

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, профессора Евдокимова Алексея Иннокентьевича на диссертационную работу **Нгуен Тхань Шона** на тему «Методика оценки влияния эксплуатационных повреждающих воздействий на качество функционирования компрессора ГТД», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов»

Актуальность темы диссертационной работы

Эксплуатационные повреждения и прежде всего лопаток компрессора способствуют снижению показателей безопасности полетов ВС, увеличению числа преждевременного съема двигателей с эксплуатации, снижению уровня исправности парка двигателей, значительным материальным затратам.

Опыт эксплуатации ВС и военного, и гражданского применения показывает, что наиболее часто эксплуатационные повреждения (ЭП) лопаток осевого компрессора происходят по причине попадания на вход в двигатель посторонних предметов, песка, пыли, птиц. Возникающие на лопатках компрессора повреждения оказывают существенное влияние на снижение их прочности, вызывают изменение газодинамических характеристик двигателя.

Для снижения повреждаемости лопаток, вредного воздействия ЭП на элементы компрессора существуют различные направления как эксплуатационного характера (например, содержание в чистоте от ПП аэродромов базирования ВС, использование специального режима работы двигателя на взлете – «взлет с додачей»), конструкционного направления (повышение ударостойкости лопаток компрессора, специальные защитные устройства, предотвращающие попадание твердых частиц и птиц в двигатель), так и создание и совершенствование методов и методик моделирования повреждений элементов конструкции компрессоров ГТД, позволяющих оценивать уровень влияния соответствующих повреждений на качество функционирования компрессора, ГТД

Отдел документационного
обеспечения МАИ

20 12 2022

в целом, их основных прочностных и газодинамических (аэродинамических) характеристик для выработки мер по их снижению.

При этом вопросы конструкционной прочности лопаток при появлении на них повреждений в процессе эксплуатации достаточно широко изучены многими отечественными и зарубежными учеными. Результаты нашли свою реализацию на практике, например, при разработке нормативной документации в виде положений, руководств, в ходе установления норм на допустимые повреждения лопаток компрессора.

В меньшей степени решены задачи по оценке влияния повреждений лопаток компрессора на газодинамические параметры: КПД, запас газодинамической устойчивости (ГДУ) компрессора, т. е. параметры, которые определяют тяговые (мощностные) характеристики, возможности беспомпажной работы двигателя, прежде всего в условиях эксплуатации с повышенной запыленностью воздуха. Знание степени влияния повреждений на уровень снижения аэродинамических параметров компрессора важно в современных условиях, когда возникает необходимость повышения напорности ступеней компрессора при жестких требованиях по минимизации массы лопаточных аппаратов.

Поиск новых направлений решения актуальной проблемы снижения числа преждевременного съема двигателей в эксплуатации, внедрение перспективных методов моделирования реальных процессов и современных алгоритмов расчета продолжается.

Предлагаемое автором направление и тема работы по разработке методики численного моделирования влияния эксплуатационных повреждений лопаток компрессора ГТД на газодинамические параметры компрессора, с проведением широкого круга параметрических исследований и оценочным анализом полученных результатов, являются **актуальными**.

В работе расчетными исследованиями оценено влияние повреждений (забоин, эрозионного износа) лопаток компрессора авиационного ГТД на аэродинамические характеристики компрессора. Представлена методика

моделирования лопатки с повреждением, обтекания профилей лопатки с повреждением и расчета основных газодинамических характеристик. Показано на примере вентилятора двигателя типа РД-33, что только при значительных повреждениях, превышающих допустимые в эксплуатации по прочности, возможно ощутимое снижение запаса ГДУ.

Общая характеристика диссертации

Введение и глава 1 посвящены анализу состояния проблемы повреждаемости элементов компрессора современных двигателей в эксплуатации, главным образом на примере двигателя ПС-90А. Справедливо указано на актуальность данной проблемы для отечественного и иностранного двигателестроения. Обосновывается актуальность разрабатываемой темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, отмечены научная новизна, практическая значимость полученных результатов, личный вклад автора. Формулируются положения, выносимые на защиту.

В главах 2 и 3 представлены основные положения, принятые автором при разработке методики численного моделирования эксплуатационных повреждающих воздействий на качество функционирования компрессора. При этом правомерно использованы общеизвестные уравнения: согласования расхода воздуха через компрессор и турбину, уравнение баланса мощностей турбины и компрессора и уравнение частот вращения роторов.

Автор предлагает подход моделирования поврежденного компрессора, конструктивные особенности которого отличаются от нового, неповрежденного компрессора. В результате вместо расчетной (первоначальной) модели конструкции лопаток с расчетным профилем и расчетными условиями обтекания рассматривается модель конструкции лопаток компрессора с повреждениями, с измененным характером обтекания профилей в зоне их повреждения.

Представлены основные подходы по созданию математической модели формирования воздушного потока, обтекающего поврежденную область профиля

лопатки. В ее основу положена теория обтекания профиля отдельными струями, связь между которыми осуществляется за счет сил трения.

Численное моделирование влияния типа (забоина, отгиб передней кромки...) и величины повреждения профиля лопатки на характер обтекания его потоком выполнено с использованием пакета программ типа ANSYS. Выполненные с помощью пакета ANSYS расчеты позволяют предварительно оценивать изменение условий обтекания профилей лопаток компрессора при возникновении на них повреждений (забоин): распределение осевой скорости, давления по профилю, что дает возможность определить перераспределение спектра нагрузок, действующих на лопатки с повреждениями.

Для моделирования влияния эксплуатационных повреждений лопаток компрессора на качество функционирования компрессора ГТД, автором разработана методика, базирующаяся на задачах исследования трёхмерного течения потока с использованием программы NUMECA, реализующей численное решение уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу. Причем не в готовом ее виде, а дорабатывая в направлении включения дополнительных блоков, позволяющих вводить необходимые уточнения, учитывающие наличие повреждения на профиле лопаток компрессора.

В частности, моделирование повреждения лопатки осуществляется с помощью метода «сетка». В предложенном автором методе конфигурация сетки изменяется в зависимости от вида и уровня повреждения, числа поврежденных лопаток, различного расположения поврежденных лопаток в рабочем колесе. Сетка выполняется так, что она позволяет учитывать все особенности принятой модели поврежденной лопатки и автоматически уточнять геометрию лопаток с использованием модуля программного продукта NUMECA. Выбранный метод построения сетки позволяет формировать расчетную модель по типовому шаблону для любой геометрии лопаточного венца. При этом автор грамотно и справедливо подошел к использованию известных зависимостей и подходов, апробированных другими авторами в соответствующих областях науки.

В рамках этих глав проведена апробация разработанной автором методики в виде параметрических исследований в широком диапазоне возможных вариантов повреждений лопаток рабочего колеса компрессора, от единичного до нескольких в различных сочетаниях. Приведены результаты сравнительных расчетов и их анализ на примере расчетного моделирования вентилятора двигателя типа РД-33 для различных режимов его работы.

Глава 4 посвящена анализу расчетных исследований, выполненных автором по разработанной методике. Представлены результаты параметрических исследований для различных возможных вариантов повреждений лопаток первой ступени компрессора.

Оценено влияние форм забоин, их количества на лопатке, мест их появления, количества поврежденных лопаток в венце в различных сочетаниях, отдельное и совместное повреждение лопаток рабочего колеса и направляющего аппарата, эрозионного износа, в том числе совместно с забоинами и т. п. Охватывается практически весь спектр возможных вариантов повреждений лопаток компрессора в эксплуатации.

Полученные результаты, представленные в наглядной графической форме, дают возможность установить наиболее неблагоприятное сочетание эксплуатационных повреждений с точки зрения их влияния на изменение основных газодинамических параметров компрессора (запасов устойчивой работы компрессора, его КПД и степень повышения давления) в зависимости от частоты вращения ротора (режима работы двигателя).

Глава 4 и вся работа в целом существенно выиграли бы, если бы автор представил материал по заявленным им в 4 главе рекомендациям - «...ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ УМЕНЬШЕНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ТРДД ОТ ДЕЙСТВИЯ ЭП В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ». К сожалению, этот важнейший для диссертации и практики раздел в работе отсутствует.

Проведенный соискателем анализ, выявленные особенности и оценка полученных научных результатов в главах 2 – 4 подтверждают, что научные положения, выводы, сформулированные в диссертации, научно обоснованы.

Научная новизна выполненной диссертационной работы заключается в разработке:

- методики численного моделирования влияния повреждения лопаток компрессора ГТД на его газодинамические параметры, прежде всего на КПД и устойчивую работу компрессора;

- сеточной модели формирования типа и размера повреждения лопатки. Предложенный автором подход по построению конфигурации сетки позволяет учитывать особенности принятой модели поврежденной лопатки и уточнять геометрию лопаток при расчете параметров с использованием усовершенствованного автором модуля программного продукта NUMECA.

Автор лично разработал методику численного моделирования и научно-методический подход построения моделей поврежденных лопаток и их обтекания воздушным потоком.

Практическая значимость полученных в диссертации Нгуен Тхань Шона результатов состоит в том, что они позволяют:

- оценивать влияние повреждения лопаток компрессора (вида повреждения, величины и характера) на основные газодинамические характеристики лопаточного аппарата на различных режимах работы двигателя;

- выявлять опасные режимы работы поврежденного двигателя, прежде всего с точки зрения степени снижения запаса газодинамической устойчивости компрессора.

Степень достоверности полученных результатов, содержащихся в диссертации, подтверждается тем, что автор использовал общепринятые апробированные подходы моделирования, современные численные методы для расчета характеристик, известные методики. При этом ряд полученных расчётных

данных разработанной автором модели прошли верификацию с экспериментальными данными других исследователей (например, влияние радиального зазора на характеристики компрессора).

Автореферат отражает основные подходы, методики расчетов и результаты и соответствует содержанию диссертационной работы.

Диссертация соответствует паспорту специальности 2.5.15 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов» по пунктам 2, 6, 12, 20.

По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ, из них 2 – в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК при Министерстве образования и науки РФ.

Диссертация написана грамотным языком с применением общепринятого в данной предметной области понятийного аппарата, изложение текста характеризуется как логическое и завершенное.

Поставленные в работе задачи решены в полном объеме.

Недостатки работы

По диссертационной работе Н.Т. Шона можно выделить следующие недостатки:

1. Полученные расчетные результаты, даже при использовании скрупулезно созданной модели повреждения и современных численных методов нуждаются в экспериментальных подтверждениях в процессе модельных и, тем более, натурных стендовых испытаний.
2. К сожалению, в работе отсутствует оценка и рекомендации по выбору размера ячеек расчетной сетки течения в межлопаточном канале в области передней кромки лопатки, особенно при наличии повреждения на лопатке.
3. Важнейшим в данном направлении работ является этап моделирования реального повреждения. «Гладкое» моделирование повреждения (забоин) через уменьшение хорды профиля, принятое автором, не позволяет в

должной мере оценить вредное влияние забоин с рваными кромками с их отгибом, изогнутостью части профиля лопатки, вырывами. Именно такие, не «гладкие» повреждения чаще всего встречаются в эксплуатации, они оказывают наибольшее влияние на процесс обтекания поврежденных профилей лопаток компрессора и его газодинамические параметры в эксплуатации.

4. Отсутствие конкретных рекомендаций по уровню допустимых повреждений с точки зрения газодинамических характеристик компрессора (они автором планировались и включены в наименование главы 4) существенно снижает вклад работы в разработке направлений по решению актуальной проблемы снижения преждевременного съема двигателей с эксплуатации.
5. Ряд представленных графических результатов параметрических исследований требует пояснения такому протеканию кривых.

Например, на рисунках 3.24, 3.25 диссертации представлено влияние величины повреждений лопаток компрессора на газодинамическую устойчивость ΔK_y , где при забоине больше 2 мм запас устойчивости не изменяется. В работе не дается разъяснений и обоснований по неочевидному результату.

Трудно объяснить причину несоответствия значений запаса газодинамической устойчивости, представленных на рисунках 4.74, 4.82 с результатами, представленными на предыдущих рисунках (на одних - запас неповрежденного компрессора меньше 70%, а на других - этот же запас больше 70%).

В работе нет объяснения, почему в ходе сравнительных исследований исходный (для неповрежденного компрессора) запас газодинамической устойчивости имеет столь высокие показатели, значительно превышающие запасы устойчивой работы вентилятора базового двигателя типа РД-33.

Несмотря на указанные выше недостатки, диссертация Нгуен Тхань Шона

заслуживает положительной оценки.

По своему содержанию диссертация является завершенной научно-квалификационной работой, выполнена автором самостоятельно, содержит новые научные результаты, имеющие научную и практическую значимость. Работа отражает положения, которые выносятся на защиту.

Тема и содержание диссертации соответствуют научной специальности 2.5.15 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

По степени актуальности, научной новизне и практической значимости работа отвечает критериям ВАК для кандидатских диссертаций, указанным в пункте 9 «положение о присуждении ученых степеней», а ее автор, Нгуен Тхань Шон заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по названной выше специальности 2.5.15.

Официальный оппонент

Доктор технических наук, профессор,
главный специалист отдела конструкторско-технологического перспективных проектов филиала АО «Объединенная двигателестроительная корпорация» «Научно-исследовательский институт технологии и организации производства двигателей» (филиал АО «ОДК» «НИИД»)

А.И. Евдокимов

16.12.2022

117393, г. Москва, улица Академика Пилюгина, д. 8, к. 1, кв. 333

тел. 8-910-400-48-59

eai47@mail.ru

Подпись профессора А.И. Евдокимова заверяю
начальник бюро управления персоналом
филиала АО «ОДК» «НИИД»



Т.В. Докторова

С отзывом
осзнакомлен
20.12.2022