

На правах рукописи



АБДЕЛЬВАХИД Мохаммед Балла

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ
УСЛОВИЙ И ЭРОЗИОННОГО ИЗНОСА
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРДДФ**

Специальность 05.07.05

«Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных
аппаратов»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва - 2015

Работа выполнена в федеральном государственном казенном военном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж) Министерства обороны Российской Федерации.

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Черкасов Александр Николаевич

Официальные оппоненты: **Котовский Владимир Николаевич**
доктор технических наук, профессор.

Вовк Михаил Юрьевич
кандидат технических наук,
Опытно-конструкторское бюро имени А. Люльки –
филиал ОАО «Уфимское моторостроительное производственное объединение»,
начальник отдела перспективных разработок.

Ведущая организация: Открытое акционерное общество «Научно-производственное объединение «Сатурн».

Защита состоится «18» мая 2015 г. в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д212.125.08, созданного на базе Московского авиационного института (национального исследовательского университета) (МАИ) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского авиационного института (национального исследовательского университета) (МАИ), <http://www.mai.ru/events/defence>.

Автореферат разослан « » _____ 2015 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д212.125.08
д.т.н., профессор

Зуев Юрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Эксплуатация авиационных двигателей и обеспечение их требуемых ресурсов в сложных климатических условиях являются важными направлениями технической эксплуатации самолётов и вертолётов, и представляют интерес для производителей и организаций, эксплуатирующих авиационную технику в подобных условиях.

Эксплуатация в зонах пустынь и степей (Средняя Азия, Ближний Восток, некоторые районы Африки) характеризуется высокой положительной температурой атмосферного воздуха, повышенной влажностью, подъемом песка и пыли в атмосферу до высоты 6000 м и т.п.

Эксплуатация ТРДДФ в сложных климатических условиях (запыленной атмосфере, повышенной влажности и т.д.) обуславливает необходимость разработки методик для определения технического состояния и характеристик элементов проточной части и оценки влияния экстремальных эксплуатационных факторов на параметры двигателя.

Длительная эксплуатация в условиях запыленной атмосферы сопровождается эрозионным износом элементов проточной части двигателя, и прежде всего лопаток компрессора, что приводит к значительному ухудшению состояния и характеристик компрессора, снижению запаса газодинамической устойчивости, и соответственно ухудшению параметров двигателя в целом.

Повышенная влажность воздуха при высоких значениях атмосферной температуры проявляется в виде изменения теплофизических свойств воздуха и продуктов сгорания топлива в нём, что приводит к существенному изменению параметров двигателя.

Разработка новых (современных) методик для оценки влияния различных эксплуатационных факторов на характеристики ТРДДФ, является актуальной научно-технической задачей.

В данной диссертационной работе предлагается комплексная методика для количественной оценки влияния эрозионного износа и влажности атмосферного воздуха на характеристики осевых компрессоров и ТРДДФ в целом. Результаты исследования могут быть использованы для обоснованного прогнозирования технического состояния ТРДДФ и разработки рекомендаций по технической эксплуатации в условиях запыленной атмосферы и повышенной влажности.

Целью работы является разработка методики оценки влияния последствий эрозионного износа и влажности атмосферного воздуха на характеристики ТРДДФ с учетом изменения газодинамических характеристик осевого компрессора.

Для достижения поставленной цели, сформулированы **следующие задачи:**

1. Разработка методики оценки влияния последствий эрозионного износа лопаток компрессора и влажности воздуха на газодинамические характеристики осевых компрессоров ГТД.

2. Исследование влияния последствий эрозионного износа и влажности воздуха на характеристики осевых компрессоров.

3. Разработка методики оценки влияния последствий эрозионного износа и влажности атмосферного воздуха на высотно-скоростные характеристики ТРДДФ.

4. Исследование влияния последствий эрозионного износа и влажности атмосферного воздуха на высотно-скоростные характеристики ТРДДФ.

Объектом исследования являются характеристики осевых компрессоров и ТРДДФ РД33-2С с учетом особенностей эксплуатации в условиях запыленной атмосферы и повышенной влажности.

Методы исследования. При выполнении работы были использованы:

- методы расчета трехмерных течений в лопаточных машинах, основанные на решении уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу;
- методы математического моделирования рабочего процесса ТРДДФ с учетом особенностей программы управления.

Научная новизна

1. Разработана методика учета влияния последствий эрозионного износа на геометрические параметры лопаток компрессора и его характеристики, позволяющая учитывать износ, как изолированных лопаточных венцов, так и многоступенчатых осевых компрессоров с учетом характерных изменений радиальных зазоров и геометрии профилей по высоте лопаток.

2. Разработана методика оценки влияния влажности воздуха на характеристики компрессора, обеспечивающая полный учет изменения физических свойств рабочего тела и повышение точности получаемых результатов.

3. Разработана программа расчета высотно-скоростных характеристик ТРДДФ, позволяющая проводить количественную оценку влияния последствий эрозионного износа и влажности воздуха на параметры двигателя с учетом особенностей программы управления. При этом учитывается влияние влагосодержания атмосферного воздуха на физические свойства рабочего тела (воздуха и продуктов сгорания топлива) в каждом характерном сечении газоздушного тракта двигателя. На основе аналитических соотношений проводится детальный анализ влияния влагосодержания на условия совместной работы всех элементов.

4. Результаты расчетных исследований влияния эрозионного износа и влажности воздуха на характеристики компрессора и ТРДДФ.

Обоснованность и достоверность результатов исследования обеспечиваются:

- использованием методов расчета трехмерных течений в лопаточных машинах, основанных на решении известных уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу, верифицированных по экспериментальным данным;
- применением известных и проверенных методов математического моделирования рабочего процесса ТРДДФ;
- верификацией результатов выполненных расчетов с данными, полученными экспериментально, и из технического описания исследуемого ТРДДФ.

Теоретическая и практическая значимость результатов исследования:

- разработанная методика позволяет проводить расчет характеристик осевых компрессоров и ТРДДФ с учетом влияния последствий эрозионного износа лопаток компрессора и влажности атмосферного воздуха;
- разработанная методика обеспечивает возможность обоснованного прогнозирования технического состояния ТРДДФ и разработки рекомендаций по технической эксплуатации в условиях запыленной атмосферы и повышенной влажности.

Личный вклад соискателя

Все перечисленные компоненты научной новизны работы получены соискателем лично.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Методика оценки влияния последствий эрозионного износа и влажности атмосферного воздуха на характеристики осевых компрессоров ГТД.
2. Результаты расчетного исследования влияния последствий эрозионного износа и влажности воздуха на характеристики осевых компрессоров ТРДДФ РД33-2С.
3. Методика оценки влияния последствий эрозионного износа и влажности воздуха на высотно-скоростные характеристики ТРДДФ.
4. Результаты расчетного исследования влияния последствий эрозионного износа и влажности воздуха на высотно-скоростные характеристики ТРДДФ РД33-2С.

Апробация работы. Основные результаты работы обсуждались на научно-технических семинарах с ведущими специалистами ВУНЦ ВВС, МАИ, УГАТУ, СГАУ, НПО «Сатурн», докладывались и были представлены на *следующих* научно-технических конференциях:

- Всероссийской научно-практической конференции «Военно-воздушные силы-100 лет на страже неба России: история, современное состояние и перспективы развития». Воронеж, май 2012;

- Международной молодежной научной конференции «XXXIX Гагаринские чтения». Москва, апрель 2013;

- Международном научно-техническом форуме, посвященном 100-летию ОАО «КУЗНЕЦОВ» и 70-летию СГАУ. Самара, сентябрь 2012;

- VII Международной научно-технической конференции «СИНТ'13». Воронеж, сентябрь 2013;

- Всероссийской научно-практической конференции «Академические Жуковские чтения». Воронеж, ноябрь 2013;

- Международной молодежной научной конференции «XL Гагаринские чтения». Москва, апрель 2014.

Результаты работы использованы в итоговом научно-техническом отчете о НИР «Вторичные течения в рабочих колесах осевых компрессоров» (шифр «Катунь»), и промежуточных отчетах о НИР «Исследование перспективных направлений совершенствования аэродинамической компоновки и модернизации силовых установок авиационных комплексов, и авиационных комплексов с БЛА в фактических условиях эксплуатации» (шифр «Инвариант»).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 12 печатных работ, из которых 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка литературы и приложений. Содержит 175 страниц машинописного текста, включающего 94 рисунка, 6 таблиц, библиографический список из 95 наименований, 2 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи научного исследования, показаны новизна работы, методы исследования, теоретическая и практическая значимость работы, а также результаты, выносимые на защиту и апробация диссертационной работы.

В первой главе рассматриваются особенности эксплуатации ГТД в сложных климатических условиях, в частности, климата Республики Судан, где температура воздуха в некоторых регионах может достигать 45°C, относительная влажность воздуха – 87%, концентрация пыли – 1 г/м³.

Выполнен обзор опыта эксплуатации ГТД в условиях запыленной атмосферы и предыдущих работ по исследованию влияния эрозионного износа на геометрические и газодинамические параметры компрессора. Также проведен обзор работ по оценке влияния влажности атмосферного воздуха на характеристики компрессора и параметры ГТД в целом.

На основании анализа научно-технических публикаций установлено, что:

- отсутствуют методики, позволяющие в полной мере учесть влияние эрозионного износа на геометрические параметры лопаточных венцов по всему тракту компрессора, а также на характеристики компрессора и ТРДДФ в целом;
- отсутствуют методики, обеспечивающие полный учет изменения свойств рабочего тела по всему тракту двигателя в результате изменения влагосодержания;
- отсутствуют методики оценки совместного влияния эрозионного износа и влажности воздуха на характеристики компрессора и ТРДДФ в целом;
- требуется разработка новых (современных) частных методик учета влияния эрозионного износа и влажности воздуха на характеристики компрессора, а также комплексных методик оценки влияния этих факторов на характеристики ТРДДФ при эксплуатации в условиях запыленной атмосферы и повышенной влажности.

Во второй главе представлена методика учета влияния последствий эрозионного износа на геометрические параметры лопаток, позволяющая учитывать износ, как изолированных лопаточных венцов, так и многоступенчатых осевых компрессоров с учетом характерных изменений радиальных зазоров и геометрии профилей по высоте лопаток, а также методика расчета характеристик осевых компрессоров с применением программного комплекса *NUMECA Fine/Turbo*.

Проведена верификация результатов расчетов характеристик изолированной ступени осевого компрессора (С-16) и компрессора низкого давления (КНД) двигателя РД33-2С. Сравнение расчетных и экспериментальных данных по ступени и каскаду компрессора (без учета эрозионного износа) показало их удовлетворительную сходимость со средней погрешностью 1...3% во всем диапазоне частот вращения.

Одним из основных последствий эрозионного износа компрессора является увеличение радиального зазора в лопаточных венцах. С целью оценки влияния радиального зазора на характеристики компрессора проведено исследование изменения характеристик ступени С-16 и каскадов компрессора двигателя РД33-2С. Установлено, что увеличение радиального зазора приводит к снижению напорности и коэффициента полезного действия (КПД) ступени и каскадов компрессора, а также уменьшению их запасов газодинамической устойчивости.

Проведенные расчетные исследования показали также необходимость создания методики оценки влияния изменения не только величины радиального зазора, но и его формы, а также геометрических параметров лопаток в результате влияния эрозионного износа.

Предложен новый подход для моделирования характера изменения геометрических параметров профилей лопаток в результате эрозионного износа, заключающийся в дискретизации сечений поверхности лопатки и разделении точек на спинке (С) и корыте (К) условно на 4 множества: S_1, K_1 – множества точек спинки и корыта с абсциссой, имеющей отрицательное значение; S_2, K_2 – множества точек спинки и корыта с абсциссой, имеющей положительное значение. При этом точка начала координат совпадает с центром тяжести сечения лопатки. Перемещение каждой i -той точки поверхности лопатки при её износе происходит по нормали к её поверхности.

Основными формулами для пересчета координат каждого множества точек профиля рабочей лопатки при эрозионном износе являются:

$$C_1: \quad y_{эp_i} = y_{i-1} + \Delta_{i-1} \cos \beta_i; \quad x_{эp_i} = x_{i-1} - S_i(y_{эp_i} - y_{i-1}). \quad (1)$$

$$C_2: \quad y_{эp_i} = y_i - \Delta_i \cos \beta_i; \quad x_{эp_i} = x_i + S_i(y_i - y_{эp_i}). \quad (2)$$

$$K_1: \quad y_{эp_i} = y_{i-1} - \Delta_{i-1} \cos \beta_i; \quad x_{эp_i} = x_{i-1} - S_i(y_{эp_i} - y_{i-1}). \quad (3)$$

$$K_2: \quad y_{эp_i} = y_i + \Delta_i \cos \beta_i; \quad x_{эp_i} = x_i + S_i(y_i - y_{эp_i}). \quad (4)$$

где
$$S_i = \left(\frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \right); \quad \beta_i = \arctg(S_i); \quad \Delta_i = d_j x_i \pm \delta_t; \quad (5)$$

x_i, y_i – координаты точки на поверхности сечения лопатки;

$x_{эp_i}, y_{эp_i}$ – координаты точки на поверхности сечения лопатки с эрозионным износом;

δ_t – уменьшение толщины профиля в центральной части по вертикали (для C_1, K_1 имеет знак (-), а для C_2, K_2 знак (+));

$d_j, j = 1 \dots 4$ – варьируемые коэффициенты, определяемые формой износа на лопатке для каждой части профиля (C_1, C_2, K_1, K_2) в зависимости от его положения по радиусу.

Множества точек, образующих линии спинки и корыта пересекаются после перемещения под острым углом на передней и задней кромках. Затем происходит определение радиусов и координат центров скругления. Процедура проводится для всех профилей периферийной части лопатки, в результате чего определяется геометрическая форма лопатки после износа. На рис. 1 представлен пример изменения профиля периферийной части лопатки рабочего колеса (РК) после эрозионного износа.

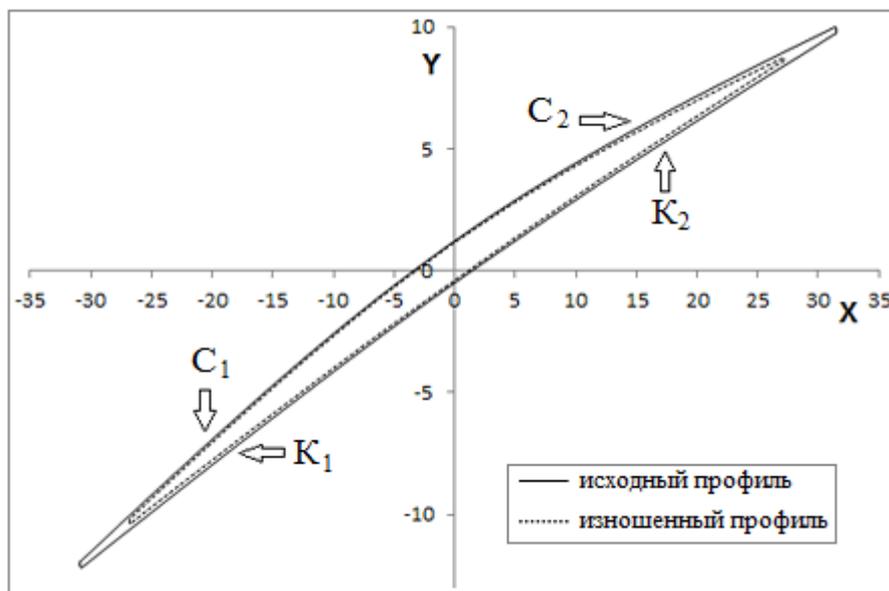


Рис. 1 – Пример изменения сечения профиля на периферийной части лопатки РК

На основании данного подхода разработана программа (на языке *Fortran-90*) для учета эрозионного износа лопаточных венцов многоступенчатых осевых компрессоров ГТД. Программа работает с файлами (текстовый формат) геометрии, определяет геометрические параметры профилей лопаток РК и направляющих аппаратов (НА) в зависимости от информации об уровне износа по

лопаточным венцам, задаваемой пользователем через файл с исходными данными, описывающими уровень износа каждого лопаточного венца. На рис. 2 показана геометрическая модель новой и изношенной лопатки РК 9-ой ступени компрессора высокого давления (КВД) РД33-2С в сравнении с реальным характером износа лопаток РК 9-ой ступени КВД двигателя F100-PW-100.

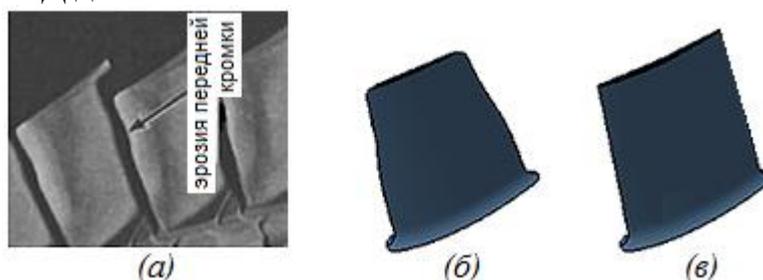


Рис. 2 – Визуальное сравнение типичного характера износа: (а) – износ лопаток РК 9-ой ступени КВД F100-PW; (б) – геометрическая модель изношенной лопатки РК 9-ой ступени КВД РД33; (в) – геометрическая модель исходной лопатки РК

На основании ряда проведенных исследований в других работах установлено, что радиальный зазор изменяется в разной степени вдоль хорды. Минимальное значение зазора отмечается на середине хорды, а на передней и задней кромках имеет максимальные значения. В данной методике координаты измененного зазора описываются в отдельном файле, что обеспечивает возможность моделирования любой формы зазора.

На рис. 3 схематично показана методика оценки влияния эрозионного износа на характеристики компрессора с применением программы изменения геометрических параметров компрессора и программного комплекса *NUMECA Fine/Turbo*. Исходными данными при применении разработанной методики являются результаты измерения геометрических параметров проточной части компрессоров на текущее время наработки.

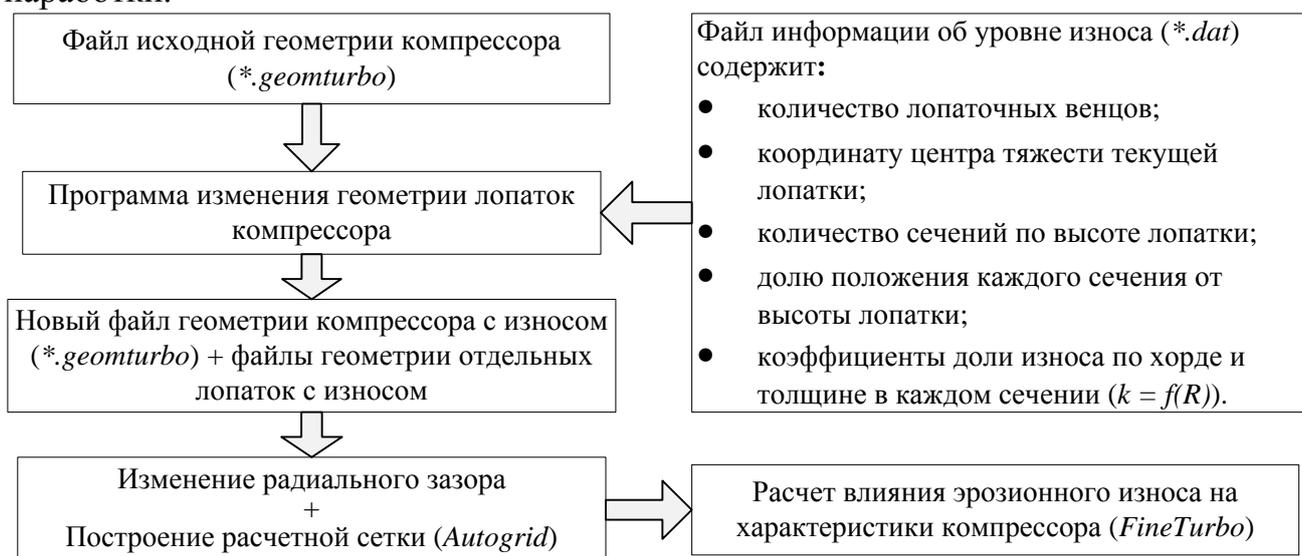


Рис. 3 – Методика оценки влияния эрозионного износа на характеристики осевого компрессора

С помощью разработанной методики учета влияния эрозионного износа на характеристики осевых компрессоров были проведены расчеты характеристик КНД и КВД двигателя РД33-2С, при их исходном состоянии и с учетом эрозионного износа

лопаток РК. При этом закономерность изменения эрозионного износа лопаток РК по ступеням КНД и КВД была задана в соответствии с результатами экспериментального исследования износа лопаток ТРДДФ F100-PW-100, так как данный двигатель по конструкции и параметрам рабочего процесса сопоставим с двигателем РД33 (эрозионный износ лопаток НА в двигателе F100-PW практически не наблюдался).

В таблицах 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	1	2	3	4
$\Delta b, \%$	5,3	6,8	8,3	9,7
$\Delta r_1, \text{мм}$	1,81	1,84	2,1	2,23
$\Delta r_2, \text{мм}$	1,92	2,0	2,18	2,41

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

№ ступени	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Delta b, \%$	4,3	4,9	5,4	6,1	6,7	7,4	8,3	9,5	11,1
$\Delta r_1, \text{мм}$	0,79	0,69	1,07	1,09	0,75	1,04	0,84	0,73	0,79
$\Delta r_2, \text{мм}$	1,04	0,68	1,04	1,28	0,78	1,4	0,86	0,73	0,84

Результаты расчетов характеристик КНД и КВД при исходном состоянии и после эрозионного износа показаны на рис. 4.

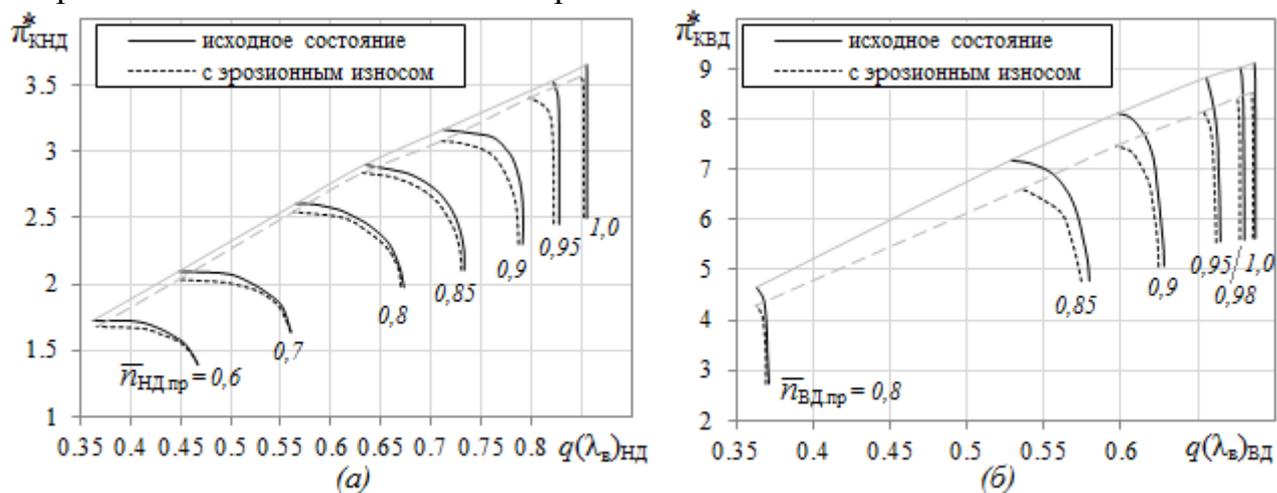


Рис. 4 – Влияние эрозионного износа на положение напорных кривых компрессора: (а) – КНД; (б) – КВД

Из представленных выше рисунков видно, что в результате эрозионного износа уменьшается напорность компрессоров и перемещаются границы их устойчивой работы в сторону уменьшения запасов газодинамической устойчивости (ГДУ).

Особенностью данной методики также является возможность оценки влияния отдельных последствий эрозионного износа на характеристики компрессора. На рис. 5 представлено изменение максимальных значений КПД компрессоров ($\eta_{к.макс}^*$) при влиянии эрозионного износа, а также при отдельном влиянии увеличения ради-

ального зазора (и изменении его формы) и изменении геометрических параметров профилей лопаток РК КНД и КВД.

Представленные результаты свидетельствуют о том, что отдельное уменьшение хорды и толщины профилей рабочих лопаток при некоторых режимах может привести к увеличению максимальных значений КПД компрессоров, если не учитывать изменение шероховатости поверхности лопаток. Увеличение радиального зазора является главным фактором уменьшения КПД компрессоров и соответственно ухудшения их характеристик.

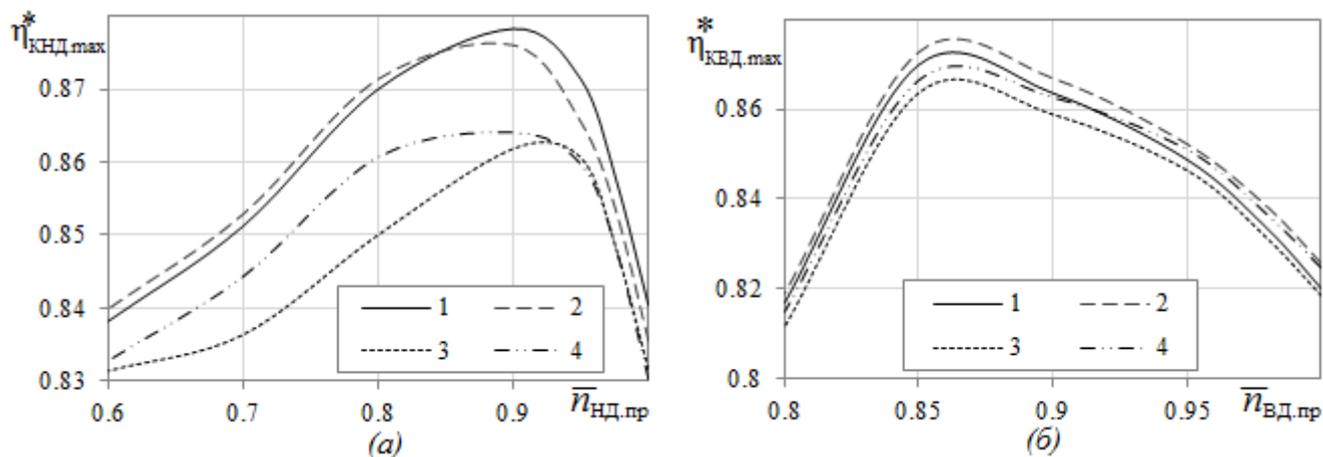


Рис. 5 – Изменение максимальных значений КПД $\eta_{k,max}^*$ при влиянии эрозионного износа и его отдельных последствий: (а) – КНД; (б) – КВД; 1 – исходное состояние; 2 – уменьшение хорды и толщины; 3 – увеличение радиального зазора; 4 – суммарное влияние износа

В третьей главе излагается методика оценки влияния влажности воздуха на свойства рабочего тела и характеристики компрессора, заключающаяся в полном учете изменения физических свойств рабочего тела (c_p , k , R) по тракту компрессора путем применения современных методов расчета трехмерного течения в компрессоре (CFD-код). При этом проводится учет изменения свойств рабочего тела при конкретных значениях относительной влажности и температуры атмосферного воздуха.

В ряде ранее проведенных исследований влияние влажности на характеристики компрессоров ГТД рассматривалось как следствие только уменьшения приведенной скорости λ_u при данном значении приведенной частоты вращения $n_{пр}$ в результате изменения k и R . Однако, характер течения воздуха в компрессоре зависит не только от λ_u , но и от показателя адиабаты k , влияющего на связь между изменением давления и изменением плотности воздуха при его течении через компрессор. Следовательно, показатель адиабаты также является параметром подобия этого течения.

Для количественной оценки влияния влажности воздуха на характеристики осевых компрессоров были проведены расчеты характеристик КНД и КВД двигателя РД33-2С с помощью программного комплекса *NUMECA Fine/Turbo* при двух значениях влагосодержания $d = 0$ и $d = 0,04$. При увеличении влагосодержания напорные кривые каскадов компрессора смещаются в сторону уменьшения $q(\lambda_b)$ на 2...3% и π_k^* на 1...2,5% вдоль границы устойчивой работы компрессора, а положение границы устойчивости при этом остается неизменным.

На рис. 6 представлено сравнение изменения положения напорных ветвей и кривых зависимости $\pi_{\text{КВД}}^*$ от $\eta_{\text{КВД}}^*$ (для двух значений $\bar{n}_{\text{пр}}$) при увеличении влагосодержания воздуха от $d=0$ до $d=0,04$, вызванного, как только уменьшением λ_u при $\bar{n} = \text{const}$ (без учета влияния других факторов), так и с учетом изменения всех свойств рабочего тела (воздуха) при увеличении d (предлагаемая методика).

Как видно из рис. 6, смещение напорных кривых, обусловленное только снижением λ_u , составляет в данном случае 60...80% смещения, обусловленного и другими факторами (и прежде всего изменением показателя адиабаты, как критерия подобия). Это отражается на точности полученных результатов расчета влияния влажности воздуха на эксплуатационные характеристики двигателя в целом.

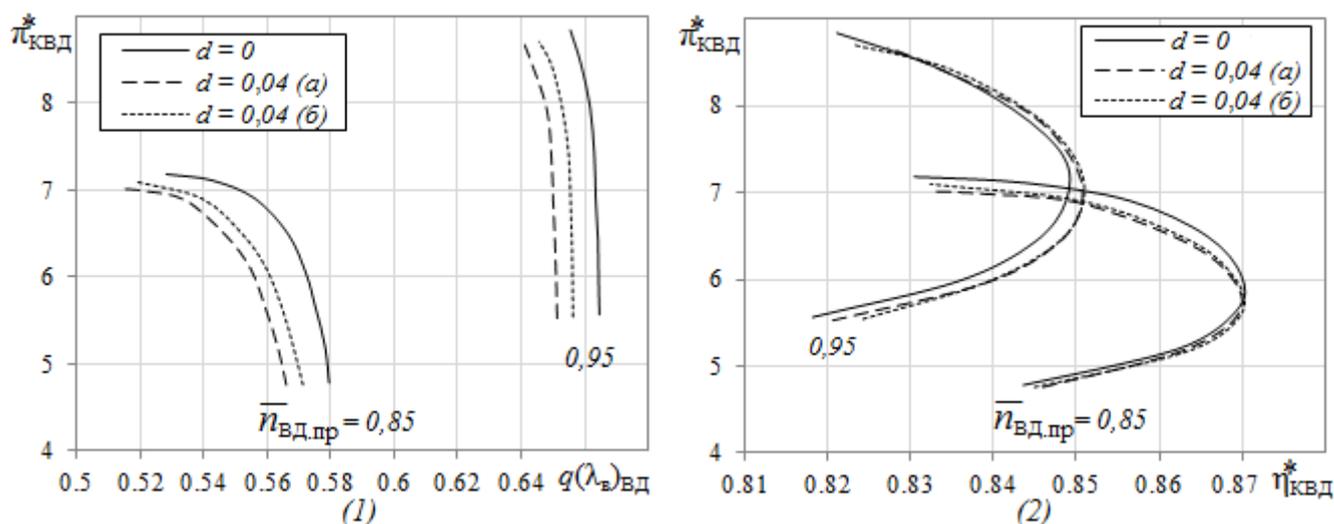


Рис. 6 – Влияние влагосодержания d : (1) – на положение напорных кривых компрессора; (2) – на кривые зависимости $\pi_{\text{КВД}}^*$ от $\eta_{\text{КВД}}^*$; (а) – при полном учете изменения всех свойств воздуха (б) – при учете только уменьшения λ_u

Изменение КПД компрессора при данных значениях $\pi_{\text{к}}^*$ и $\bar{n}_{\text{пр}}$, обусловленное изменением, как только λ_u , так и всех свойств рабочего тела (воздуха), практически одинаково.

В четвертой главе излагается методика расчета высотно-скоростных характеристик (ВСХ) ТРДДФ. Для её реализации разработана программа расчета ВСХ ТРДДФ (написана на языке Fortran-90), позволяющая проводить количественную оценку влияния эрозионного износа и влажности воздуха на характеристики двигателя с учетом изменения характеристик каскадов компрессора в результате влияния этих факторов. При этом учитывается влияние влагосодержания на физические свойства рабочего тела (воздуха и продуктов сгорания топлива) в каждом характерном сечении газоздушного тракта двигателя. В программе также учитываются особенности программы управления двигателя.

В качестве исходных данных используются рассчитанные (с помощью выше изложенных методик) характеристики каскадов компрессора при исходном состоянии и после эрозионного износа, а также при работе в условиях сухого и влажного воздуха. Полученные при расчете характеристик КНД и КВД напорные кривые и значения КПД для разных значений $\bar{n}_{\text{НД,пр}}$ и $\bar{n}_{\text{ВД,пр}}$ представляются в табличной форме и интерполируются функциями:

$$\left. \begin{aligned} \tau_{\text{КНД}}^* &= f(q(\lambda_{\text{к.НД}}), \bar{n}_{\text{НД.пр}}); & \pi_{\text{КНД}}^* &= f(q(\lambda_{\text{к.НД}}), \bar{n}_{\text{НД.пр}}); \\ \psi_{\text{КНД}} &= f(\pi_{\text{КНД}}^*, \bar{n}_{\text{НД.пр}}); & \psi_{\text{КНД.гу}} &= f(\bar{n}_{\text{НД.пр}}); \\ \pi_{\text{КВД}}^* &= f(\psi_{\text{КВД}}, \bar{n}_{\text{ВД.пр}}); & \eta_{\text{КВД}}^* &= f(\psi_{\text{КВД}}, \bar{n}_{\text{ВД.пр}}); & \psi_{\text{КВД.гу}} &= f(\bar{n}_{\text{ВД.пр}}), \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где

$$\tau_{\text{КНД}}^* = \frac{\pi_{\text{КНД}}^* \frac{k-1}{k} - 1}{\eta_{\text{КНД}}^*}; \quad \psi_{\text{к}} = \frac{\pi_{\text{к}}^*}{q(\lambda_{\text{в}})}; \quad q(\lambda_{\text{к.НД}}) = q(\lambda_{\text{в.НД}}) \frac{F_{\text{в}}}{F_{\text{кНД}}} \frac{\sqrt{\tau_{\text{КНД}}^*}}{\pi_{\text{КНД}}^*}; \quad (7)$$

$\psi_{\text{КНД.гу}}, \psi_{\text{КВД.гу}}$ – значения коэффициента $\psi_{\text{к}}$ на границе устойчивой работы КНД и КВД;
 $F_{\text{в}}$ и $F_{\text{кНД}}$ – площади сечений на входе в КНД и выходе из него.

При обеспечении условия баланса расходов через газогенератор, проводился анализ изменения $\frac{m_{\text{г}}}{m_{\text{в}}}$ при работе во влажном воздухе. Установлено, что разница (по сравнению с сухим воздухом) всего 0,005%. Поэтому можно считать:

$$\frac{\pi_{\text{к}}^*}{q(\lambda_{\text{в}})} = A \sqrt{\frac{T_{\text{г}}^*}{T_{\text{в}}^*}}, \quad (8)$$

где A – константа, не зависящая от температуры $T_{\text{в}}^*$ и влагосодержания воздуха.

При обеспечении условия баланса мощностей КВД и ТВД, был проведен анализ влияния влагосодержания d на работу турбины при различных значениях d , $T_{\text{г}}^*$, $\pi_{\text{г}}^*$ и $g_{\text{г}}$. Расчеты показали, что в диапазоне $T_{\text{г}}^*$ от 1200 до 1600 К при значениях d от 0 до 0,1 с погрешностью, не превышающей 0,05%, при $\pi_{\text{г}}^* = \text{const} \approx 3$ и $\eta_{\text{г}}^* = \text{const}$ можно считать:

$$L_{\text{ТВД}} = \text{const} \cdot T_{\text{г}}^* (1 + 0,64d - 0,6d^2) \quad (9)$$

Тогда из условия баланса мощностей:

$$0,99 \cdot c_p T_{\text{в}}^* \frac{e_{\text{к}}^* - 1}{\eta_{\text{к}}^*} = a \cdot \text{const} \cdot T_{\text{г}}^* (1 + 0,64d - 0,6d^2) \quad (10)$$

следует, что:

$$\frac{T_{\text{г}}^*}{T_{\text{в}}^*} = B \frac{c_p}{1 + 0,64d - 0,6d^2} \frac{e_{\text{к}}^* - 1}{\eta_{\text{к}}^*}, \quad (11)$$

где B константа. Из формулы (8) получим:

$$\frac{\pi_{\text{к}}^*}{q(\lambda_{\text{в}})} = C_0 \sqrt{\frac{c_p}{c_{p \text{ расч}}}} \frac{1}{\sqrt{1 + 0,64d - 0,6d^2}} \sqrt{\frac{e_{\text{к}}^* - 1}{\eta_{\text{к}}^*}}, \quad (12)$$

где $c_{p \text{ расч}}$ – теплоемкость на входе в КВД на расчетном режиме (т.е. при сухом воздухе), а c_p – теплоемкость на входе в КВД при влажном воздухе; а значение константы C_0 определяется по соответствующим параметрам на расчетном режиме.

Уравнение (12) является уравнением рабочей линии на характеристике компрессора, учитывающее зависимость теплоемкости рабочего тела от температуры и влагосодержания атмосферного воздуха.

Проведение расчета ВСХ двигателя с учетом изменения теплоемкости рабочего тела во всех сечениях его газоздушного тракта является очень громоздкой задачей, так как, например, характеристика газогенератора приобретает в этом случае вид:

$$\pi_{\Gamma}^* = f(\bar{n}_{\text{ВД.пр}}, d, T_{\text{ВД}}^*); \quad \tau_{\Gamma}^* = f(\bar{n}_{\text{ВД.пр}}, d, T_{\text{ВД}}^*); \quad \Delta_{\Gamma}^* = f(\bar{n}_{\text{ВД.пр}}, d, T_{\text{ВД}}^*). \quad (13)$$

Поэтому при оценке влияния влажности на ВСХ двигателя, учитывая, что повышенное влагосодержание воздуха на входе в двигатель может наблюдаться реально (на взлёте или в полёте у моря) в узком диапазоне значений температуры на входе в двигатель $T_{\text{в}}^*$ (300...400 К), расчет характеристики газогенератора проводится с учетом изменения свойств рабочего тела только вследствие изменения его влагосодержания (полагая, что теплоемкости сухого воздуха и «сухих» продуктов сгорания во всех сечениях его проточной части таковы же, как и на расчетном режиме).

Таким же образом был проведен анализ влияния влагосодержания на различные параметры газоздушного потока при определении режима работы газогенератора и его параметров в конкретных условиях полёта, определении параметров турбины, режима турбокомпрессорного модуля и параметров двигателя на максимальном и форсажном режимах работы двигателя.

В пятой главе приводятся результаты численного исследования влияния эрозионного износа и влажности воздуха на ВСХ двигателя РД33-2С. Проводится оценка адекватности результатов расчета ВСХ двигателя, полученных с помощью разработанной методики. Результаты расчетов показали удовлетворительную сходимость (со средней погрешностью менее 2,5%) с данными, указанными в описании двигателя (при исходном состоянии и полете в сухом воздухе) во всех диапазонах изменения высот и чисел Маха полета. Приведены результаты расчетов влияния эрозионного износа и влажности воздуха на ВСХ двигателя на максимальном режиме и режиме полного форсажа, а также на запасы газодинамической устойчивости каскадов компрессора ΔK_y . Ниже на рис. 7 и 8 представлены результаты расчета ВСХ двигателя РД33-2С при его исходном состоянии и эрозионном износе лопаток каскадов компрессора, приведшем к изменению их характеристик, а на рис. 9 и 10 результаты влияния эрозионного износа на запасы ГДУ каскадов компрессора.

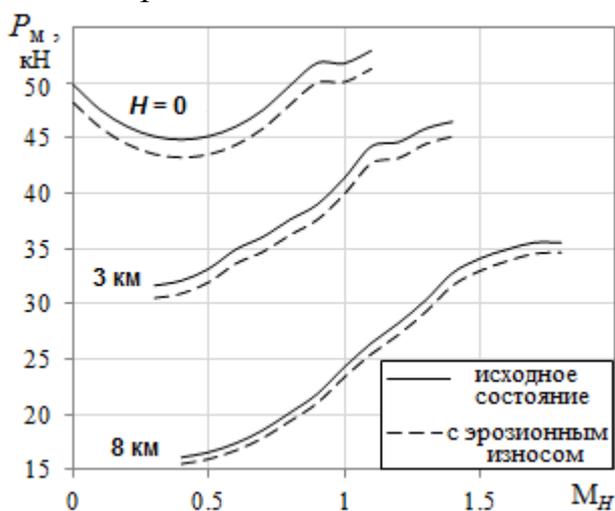


Рис. 7 – Влияние эрозионного износа на тягу двигателя (режим «Максимал»)

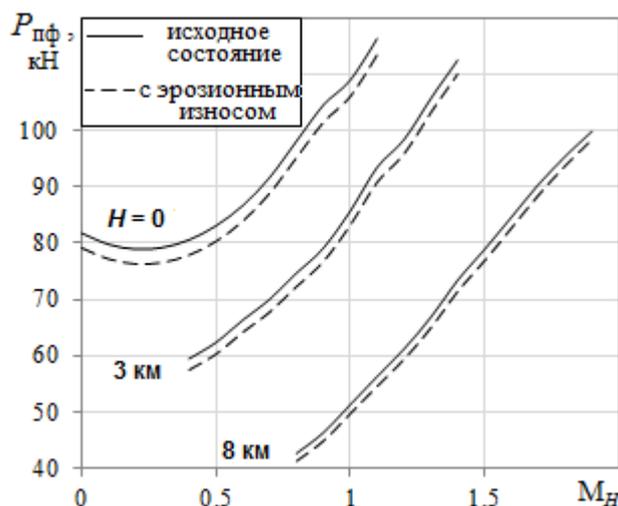


Рис. 8 – Влияние эрозионного износа на тягу двигателя (режим «Полный форсаж»)

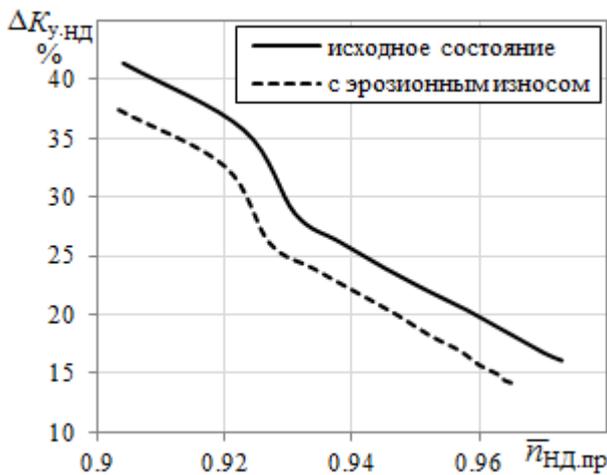


Рис. 9 – Влияние эрозионного износа на $\Delta K_{y, \text{КНД}}$

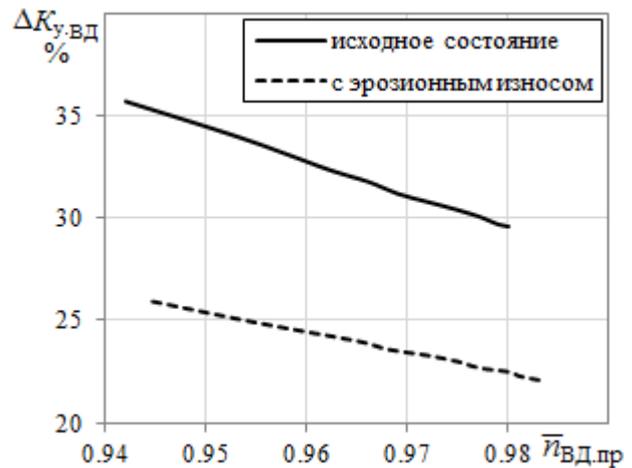


Рис. 10 – Влияние эрозионного износа на $\Delta K_{y, \text{КВД}}$

Как показали результаты расчета, эрозионный износ приводит к снижению тяги двигателя во всем диапазоне чисел M_H и высот полета H , но наибольшее влияние наблюдается на малых высотах полета. Получены численные значения снижения тяги, которое составляет 3,5...4%. При этом существенно снижается ΔK_y каскадов компрессора, в данном случае $\Delta K_{y, \text{КНД}}$ снижается на 4...5%, а $\Delta K_{y, \text{КВД}}$ – на 7...9%.

Расчеты показали также, что в данном случае влияние эрозионного износа на увеличение удельного расхода топлива незначительно.

Как известно, с увеличением высоты снижается влагосодержание, поэтому исследование влияния влажности на ВСХ двигателя проводилось на малой высоте ($H = 0$ и $H = 3$ км) и при повышенных значениях атмосферной температуры ($T_H = 320$ К и 300 К) применительно к условиям Республики Судан. Результаты расчета ВСХ на максимальном режиме представлены на рис. 11 и 12.

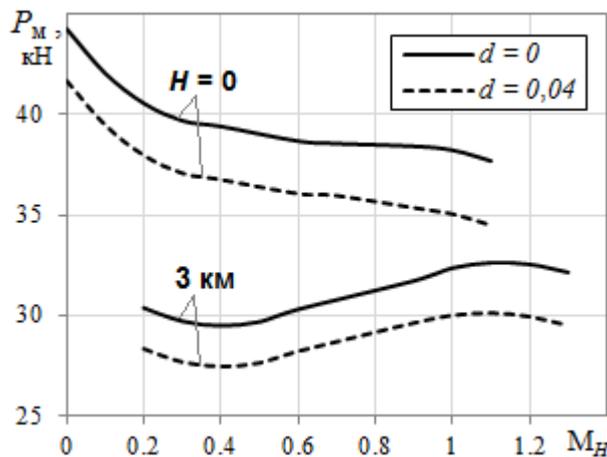


Рис. 11 – Влияние влагосодержания на тягу двигателя

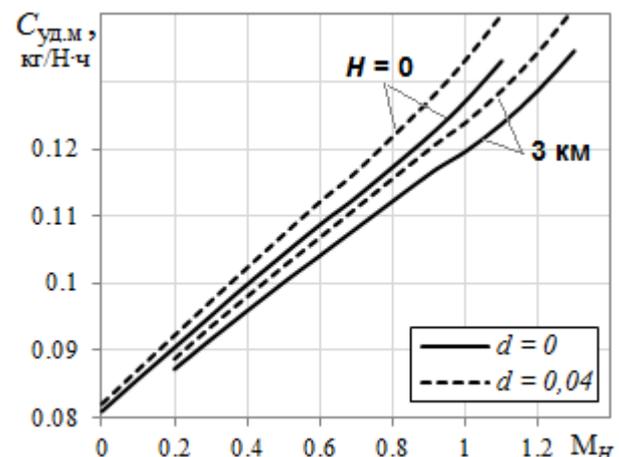


Рис. 12 – Влияние влагосодержания на удельный расход топлива

Как видно из рис. 11 и 12, увеличение влагосодержания приводит к существенному снижению тяги двигателя и увеличению удельного расхода топлива. В данном случае при увеличении влагосодержания от $d = 0$ до $d = 0,04$ снижается тяга двигателя на 6...7%, и увеличивается удельный расход топлива в среднем на 3...5%. При этом изменение запасов газодинамической устойчивости каскадов компрессора незначительно.

Для оценки совместного влияния эрозионного износа и влажности воздуха на характеристики ТРДДФ с помощью разработанной методики проводился расчет ВСХ двигателя РД33-2С при принятом в предыдущих расчетах характере эрозионного износа и значениях влагосодержания $d = 0; 0,04$. При этом исследование также проводилось на малой высоте и применительно к условиям Судана.

Результаты расчета показали, что в данном случае при эрозионном износе и полете во влажном воздухе ВСХ двигателя качественно носят такой же характер протекания, как представленный на рис. 11, 12. В количественном выражении тяга двигателя снижается на 8...10%, и увеличивается удельный расход топлива в среднем на 3...5%. При этом ΔK_y , КНД снижается на 2...5%, а ΔK_y , КВД на 7...9%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны методики оценки влияния эрозионного износа и влажности воздуха на характеристики компрессора с применением современных методов расчета трехмерного течения на основе программного комплекса *NUMECA Fine/Turbo*.

2. Получены результаты расчетного исследования влияния эрозионного износа и влажности воздуха на характеристики КНД и КВД двигателя РД33-2С.

3. Разработана программа расчета ВСХ ТРДДФ, которая позволяет определить параметры двигателя на максимальном и форсажном режимах с учетом влияния эрозионного износа и влажности воздуха.

4. Получены результаты расчета влияния эрозионного износа и влажности воздуха на ВСХ двигателя РД33-2С:

- эрозионный износ (рассмотренный в работе) приводит к уменьшению тяги двигателя на 3,5...4% и снижению ΔK_y , КНД на 4...5%, КВД – на 7...9%;

- увеличение влагосодержания воздуха от $d = 0$ до $d = 0,04$ при малых высотах и повышенной температуре воздуха приводит к уменьшению тяги двигателя на 6...7% и увеличению удельного расхода топлива на 3...5%;

- совместное влияние эрозионного износа и влажности воздуха (в данном случае) приводит к снижению тяги на 8...10%, увеличению удельного расхода топлива на 3...5%. При этом ΔK_y , КНД уменьшается на 2...5%, КВД – на 7...9%;

5. Результаты данного исследования целесообразно использовать для прогнозирования эксплуатационных характеристик ТРДДФ, его технического состояния и разработки рекомендаций по технической эксплуатации в условиях запыленной атмосферы и повышенной влажности.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Абдельвахид, М. Б. Расчет влияния радиального зазора на характеристику КНД двигателя РД-33 [Текст] / М. Б. Абдельвахид, Р. М. Федоров, К. С. Федечкин // Вестник СГАУ: Научный журнал Самарского государственного аэрокосмического университета – Самара: СГАУ, 2012. – № 3 (34), часть 3. – С. 23–27.

2. Абдельвахид, М. Б. Расчет влияния влажности атмосферного воздуха на характеристику осевого компрессора ТРДД [Текст] / М. Б. Абдельвахид // Научно-технический и информационный журнал «Компрессорная техника и пневматика», 2013. – № 8. – С. 40–43.

3. Абдельвахид, М. Б. Численное исследование влияния эрозионного износа на характеристики осевых компрессоров ТРДДФ [Текст] / М. Б. Абдельвахид,

А. Н. Черкасов, К. С. Федечкин // Научно-технический и информационный журнал «Компрессорная техника и пневматика», 2014. – № 2. – С. 28–33.

4. Абдельвахид, М. Б. Расчетное исследование влияния эрозионного износа на высотно-скоростные характеристики ТРДДФ [Текст] / М. Б. Абдельвахид, А. Н. Черкасов, Р. М. Федоров, К. С. Федечкин // Вестник УГАТУ: Научный журнал Уфимского авиационного технического университета – Уфа: УГАТУ, 2014. – Т. 18, № 3 (64). – С. 16–22.

Публикации в других изданиях:

5. Абдельвахид, М. Б. Исследование влияния радиального зазора на газодинамическую устойчивость трансзвуковой ступени осевого компрессора [Текст] / М. Б. Абдельвахид, Р. М. Федоров, К. С. Федечкин // Сборник научных статей Всероссийской научно-практической конференции «ВВС - 100 лет на страже неба России» – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», 2012. – часть 3. – С. 3–6.

6. Абдельвахид, М. Б. Расчетное исследование влияния радиального зазора на характеристики компрессора низкого давления ТРДД [Текст] / М. Б. Абдельвахид, Р. М. Федоров, К. С. Федечкин // Сборник научных статей Всероссийской научно-практической конференции «ВВС - 100 лет на страже неба России» – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», 2012. – часть 3. – С. 7–10.

7. Абдельвахид, М. Б. Расчет влияния радиального зазора на характеристики ступени осевого компрессора [Текст] / М. Б. Абдельвахид, Р. М. Федоров, К. С. Федечкин // Научно-технический журнал «Насосы. Турбины. Системы», 2013. – № 1(6). – С. 44–52.

8. Абдельвахид, М. Б. Расчет влияния эрозионного износа на характеристики трансзвуковой ступени осевого компрессора [Текст] / М. Б. Абдельвахид, К. С. Федечкин, А. Н. Черкасов // Научные труды Международной молодежной научной конференции «XXXIX Гагаринские чтения». – М.: МАТИ, 2013. – Т.2. – С. 178–179.

9. Абдельвахид, М. Б. Оценка изменения основных газодинамических параметров ступени осевого компрессора в результате эрозионного износа [Текст] / М. Б. Абдельвахид // Научно-технический журнал «Насосы. Турбины. Системы», 2013. – № 3(8). – С. 44–55.

10. Абдельвахид, М. Б. Исследование влияния величины и формы радиального зазора на характеристику компрессора высокого давления ТРДД [Текст] / М. Б. Абдельвахид, А. Н. Черкасов, К. С. Федечкин // Сборник трудов VII Международной научно-технической конференции «СИНТ'13». – Воронеж, 2013. – С. 24–29.

11. Абдельвахид, М. Б. Применение современных методов расчета для оценки влияния влажности воздуха на характеристики осевых компрессоров ГТД [Текст] / М. Б. Абдельвахид, А. Н. Черкасов, Р. М. Федоров, К. С. Федечкин // Сборник научных статей Всероссийской научно-практической конференции «Академические Жуковские чтения». – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», 2013. – С. 3–9.

12. Абдельвахид, М. Б. Методика оценки влияния эрозионного износа и влажности атмосферного воздуха на характеристики ТРДДФ [Текст] / М. Б. Абдельвахид, А. Н. Черкасов // Научные труды Международной молодежной научной конференции «XL Гагаринские чтения». – М.: МАТИ, 2014. – Т.2. – С. 206–207.