

На правах рукописи



Шахов Александр Сергеевич

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ДИНАМИКИ И ПРОЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ
КОМПРЕССОРА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ С
УЧЕТОМ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ОТКЛОНЕНИЙ**

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)» на кафедре «Конструкция и проектирование двигателей».

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент
Архипов Александр Николаевич

Официальные оппоненты:

Матвиенко Юрий Григорьевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, заведующей отделом прочности, живучести и безопасности машин

Лежин Дмитрий Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», доцент кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов

Ведущая организация:

Государственный научный центр, федеральное автономное учреждение «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова»

Защита состоится «28» декабря 2022 г. в 10:00 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 федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»: https://mai.ru/upload/iblock/6d9/3d4j0pok3xkguo0zg1s69ycrxxmed598/Dissertatsiya_Final_4_P.pdf

Автореферат разослан « _____ » _____ 2022 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.2.327.06

доктор технических наук, доцент



Краев Вячеслав Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации.

Проектирование современных авиационных двигателей является наукоемким, технически сложным и высокочувствительным процессом. Совершенствование газотурбинных двигателей (ГТД) подразумевает повышения параметров рабочего цикла, что приводит к возрастанию эксплуатационных нагрузок на детали и узлы двигателя. При создании двигателей особое внимание уделяется их надежности, которая обеспечивается подтверждением ресурса с помощью испытаний узлов и деталей при предельных нагрузках.

Одной из важных задач при проектировании ГТД для гражданской авиации является необходимость обеспечения ресурса и надежности вентилятора и компрессора более 20000 циклов, при одновременном снижении удельной массы, расхода топлива и увеличении удельной тяги. Ограничения по ресурсу двигателя, в первую очередь, определяется высоконагруженными роторными деталями, такими как лопатки, диски и барабаны вентилятора и компрессора. Обеспечение заданного ресурса и надежности требует повышения точности расчетов напряженно-деформированного состояния (НДС) и динамики деталей ГТД, для этого эффективно применяются современные вычислительные комплексы, основанные на расчете двух- и трехмерных конечно-элементных моделей с номинальными размерами и нагрузками. При этом важно учитывать, как геометрические отклонения изготовленных деталей вентилятора и компрессора влияют на динамику и долговечность.

Сложность проведения таких исследований связана с высокой трудоемкостью подготовки геометрических моделей, граничных условий, большой длительностью проведения расчетов деталей и узлов, а также необходимостью экспериментального подтверждения ресурса. Автоматизация подготовки и проведения расчетов способствует уменьшению трудозатрат на проектирование, для чего необходимо использование параметрических геометрических моделей деталей ГТД, позволяющих быстро менять конфигурацию изделий.

Таким образом, разработка автоматизированных методов подготовки и расчета моделей основных деталей компрессора низкого давления (КНД), таких как лопатки, диски из титановых сплавов, статорные детали из композиционных материалов и сопряженные с ними детали, является актуальной задачей.

Степень разработанности темы.

Существенный вклад в области оценки прочности деталей российских ГТД внесли Серенсен С. В., Биргер И. А., Болотин В. В., Когаев В. П., Иноземцев А. А., Ножницкий Ю. А., Темис Ю. М. и др. исследователи, в частности, решением проблем в области малоциклового усталости (МЦУ) занимались Махутов Н. А., Марчуков Е. Ю., Матвиенко Ю. Г., Равикович Ю. А., Петухов А.Н., Архипов А. Н., Туманов Н. В. и др. Работы по изучению ресурса деталей ГТД проводятся на ведущих предприятиях ОДК (ОДК-Авиадвигатель, ОКБ им. А. Люльки, ОДК-Сатурн и др.) и научно-исследовательских и учебных институтов (ЦИАМ, ИМАШ РАН, МАИ, Самарский университет, РГАТУ и др.). Основной подход к расчетам прочности и назначению ресурса заключается в определении НДС и циклической долговечности моделей деталей и узлов ГТД, однако на характер НДС, особенно в зонах концентрации напряжений, существенно влияют отклонения размеров и нагрузок сопряженных деталей. Влияние этих отклонений учитывается величиной запасов по напряжениям и долговечности, предельные значения которых назначаются по результатам стендовых испытаний образцов, деталей, узлов, а также полноразмерных двигателей и их эксплуатации.

Для подготовки и проведения конечно-элементных расчетов применяется современные CAD-CAE (Ansys, Siemens NX) системы, зарекомендовавшие себя в области прочностных расчетов во всем мире и позволяющие не только оценивать НДС детали с высокой точностью, но и проводить большинство подобных расчетов в автоматическом режиме.

Особое место занимают вопросы прочности полимерных композиционных материалов (ПКМ), применение которых в авиационном двигателестроении в России находится на начальном этапе. Здесь можно выделить работы Болотина В.В., Ножницкого Ю.А., Каримбаева Т. Д., Аношкина А. Н. и др. исследователей. Начаты работы по использованию ПКМ во внешнем воздушном тракте для статорных деталей, которые не подвергаются высоким нагрузкам. Однако вследствие эрозионного разрушения поверхности детали возможно изменение геометрических размеров и ухудшение прочностных характеристик, что требует дополнительных расчетов при изменении размеров.

Проведенный анализ состояния проблемы влияния геометрических отклонений на прочность показал возможные направления работы и позволил сформулировать цель, направления, задачи исследования и методы их решения.

Целью данной работы является разработка и исследование методов оценки прочности деталей вентилятора и компрессора ГТД с учетом геометрических отклонений за счет применения современных расчетных комплексов, повышения точности проводимых расчетов и их автоматизации, упрощенных методик испытаний долговечности.

Для достижения поставленной цели в настоящей работе были поставлены следующие **задачи**:

- разработка параметрических моделей барабана КНД, разделителя потока и панели внутренней для автоматизации дальнейших расчетов;
- расчетная оценка влияния единичных и комбинированных производственных отклонений барабана КНД на прочность;
- разработка и проведение испытаний на МЦУ конструктивно подобных элементов барабана бустера КНД;
- расчетное исследование прочности и динамики рабочей лопатки вентилятора ГТД с учетом производственных отклонений;
- расчет прочности и динамики деталей КНД, изготовленных из композиционных материалов, в условиях повышенной эрозионной нагрузки.

Научная новизна и практическая значимость.

- Разработана методика применения параметрических моделей для проведения серии прочностных расчетов моделей барабана КНД и деталей статора из композитных материалов, позволяющая проводить расчеты в автоматическом режиме, при изменении размеров деталей в рамках заданных допусков.
- Проведена расчетная оценка прочности барабана КНД с учетом геометрических отклонений. Определены коэффициенты влияния единичных и комбинированных отклонений, позволяющие проводить оценку долговечности изготовленного барабана по результатам измерения его геометрических и весовых параметров.
- Разработана методика расчетно-экспериментального исследования долговечности конструктивно подобного элемента (КПЭ), вырезанного из барабана КНД, позволяющая проводить опережающую оценку долговечности барабана.
- Проведено расчетное исследование прочности и динамики рабочей лопатки (РЛ) вентилятора с учетом геометрических отклонений, определены коэффициенты влияния, позволяющие проводить оценку РЛ по результатам измерения геометрических и весовых параметров.

– Разработана методика расстановки рабочих лопаток вентилятора, учитывающая влияние геометрических отклонений на дисбаланс и аэродинамические показатели.

– Проведен расчет влияния изменения толщины деталей статора из композиционных материалов на их динамику и прочность. Определены критические толщины при эрозии композитной части разделителя потока и панели внутренней.

Методы исследования. В работе применяются методы математического анализа и статистики, численного решения задач прочности и динамики деталей ГТД с использованием программных расчетных комплексов, основанных на методе конечных элементов, экспериментальные методы проведения испытаний на малоцикловую усталость и балансировки облопаченных дисков ГТД.

Положения, выносимые на защиту.

– Методика применения параметрических моделей при проведении серии прочностных расчетов деталей ГТД.

– Результаты оценки влияния геометрических отклонений на НДС и циклическую долговечность барабана бустера КНД.

– Методика и результаты экспериментального исследования долговечности конструктивно подобных элементов, вырезанных из барабана бустера КНД.

– Результаты оценки влияния геометрических отклонений на динамику и прочность рабочей лопатки вентилятора.

– Методика расстановки рабочих лопаток вентилятора, учитывающая влияние геометрических отклонений на дисбаланс и аэродинамические показатели.

– Результаты оценки влияния толщины деталей статора из композиционных материалов на их динамику и прочность при эрозии.

Достоверность результатов обеспечивается использованием сертифицированного программного комплекса ANSYS, созданием нескольких конечно-элементных моделей для одной детали и проверкой близости результатов расчета, статистической обработкой экспериментальных результатов, проверкой расчета и данных испытаний, проведенных на современном оборудовании.

Апробация результатов. Основные положения и результаты диссертационной работы были доложены на всероссийских и международных научно-технических конференциях, международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения» (г. Москва, 2018 г.); международная конференция «Авиация и космонавтика» (г. Москва, 2019, 2020 г.); международная научно-техническая конференция «International Conference on Aviation Motors» (ICAM) (г. Москва, 2020 г.); VIII

Международная конференция "Проблемы механики современных машин" (ПМСМ'22) (г. Улан-Удэ, 2022 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 работ, в том числе 1 статья в периодических изданиях, включенных в перечень ВАК России и 2 статьи в изданиях, индексируемых в базе SCOPUS.

Вклад автора в проведенное исследование заключается: в участии в постановке целей и задач исследования, в проведении расчетных исследований, анализе и обработке результатов, в непосредственном участии в проведении экспериментов и обработке экспериментальных данных, формулировке выводов по диссертации, а также подготовке публикаций и докладов на научных конференциях.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 134 страницах машинописного текста, содержит 102 рисунка и 35 таблиц. Работа состоит из введения, 5 глав, общих выводов и списка литературы из 98 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, определены цели исследования, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены структура диссертации, объект исследования, сведения о научных публикациях и апробации работы.

На рисунке 1 показана схема разрабатываемой методики для различных деталей газотурбинного двигателя.



Рисунок 1 – Схема методики для различных деталей ГТД

В первой главе проводится обзор современных САД комплексов, позволяющих автоматизировать процесс определения коэффициентов влияния единичных и комбинированных геометрических отклонений на НДС, предложено использование флагманской CAD/CAM/CAE системы Siemens NX. Сопряжение расчетного комплекса ANSYS и Siemens NX позволяет проводить однотипные расчеты в автоматическом режиме.

Описывается построение параметрических моделей барабана бустера компрессора низкого давления (КНД), разделителя потока и панели внутренней (рисунок 2).

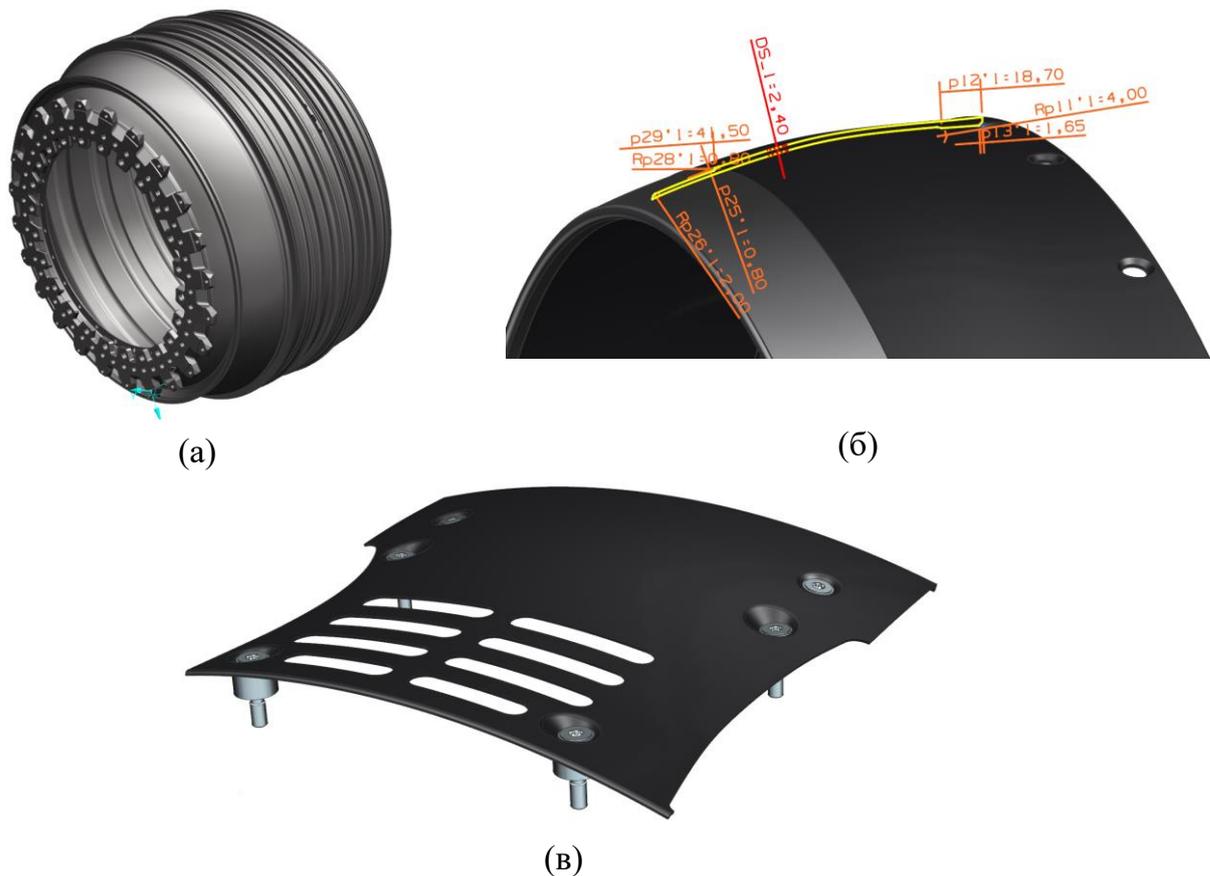


Рисунок 2 – Трехмерные модели (а) – барабана бустера, (б) – разделитель потока, (в) – панель внутренняя

После подготовки параметрических моделей есть возможность сопряжения CAD и CAE программ, что позволяет изменять геометрические размеры детали в расчетном блоке при анализе методом конечных элементов и сократить время на подготовку расчетных моделей, а также добиться автоматизации расчетного процесса с помощью сопряжения Siemens NX и ANSYS.

Вторая глава посвящена расчетному исследованию прочности моделей барабана бустера КНД с учетом производственных отклонений. Представлена методика прочностного расчета барабана КНД, серия расчетов осесимметричной модели ротора, подготовка и расчет трехмерной модели барабана, описание граничных и кинематических условий и проведение серии расчетов прочности модели с единичными и комбинированными геометрическими отклонениями (рисунок 3). Расчеты размаха напряжений и долговечности проводятся по двум расчетным точкам типового полетного цикла.

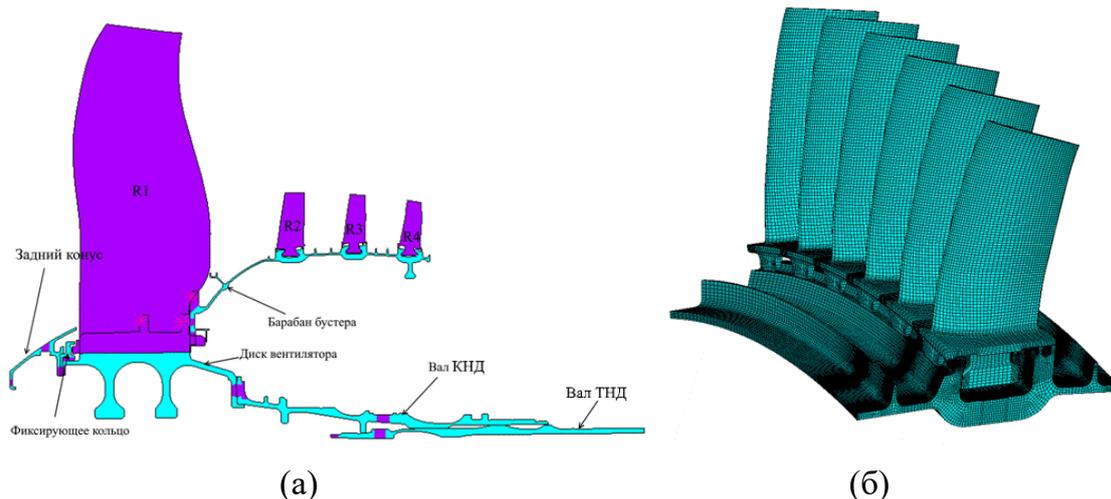


Рисунок 3 – Модель КНД, (а) – осесимметричная модель ротора КНД, (б) конечно-элементная модель сектора барабана КНД

Было проверено влияние конечно-элементной сетки на НДС, для этого расчет проводился для двух моделей с разными настройками построения сетки.

Анализ единичных отклонений выявил семь размеров, наиболее сильно влияющих на величину напряжений в критической зоне (рисунок 4), увеличение напряжения составило от 0,5 до 1,85%, также существенное влияние оказало отклонение плотности материала лопаток, при котором увеличение напряжений составило 2,3%.

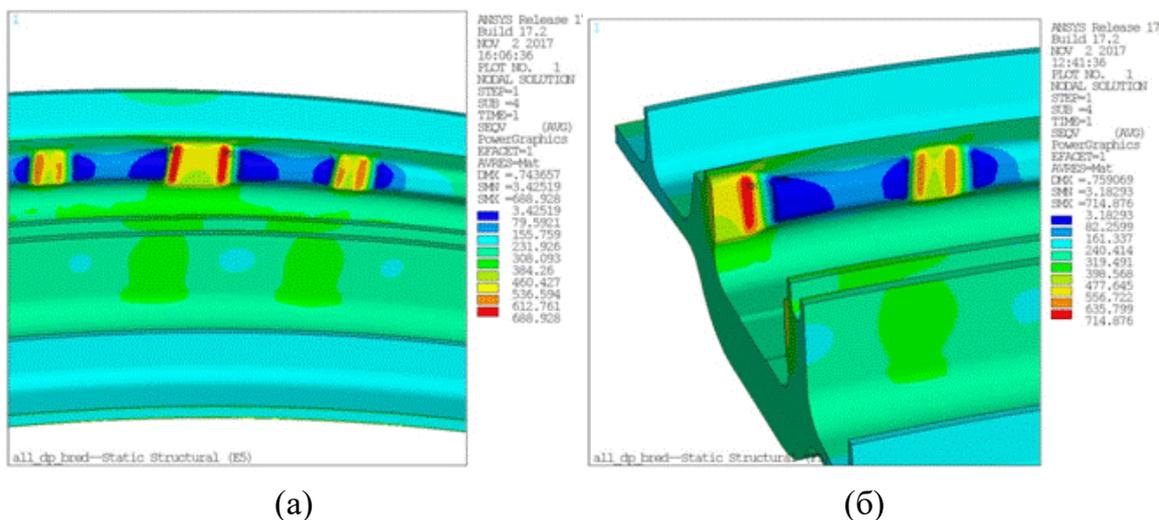


Рисунок 4 – Распределение напряжений Мизеса (МПа), модель 1 (а) и модель 2 (б)

Суммарные коэффициенты влияния неблагоприятных допусков на напряжения в критической зоне моделей практически совпали, 9,53% и 9,9% и близки к отношению напряжений для наихудшей и номинальной моделей в 10,8% и 10,78% соответственно.

Оценка ресурса барабана бустера проводилась с использованием свойств минимальных значений долговечности из трех источников (ПАО «ОДК-Сатурн», ЦАГИ и ЦИАМ). По результатам расчетов для отдельных циклов взлета и реверса были определены суммарные значения долговечности при линейном суммировании повреждений по минимальным свойствам материала. Минимальное расчетное значение циклической долговечности составило 24 129 циклов для варианта с неблагоприятным сочетанием допусков и 33 296 цикла для номинальной модели. Целевое значение циклической долговечности в 20 000 достигается с коэффициентом запаса 1.2.

Третья глава посвящена разработке и проведению опережающих испытаний на МЦУ конструктивно подобных элементов (КПЭ), вырезанных из барабана КНД. На основе расчетов, приведенных во второй главе, разработан КПЭ, вырезанный из барабана (рисунок 5), и испытательная оснастка (рисунок 6).

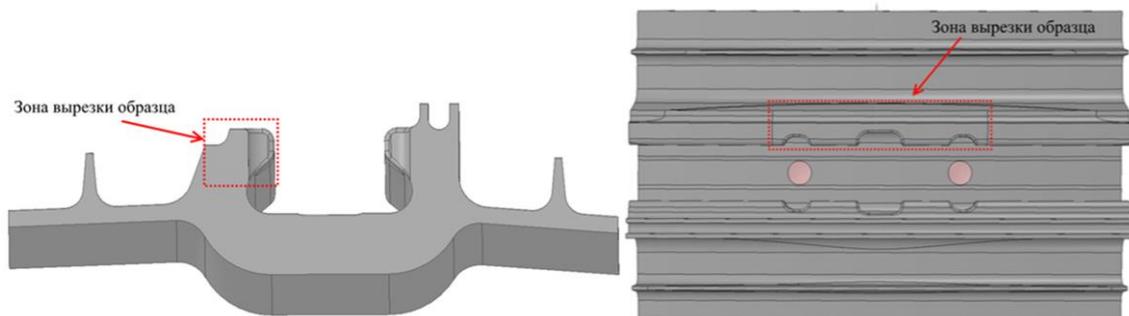
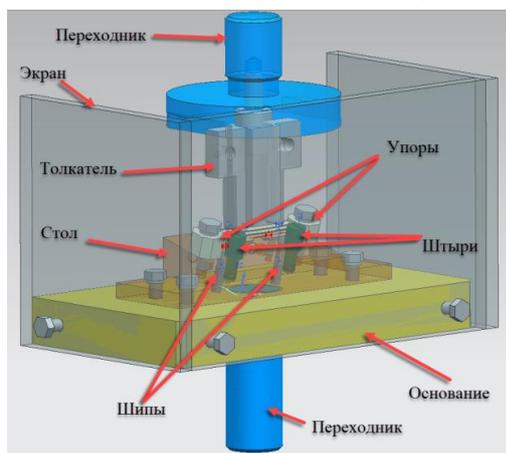
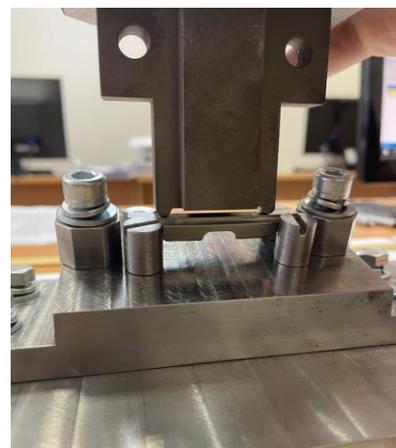


Рисунок 5 – Схема вырезки образца из критической зоны барабана



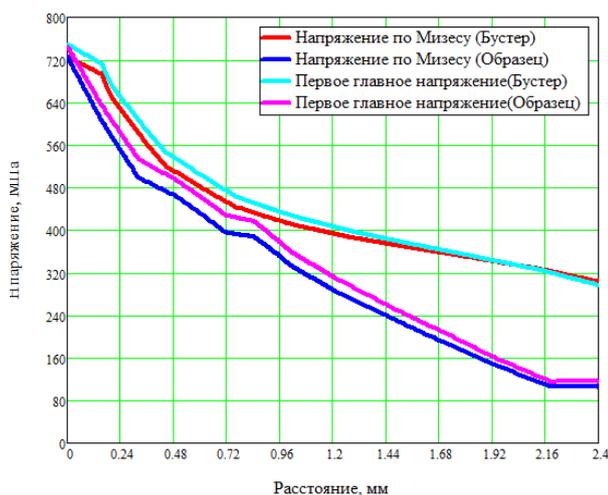
(а)



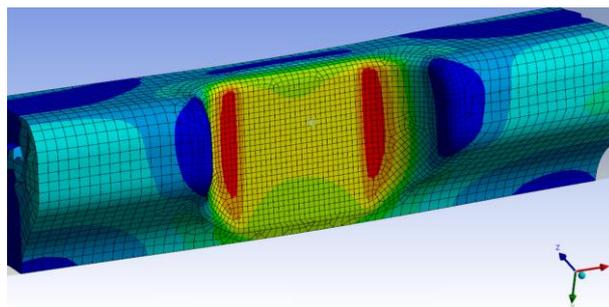
(б)

Рисунок 6 – (а) Сопряженная модель испытательной оснастки и КПЭ, (б) – фото КПЭ в испытательной оснастке

Соответствие градиента напряжений КПЭ и барабана бустера выбрано главным критерием при определении схемы нагружения элементов в процессе подготовки и проведения испытаний (рисунок 7).



(a)



(б)

Рисунок 7 – Распределение напряжений по Мизесу (а) – градиент напряжений в барабане бустера и образце, (б) – конструктивно подобный элемент

Разработана методика проведения опережающих испытаний с использованием КПЭ на серво-гидравлической машине MTS 322 с частотой 600 циклов в минуту при максимальном напряжении в критической зоне на базе 30 000 циклов, с последующим увеличением нагрузки на 20% при достижении базы. Статистическая обработка экспериментальных результатов проведена с учетом коэффициента Стюдента для 6 образцов и доверительной вероятности 0,95.

$$N_{\min} = \overline{\lg N} - K(\alpha, p, n) S_{\lg N}, \quad (1)$$

где $K(\alpha, p, n)$ – коэффициент для определения границ одностороннего статистического толерантного интервала при известном значении $S_{\lg N}$, α – уровень значимости ($(1 - \alpha)$ – выбранный уровень доверия), p – доля совокупности для определения толерантного интервала, $n = 6$ – объем выборки.

Оценки минимального значения долговечности по результатам проведенных испытаний приведены ниже (таблица 1) для разных значений α и p .

Таблица 1 – Минимального значения долговечности для разных значений α и p

α	p	n	K	$\log N_{\min}$	N_{\min}
0,05	0,99	6	2,998	4,706649	50891
0,05	0,999	6	3,762	4,570987	37238
0,01	0,99	6	3,277	4,657107	45405
0,01	0,999	6	4,04	4,521624	33237
0,001	0,99	6	3,588	4,601884	39983
0,001	0,999	6	4,352	4,421223	26376

Оценка долговечности испытанных КПЭ показала минимальное количество циклов нагружения в 26 376, что на 7% больше по сравнению с расчетными значениями долговечности в 24 129 циклов, полученными в 2й главе и на 30% больше целевого показателя 20 000 циклов.

Четвертая глава посвящена расчетному исследованию прочности рабочей лопатки вентилятора с учетом геометрических отклонений. Представлена методика расчета прочности рабочей лопатки вентилятора, включающая описание расчетной 3D модели, описание граничных и кинематических условий, расчет статических перемещений и напряжений, а также оценку опасных форм колебаний.

Описывается методика подбора лопаток и расстановки в сборочном комплекте вентилятора КНД. Предлагается использование четырехлепестковой схемы, при которой самые тяжелые лопатки с наибольшим суммарным статическим моментом сконцентрированы в четырех лепестках (рисунок 8).

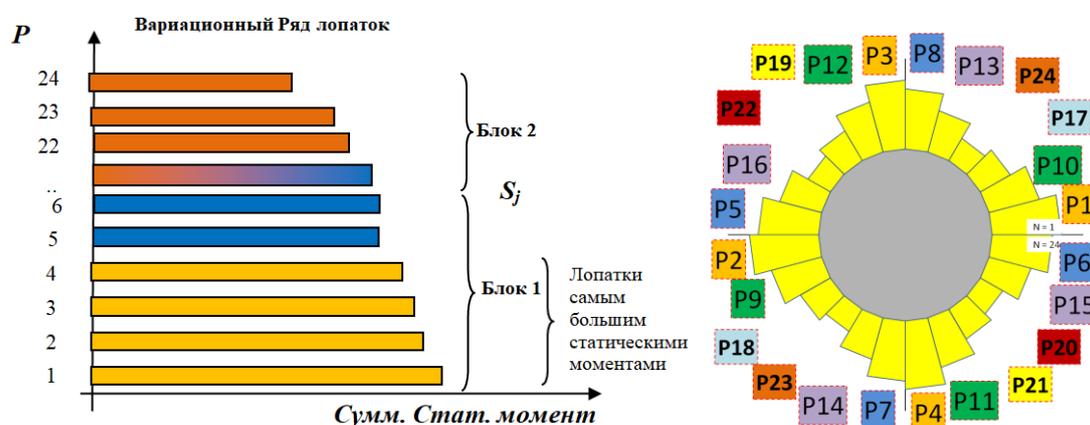


Рисунок 8 – Расстановка рабочих лопаток вентилятора по четырехлепестковой схеме

На основе выводов о незначительном влиянии геометрических отклонений на прочностные характеристики лопатки вентилятора было предложено включение в программу балансировки критерия влияния индивидуальных геометрических отклонений РЛ на тягу двигателя.

Проведена оценка максимального влияния геометрических отклонений на тягу, для этого рассчитано суммарное влияние производственных отклонений по секторам, состоящим из 6 лопаток, для всех вариантов расстановки. Критерием оценки является максимальное положительное и отрицательное суммарное влияние геометрических отклонений в секторе.

Пятая глава посвящена исследованию прочности деталей КНД, изготовленных из композиционных материалов, в условиях повышенной эрозионной нагрузки, что приводит к изменению геометрии детали. Проводится расчет модели

разделителя потока и внутренней панели КНД с номинальной геометрией и с учетом эрозионного износа.

Моделирование разделителя потока проведено в трехмерной постановке, статический и динамический расчет выполнен в программном комплексе ANSYS. Модель разделителя состоит из композитной части с приклеенной титановой кромкой (рисунок 9).

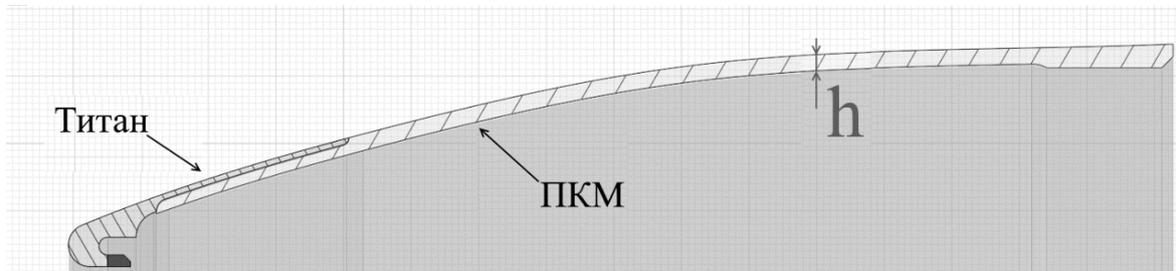


Рисунок 9 – Сечение модели разделителя потока (РП)

Расчет проведен с использованием параметрической модели, разработанной в главе 1, с различной толщиной композитной части, моделирующей эрозионный износ детали.

Полученные значения собственных частот и форм колебания РП в зависимости от толщины композитной части показаны на рисунке 10.

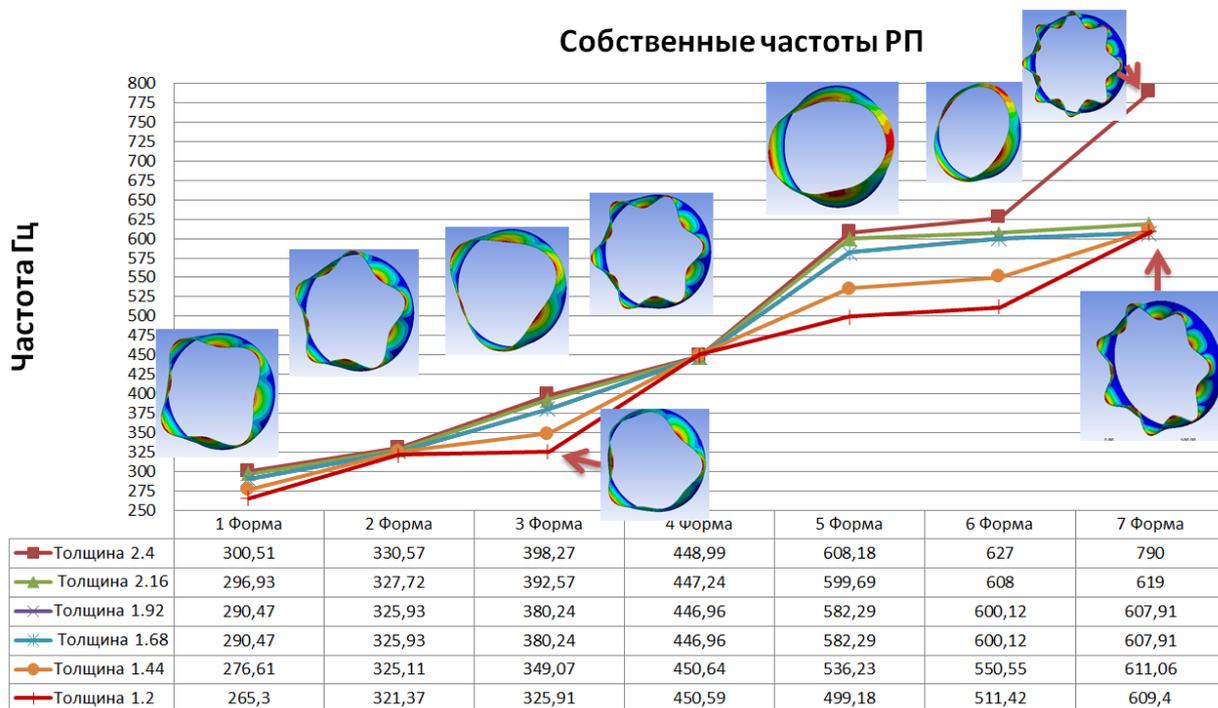


Рисунок 10 – Результаты динамического расчета РП

Резонансными частотами колебаний на двигателе являются частоты 105, 210, 315, 420 Гц. Определяется критическая толщина композитной части, ниже которой собственная частота колебаний РП по третьей форме с тремя узловыми диаметрами

приближается к резонансной частоте. Виброустойчивость детали к возбуждению 3-ей гармоникой при колебаниях по 1-ой (с 4-мя узловыми диаметрами) и 2-ой (с 5-ю узловыми диаметрами) формам колебаний была проверена при испытаниях двигателя. Учитывая результаты статического расчета, показанные на рисунке 11, определена критическая толщина в 1,44 мм, ниже которой собственная частота колебаний РП по третьей форме с тремя узловыми диаметрами приближается к резонансной частоте.

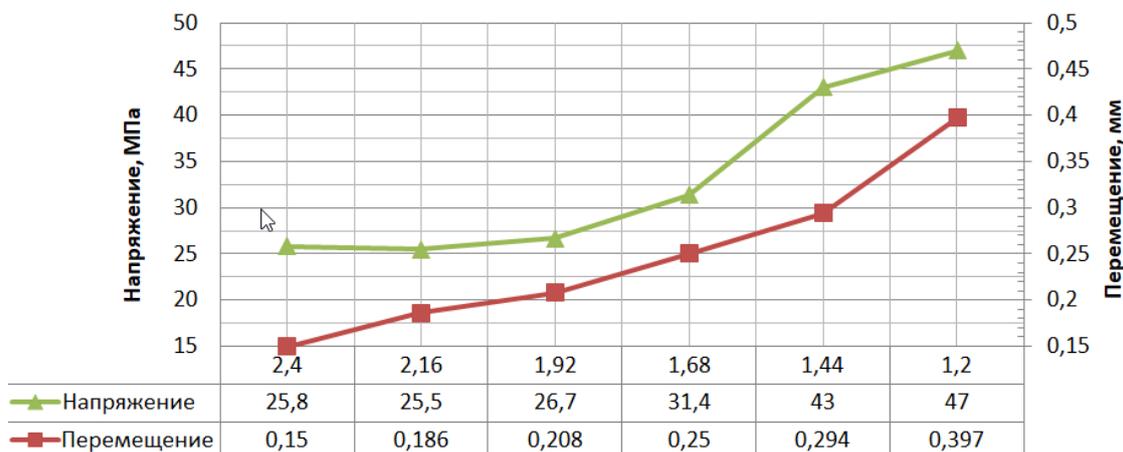
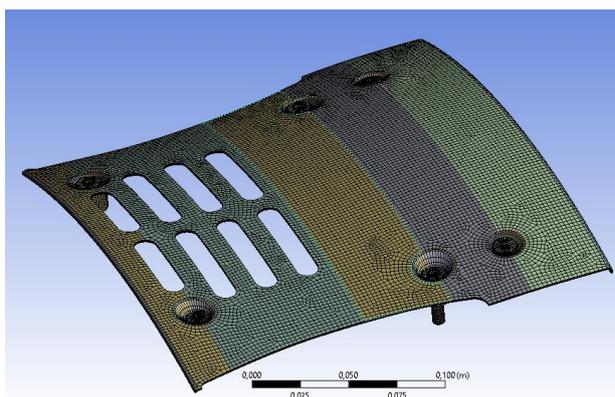
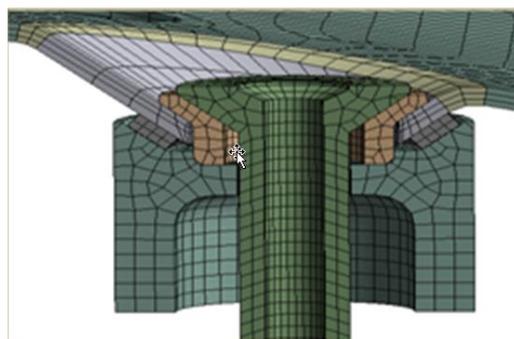


Рисунок 11 – Результаты статического расчета РП

Моделирование панели внутренней, также проводилось в трехмерной постановке (рисунок 12). Импортированная параметрическая модель, созданная в главе 1, была рассечена на простые геометрические формы для упрощения подготовки КЭ сетки. Моделирование проведено с учетом затяжки крепежных элементов, приложением полей давления и температуры.



(а)



(б)

Рисунок 12 – Конечно-элементная модель внутренней панели из ПКМ, (а) – общий вид, (б) – узел крепления

Проведен динамический и статический расчет панели из полимерного композитного материала, входящей в состав компрессора низкого давления

авиационного двигателя. При анализе полученных собственных частот колебаний панелей с разной толщиной, выявлена критическая толщина панели 0,9 мм, при которой частота колебаний по первой форме снижается до 442 Гц и приближается к опасным роторным гармоникам двигателя, при которых возрастает вероятность работы детали в критической области (таблица 2).

Таблица 2 – Результаты расчёта собственных частот и форм колебаний панели внутренней.

№ формы колебаний	Толщина панели (мм)				
	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8
	Частота колебаний (Гц)				
1	517	498	475	442	371
2	575	552	526	496	457
3	602	578	548	514	458
4	605	586	569	548	504
5	626	607	587	567	532
6	670	640	610	581	544
7	804	795	777	738	677
8	865	827	788	753	689
9	901	884	852	813	744
10	927	896	867	835	770
11	1025	983	939	886	811
12	1066	1019	968	912	828
13	1089	1044	992	927	844
14	1099	1057	1012	955	871
15	1181	1109	1045	999	917

Результаты статического расчёта напряжений показаны в таблице 3. Статические напряжения при выбранных толщинах не превышают допустимый уровень.

Таблица 3 – Результаты расчёта статических напряжений панели внутренней.

Компонента напряжений	Толщина панели (мм)				
	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8
	Максимальные напряжения (МПа)				
σ_x+	61,4	66,0	64,6	64,3	67,1
σ_x-	-83,0	-83,4	-83,6	-83,6	-87,4
σ_y+	78,1	80,9	83,4	85,8	108,1
σ_y-	-101,7	-103,6	-105,2	-106,7	-106,2
σ_z+	6,4	6,8	7,2	7,6	8,7
σ_z-	-57,2	-57,0	-57,0	-56,8	-56,4
τ_{xy}	19,8	20,3	20,8	21,2	22,0
τ_{yz}	30,3	30,1	30,4	30,6	30,7
τ_{xz}	23,0	23,0	22,9	22,8	22,7

Результаты статического расчета подтвердили надежность композитной панели; даже при критической толщине панели, статические напряжения не превышают допустимый уровень.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлено решение значимой научно-технической задачи, направленной на повышение точности определения ресурса деталей ГТД с учетом геометрических отклонений, путем разработки автоматизированных методов подготовки и расчета моделей основных деталей компрессора низкого давления и создания методики расчетно-экспериментальных исследований с использованием высокоточных вычислительных комплексов.

На основании выполненных исследований получены следующие результаты:

1. Разработанные параметрические модели барабана КНД, разделителя потока и панели внутренней, позволили сократить время на подготовку расчетных моделей, а также добиться автоматизации расчетного процесса с помощью сопряжения Siemens NX и ANSYS, что позволило уменьшить время на проведение серии расчетов.

2. Выполнено исследование влияния единичных и комбинированных производственных отклонений барабана КНД на прочностные характеристики с использованием разработанной параметрической модели барабана. Выявлено 7 размеров, существенно влияющих на величину напряжений в критической зоне, увеличение напряжения составило от 0,5 до 1,85%, также существенное влияние оказало отклонение плотности материала лопаток, при котором увеличение напряжений составило 2,3%. Суммарные влияние комбинированных отклонений на величину напряжений достигло 10,8%. Проведенная оценка циклической долговечности показала минимальное расчетное значение в 24 129 циклов для варианта с неблагоприятным сочетанием допусков и 33 296 цикла для номинальной модели.

3. Разработана методика расчетно-экспериментального исследования малоциклового усталости конструктивно подобных элементов, вырезанных из барабана КНД, с сохранением технологических концентраторов напряжений. Для КПЭ также проведено исследование влияния единичных и комбинированных производственных отклонений на прочностные характеристики. Существенное влияние на напряжение оказывают габаритные размеры элемента и размеры, непосредственно влиявшие на концентратор (от 0,9 до 2,3%). Суммарные влияние комбинированных отклонений в модели составило 7,5%.

4. Проведено экспериментальное исследование долговечности конструктивно подобных элементов, вырезанных из барабана бустера. Результаты, полученные при расчете барабана, позволили разработать схему вырезки КПЭ и

схему нагружения для проведения испытаний на МЦУ. Была спроектирована и изготовлена испытательная оснастка. Проведена серия испытаний КПЭ на уровне напряжений 725 МПа на базе 30 000 циклов с частотой нагружения 10 Гц, с увеличением нагрузки на 20% после прохождения базы. После статистической обработки результатов минимальное число циклов нагружения оставило 26 000 с доверительной вероятностью 0,999, что превышает заявленный ресурс на 30%.

5. Выполнено исследование влияния производственных отклонений рабочей лопатки вентилятора на прочностные характеристики. Создана конечно-элементная модель, на которой проверено 25 вариантов единичных геометрических отклонений и 6 моделей с комбинированными геометрическими отклонениями. Разброс по напряжениям составляет 4,25% между максимальными и минимальными значениями, максимально полученное напряжение составило 510 МПа, что удовлетворяет требованиям прочности, в тоже время влияние на перемещение кромки лопатки доходит до 10.62%, что может существенно сказаться на аэродинамических показателях двигателя. Выявлено опасное приближение собственной частоты колебаний (526 Гц) к пятой гармонике двигателя (525 Гц) при сочетании геометрических отклонений. Разработана методика расстановки рабочих лопаток в сборочном комплекте вентилятора КНД по четырехлепестковой схеме, включающая комбинированную оценку по наименьшему статическому моменту и влиянию геометрических отклонений рабочих лопаток на тягу двигателя.

6. Выполнено исследование динамики и прочности деталей КНД из полимерных композиционных материалов при изменении геометрии под действием повышенной эрозионной нагрузки. Для разделителя потока и панели внутренней определена критическая толщина композита, при которой частота собственных колебаний приближается к роторным гармоникам двигателя. Критическая толщина композитной части разделителя потока составила 1,44 мм, ниже которой собственная частота колебаний РП по третьей форме с тремя узловыми диаметрами приближается к резонансной частоте. Для панели выявлена критическая толщина в 0,9 мм, при которой частота колебаний по первой форме снижается до 442 Гц и приближается к опасным роторным гармоникам двигателя. Результаты статического расчета подтвердили надежность деталей из композиционных материалов, даже при критической толщине запас прочности по статическим напряжениям превышает 9.

7. Разработанные методики позволяют усовершенствовать методы оценки прочности деталей ГТД, учитывая индивидуальные особенности геометрии реальных изделий, тем самым повысить точность оценки ресурса, прочности и аэродинамических показателей.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Архипов, А. Н. Развитие критериев оценки эрозионной стойкости деталей авиационных двигателей из композиционных материалов / А. Н. Архипов, Ю. А. Равикович, Д. П. Холобцев, **А. С. Шахов** // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2020. – № 4. – С. 116-120.

Статьи в изданиях, индексируемых базой данных Scopus

2. Arkhipov A.N. Development of Criteria for Estimating the Erosion Resistance of Aircraft Engine Parts from Composite Materials / A. N. Arkhipov, Y. A. Ravikovich, D. P. Kholobtsev, **A. S. Shakhov** // Russian Aeronautics. – 2020. – Vol. 63. – No 4. – P. 686-691.

3. Ravikovich, Y. A. Application of composite materials in an upgraded engine low-pressure compressor for a regional passenger aircraft / Y. A. Ravikovich, A. N. Arkhipov, **A. S. Shakhov**, T. S. Erofeev // Inventions. – 2021. – Vol. 6. – No 3.

4. Arkhipov A.N. Calculation and Experimental Study of Low-Cycle Fatigue of Gas Turbine Engines Booster Drum / A. N. Arkhipov, Y. A. Ravikovich, D. P. Kholobtsev, **A. S. Shakhov** // Inventions. – 2022. – Vol. 7. – No 3.

Материалы конференций, индексируемых базой данных Scopus

5. Ravikovich, Y. A. Criterion for evaluation of erosion of aviation engine parts from polymer composite materials / Y. A. Ravikovich, D. P. Kholobtsev, A. N. Arkhipov, **A. S. Shakhov** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 18th International Conference "Aviation and Cosmonautics" : AviaSpace – 2019. – №. 012026.

6. Ravikovich, Y. A. Influence of geometric deviations of the fan blade airfoil on aerodynamic and mechanical integrity. / Y. A. Ravikovich, D. P. Kholobtsev, A. N. Arkhipov, **A. S. Shakhov** // Journal of Physics: Conference Series, Moscow. – 2021. – №. 012042.

Публикации в других изданиях

7. **Шахов, А. С.** Прочностной расчет барабана бустера компрессора низкого давления с учетом отклонений геометрии и нагрузки / А. С. Шахов // Гагаринские чтения - 2018 : Сборник тезисов докладов XLIV Международной молодёжной научной конференции. – Москва. – 2018. – С. 145-146.

8. **Шахов, А. С.** Выбор критериев оценки эрозионной стойкости деталей авиационных двигателей из ПКМ / А. С. Шахов, Д. П. Холобцев, А. Н. Архипов, Ю. А. Равикович // 18-я Международная конференция "Авиация и космонавтика - 2019" : Тезисы доклада. – Москва. – 2019. – С. 77-78.

9. Ерофеев Т. С. Применение композиционных материалов в модернизированном компрессоре низкого давления двигателя для регионального пассажирского самолета / Т. С. Ерофеев, Ю. А. Равикович, А. Н. Архипов, **А. С. Шахов** // 19-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» : Тезисы. – Москва. – 2020. – С. 151-153

10. Архипов А. Н. Влияние геометрических отклонений пера лопаток вентилятора на аэродинамические и прочностные характеристики / А.Н. Архипов, Ю.А. Равикович, Д.П. Холобцев, **А.С. Шахов** // Международная научно-техническая конференция по авиационным двигателям ICAM 2020: тезисы доклада. – Москва: ЦИАМ, 2020. – С. 611-613.