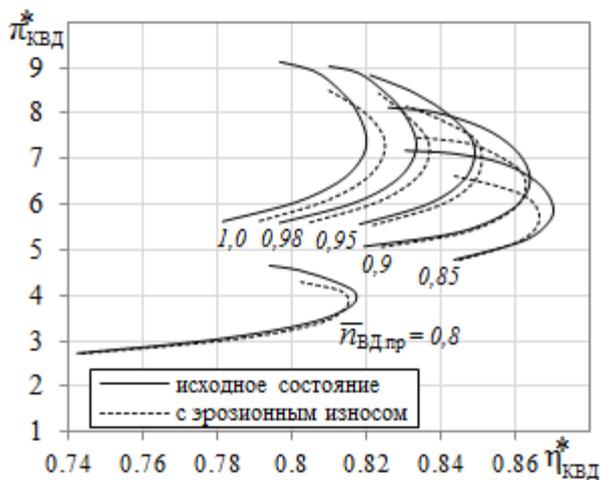


Рис. 5. Влияние эрозионного износа на зависимость  $\pi_{квд}^*$  от  $\eta_{квд}^*$

Из представленных на рис. 2 и 4 результатов расчетов следует, что влияние эрозионного износа проявляется в снижении значений  $\pi_k^*$  и  $q(\lambda_{в})$  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:

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

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

где

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

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

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

а  $\psi_{кнд.гу}$ ,  $\psi_{квд.гу}$  – значения коэффициента  $\psi_k$  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.

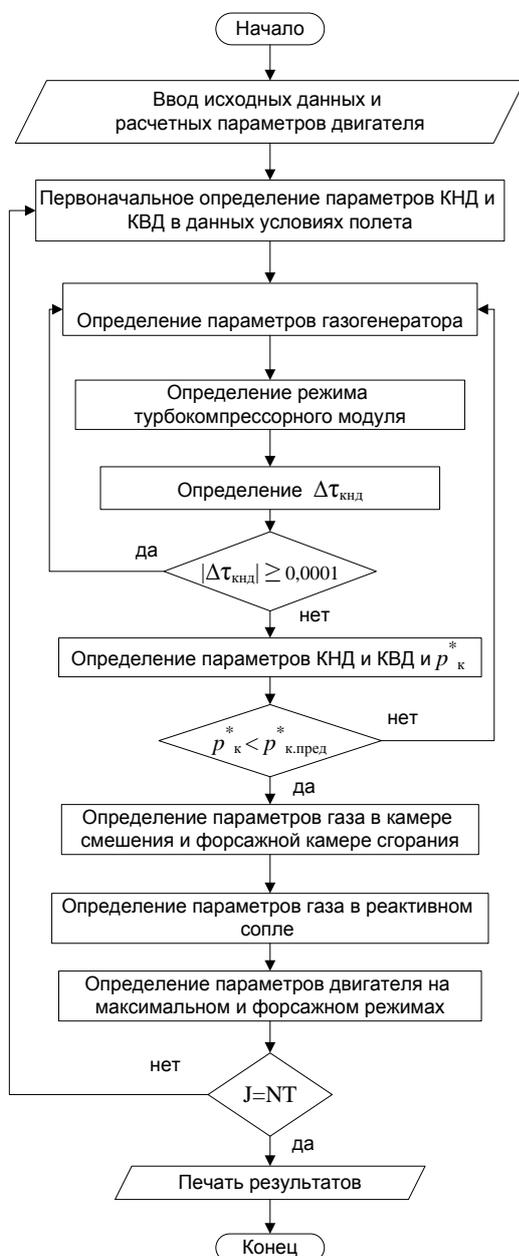


Рис. 6. Блок-схема программы расчета ВСХ ТРДДФ

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  $\Delta K_y$ , особенно существенному в КВД. В данном случае  $\Delta K_y$  КНД снижается на 4–5 %, а  $\Delta K_y$  КВД снижается на 7–9 %. Поэтому можно сделать вывод, что снижение  $\Delta K_y$  является основным следствием влияния эрозионного износа [4].

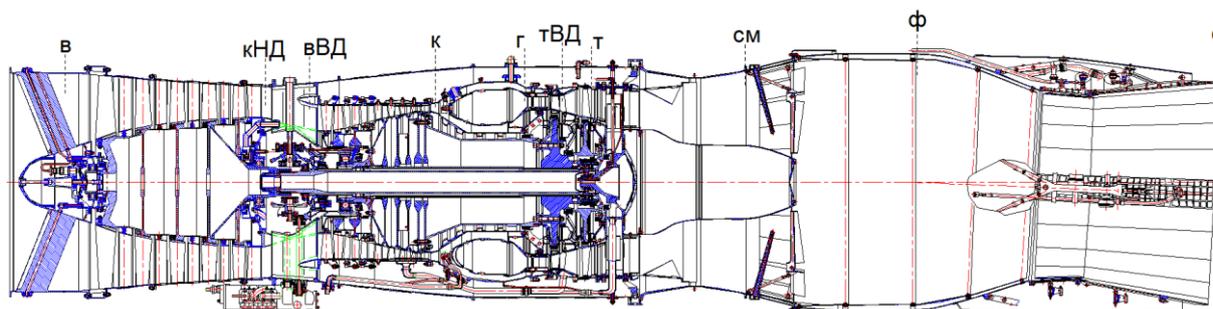
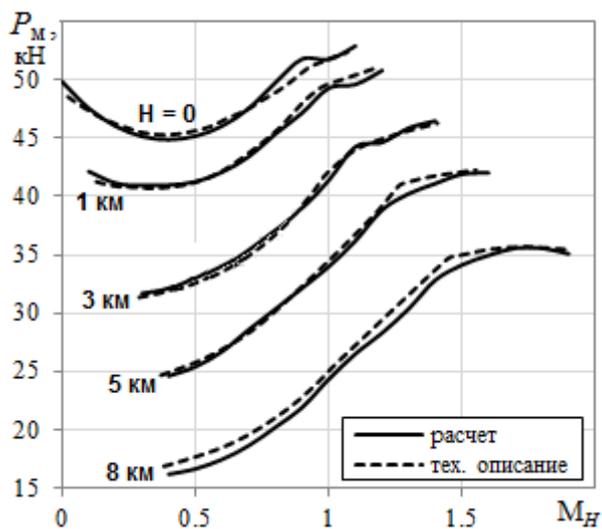
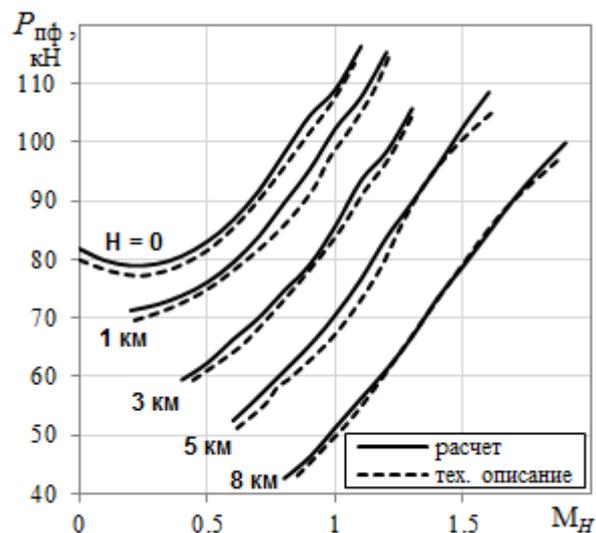
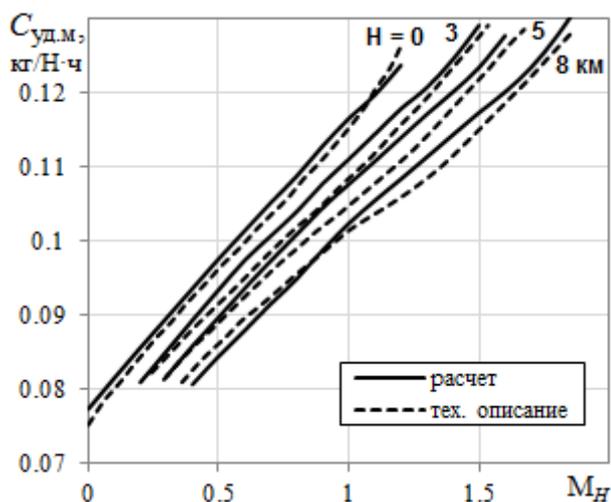
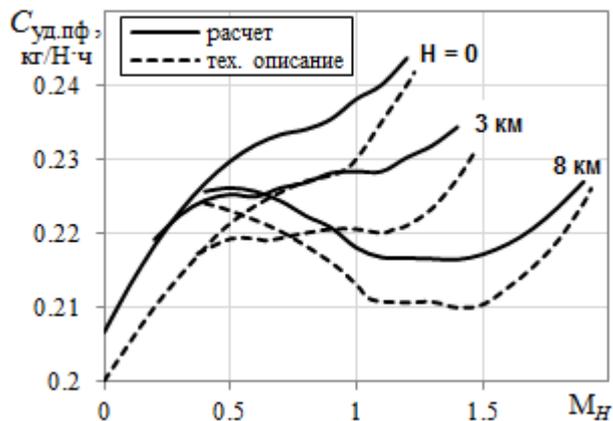


Рис. 7. Схема двигателя РД33-2С

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»)

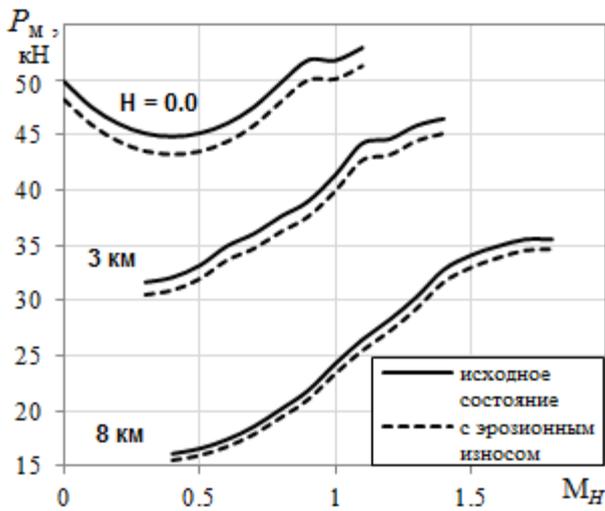


Рис. 12. Влияние эрозионного износа на тягу двигателя (максимальный режим)

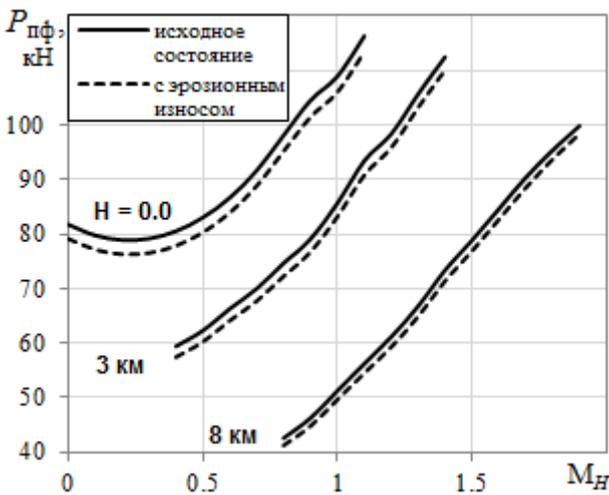


Рис. 13. Влияние эрозионного износа на тягу двигателя (режим «полный форсаж»)

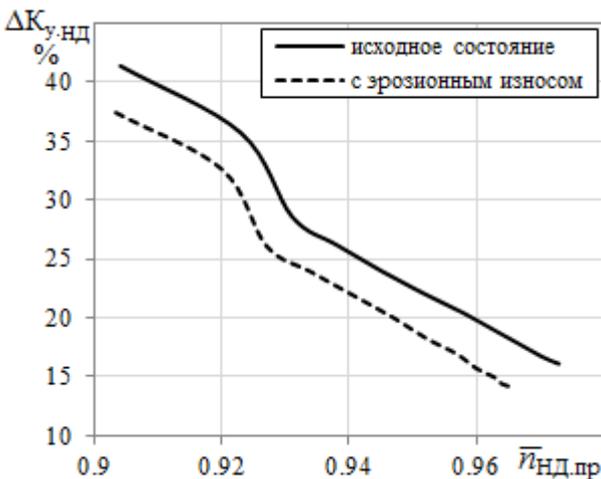


Рис. 14. Влияние эрозионного износа на  $\Delta K_{y, \text{КНД}}$

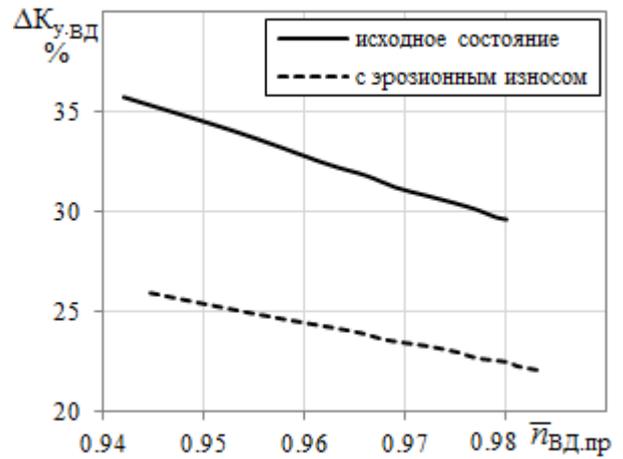


Рис. 15. Влияние эрозионного износа на  $\Delta K_{y, \text{КВД}}$

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  $\Delta K_y$  данного каскада. На рис. 14 и 15 представлены соответственно результаты расчета влияния эрозионного износа на  $\Delta K_y$  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. Abdelwahid<sup>1</sup>, A. N. Cherkasov<sup>2</sup>, R.M. Fedorov<sup>3</sup>, C. S. Fedechkin<sup>4</sup>.

**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:** <sup>1</sup>mbballa66@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).