

На правах рукописи



Нгуен Тхань Шон

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ  
ПОВРЕЖДАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА  
КАЧЕСТВО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОМПРЕССОРА ГТД**

Специальность 2.5.15. – Тепловые, электроракетные двигатели  
и энергоустановки летательных аппаратов

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва - 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный Руководитель: **Сиротин Николай Николаевич**, Заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник отдела 52 НИЦ (г. Люберцы) ЦНИИ Минобороны России, профессор кафедры 203 ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Официальные оппоненты: **Евдокимов Алексей Иннокентьевич**, доктор технических наук, профессор, главный специалист филиала АО «Объединенная двигателестроительная корпорация» «Научно-исследовательский институт технологии и организации производства двигателей» (филиал АО «ОДК» «НИИД»)

**Марков Данил Сергеевич**, кандидат технических наук, преподаватель 74 кафедры аэродинамики и безопасности полета ФГКВУ ВО Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО Московский государственный технический университет гражданской авиации (МГТУ ГА)

Защита состоится «30» января 2023 года в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.327.06, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»:

[https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT\\_ID=168920](https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=168920)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.2.327.06,  
д.т.н., доцент



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы диссертации.**

Повреждения элементов конструкции авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) от эксплуатационных повреждающих воздействий способствуют, снижению уровня безопасности полетов, росту числа аварий и катастроф, увеличению затрат на эксплуатацию, связанных с необходимостью проведения восстановительного ремонта поврежденного двигателя или досрочного его съема с эксплуатации.

По данным Межгосударственного авиационного комитета (МАК), опубликованным в июне 2022 года, в 2021 году в России произошло три авиакатастрофы, в них погибло 38 человек. Крупнейшей авиакатастрофой в РФ в 2021 году стала катастрофа самолета Ан-26 Камчатского авиапредприятия в районе аэропорта Палана в начале июля. Жертвами стали 28 человек — 22 пассажира и шесть членов экипажа. В июне 2022 года в Рязани разбился военнотранспортный Ил-76. В результате жесткой посадки в пойме реки и мощного керосинового пожара, начавшегося еще в воздухе, пятеро членов экипажа самолета погибли, но еще четверо оказались в больнице. Минобороны назвало причиной катастрофы отказ двигателя воздушного судна (ВС). Один из самых громких случаев с попаданием в двигатели самолета произошел 15 августа 2019 года. После того как пассажирский лайнер А321 вылетел из аэропорта «Жуковский», судно столкнулось со стаей птиц. Заметив неполадки в работе с двигателя, капитан судна пришел к выводу о необходимости совершения аварийной посадки. Анализ причин авиакатастроф выше указывает на необходимость уточнения влияния эксплуатационных повреждений лопаток компрессора на качество функционирования ГТД.

Качество функционирования ГТД – это совокупность свойств ГТД как объекта летной эксплуатации, определяющее его пригодность к эффективному выполнению главных функций своего предназначения и определяющих условия его применения.

Эксплуатационные повреждения лопаток компрессора, возникающие в зависимости от условий эксплуатации, в основном, являются следствием повреждающего действия:

при взлете и посадке ВС от- посторонних предметов (ПП) с взлетно-посадочной полосы (ВПП) и рулёжных дорожек;

в полете от- птиц, находящихся в воздушном пространстве на траектории полета воздушного судна;

в полете от- элементов конструкции ВС и элементов конструкции других систем ВС (заклепки, контровка, лед, часть обшивки ВС, элементы конструкции и т.д.);

при взлете, в полете и посадке ВС от- частиц, загрязняющих воздушное пространство, обладающие химической активностью в данных условиях

эксплуатации, т.е., когда частицы в воздушном пространстве обладают способностью генерировать химические реакции на поверхности пера лопатки. Эксплуатационные повреждения в данном случае проявляются в виде коррозионного повреждения поверхности конструкции лопаток компрессора;

при взлете, в полете и посадке ВС от- частиц, размером менее 0,4 мм, загрязняющих воздушное пространство. При взаимодействии таких частиц с лопатками компрессора, происходит их повреждение в виде эрозии поверхностей пера лопаток, входной и выходной кромок.

Общемировой ущерб авиации от повреждений ГТД, например, птицами в процессе эксплуатации составляет \$3...\$4 миллиарда в год.

Все эксплуатируемые в мире типы авиационных ГТД из-за эксплуатационных повреждений элементов конструкции компрессора ГТД не всегда отработывают назначенный ресурс.

Эксплуатационные повреждения лопаток компрессора способствуют увеличению числа съема двигателей с эксплуатации, что приводит к снижению уровня исправности парка двигателей и безопасности полетов ВС. Для поддержания требуемого уровня исправности и безопасности полетов, необходимы дополнительные материальные затраты, связанные с расходом средств на восстановление исправности, поврежденных в эксплуатации двигателей и производством новых.

Уменьшение числа съема авиационных ГТД с эксплуатации из-за эксплуатационных повреждений возможно путем выполнения работ в следующих направлениях.

**Первое направление.** Создание новой конструкции или совершенствование серийной конструкции ГТД, обеспечивающие стойкость и самозащиту от повреждающего действия эксплуатационных факторов. Это направление является эффективным, но сложным в исполнении так как связано с созданием новой конструкции или с изменением конструкции серийного ГТД, что требует больших затрат.

**Второе направление.** Совершенствование качества эксплуатации ВС, связанное с обеспечением качественного покрытия ВПП аэродромов, их очистки и ремонта. По своим возможностям это направление работ имеет ряд ограничений. В первую очередь эти ограничения связаны с тем, что применяемые в настоящее время методы и средства очистки покрытия рулежных дорожек, ВПП и мест опробования двигателей, не позволяют полностью очистить покрытие. Места опробования двигателей, покрытие рулежных дорожек и ВПП засоряются щебнем, песком, частицами смерзшейся земли, льдом и т.п.

**Третье направление.** Совершенствование систем защиты ГТД от эксплуатационных повреждений. Это направление работ, обеспечивающее уменьшение числа съема двигателей с эксплуатации, является эффективным, если не требуется изменение конструкции двигателя и ВС.

**Четвертое направление.** Создание и совершенствование методик моделирования эксплуатационных повреждений элементов конструкции ГТД, позволяющие выявлять закономерности влияния эксплуатационных повреждений на изменение эффективности компрессора, как лопаточной машины, качество функционирования поврежденных компрессора и ГТД.

Эффективность «Методики численного моделирования эксплуатационных повреждающих воздействий на качество функционирования компрессора ГТД» существенно повышается, так как такие методики позволяют моделировать ряд эксплуатационных повреждений, трудно воспроизводимых в условиях стенда. Кроме того, такое моделирование проводится с меньшими затратами чем при натурных испытаниях, проведение которых рекомендовано в авиационных правилах.

Поэтому выполнение исследовательских работ по четвертому направлению, путем обеспечения совершенства коммерческих вычислительных программ и создание новых методик, позволяет провести исследования поврежденного компрессора, выявить закономерности влияния эксплуатационных повреждений лопаток компрессора на эффективность компрессора и качество функционирования ГТД. Наличие подобных методик, позволяет исследовать поврежденный компрессор ГТД, выявлять закономерности действия эксплуатационных повреждений лопаток компрессора по ухудшению эффективности компрессора, как лопаточной машины, качества функционирования ГТД, спектра нагрузок, действующих на лопатки. Такие работы являются актуальными и позволяют существенно повысить качество исследовательских работ в данном направлении, расширить область исследования поврежденного компрессора ГТД, в частности, при установлении величины диапазона влияния нерасчетного обтекания поврежденных лопаток на параметры потока, обтекающего неповрежденную часть лопаток.

Кроме того, в соответствии со стандартами и руководствами для конструкторов на этапе разработки ГТД, рабочей документацией опытного образца предусматривается формирование норм допустимых повреждений лопаток с точки зрения снижения усталостной прочности поврежденных лопаток, при которых эксплуатация ГТД допускается без ограничения ресурса. Нормы на допустимые повреждения лопаток компрессора как лопаточной машины не приводятся. Это обстоятельство в условиях эксплуатации затрудняет определение истинной причины снижения эффективности работы ГТД и компрессора. В частности, в отдельных случаях затруднительно установить истинную причину помпажа компрессора, проявляющегося в условиях полета и не подтверждающегося при стендовых испытаниях. Это обстоятельство может явиться следствием отсутствия данных о характере влияния эксплуатационных повреждений элементов конструкции компрессора на качество функционирования и надежность поврежденного ГТД.

Поэтому повышение уровня безопасности полетов ВС и эффективности использования поврежденного ГТД в данном случае возможно, если имеются данные о снижении эффективности использования поврежденных авиационных ГТД.

Проблема исследования влияния эксплуатационных повреждающих воздействий на качество функционирования компрессора ГТД в настоящее время является одной из приоритетных и актуальных.

Снижение числа авиационных происшествий из-за повреждающего воздействия эксплуатационных факторов и повышение уровня эффективности и безопасности полетов возможно путем совершенствования конструкции компрессора ГТД воздушных судов на основе знаний закономерностей влияния эксплуатационных повреждающих воздействий на качество функционирования компрессора ГТД как лопаточной машины.

В данной работе представлены результаты исследования этой задачи с использованием численного моделирования процессов в исследуемой области, и разработанной автором «Методики оценки влияния эксплуатационных повреждающих воздействий на качество функционирования компрессора ГТД». Построение методики основано на использовании результатов численного моделирования процессов, протекающих в поврежденном компрессоре.

#### **Степень разработанности темы.**

В ранее выполненных различными авторами работ в области исследования влияния эксплуатационных повреждающих воздействий на характеристики ГТД и его повреждаемость в недостаточной степени выявлено влияние реальных эксплуатационных повреждений на изменение характеристик ГТД и его повреждаемость.

Значительный вклад в исследования влияния эксплуатационных повреждающих воздействий на повреждаемость элементов конструкции ГТД от поражающего воздействия эксплуатационных факторов типа посторонних предметов, птиц внесли отечественные ученые, такие как Б. Ф. Шорр, П. А. Моссаковский, А. Г. Нарыжный, М. Ш. Нихамкин, Ножницкий Ю. А. и др., а также зарубежные ученые – М-А. Лавуа (M-A Lavoie), М. Ангилери (M. Anghileri), М. Селезнева (M. Selezneva), Дж. Фришбир (J. Frischbier) и др. Эти исследования сосредоточены на построении модели повреждаемости элементов конструкции ГТД от воздействия посторонних предметов-птиц. Исследования влияния эксплуатационных повреждающих воздействий на качество функционирования компрессора ГТД как лопаточной машины не проводились.

**Цель выполненного автором исследования является:** разработка методики, основанной на результатах численного моделирования влияния эксплуатационных повреждений (ЭП) лопаток компрессора ГТД на эффективность поврежденного компрессора, как лопаточной машины, и качества

функционирования поврежденного ГТД, обеспечивающая повышение безопасности полетов и эффективности применения поврежденного ГТД.

**Для достижения этой цели сформулированы и решены следующие научные задачи:**

1. Обобщение данных об эксплуатационных повреждениях лопаток компрессора на основании данных по эксплуатации современных ГТД.
2. Формирование основных направлений и этапов разработки методики.
3. Результаты исследования влияния ЭП на функционирование ТРДД с оценкой влияния ЭП лопаток компрессора на качество его функционирования.
4. Разработка рекомендаций научно-исследовательским, проектным и эксплуатирующим организациям по закономерности влияния эксплуатационных повреждений на изменение эффективности компрессора качества функционирования поврежденных компрессора и ГТД.

**Методы исследования:** Аналитический метод и метод численного моделирования.

Аналитический метод позволяет устанавливать функциональную связь параметров ГТД с его режимами работы.

Численное моделирование использовалось для установления закономерности влияния ЭП лопаток компрессора ГТД на эффективность поврежденного компрессора как лопаточной машины и качества функционирования поврежденного ГТД, а также на характер обтекания поврежденных лопаток и определение значения параметров воздушного потока во всех точках расчетной модели.

Методика численного моделирования основана на доработанном пакете коммерческих программ типа ANSYS, NUMECA Fine/Turbo.

**Научная новизна** диссертационной работы состоит в том, что:

1. Доказано влияние поврежденных лопаток компрессора на снижение эффективности его работы как лопаточной машины с помощью метода численного моделирования.
2. Уточнена закономерность влияния различных видов эксплуатационных повреждений компрессора низкого давления (КНД) на характеристики поврежденного компрессора.
3. Доказано, что только значительные эксплуатационные повреждения, определенного вида, лопаток КНД двухконтурного турбореактивного двигателя (ТРДД), оказывают влияние на характеристики поврежденного КНД и качество работы двигателя. Влияние регистрируется только в определенном диапазоне частот вращения ротора компрессора.

**Практическая значимость исследования** состоит в том, что его результаты позволяют:

- определить уровень и вид повреждения, влияющих на характер изменения местных значений  $\pi^*$ , КПД и запаса газодинамической устойчивости на всех рабочих режимах.

- оценить надежность ГТД.

- выявить опасные режимы работы поврежденного двигателя.

- оценить степень снижения запаса газодинамической устойчивости поврежденного КНД при работе в системе двигателя.

- рассчитать характеристику КНД с учетом уровня и вида повреждения.

- выявить изменения параметров КНД и ГТД в зависимости от уровня и вида повреждения.

### **Научные результаты, выносимые на защиту:**

1. Системный анализ повреждений элементов конструкции ГТД от действия ЭП в условиях эксплуатации.

2. Теоретические положения по обоснованию необходимости создания и разработки «Методики численного моделирования эксплуатационных повреждающих воздействий на качество функционирования компрессора ГТД».

3. Методика численного моделирования эксплуатационных повреждающих воздействий на качество функционирования компрессора ГТД.

4. Исследование влияния уровня повреждений лопатки в рабочем колесе первой ступени на качество функционирование КНД.

5. Исследование влияния геометрии забоин на характеристики КНД.

6. Исследование влияния количества забоин на входной кромке поврежденных лопаток на качество функционирования КНД.

7. Исследование влияния количества поврежденных лопаток рабочего колеса первой ступени на качество функционирования компрессора.

8. Исследование влияния расположения поврежденных лопаток рабочего колеса первой ступени на качество функционирования КНД.

9. Исследование влияния повреждений лопаток направляющего аппарата первой ступени на качество функционирования КНД.

10. Исследование влияния эксплуатационных повреждений в виде эрозионного износа поверхности пера лопаток компрессора и влияние увеличения радиального зазора от эрозионного износа поверхности торца пера лопаток на качество функционирования поврежденного ТРДД и КНД.

**Достоверность результатов исследования** определяется:

корректностью применения основных положений газовой динамики, подтверждается сходимостью результатов численного моделирования с экспериментальными данными.

### **Личный вклад автора.**

1. Автором разработаны:

- научно-методический подход построения модели повреждаемости ГТД на основе численного моделирования ЭП ГТД;



- методика численного моделирования эксплуатационных повреждающих воздействий на качество функционирования компрессора ГТД.

- математические модели.

2. Автором выполнены:

- системный анализ эксплуатационных повреждений авиационных ГТД;

- апробация разработанной автором методики на прототипе ТРДД с оценкой влияния уровня и характера забоин на входных кромках лопаток компрессора.

- апробация методики на ТРДД с оценкой влияния эксплуатационных повреждений в виде эрозийного износа лопаток компрессора, способствующего увеличению радиального зазора, на качество его функционирования;

- алгоритмическое обеспечение численного моделирования повреждаемости ГТД от поражающего воздействия ЭП.

3. Автор уточнил закономерности повреждаемости и стойкости ТРДД к поражающему воздействию ЭП

Все научные результаты получены самостоятельно.

#### **Апробация работы.**

Основные результаты исследований докладывались на всероссийской научной конференции с международным участием им. И. Ф. Образцова и Ю. Г. Яновского «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред» (2018), международном симпозиуме «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А. Г. Горшкова (Вятчи, 2019), 18-ой, 20-ой международных конференциях «Авиация и космонавтика» (2019, 2021), международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» Самарского университета (Самара, 2021).

#### **Публикации по теме диссертации.**

Основные научные результаты работы опубликованы в 9 печатных изданиях, в том числе: 2 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов диссертаций, одна статья в издании, включенном в международную систему цитирования SCOPUS, и одна статья в трудах международных и всероссийских конференций РИНЦ.

#### **Структура и объём диссертации.**

Диссертация состоит из введения, четыре главы, заключения, списка литературы из 96 наименований, содержит 140 рисунков, 3 таблицы. Общий объём работы 162 страницы, включая рисунки и таблицы.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.**

**Во введении** показаны и обоснованы актуальность работы, её цель, объект и предмет исследования, изложены научная новизна, практическая значимость, методы исследования и основные положения, которые выносятся на защиту.

**В первой главе** приведен анализ повреждений элементов конструкции ГТД от действия ЭП в условиях эксплуатации.

Изменение технического состояния двигателя в условиях эксплуатации, в большинстве случаев, происходит в результате повреждений лопаток компрессора двигателя в виде забоин, вмятин с искривлением входной кромки, пластических деформаций пера лопатки- загиб уголка на передней и задней кромках лопаток, вмятин на поверхности пера. При взаимодействии таких частиц размером менее 0,4 мм с лопатками компрессора происходит повреждение лопаток в виде эрозии поверхностей пера, входной и выходной кромок лопаток.

**Во второй главе** приведены теоретические положения по обоснованию необходимости создания и разработки «Методики численного моделирования эксплуатационных повреждающих воздействий на качество функционирования компрессора ГТД».

При оценке поведения воздушного потока его рассматривают как воздушный поток, состоящий из отдельных струй. Принято, что связь между струями потока осуществляется силами трения между струями и характеризуется значениями расходной составляющей воздушного потока, тогда силу взаимодействия между струями можно оценить с помощью выражения (1)

$$F_{\text{взим}} = f \cdot C_{1a}, \quad (1)$$

где  $f$  - коэффициент, характеризующий силу трения между струями потока и процесс генерации нерасчетного потока, обтекаемый поврежденные лопатки.

Если изменение сил взаимодействия струй по толщине потока, от места повреждения лопаток, соответствует экспоненциальному закону, то для экспоненциального закона, силу взаимодействия между струями  $F_{\text{взим}}$  можно определить с помощью выражения (2)

$$F_{\text{взим}} = F_0 e^{k \cdot x}, \quad (2)$$

где  $k$  - коэффициент, характеризующий процесс генерации нерасчетного потока, обтекающего поврежденные лопатки, в зависимости от значений параметров воздушного потока, протекающего в смежных межлопаточных каналах;  $x$ - текущее значение координаты, определяющее расположение сил трения по толщине потока.

Из выражения (2) также следует:

$$\text{если } x=0, \text{ то } F_0 = f \cdot C_{1\text{аповр}},$$

где  $C_{1\text{аповр}}$  - расходная составляющая в зоне повреждения лопаток;

$$\text{если } x=h_{\text{поток}}, \text{ то } F_{\text{взим}} = f C_{1\text{аповр}} e^{k \cdot h_{\text{поток}}}.$$

В зоне не поврежденных лопаток на расстоянии, меньше, чем высота межлопаточного канала, где нерасчетный поток встречается с расчетным потоком, происходит выравнивание сил трения и расходной составляющей потоков.

Повреждение входных кромок рабочих лопаток компрессора в виде забоин приводит к уменьшению абсолютного значения расходной составляющей скорости

$$Dc_{1a} = (c_{1a})_{d=0} - (c_{1a})_{d=d} \quad (3)$$

Аналитически это уменьшение определяется соотношением

$$\Delta c_{1a} = (c_{1a} \Delta F) / F_k, \quad (4)$$

где  $F_k$  - площадь проходного сечения межлопаточного канала решетки между сечениями, где возможно повреждение;  $\Delta F$  - изменение  $F_k$  из-за повреждения лопатки в виде забоины.

Так как значение  $c_{1a}$  зависит от режима работы ГТД, то это означает, что эффект влияния повреждения лопаток компрессора на эффективность его работы будет зависеть не только от значения глубины забоины, но и от режима работы ГТД, а также конструкции его компрессора. Из анализа выражения  $Dc_{1a}$  следует, что:

- значение  $Dc_{1a}$  является функцией  $c_{1a}$  и режима работы ГТД при одном и том же уровне повреждения;
- значение  $Dc_{1a}$  увеличивается с ростом уровня повреждения при одном и том же значении  $c_{1a}$ ;
- относительный уровень повреждения  $\Delta F / F_k$  определяется конструкцией компрессора.

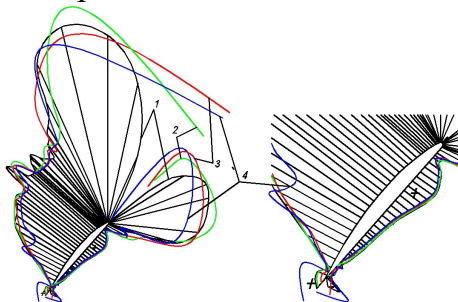


Рис. 1. Распределение давлений по профилю: 1 -  $\delta=0$  мм, 2 -  $\delta=0,1$  мм, 3 -  $\delta=0,2$  мм, 4 -  $\delta=0,3$  мм.

Повреждения элементов конструкции двигателя способствуют изменению его технического состояния, что приводит к нарушению расчетных условий ГТД и не выполнению двигателем его работы с требуемым качеством функционирования и эффективностью компрессора. Возникает изменение спектра нагрузок, действующих на лопатки и рассогласование ступеней компрессора, причем наибольшее

рассогласование происходит на его первых и последних ступенях.

В качестве критерия используется соотношение в виде

$$\Delta k = 1 - \frac{G_{Bi}}{G_{\text{врасчет}}}, \quad (5)$$

где  $G_{Bi}$  - значение расхода воздуха, переменного в зависимости от имеющегося расстояния до границы помпажа.

**Третья глава** посвящена разработке «Методики численного моделирования эксплуатационных повреждающих воздействий на качество функционирования компрессора ГТД».

Повреждаются входные кромки и перо лопаток КНД. В случае повреждения входной кромки лопаток компрессора уменьшается хорда, изменяются радиус входной кромки и угол атаки. Это обстоятельство приводит к изменению характера обтекания рабочих лопаток и лопаток направляющего аппарата и к уменьшению запаса газодинамической устойчивости КНД, определяемого как  $\Delta K_y = (K_y - 1)100\%$ , (6)

где 
$$K_y = \frac{\pi_{к.гр}^* / G_{в.пр.г}}{\pi_{к.раб}^* / G_{в.пр.раб}}$$
, индексы "гр" и "раб" соответствуют значениям

параметров на границе устойчивости и на линии рабочих режимов для одной и той же напорной ветви характеристики колеса, т.е. для определенной кривой с  $n_{пр} = const$ .

В данной главе предложена методика исследования трёхмерного течения потока в поврежденном компрессоре с использованием CFD-код NUMECA Fine/Turbo, реализующая численное решение уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу, если турбулентность характеризуется однопараметрической моделью турбулентности Spalart-Allmaras.

Разработанная методика обеспечивает проведение исследований поврежденного КНД ГТД с необходимой точностью при относительно небольших вычислительных ресурсах и включает в себя следующие операции:

- 1) выбор прототипа ГТД.
- 2) построение расчетной геометрической модели поврежденного компрессора ТРД.
- 3) профилирование сверхзвуковых лопаток КНД ГТД.
- 4) построение сетки, обеспечивающей расчет характеристик поврежденного компрессора, с учетом числа поврежденных лопаток, их расположения в рабочем колесе, уровня и вида повреждения.
- 5) выбор модели турбулентности.
- 6) построение расчетной модели поврежденного компрессора.

При выборе прототипа ГТД в качестве исходного варианта двигателя выбран ТРДД типа РД-33.

В основу разработанной методики профилирования сверхзвуковых лопаток компрессора положены современные требования, предъявляемые к профилированию сверхзвуковых лопаток КНД и условия, обеспечивающие:

- 1) формирование скорости потока в относительном движении на входе в рабочее колесо в диапазоне  $> 1,0$ ;

2) формирование с помощью дуг окружностей (или параболических или гиперболических кривых, лемнискат Бернули или кривых более высокого порядка) средней линии сверхзвукового профиля, спинки профиля и вогнутой части лопатки;

3) формирование значение кривизны поверхности спинки на начальном участке, позволяющей стабилизировать скачки уплотнения в этой области, обеспечение высокого значения КПД сжатия и исключение отрыва пограничного слоя;

4) индивидуальное построение профиля лопатки по высоте в каждом расчетном сечении и исключение использования единого базового профиля определенного семейства;

5) построение профиля сверхзвуковой лопатки рабочего колеса КНД с использованием программы Autodesk Inventor 2019 для сверхзвуковой 3D-модели лопатки.

Разработанная методика включает в себя методику построения сетки численного моделирования эксплуатационных повреждений рабочих лопаток ротора КНД ТРД и выполнение следующих обязательных операций:

#### **Выбор расстояния до стены от ближайшей точки сетки.**

Соотношение между безразмерным значением  $y^+$  и расстоянием до стены, от ближайшей точки сетки, определялось с использованием уравнения Блазиуса. Для турбулентных течений. Уравнение Блазиуса принимает в виде:

$$Y_{wall} = 6 \left( \frac{V_{ref}}{\nu} \right)^{\frac{7}{8}} \left( \frac{L_{ref}}{2} \right)^{\frac{1}{8}} y^+, \quad (7)$$

где

- $Y_{wall}$  - расстояние до стены от ближайшей точки сетки, (м);
- $V_{ref}$  - характер скорости потока, например, скорость на входе (м/с);
- $\nu$  - кинематическая вязкость жидкости ( $\text{м}^2/\text{с}$ ) - отношение динамической вязкости к плотности жидкости;
- $L_{ref}$  - характерные размеры лопатки - длина, высота лопатки;
- $y^+$  - безразмерная величина.

Если  $V_{ref} = 425$  м/с,  $L_{ref} = 0,05$  м,  $\nu = 1,466 \times 10^{-5}$   $\text{м}^2/\text{с}$ ,  $y^+ = 2$ , то  $Y_{wall} = 3 \times 10^{-7}$  м. В работе принято  $Wall Cell Width = 3 \times 10^{-7}$  м.

#### **Выбор модели турбулентности.**

Модель турбулентности выбирается в соответствии с рекомендациями NUMECA и место положения до ближайшей точки сетки, вдоль стены, на расстоянии, соответствующем безразмерному значению  $y^+$ , в диапазоне 1...5 (для моделей с низким числом Рейнольдса) или 30...50 (для моделей с высоким числом Рейнольдса). В случае, тепловых эффектов, значение  $y^+$  принимают 0,1.

### **Выбор сеточной топологии.**

В модуле AutoGrid5™ топология О4Н по умолчанию использованы дополнительные восходящие/нисходящие Н-блоки. Топология О4Н по умолчанию включает в себя 5 блоков: пристеночный блок, представляющий собой О-сетку, окружающую лопатки; входной блок, представляющий собой Н-сетку, расположенную перед входной кромкой; выходной блок, представляющий собой Н-сетку, расположенную за выходной кромкой; верхний блок, представляющий собой Н-сетку, расположенную над профилем лопатки; нижний блок, представляющий собой Н-сетку, расположенную под профилем лопатки.

### **Построение сетки в зоне поврежденных лопаток.**

В зоне поврежденных лопаток сетка строится с учетом уровня и вида (формы) повреждения с использованием контрольной точки в окне «от лопатки к лопатке» (View B2B). Положение контрольной точки определяет конфигурацию сетки (рис. 2). Если повреждение имеет вид забоины, то для получения сетки контрольная точка располагается в середине забоины.

### **Построение сетки с учетом расположения поврежденных лопаток в рабочем колесе.**

Не доработанный модуль AutoGrid5™ коммерческого программного продукта NUMECA Fine/Turbo позволяет строить сетку только для отдельного не поврежденного модуля рабочего колеса или направляющего аппарата. Поэтому доработка модуля выполнена таким образом, чтобы использовать его при формировании рабочего колеса с поврежденными лопатками. В каждом модуле сетка строится с периодичностью по одному оригинальному сектору, в который импортируется отдельно геометрия лопаток. Поэтому моделирование влияния эксплуатационных повреждения лопаток КНД на эффективность работы КНД с использованием программного продукта NUMECA Fine/Turbo проведено в зависимости от числа секторов, построенных с определенным количеством поврежденных лопаток, импортированных из оригинального сектора.

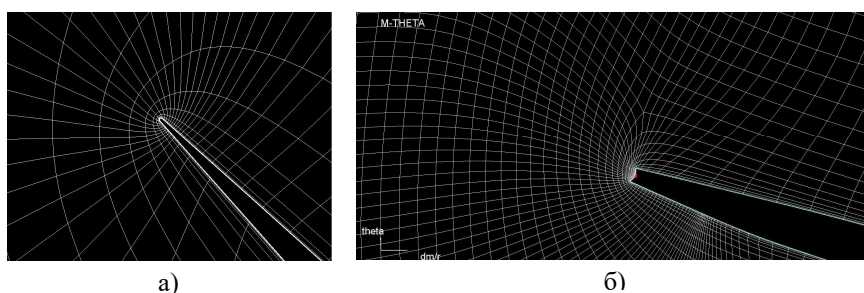


Рис.2. Сетка конечных объемов для численной модели поврежденной лопатки: Повреждение в виде забоины входной кромки лопатки рабочего колеса первой ступени КНД : а- лопатка не повреждена; б- лопатка повреждена

Если в качестве прототипа принять ТРДД, у которого рабочее колесо первой ступени КНД выполнено с 28 лопатками, то построение сетки рабочего колеса с

помощью доработанного модуля AutoGrid5™ может быть проведено с использованием следующих вариантов:

- 28 секторов. В каждом секторе одна неповрежденная или поврежденная лопатка. Это соответствует случаю, когда отсутствуют повреждения лопаток или когда все лопатки повреждены;

- 14 секторов. В каждом секторе представлена одна поврежденная лопатка, что соответствует повреждению 14 лопаток;

- 7 секторов. В каждом секторе повреждена одна лопатка. Это соответствует повреждению 7-ми лопаток;

- 4 сектора. В каждом секторе повреждена одна лопатка. Это соответствует случаю, когда повреждены 4 лопатки (рис. 3).

### **Построение сетки с учетом вида эксплуатационных повреждений лопаток КНД ТРД.**

В результате эксплуатационных повреждений лопаток компрессора происходит изменение конфигурации поперечного сечения лопатки, вызывающее изменение формы лопатки по высоте, радиуса кривизны, что требует учета этого обстоятельства при построении сетки. Учет изменения формы сетки по высоте обеспечивается модулем AutoGrid5™ через линии входной и выходной кромок и выбором расположения контрольной точки. При изменении конфигурации поперечного сечения на определенной высоте, для получения сетки контрольная точка в окне «от лопатки к лопатке» (View B2B) располагается в середине забоины (рис. 2).

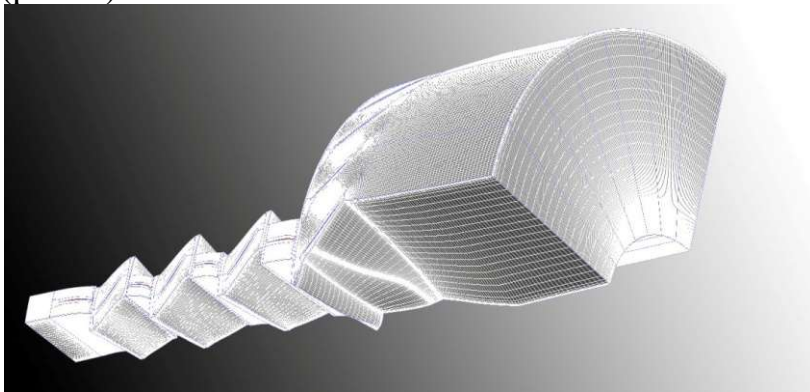


Рис. 3. Расчетная сетка КНД для случая, когда сетка рабочего колеса первой ступени состоит из 4 секторов

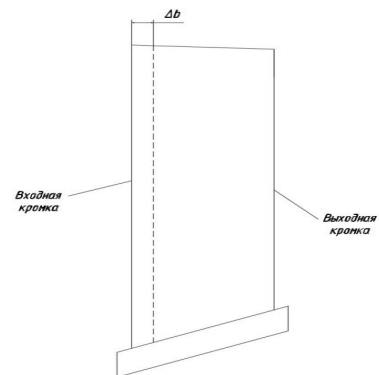


Рис. 4. Модель поврежденной лопатки в виде забоины на входной кромке лопатки

### **Построение модели поврежденной лопатки.**

Если лопатка КНД повреждена в виде забоины, то модель поврежденных лопаток строится с учетом уменьшения хорды лопаток КНД в зависимости от формы и уровня повреждения (рис. 4). Трехмерная геометрия лопатки построена по поперечным сечениям, включая поврежденные и неповрежденные сечения, так что форма лопатки похожа на реальную при её повреждении.

### **Построение сетки с учетом уровня повреждения лопаток КНД.**

Учет уровня повреждения лопаток (рис. 4) при построении сетки проводился в соответствии с моделью поврежденной лопатки.

При уменьшении хорды лопаток появляется разница между структурами сетки в поврежденной и неповрежденной зонах (рис. 2). В окне «от лопатки к лопатке» (View B2B) контрольная точка сетки в поврежденной зоне перемещается к середине забоины.

#### **Построение сетки с учетом количества поврежденных лопаток в рабочем колесе КНД.**

Сетка строится в зависимости от вариантов секторов:

- 28 секторов. В каждом секторе одна неповрежденная лопатка, если количество поврежденных лопаток равно 0.
- 4 сектора. В каждом секторе представлена только одна поврежденная лопатка, если количество поврежденных лопаток равно 4.
- 7 секторов. В каждом секторе повреждена только одна лопатка, если количество поврежденных лопаток равно 7.
- 14 секторов. В каждом секторе повреждена только одна лопатка если количество поврежденных лопаток равно 14.
- 28 секторов. В каждом секторе одна поврежденная лопатка, если количество поврежденных лопаток равно 28.

#### **Построение сетки с учетом вида расположения поврежденных лопаток в рабочем колесе КНД.**

Если количество поврежденных лопаток равно 14 и каждая поврежденная лопатка расположена между двумя неповрежденными лопатками, то сетка строится по варианту 14-ти секторов. В каждом секторе представляется одна поврежденная лопатка и одна неповрежденная лопатка.

Если число поврежденных лопаток равно 14 с последовательным расположением двух поврежденных лопаток между двумя неповрежденными лопатками, то сетка строится по варианту 7 секторов. В каждом секторе представлены две поврежденные и две неповрежденные лопатки в определенном порядке.

#### **Построение сетки с учетом изменения (уменьшения) хорды профиля лопатки, угла атаки $\beta_1$ и высоты межлопаточного канала.**

При построении сетки с учетом уменьшения хорды профиля лопатки, угла атаки и высоты межлопаточного канала, контрольная точка в окне «от лопатки к лопатке» (View B2B) располагается в середине забоины (рис. 2б) и сетка реструктурируется.

#### **Оценка характера обтекания профиля поврежденной рабочей лопатки.**

Программы типа CFD-код NUMECA Fine/Turbo. Эти программы позволяют проводить оценку: характера обтекания профиля поврежденной рабочей лопатки для различных видов эксплуатационных повреждений; роста гидравлических



потерь; снижения эффективности процессов сжатия в зависимости от вида и уровня повреждений. (рис.8) и др.

### Построение расчетной модели поврежденного компрессора.

Расчетная модель поврежденного компрессора низкого давления строится на основании данных КНД прототипа ТРД с использованием доработанных программ типа CFD-код NUMECA Fine/Turbo. Для сравнения характеристик используется модель неповрежденного компрессора.

### Оценка изменения значений параметров поврежденного компрессора.

Использование разработанной методики позволяет провести оценку изменения значений всех параметров поврежденного компрессора и ТРД, с учетом особенностей повреждения двигателя и КНД, в частности: 1. Уточнить закономерности влияния видов эксплуатационных повреждений лопаток КНД, необходимые для построения расчетной модели поврежденного компрессора. 2. Построить сетки поврежденного компрессора, учитывающие характер повреждения, а также характеристики компрессора. 3. Оценить надежность поврежденного ТРДД. 4. Выявить опасные режимы работы поврежденного двигателя. 5. Определить ресурс поврежденной лопатки. 6. Оценить степень снижения запаса газодинамической устойчивости поврежденного КНД при работе в системе двигателя.

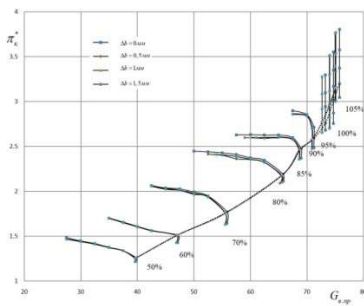


Рис. 5. Изменение положения напорных кривых компрессора в зависимости от повреждений лопаток рабочего колеса первой ступени КНД, в виде забоины

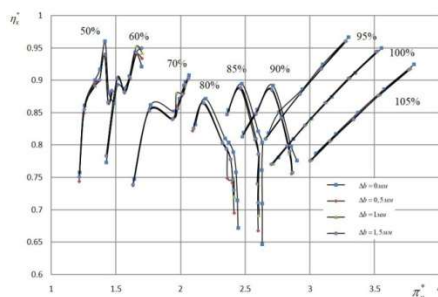


Рис. 6. Изменение значений КПД компрессора в зависимости от режима работы, уровня повреждения лопаток рабочего колеса первой ступени КНД, в виде забоины (количество поврежденных лопаток на рабочем колесе – 14)

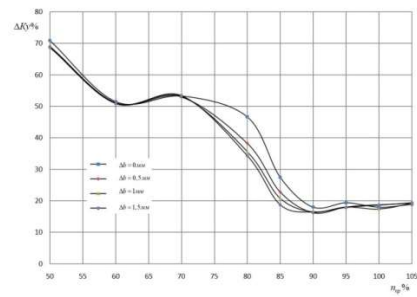
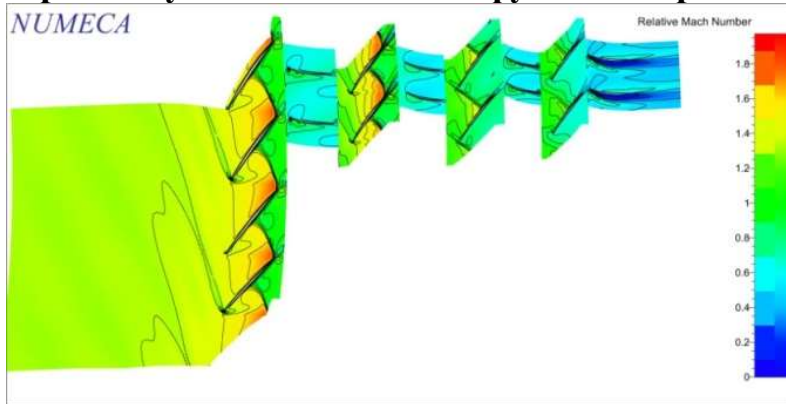


Рис. 7. Изменение запаса газодинамической устойчивости компрессора в зависимости от уровня их повреждения в виде забоины на входной кромке треугольной формы на высоте среднего сечения лопатки рабочего колеса первой ступени КНД (количество поврежденных лопаток на рабочем колесе - 14).

Уменьшение хорды лопаток способствует изменению местных значений  $\pi^*$  и КПД (рис.5, 6). Значение  $\Delta K_y$  уменьшается с ростом уровня повреждения -  $\Delta b$ . Максимальное снижение запаса газодинамической устойчивости регистрируется на определенном режиме ( $n=80\%$ , и  $n=85\%$ ), если повреждения рабочих лопаток компрессора КНД представляются в виде забоины треугольной формы на входной кромке на высоте среднего сечения лопатки, а количество поврежденных лопаток равно 14 (рис.7).

В четвертой главе представлены практические результаты исследования поврежденного ТРДД от действия ЭП в условиях эксплуатации с использованием разработанной методики, разработка рекомендаций.

**Исследование влияния уровня повреждений лопатки рабочего колеса первой ступени на качество функционирование компрессора КНД.**



Доказано, что только значительные эксплуатационные повреждения, определенного вида, лопаток КНД ТРДД, оказывают влияние на характеристики поврежденного КНД и качество работы двигателя. Влияние регистрируется только в определенном диапазоне частот вращения ротора компрессора.

Рис. 8. Характер обтекания поврежденных лопаток КНД. Повреждения в виде забоины глубиной 6,0 мм в периферийном сечении

Для исследуемого ТРДД - на режимах  $n_{пр}=80\%$ , и  $n_{пр}=85\%$ . Нарушение характера обтекания поврежденных лопаток КНД, в виде забоин глубиной  $>6,0$  мм на входной кромке, приводит к изменению расхода воздуха в межлопаточных каналах и к значительному ухудшению характеристик КНД (рис. 8).

**Исследование влияния геометрии забоин на характеристики КНД.** Для исследования влияния геометрии забоин на характеристики КНД приводятся расчеты для треугольной, окружной и прямоугольной забоин в высоте  $h/2$  при одном и том же уровне повреждения  $\Delta b=1.5$  мм (рис .9).

**Влияния количества забоин во входной кромке поврежденных лопаток на качество функционирование КНД.** Для исследования влияния количества забоин во входной кромке поврежденных лопаток на характеристики КНД рассматриваются три случая: во входной поврежденных лопаток существуют одна, две и три треугольных забоин с уровнем  $\Delta b=1,5$  мм (рис .10).

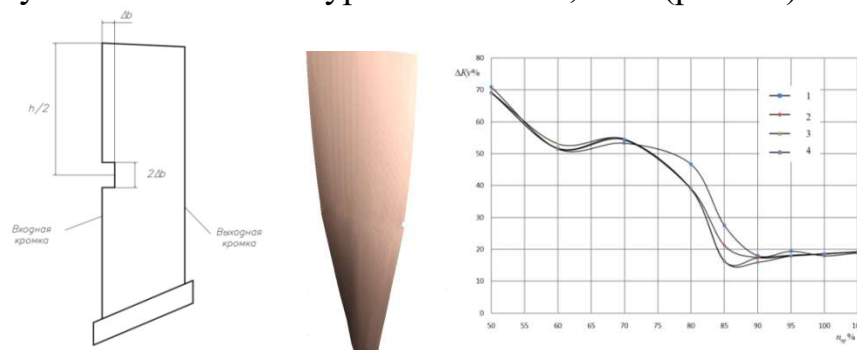


Рис. 9. Модель поврежденных лопатки в виде прямоугольной забоины и влияние геометрии забоин на запас газодинамической устойчивости КНД. 1- неповрежденное, 2- окружная забоина, 3- прямоугольная забоина, 4- треугольная забоина.

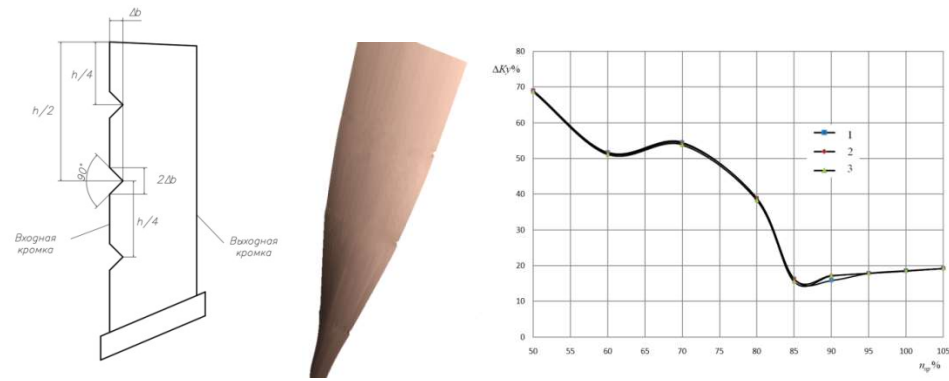


Рис. 10. Модель поврежденных лопатки с тремя забоинами и влияние количества забоин на входной кромке поврежденных лопаток на запас газодинамической устойчивости КНД. 1- одна забоина, 2- две забоины, 3- три забоины.

Влияние количества поврежденных лопаток рабочего колеса первой ступени, расположения поврежденных лопаток рабочего колеса первой ступени, повреждений лопаток направляющего аппарата первой ступени и одновременных повреждений лопаток рабочего колеса и направляющего аппарата первой ступени на качество функционирование КНД показаны на рис.11-14.

**Исследование влияния радиального зазора на качество функционирование компрессора КНД** выполнено путем присвоения значений радиальному зазору в этапе построении сетки в модуле Autogrid программы NUMECA.

Для оценки влияния радиального зазора на качество функционирования осевого компрессора в данной работе проводились расчеты для трех значений радиального зазора  $\Delta r = 0,5; 1,0; 1,5$  мм (рис.15).

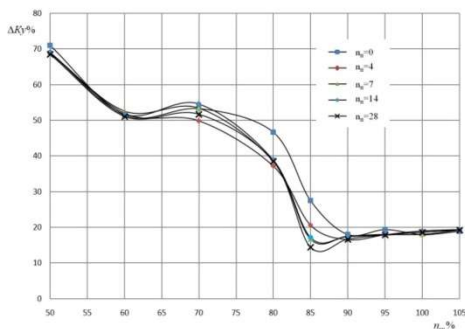


Рис. 11. Влияние количества поврежденных лопаток рабочего колеса первой ступени на запас газодинамической устойчивости КНД.

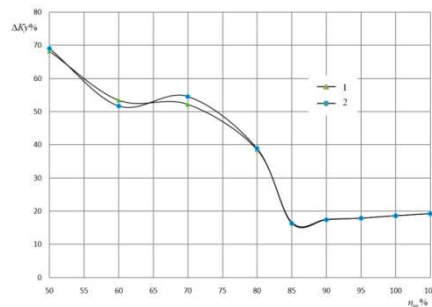


Рис. 12. Влияние расположения поврежденных лопаток рабочего колеса первой ступени на запас газодинамической устойчивости КНД. 1- последовательное расположение, 2- непоследовательное расположение.

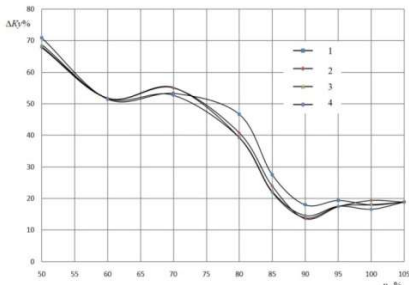


Рис. 13. Влияние повреждения лопаток НА первой ступени в виде треугольной забоины на запас газодинамической устойчивости  $\Delta K_y$  КНД (1-  $\Delta b = 0$ , 2-  $\Delta b = 0,5$  3-  $\Delta b = 1$ , 4-  $\Delta b = 1.5$  мм).

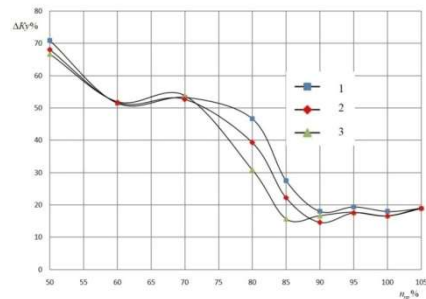


Рис. 14. Влияние повреждения лопаток на запас газодинамической устойчивости  $\Delta K_y$  КНД (1- неповрежденный КНД, 2- повреждение только в направляющем аппарате, 3- одновременное повреждение лопаток рабочего колеса и направляющего аппарата первой ступени)

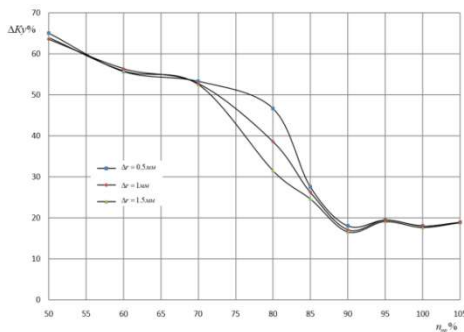


Рис. 15. Влияние радиального зазора на запас газодинамической устойчивости  $\Delta K_y$  КНД.

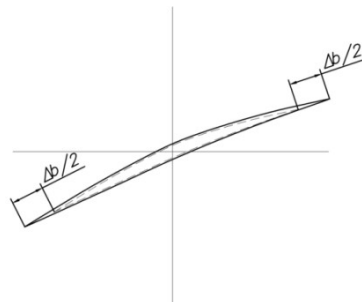
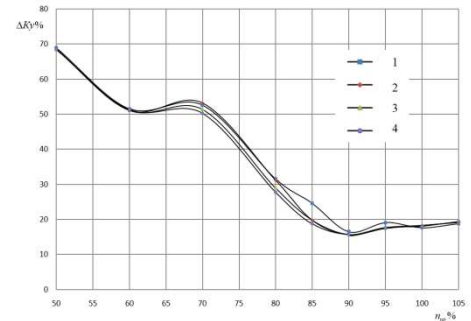


Рис. 16. Модель равномерного износа профиля и влияние равномерного износа профиля рабочего колеса первой ступени на запас газодинамической устойчивости  $\Delta K_y$  КНД.



### **Влияние равномерного эрозионного износа профиля лопатки на характеристики КНД двигателя.**

В случае равномерного износа геометрия профиля изнашивается равномерно по слоям. Модель равномерного износа показана на рис. 16.

### **Влияние неравномерного эрозионного износа профиля лопатки на характеристики КНД.**

При неравномерном эрозионном износе геометрия профиля изнашивается не равномерно по слоям, а только в конкретной зоне профиля (рис. 17). В этом случае уменьшение длины хорды и увеличение радиуса входной кромке приводят к ухудшению качества функционирования компрессора. Исследован случай неравномерного эрозионного износа на всех сечениях лопатки, при котором уменьшение длины хорды  $\Delta b = 1,5$  мм и радиус входной кромки увеличивается с 0,02 мм до 0,1 мм.

### **Влияние суммирования эрозионного износа и забоины на качество функционирования КНД.**

На рис.18 показано сравнение результатов расчёта для рабочего колеса первой ступени, первой ступени и КНД в соответствии со случаями: 1- не

повреждены, 2- повреждены с радиальным зазором 1,5 мм, 3- суммирование радиального зазора 1,5 мм и равномерного износа профиля  $\Delta b_{из} = 1,5\text{мм}$ , и 4- суммирование радиального зазора, равномерного эрозионного износа профиля лопатки и забоины на выходной кромке.

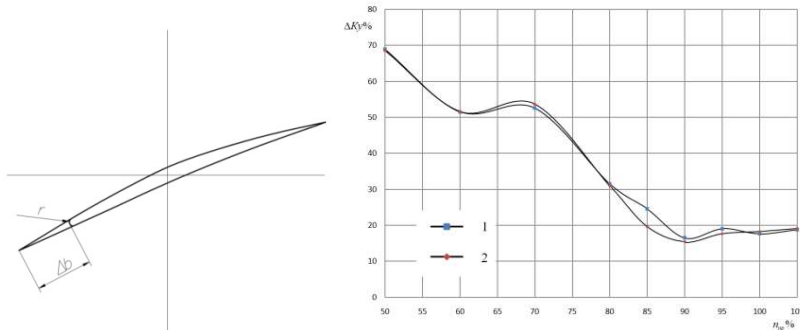


Рис. 17. Модель износа на входной кромке и влияние неравномерного эрозионного износа профиля лопатки на запас газодинамической устойчивости  $\Delta K_y$  КНД. 1-  $\Delta b = 0$  мм,  $r = 0,02$  мм 2-  $\Delta b = 1,5$  мм,  $r = 0,1$  мм.

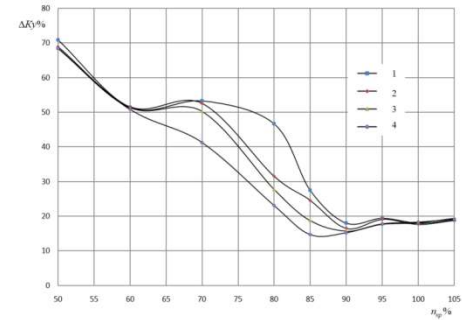


Рис. 18. Влияние суммирования поврежденных факторов на запас газодинамической устойчивости  $\Delta K_y$  КНД.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Эксплуатационные повреждения лопаток компрессора приводят к увеличению числа аварий и катастроф, а также к увеличению числа съема двигателей с эксплуатации, снижению уровня исправности парка двигателей и безопасности полетов ВС.

2. Создание методик моделирования эксплуатационных повреждений элементов конструкции авиационных ГТД позволит уменьшить число съема авиационных ГТД с эксплуатации, из-за эксплуатационных повреждений.

3. Повреждение рабочих лопаток компрессора приводит к изменению расходной составляющей осевой скорости воздушного потока на входе в ступень.

4. Повреждение входной кромки лопатки, в виде забоины глубиной  $\delta = 0,3$  мм, дно которой представляет собой плоскость, приводит к уменьшению осевой скорости по спинке профиля в среднем до 25 %.

5. С увеличением уровня повреждения возрастает интенсивность турбулизации пограничного слоя.

6. Влияние повреждений лопаток компрессора целесообразно оценивать комплексно, как с учетом влияния на снижение усталостной прочности поврежденных лопаток, так и с учетом влияния поврежденных лопаток компрессора на снижение эффективности его работы как лопаточной машины.

7. Изменение поведения и свойств конструкции лопаток определяет взаимодействие поврежденной конструкции лопаток с воздушным потоком, падение уровня значений КПД компрессора и изменение спектра нагрузок, действующих на лопатки.

8. Использование доработанного коммерческого программного продукта NUMECA Fine/Turbo позволяет: уточнить закономерность влияния различных

видов эксплуатационных повреждений лопаток КНД на характеристики поврежденного компрессора, как лопаточной машины; оценить уровень и вид повреждения, влияющих на характер изменения местных значений  $\pi^*$ , КПД и запаса газодинамической устойчивости на всех рабочих режимах; оценить надежность ТРДД; выявить опасные режимы работы поврежденного двигателя; оценить степень снижения запаса газодинамической устойчивости поврежденного КНД при работе в системе двигателя; рассчитать характеристику КНД с учетом уровня и вида повреждения, выявить изменения параметров КНД и ТРДД в зависимости от уровня и вида повреждения.

9. Исследования поврежденного КНД прототипа ТРДД позволили выявить следующее:

9.1. Повреждения в виде забоины лопатки при попадании в двигатель ПП или птицы рабочего колеса или направляющего аппарата приводят к уменьшению местных значений  $\pi^*$ , КПД и запаса газодинамической устойчивости всех режимов. С увеличением уровня повреждения лопаток уменьшается запас газодинамической устойчивости.

- Если повреждены только лопатки рабочего колеса первой ступени и уровень повреждения равен 1,5мм, уменьшение запаса газодинамической устойчивости регистрируется на режимах  $n_{пр}=80\%$ , и  $n_{пр}=85\%$ .

- Если повреждены только лопатки направляющего аппарата первой ступени и уровень повреждения равен 1,5мм уменьшение запаса газодинамической устойчивости регистрируется на режимах  $n_{пр}=80\%$ , 85%, 90%.

- При одновременном повреждении лопаток рабочего колеса и направляющего аппарата первой ступени уменьшение запаса газодинамической устойчивости КНД регистрируется на режимах  $n_{пр}=80\%$ , 85%, 90%, 95%, 100%.

9.2. Геометрия забоины влияет на качество функционирования компрессора. Уменьшение запаса газодинамической устойчивости при повреждении в виде окружной забоины меньше, чем при повреждении в виде прямоугольной и треугольной забоинах.

9.3. Увеличение количества поврежденных лопаток приводит к уменьшению газодинамической устойчивости компрессора. Для КНД исследуемого ТРДД с увеличением количества поврежденных лопаток газодинамическая устойчивость уменьшается значительно в режимах  $n_{пр}=70\%$ , 80%, 85%.

9.4. При последовательном расположении поврежденных лопаток в рабочем колесе КНД газодинамическая устойчивость компрессора уменьшается в меньшей степени по сравнению с непоследовательным расположением поврежденных лопаток. Изменения происходят за счет возрастания интенсивности турбулизации в пограничном слое.

9.5. Увеличение количества забоин на входной кромке поврежденных лопаток приводит к уменьшению запаса устойчивости.

9.6. Радиальный зазор и эрозионный износ лопаток приводят к уменьшению местных значений  $\pi^*$ , КПД и запаса газодинамической устойчивости всех режимов.

9.7. Под действием радиального зазора в зоне зазора и на выходной кромке возникают срыв и вихрь потока. При значении радиального зазора  $\Delta r = 1,5$  мм уменьшение газодинамической устойчивости регистрируется существенно более заметным на режиме  $n_{пр}=80\%$  на величину 32,46%.

9.8. Эрозионный износ лопаток по профилям или по высоте вызывает изменение конструкции межлопаточных каналов. В его результате ухудшается качество функционирования компрессора, т.е. уменьшается газодинамическая устойчивость.

9.9. С накоплением изношенных факторов уменьшается запас газодинамической устойчивости. Суммирование эрозионного износа и забоины приводит к уменьшению газодинамической устойчивости компрессора значительно на режимах  $n_{пр}=70\%$ ,  $n=80\%$ , и  $n=85\%$ .

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в рецензируемых научных изданиях и публикации, приравненные к ним**

1. Сиротин Н. Н., Нгуен Тхань Шон. Методика численного моделирования эксплуатационных повреждений рабочих лопаток ротора компрессора низкого давления турбореактивного двигателя // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 4. С. 131-150.

2. Сиротин Н. Н., Нгуен Тхань Шон, Журинский А. А. Численное моделирование эксплуатационных повреждений лопаток компрессора авиационного ТРДД типа РД-33, зависящие от условий эксплуатации и определяющие эффективность компрессора, качество функционирования двигателя и безопасность полетов ВС // Научно-технический журнал «Авиационная промышленность». № 1-2-2022г. С. 92-101.

3. Nguyen Thanh Son, Sirotin N. N, Research on clarification and identification of new regularities of change in the functioning quality of the compressor of the engine type RD-33 from the damaging effect of operating factors based on numerical simulation data // Journal of Mechanical Engineering Research and Developments, ISSN: 1024-1752, Vol. 44, No. 11, pp. 123-131. Published Year 2021.

### **Другие публикации**

1. Сиротин Н. Н., Нгуен Тхань Шон. Влияние эксплуатационных повреждений авиационного компрессора на качество его функционирования // Сборник трудов 8-й Всероссийской научной конференции с международным участием им. И. Ф. Образцова и Ю. Г. Яновского «механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред». 18-19 декабря 2018 г. С.96-100.



2. Сиротин Н. Н., Нгуен Тхань Шон. Влияние эксплуатационных повреждений авиационного компрессора на качество его функционирования // Сборник тезисов докладов 8-й Всероссийской научной конференции с международным участием им. И. Ф. Образцова и Ю. Г. Яновского «Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред». 18-19 декабря 2018 г. С.57.

3. Сиротин Н. Н., Нгуен Тхань Шон. Моделирование эксплуатационных повреждений компрессора авиационных ГТД // XXV международный симпозиум «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А. Г. Горшкова. Тезисы докладов. (Вятчи, 18-22 марта 2019 г). Том 2. С.126-127.

4. Сиротин Н. Н., Нгуен Тхань Шон. Методика моделирования эксплуатационных повреждений компрессора авиационных ГТД // 18-я международная конференция «Авиация и космонавтика – 2019» МАИ С.63-64.

5. Сиротин Н. Н., Нгуен Тхань Шон. Методика моделирования эксплуатационных повреждений компрессора низкого давления ТРДД типа РД-33 на качество функционирования поврежденного компрессора и надежность двигателя // Сборник докладов международной научно-технической конференции. «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». 23-25 июня 2021 года Самарского университета. Том 1. С.34-36.

6. Сиротин Н. Н., Нгуен Тхань Шон. Моделирование влияния эксплуатационных повреждений рабочих лопаток компрессора низкого давления авиационных ГТД на качество функционирования поврежденного компрессора и надежность двигателя// 20-я международная конференция «Авиация и космонавтика – 2021» МАИ С.129-130.