

## Отзыв

на диссертацию Абдельвахида Мохаммеда Балла, представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Актуальность избранной темы диссертации заключается в необходимости разработки методики количественной оценки совместного влияния эрозионного износа проточной части осевых компрессоров авиационных ГТД и влажности воздуха на их характеристики и характеристики авиационного ГТД в целом.

Научная новизна работы заключается в разработке комплексной методики и программы расчета для количественной оценки влияния эрозионного износа элементов проточной части компрессора авиационного ГТД и влажности атмосферного воздуха не только на характеристики компрессора, но и на характеристики двигателя в целом.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования разработанных в диссертации методик для прогнозирования технического состояния авиационных двигателей в процессе их эксплуатации в запыленной и влажной атмосфере. Расчеты с использованием указанных методик дают возможность разрабатывать рекомендации по методам технической эксплуатации ГТД в условиях запыленной и влажной атмосферы. Прогнозируя влияние запыленности и влажности воздуха на характеристики ГТД можно более достоверно оценить тактико-технические возможности авиационного комплекса в целом и его боевую эффективность.

Кроме того, возможность оценки степени эрозионного износа лопаток компрессора авиационного ГТД, работающего в запыленной атмосфере, позволяет выработать рекомендации по необходимой частоте контроля этого износа в процессе эксплуатации ГТД с целью предотвращения отказов двигателя или чрезмерного ухудшения его характеристик.

Достоверность полученных в диссертации результатов обеспечена использованием в ней известных и хорошо зарекомендовавших себя методик расчета характеристик осевых компрессоров и характеристик турбореактивных (ТРДФ и ТРДДФ) двигателей в целом. Она также подтверждена удовлетворительным их согласованием с известными экспериментальными данными и данными, приведенными в технической документации исследуемого ТРДДФ.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждена удовлетворительным согласованием результатов, полученных в диссертации,



с известными экспериментальными и научными результатами работ других авторов.

По материалам диссертации имеется достаточное количество публикаций и выступлений на научных конференциях и семинарах по теме рассматриваемой диссертации. Четыре из указанных публикаций имеется в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

В первой главе диссертации приведены численные данные о концентрации пыли в районах Ближнего Востока и Северной Африки, а также данные по изменению температуры и относительной влажности по месяцам в Республике Судан. Эти данные использованы автором при проведении расчетов характеристик осевых компрессоров и высотно-скоростных характеристик двигателя РД33-2С, эксплуатирующихся в этой республике.

Здесь же дан подробный обзор работ, посвященных оценке влияния эрозионного износа на характеристики осевых компрессоров и ГТД в целом. Из этого анализа автор делает вывод об основных последствиях эрозионного износа, в частности, на компрессор:

- снижение его коэффициента полезного действия (КПД) и напорности;
- ухудшение газодинамической устойчивости;
- возникновение условий усталостного разрушения лопаток.

Кроме того, данный анализ позволил определить характер износа лопаток осевых компрессоров как по радиусу, так и по длине проточной части. Установлено также, что интенсивность износа лопаток осевых компрессоров зависит от физических свойств пыли, особенно от концентрации в ней частиц кварца.

В этой же главе выполнен также обзор работ, посвященных анализу влияния влажности воздуха на основные параметры компрессора и двигателя в целом. Установлено, что значительное повышение влажности воздуха приводит к снижению тяги и повышению удельного расхода топлива на несколько процентов. Причем, это связано, в основном, с ухудшением параметров компрессора.

В заключение этой главы сформулирована структура методики учета совместного влияния запыленности воздуха и его влажности на характеристики осевого компрессора и ТРДДФ.

Вторая глава посвящена исследованию влияния эрозионного износа на характеристики осевого компрессора. Описывается выбранная для расчета характеристик осевого компрессора программа (программный продукт) Numesa, в которой реализовано решение системы уравнений Навье-Стокса, осреднённых по Рейнольдсу. Описываются особенности построения расчетной сетки для описания геометрии венцов и поверхностей осевого компрессора. Выбрана модель турбулентной вязкости.



В этой главе представлены примеры расчета характеристик осевой ступени С-16 и компрессора низкого давления двигателя РД33-2С с помощью программы Numesa, показавшие удовлетворительное согласование с экспериментальными данными.

Здесь же предложен новый подход к моделированию характера изменения геометрических параметров профилей лопаток после эрозионного износа. Использование этого подхода позволило рассчитать характеристики ступени С-16, КНД и КВД РД33-2С при наличии различной степени эрозионного износа её лопаток. Результаты этих расчетов показали отрицательное влияние эрозионного износа на степень повышения давления ( $\pi_k^*$ ) и коэффициент полезного действия ( $\eta_k^*$ ) ступени и каскадов компрессора.

Представлено также полученное расчетом изменение параметров по радиусу и по длине проточной части ступени С-16 и каскадов компрессора РД33-2С, а также поля распределений чисел Маха и скоростей на различных радиусах лопаточных венцов и каскадов компрессора без эрозионного износа и с износом. Анализ этих результатов показал, что эрозионный износ приводит к снижению  $\pi_k^*$  и  $\eta_k^*$  ступени и компрессора. Причем основное отрицательное влияние на эти параметры оказывает увеличение радиального зазора и его форма.

В главе 3 рассмотрено влияние влажности воздуха на характеристики КНД и КВД двигателя РД33-2С. В результате расчетов установлено, что увеличение влажности воздуха напорные кривые на характеристиках указанных каскадов смещаются в сторону уменьшения относительной плотности тока на входе в компрессор  $[q(\lambda)]$  и  $\pi_k^*$ . Изменение  $\eta_k^*$  компрессора при изменении приведенных оборотов ( $n_{пр}$ ) неоднозначно: при некоторых значениях  $n_{пр}$  он увеличивается, а при некоторых – уменьшается.

Расчетами также установлено, что изменение положения границы устойчивой работы компрессора при увеличении влажности воздуха практически не происходит.

Следует отметить, что в работе не объясняется причина такого изменения параметров каскадов компрессора при изменении влажности воздуха.

Глава 4 посвящена разработке методики расчета высотно-скоростных характеристик (ВСХ) ТРДДФ с учетом влажности воздуха и эрозионного износа лопаток компрессора. С этой целью в главе изложена методика определения характеристик газогенератора (ГГ), параметров турбины, режима работы турбокомпрессорного модуля (ТКМ) и параметров двигателя. В этой методике учитывается влияние влажности атмосферного воздуха на его физические свойства и на свойства смеси воздуха и продуктов сгорания топлива в каждом характерном сечении двигателя.



Следует отметить, что при описании методики определения режима работы ТКМ на стр.116 используется понятие «...приближенная рабочая линия КНД...», но не описывается, как она определена. Кроме того, при разработке методики определения ВСХ двигателя принят ряд упрощающих допущений. Хотя возникающая при принятии каждого допущения ошибка оценена, но суммарное их влияние на конечный результат не ясно.

В главе 5 вначале проведена оценка степени соответствия результатов расчета ВСХ с помощью разработанной в диссертации методики паспортным данным двигателя РД33-2С. Она показала удовлетворительное согласование расчетных и паспортных данных. После указанной оценки были проведены расчеты ВСХ двигателя РД33-2С в условиях влажности и запыленности воздуха в диапазоне значений его температуры, характерных для Республики Судан. Расчеты показали, что как наличие влажности, так и запыленности атмосферного воздуха приводит к снижению тяги двигателя и увеличению удельного расхода топлива. Особенно это сильно проявляется при совместном влиянии влажности и запыленности воздуха. Причем наибольшее влияние эти факторы оказывают на запасы устойчивой работы компрессора.

Содержание автореферата диссертации соответствует основным положениям диссертации.

#### В качестве замечаний следует отметить:

1. Утверждение (стр. 46) о том, что результаты, полученные при расчете характеристик лишь ступени С-16 и КНД двигателя РД33-2С, позволяют считать, что «... методика (имеется в виду Numesa) применима для расчета характеристик любых осевых компрессоров...» требует подтверждения путем применения её для расчета характеристик многих компрессоров, что в диссертации не выполнялось.

2. Вывод об уменьшении запаса газодинамической устойчивости компрессора  $\Delta K_y$  (стр.52, 81) при эрозионном износе лопаток компрессора и увеличении радиального зазора не совсем корректен, так как определить  $\Delta K_y$  без наличия рабочей линии на характеристике компрессора невозможно.

3. Вывод на стр. 82 о том, что разработанная в диссертации методика полного учета физических свойств рабочего тела также не совсем корректен, так как теплоемкость и показатель адиабаты зависят не только от влажности и температуры газа, но и от давления.

#### Заключение

Не зависимо от сделанных замечаний, считаю, что диссертант Абдельвахид Мохаммед Балла решил важную научно-практическую задачу, а именно создал методику учета влияния влажности и запыленности воздуха на высотно-скоростные характеристики турбореактивного двигателя.

Применив эту методику для оценки этого влияния для конкретных климатических условий Республики Судан, получил количественные результаты, позволяющие прогнозировать техническое состояние авиационных ГТД в процессе их эксплуатации.

На основании сказанного считаю, что диссертация Абдельвахида Мохаммеда Балла является научно-квалификационной работой, соответствует критериям, установленным Положением ВАК РФ о присуждении ученых степеней, а её автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Официальный оппонент  
доктор технических наук, профессор  
Котовский Владимир Николаевич

*Котовский*

Двадцать четвертого апреля две тысячи пятнадцатого года .

Почтовый адрес: 109542, г. Москва, Рязанский проспект, дом 64, корпус 2, квартира 116, 117

Телефон : 8 916-223-77-60

Адрес электронной почты: vkotovskiy@mail.ru

✓ *Котовский Владимир Николаевич*

*Котовский*

В соответствии со статьей 80 Основ законодательства Российской Федерации о нотариате, свидетельствуя подлинность подписи, нотариус удостоверяет, что подпись на документе сделана определенным лицом, но не удостоверяет фактов, изложенных в документе.

**Город Москва.**

**Двадцать четвёртого апреля две тысячи пятнадцатого года.**

Я, Семенова Елена Владимировна, нотариус Московского городского нотариального округа, свидетельствую подлинность подписи гр. КОТОВСКОГО ВЛАДИМИРА НИКОЛАЕВИЧА, которая сделана в моем присутствии. Личность подписавшего документ установлена.

Зарегистрировано в реестре за №

2 - 7523

Взыскано по тарифу:

100 руб. 00 коп.

Нотариус

*Е.В. Семенова*

Е.В. Семенова







Итого пронумеровано,  
прошнуровано, скреплено  
печатью 5 листов.

*[Handwritten signature]*