

УДК 621.452.322

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ И ПРОЧНОСТИ ОСНОВНЫХ ДЕТАЛЕЙ ГТД С УЧЕТОМ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ОТКЛОНЕНИЙ

Ю. А. РАВИКОВИЧ<sup>1</sup>, Д. П. ХОЛОБЦЕВ<sup>2</sup>, А. Н. АРХИПОВ<sup>3</sup>, А. С. ШАХОВ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>yurav@mai.ru, <sup>2</sup>nio203\_mai@mai.ru, <sup>3</sup>arkhipov.48@list.ru, <sup>4</sup>shakhov\_alexander@mail.ru

ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ)

*Поступила в редакцию 03.10.2022*

**Аннотация.** В работе описывается методика оценки прочности деталей компрессора низкого давления (КНД) газотурбинного двигателя (ГТД) с использованием коэффициентов влияния геометрических отклонений. Предложена методика опережающей расчётно-экспериментальной оценки долговечности основных деталей КНД, основанная на циклических испытаниях конструктивных элементов (КЭ), вырезанных из изготовленных деталей с сохранением поверхности в критической зоне. КЭ разработаны на основе расчётных исследований при совпадении напряженно-деформированного состояния (НДС) с полноразмерными деталями ГТД. Представлены результаты экспериментального исследования КЭ, обеспечивающих эквивалентность стендовым испытаниям.

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель; конструктивный элемент; компрессор низкого давления; метод конечных элементов; малоцикловая усталость; напряженно-деформированное состояние; прочность.

### ВВЕДЕНИЕ

Проектирование современных двигателей является наукоемким, технически сложным и высокочувствительным процессом. Совершенствование газотурбинных двигателей (ГТД) подразумевает повышения параметров рабочего процесса, 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 [1, 2].

В процессе изготовления основных деталей ГТД их геометрические размеры отклоняются от номинальных значений в пределах заданных допусков, зависящих от технологии изготовления. При определенных условиях, вследствие неблагоприятного сочетания отклонений, возможно их заметное влияние на напряженно-деформированное состояние (НДС) и характеристики двигателя.

Основными деталями двигателя, влияющими на ресурс, являются высоконагруженные детали ротора, такие как рабочие лопатки вентилятора, диски компрессора, дефлектор и диск турбины и др. Разрушение лопаток вентилятора в первую очередь может быть связано с изменением динамических характеристик, повышением статических напряжений и изменением асимметрии цикла; повреждение дисков в основном может быть вызвано малоцикловой уста-

лостью (МЦУ). Также в последнее время началась замена в компрессоре двигателя металлических материалов на композиты [4], которые более чувствительны к эрозионному воздействию [5, 6] при взлете и посадке самолета.

Двигатель эксплуатируется в различных климатических зонах, что оказывает влияние на его параметры. Кроме того, параметры двигателя ухудшаются во время работы из-за износа турбины и камеры сгорания, что приводит к более высоким оборотам ротора и газовым нагрузкам на лопатки. Такие изменения также должны учитываться при расчетах напряжений.

Основные аналитические методы оценки динамики и циклической долговечности деталей ротора основаны на анализе напряженно-деформированного состояния с применением двух- и трехмерных конечно-элементных моделей с использованием номинальных размеров и нагрузок [1, 2]. При данном подходе наиболее сложным является назначение запасов, которые определяются по результатам обобщения результатов испытаний, доводки и эксплуатации известных двигателей.

Кроме того, существуют подходы, при которых геометрическая модель деталей ротора строится с использованием наихудших отклонений. В работе [7] показано, что при неблагоприятном сочетании допусков на геометрические размеры аналитическая разрушающая частота вращения диска компрессора может снизиться на 1,5% по сравнению с расчетами с использованием номинальных размеров. Хотя подход к созданию модели деталей ротора с использованием наихудших отклонений сегодня находит все более широкое применение, но при этом возможно завышение действующих напряжений и недооценка срока службы, особенно на ранних стадиях эксплуатации. Выбор параметров, которые являются наихудшими с точки зрения срока службы (допуски на размеры, нагрузки на сопрягаемые детали и т.д.), не всегда очевиден и требует нескольких итераций предварительных расчетов.

В настоящее время при оценке ресурса основных деталей газовой турбины все шире применяется вероятностное моделирование. Вероятностные подходы широко используются в России с 80-х годов [8, 9]. В отличие от детерминированных дискретных подходов, вероятностное моделирование позволяет более четко оценить риски, связанные с изменением свойств материала, разбросом геометрии, условий эксплуатации, нагрузок, прикладываемых к детали. При моделировании НДС и оценке ресурса детали вместо дискретных значений учитывается разброс различных исходных параметров и используется метод Монте-Карло (ММК), что позволяет получить значения долговечности, наиболее соответствующие опыту эксплуатации, и повысить достоверность оценки срока службы детали.

Например, Ножницкий и др. [10] разработали программу статистического определения долговечности дисков из порошковых сплавов со случайными полями керамических включений. Последовательно решались проблемы возникновения трещины и ее стабильного распространения от керамических включений.

Вероятностный анализ срока службы был представлен в работе [11], чтобы оценить индивидуальное влияние изменений производственных допусков, граничных тепловых условий и распределения давления газа на разброс срока службы сопловых лопаток турбины. Распределения долговечности МЦУ и ползучести, а также изменение толщины слоя окисления основного металла были получены с учетом разброса свойств материала, тепловых граничных условий, геометрических размеров.

Рейтер и др. [12] разработали технологическую цепочку от CAD-модели до анализа жизненного цикла и внедрили ее в моделирование методом Монте-Карло. Геометрические параметры диска турбины и диапазоны их оптимизации были использованы для создания и изменения новой геометрии. На основе нового метода постобработки были исследованы результирующие переменные напряжения по Мизесу и ресурс на предмет их чувствительности к геометрическим параметрам отверстия диска.

Бек и др. [13] исследовали влияние изменений геометрии на динамику блиска. Большое количество лопаток блисков были отсканированы с помощью структурированного светового оптического сканера, чтобы получить измеренную геометрию в виде данных облака точек.

Была продемонстрирована возможность вероятностной оценки влияния геометрии на собственные частоты блиска.

В работе [14] подробно исследовалось влияние возможных отклонений реального и теоретического профиля пера на величины собственных частот колебаний рабочей лопатки компрессора.

Проведенный анализ состояния проблемы показал необходимость проведения исследования по влиянию геометрических отклонений на динамику и прочность деталей двигателя и развития вероятностного подхода к определению срока службы деталей.

#### МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ГТД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВЛИЯНИЯ ЕДИНИЧНЫХ И КОМБИНИРОВАННЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ОТКЛОНЕНИЙ

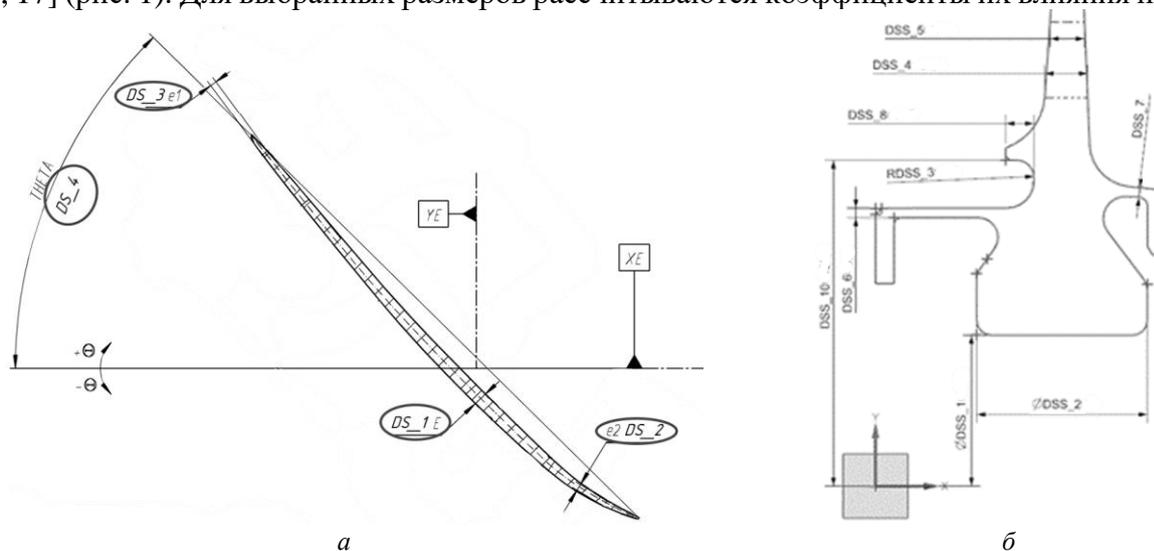
В работе для определения напряженно-деформированного состояния деталей используется метод конечных элементов, который реализован в программном комплексе *ANSYS Mechanical* и *APDL*. Данный комплекс используется в современном авиастроении для определения характеристик изделия на этапе проектирования. Эти расчеты требуют достоверных сведений о свойствах материалов, поэтому для верификации расчетов необходима экспериментальная проверка достоверности расчетной модели.

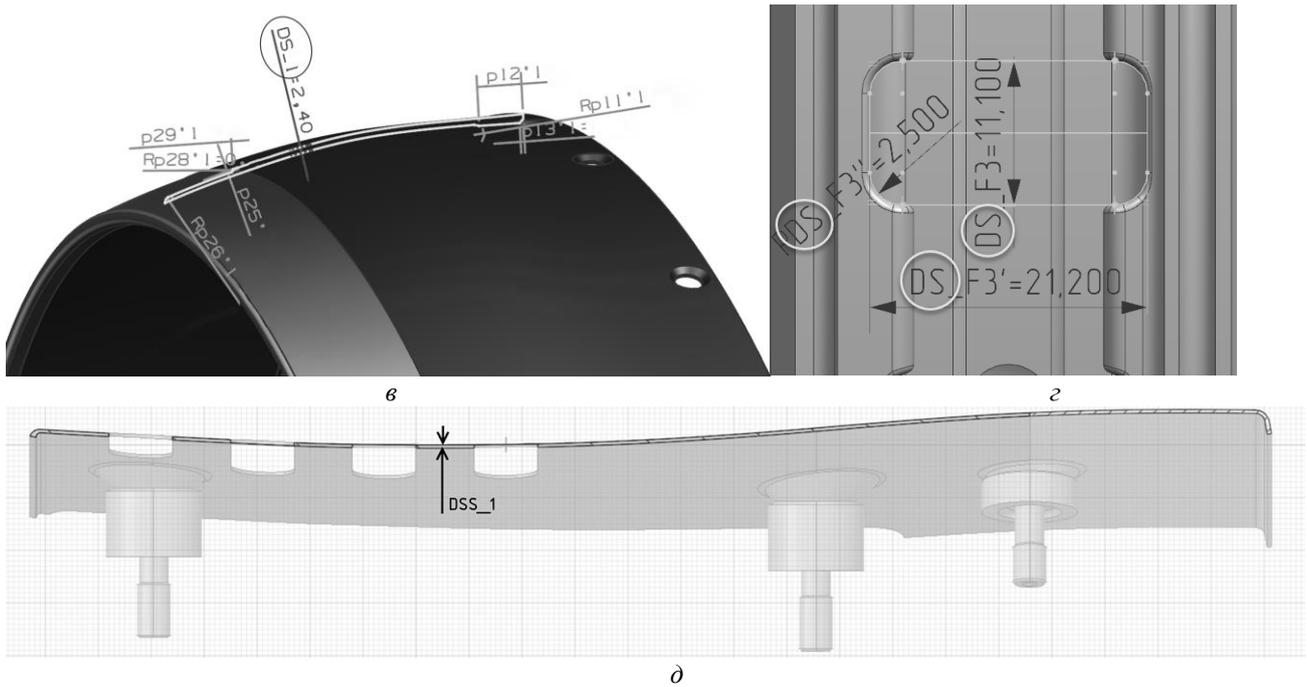
Оценка ресурса деталей производится за несколько шагов:

- разработка параметризованных моделей для автоматизирования расчетного процесса;
- расчет напряженно-деформированного состояния деталей ГТД и определение опасных зон и коэффициентов влияния геометрических, весовых и других отклонений, включая выбор повреждающих циклов нагружения;
- вероятностное моделирование динамики и прочности деталей с учетом отклонений;
- экспериментальная проверка достоверности расчетной модели, включая разработку и расчет конструктивно-подобных элементов, вырезанных из готовой детали в районе критической зоны с сохранением технологии изготовления и идентичности НДС.

#### ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОЧНОСТНЫХ РАСЧЕТОВ.

Современный подход к проведению прочностных расчетов требует подготовки параметрической модели детали, которая позволяет учитывать изменения отдельных параметров (геометрических размеров, положения детали и свойств материалов) и проводить автоматизированное перестроение модели, что позволяет сократить время на подготовку к расчетам [15]. Размеры, предположительно влияющие на НДС, обозначаются префиксом «DS» или «DSS» [16, 17] (рис. 1). Для выбранных размеров рассчитываются коэффициенты их влияния на НДС.

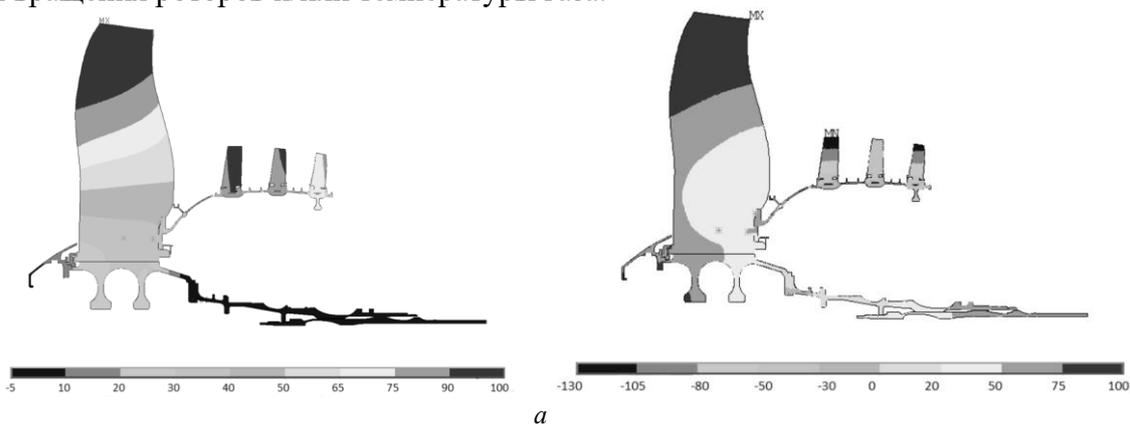




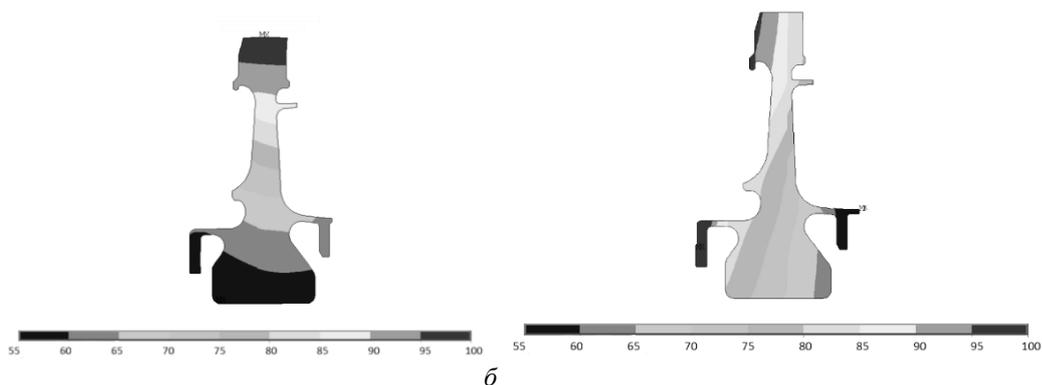
**Рис. 1.** Параметризованные эскизы разных деталей ГТД: а – профиль пера рабочей лопатки вентилятора, б – диск турбины высокого давления, в – разделитель потока, г – барабан компрессора низкого давления, д – панель внутренняя

### РАСЧЕТ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ РОТОРОВ

В соответствии с рекомендациями [1, 2] расчет деталей ротора целесообразно проводить в два этапа. На первом этапе нужен анализ осесимметричной модели, включающий подготовку параметрической модели, задание граничных условий, перенос поля температур из аэродинамического расчета, упрощение неосесимметричных элементов до единичных масс. Осесимметричная постановка задачи позволяет получить достаточно точную картину распределения перемещений (рис. 2) и получить граничные условия для дальнейших трехмерных расчетов. Расчет проводится для нестационарного цикла нагружения (шагов по времени цикла). Шаги выбираются для моментов времени, при которых происходит максимальное изменение частоты вращения роторов и/или температуры газа.



а



**Рис. 2.** Радиальные и осевые перемещения осесимметричной модели на взлетном режиме: *а – ротор КНД, б – диск ТВД.*

Для деталей статора осесимметричные модели не нужны, поэтому для них сразу строится трехмерная модель.

### РАСЧЕТ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ

Следующий этап – это проведение серии расчетов трехмерной субмодели сектора ротора, содержащего критическую область, или полной модели детали статора.

Для данного этапа также разрабатываются трехмерные параметрические модели. При расчете учитываются граничные условия из предыдущего осесимметричного расчета (для деталей ротора), контактное взаимодействие соседних деталей, температуры и центробежные нагрузки. Ниже приведены примеры расчетов трехмерных моделей для различных деталей ротора и статора.

### РАБОЧАЯ ЛОПАТКА ВЕНТИЛЯТОРА

Для оценки коэффициентов влияния геометрических отклонений была создана расчетная модель диска вентилятора с рабочей лопаткой (рис. 3). Были получены коэффициенты влияния для 24 параметров и созданы 6 моделей с комбинированными отклонениями. Единичные отклонения размеров в 4-х сечениях по высоте пера привели к изменению перемещений торца лопатки до 10%, комбинированные – до 33%, что приводит к изменению аэродинамических характеристик вентилятора [18]. Влияние геометрических отклонений на частоты потенциально опасных форм колебаний лежат в пределах от  $-3,53\%$  до  $+4,35\%$ .



**Рис. 3.** Сеточная модель сектора диска вентилятора с рабочей лопаткой

Оценка опасности форм колебаний проведена по построенным диаграммам Кэмпбелла (рис. 4) с одним и пятью узловыми диаметрами для семи форм колебаний и гармоник двигателя.

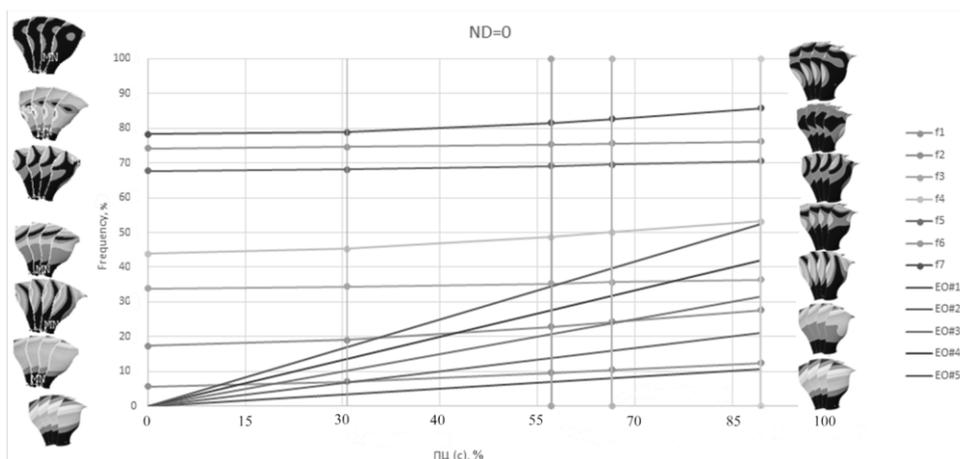


Рис. 4. Диаграмма Кэмпбелла диска вентилятора с рабочей лопаткой

Выявлено опасное приближение собственной частоты колебаний для четвертой формы с пятью узловыми диаметрами к пятой гармонике двигателя при сочетании геометрических отклонений.

#### БАРАБАН БУСТЕРА КОМПРЕССОРА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

Предложенная методика была применена при расчете НДС и циклической долговечности барабана бустера КНД [15].

По расчетам модели с варьированием 25 параметров единичные отклонения вызвали увеличение напряжений в детали до 2%, а комбинированные – до 10,8%. Предварительная оценка коэффициентов влияния допусков на НДС в критической зоне (рис. 5) может быть использована для выбора оптимальных (с точки зрения ресурса) допусков на этапе проектирования. Учет фактических геометрических и весовых параметров может позволить оценить НДС каждого изготовленного барабана. По результатам испытаний малоразмерного КНД предложенная методика расчетов может быть предложена для использования в промышленности.

Стоит отметить, что в зависимости от выбранной модели и заданных граничных условий отклонение в значении напряжения может достигать 4% [19].

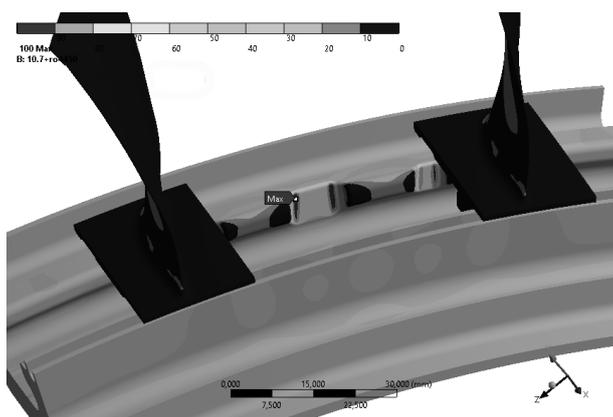


Рис. 5. Результаты барабана бустера в критической зоне

Предварительная оценка долговечности проведена по минимальным значениям долговечности материала Т-А6V для модели с неблагоприятным сочетанием допусков. Целевое значение циклической долговечности достигнуто с коэффициентом запаса 1,2.

### СТУПЕНЬ ТУРБИНЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Для турбины ТВД была разработана модель сектора ротора с углом между меридиональными сечениями  $30^\circ$ , проведены упругие с пересчетом по Нейберу (для одного типового полетного цикла – ТПЦ) и упругопластические (для всех ТПЦ) расчеты упругопластических деформаций с последующей оценкой циклической долговечности диска и дефлектора в предполагаемых критических зонах.

По результатам расчетов параметрических моделей с единичными отклонениями выбраны и рассчитаны модели с наиболее благоприятным и неблагоприятным сочетанием допусков с точки зрения ресурса в критических зонах диска и дефлектора.

Для определения коэффициентов влияния допусков геометрических размеров деталей и характеристик материала на напряженно-деформированное состояние и циклическую долговечность критических зон диска 1 ступени ТВД было выбрано 10 размеров и один вариант отклонения плотности рабочих лопаток. Для ускорения расчетов созданы параметрические модели ротора ТВД с допусками на основные геометрические размеры.

По результатам расчетов параметрических моделей с единичными отклонениями выбраны и рассчитаны модели с наиболее благоприятным и неблагоприятным сочетанием допусков с точки зрения ресурса в критических зонах диска.

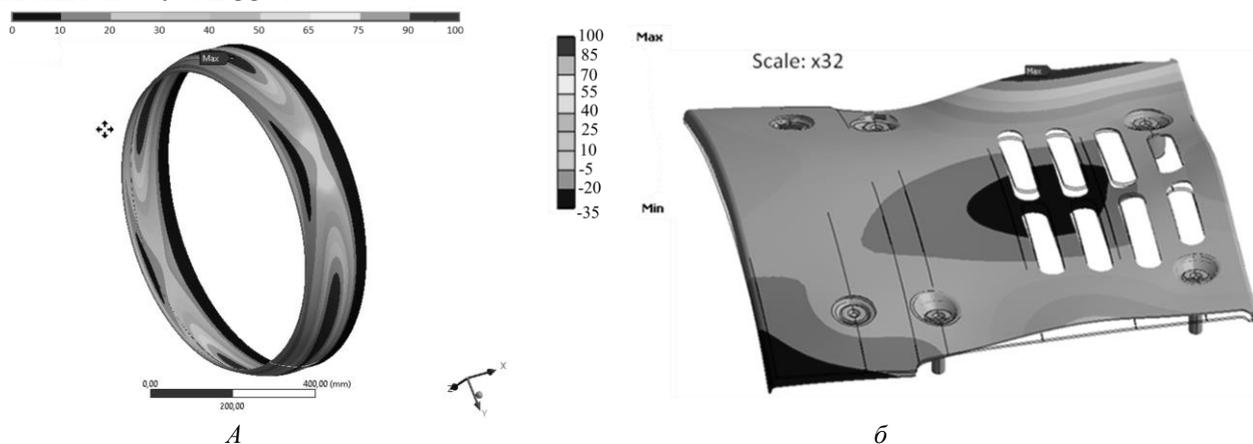
Для полученных моделей были определены коэффициенты влияния для сочетания допусков. Максимальное снижение долговечности для диска составило 6,5%. При благоприятном сочетании допусков возможно увеличение долговечности диска до 5%.

### РАЗДЕЛИТЕЛЬ ПОТОКА И ПАНЕЛЬ ВНУТРЕННЯЯ

Разделитель потока и внутренняя панель не являются роторными деталями, поэтому нагрузки, приходящиеся на них, невелики, вследствие чего появилась возможность заменить титановые детали на аналогичные из композиционных материалов и уменьшить вес изделия. Но в процессе эксплуатации эти конструкции подвергаются воздействию различных внешних факторов, таких как заброс в компрессор при взлете и посадке пылегазовой смеси, вулканического пепла, пыли и т.д.

Была проведена серия работ по исследованию влияния эрозионного износа на прочность деталей из композиционных материалов [20–22] (рис. 6). По результатам расчетов, вследствие утонения композитной части возможно увеличение напряжений панели на 40%, разделителя на 60%. Одновременно снизилась собственная частота колебаний, которая приблизилась к возбуждающей гармонике ротора.

Расчеты показали, что возможно уменьшение толщины панели и разделителя соответственно на 40% и 33%.



**Рис. 6.** Статические перемещение:  
а – разделителя потока, б – панели внутренней

## МЕТОДИКА ВЕРОЯТНОСТНЫХ РАСЧЕТОВ

Методика расчетов деталей ГТД при вероятностном моделировании ресурса с учетом производственных отклонений описана в работах [11, 23]. Данная методика представляет собой развитие общей методики инженерных расчетов, при которой проводится вероятностная оценка долговечности с учетом разброса значений напряжений, размахов упругопластических деформаций и долговечности (по минимальным и номинальным значениям) по методу Монте-Карло (ММК). Данный подход достаточно широко используется в мировой практике для различных деталей газовых турбин. Расчет ММК проводится с использованием датчика случайных чисел по опытной программе. Оценка долговечности проводилась с помощью ранее разработанной программы вероятностного моделирования ресурса по методу Монте-Карло [23]. При учете случайного разброса геометрических отклонений для вероятности разрушения 0,01% принимается возможность увеличения максимальных напряжений на 6%.

На основе допусков на геометрические размеры, веса рабочих лопаток и разброса циклической долговечности была проведена вероятностная оценка долговечности, которая показала, что минимальные значения долговечности лежат в диапазоне от 107% циклов до 111,5% от базы для диска турбины и до 170% для барабана КНД для заданной вероятности 0,1 %, что удовлетворяет установленному ресурсу.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНО ПОДОБНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА МАЛОЦИКЛОВУЮ УСТАЛОСТЬ

Для повышения точности расчетов и оценки долговечности необходимо определение усталостных характеристик исследуемой детали ГТД. Одним из основных факторов, влияющих на долговечность титановых сплавов, является геометрия и технология изготовления детали [24], поэтому значения долговечности можно получить лишь испытаниями этой детали или элементов ее конструкции с сохранением основных концентраторов напряжений и учетом технологии изготовления [25, 26].

Таким образом, окончательное заключение о долговечности барабана бустера можно дать только после проведения испытаний на МЦУ.

Для определения силы нагружения и последующей разработки испытательной оснастки была проведена серия расчетов нескольких вариантов конструктивно подобного элемента (КПЭ), вырезаемого из исследуемого барабана (рис. 7). Главным критерием отбора было совпадение НДС в критической зоне КПЭ и полноразмерного барабана бустера [27].

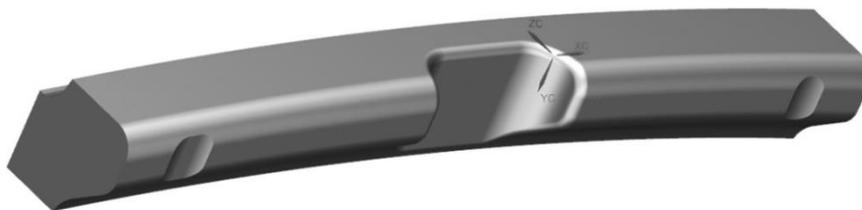


Рис. 7. Общий вид конструктивно подобного элемента, вырезанного из барабана бустера

Для обеспечения подобия НДС с барабаном бустера были разработаны схема нагружения КПЭ (рис. 8) [27] и специальная оснастка (рис. 9) для проведения испытаний на сервогидравлической машине *MTS 322*.

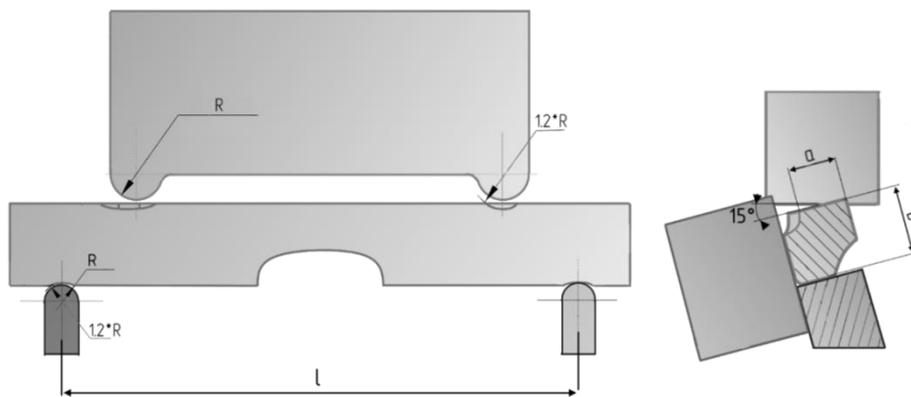


Рис. 8. Схема нагружения при проведении испытаний КПЭ на МЦУ

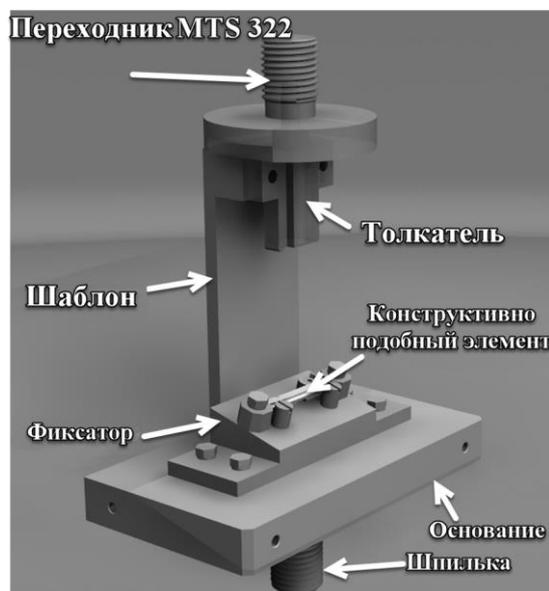


Рис. 9. Испытательная оснастка с установленным КПЭ

Усилие изгиба выбирается исходя из условия задания максимальных напряжений в критической зоне. На основании серии расчетов могут быть рекомендованы угол приложения силы  $\alpha$ , равный  $15^\circ$ , и величина силы, при которой достигается максимальное напряжение в критической зоне.

При подобранном угле приложения силы и величине этой силы градиент напряжений КПЭ максимально приближается к градиенту барабана бустера (рис. 10).

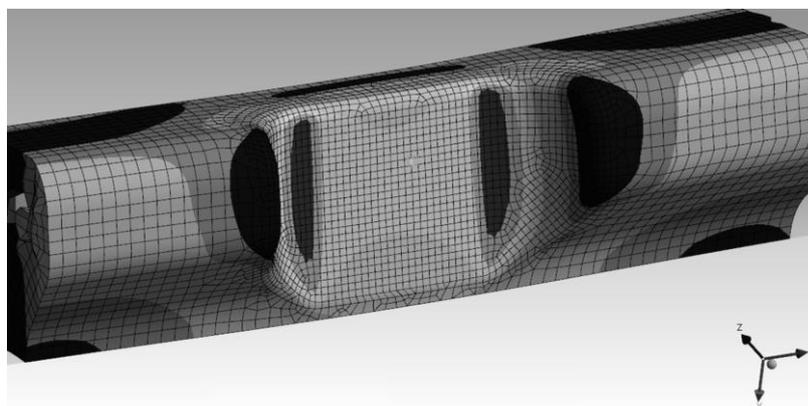


Рис. 10. Распределение напряжений Мизеса изгибаемого образца

Для сокращения времени испытания проводились при пульсирующем цикле нагружения с частотой 600 циклов в минуту (10 Гц) без выдержки при максимальной нагрузке, полученной в ходе расчетов и контролируемой тензорезисторами, установленными на КПЭ. Минимальная остаточная нагрузка составляет 200 Н, максимальная – 4500 Н, расчетный уровень напряжения равен 100%. После достижения базового значения циклов нагружения нагрузка увеличивается на 20%.

Усилия нагружения и перемещения регистрируются через управляющую программу испытательной машины с помощью встроенных датчиков и записываются в протокол испытаний.

Значения относительных деформаций измеряются с помощью двух тензорезисторов, наклеенных на образец возле критической зоны и на противоположной стороне. Результаты испытаний приведены в табл. 1.

Таблица 1

#### Результаты испытаний

Нагрузка, %	Номер образца	Число циклов $N$				
		1	2	3	4	5
100		30000	30000	30000	30000	30000
120		30000	30000	30000	30000	28185
140		30000	23291	30000	30000	-
160		6425	-	4506	26095	-
Приведенное к напряжению 100%		159177	134248	141373	249985	69414

Значения, полученные при ступенчатом увеличении нагрузки, пересчитаны на уровень напряжений, соответствующий напряжению в критической зоне барабана бустера при неблагоприятном сочетании допусков.

Оценка минимального значения долговечности по результатам проведенных испытаний проводилась с учетом коэффициента Сьюдента и доверительной вероятностью 0,99 и показала минимальное количество циклов нагружения на 7% больше по сравнению с расчетными значениями долговечности, что на 30% больше целевого значения.

#### ВЫВОДЫ

Подготовленные параметрические модели позволили сократить время для подготовки КЭ моделей и добиться автоматизации расчетов.

Определены опасные формы колебаний и оценена работоспособность РЛ вентилятора. Разброс по напряжениям составляет 4,35% между максимальными и минимальными значениями, максимальное полученное напряжение удовлетворяет требованиям прочности, в то же время влияние на перемещение кромки лопатки доходит до 10%, что может существенно сказаться на аэродинамических показателях двигателя. Выявлено опасное приближение собственной частоты колебаний к пятой гармонике двигателя при сочетании геометрических отклонений.

Проведена оценка влияния толщины композитной части на частоты и статические напряжения панели внутренней и разделителя потока, критическая толщина композита составила 0,9 мм и 1,4 мм соответственно, при которой частота собственных колебаний приближается к четвертой гармонике двигателя.

Вероятностное определение ресурса изделия было продемонстрировано на высоконагруженных роторных деталях ГТД. Во всех случаях расчетное значение минимального ресурса изделия с заданной вероятностью превышает ресурс исследуемых деталей, минимальное значение 11% для ТВД и до 70% для КНД. По результатам испытаний конструктивно подобных элементов минимальная долговечность также превышает заявленный ресурс детали.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Иноземцев А. А., Нихамкин М. А., Сандрацкий В. Л.** Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. / Иноземцев А. А., М. А. Нихамкин, В. Л. Сандрацкий. М.: Машиностроение, 2008. Т. 4. 192 с. [A. A. Inozemtsev, M. A. Nechamkin, V. L. Sandratskii "Fundamentals of design of aircraft engines and power plants". Volume 4. Moscow, Mashinostroenie. 2008.] URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19641841>
2. **Скибин В. А., Темис Ю. М., Сосунов В. А.** Машиностроение. Энциклопедия, раздел IV Расчет и конструирование машин, том IV-21 Самолеты и вертолеты, книга 3 Авиационные двигатели. Москва, «Машиностроение», 2010, 720 с. [V. A. Skibin, U. M. Temis, V. A. Sosunov. "Engineering. Encyclopedia, section IV calculation and design of machines, volume IV - 21 aircraft and helicopters, book 3 aircraft engines". Moscow, Mashinostroenie, 2010.].
3. **Inozemtsev, A. A.** Life validation strategy / A. A. Inozemtsev, L. B. Polatidi, I. L. Andreychenko // 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, ICAS. 2014. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24005338>
4. **Аношкин А. Н., Зуйко В. Ю., Шипунов Г. С., Третьяков А. А.** Технологии и задачи механики композиционных материалов для создания лопатки спрямляющего аппарата авиационного двигателя / А. Н. Аношкин, В. Ю. Зуйко, Г. С. Шипунов, А. А. Третьяков // Вестник ПНИПУ. Механика. 2014. № 4. С. 5–43. [A. N. Anoshkin "Technologies and problems of mechanics of composite materials for creating a blade straightening apparatus of an aircraft engine" / A. N. Anoshkin, V. Yu. Zuiko, G. S. Shipunov, A. A. Tretyakov // Vestnik PNRPU. Mechanica. 2014. No. 4. pp. 5–43.] URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22786586>
5. **K. V. Pool, C. K. H. Dharan, I. Finnie** Erosive Wear of Composite Materials // K. V. Pool, C. K. H. Dharan, I. Finnie // Wear. 1986. V. 107. Iss. 1. P. 1–12. URL: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(86\)90043-8](https://doi.org/10.1016/0043-1648(86)90043-8)
6. **Шульдешова, П. М.** Влияние атмосферных условий и запыленности среды на свойства конструкционных органических полимеров / П. М. Шульдешова, Г. Ф. Железина // Авиационные материалы и технологии. 2014. № 1(30). С. 64–68. [P. M. Shuldeshova, G. F. Zhelezina "An influence of atmospheric conditions and dust loading on properties of structural organic plastics" / P. M. Shuldeshova, G. F. Zhelezina // Aviatsionnye materialy i tekhnologii. 2014. No. 1(30). pp. 64-68.] URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21119808>
7. **Архипов, А. Н.** Моделирование напряженно-деформированного состояния ротора КНД с учетом геометрических и весовых допусков / А. Н. Архипов, М. В. Волгина, А. А. Матушкин [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. 2018. № 10. С. 61–68. [A. N. Arkhipov, M. V. Volgina, A. A. Matushkin, Yu. A. Ravikovich, D. P. Kholobtsev "Modeling of the stress-strain state of the LCP rotor taking into account geometrical and weight tolerances" // Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzhya. 2018. № 10. P. 61-68.] URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36402689>
8. **Биргер, И. А.** Конструкционная прочность материалов и деталей ГТД. / И. А. Биргер, Б. Ф. Балашов, Р. А. Дульнев [и др.] М.: Машиностроение, 1981. – 234 с. [I. A. Birger, B. F. Balashov, R. A. Dulnev "Structural strength of materials and parts of GTE" M.: Mashinostroenie, 1981.]
9. **Биргер, И. А.** Принципы построения норм прочности и надежности в машиностроении // Вестник машиностроения. 1988. №7. С. 3–5. [I. A. Birger "Principles of construction of strength and reliability standards in mechanical engineering" // Vestnik mashinostroeniya. 1988. №7. p. 3-5.]
10. **Nozhnitsky Y. A.** Probabilistic prediction of aviation engine critical parts lifetime / Y. A. Nozhnitsky, E. A. Lokshtanov, I. N. Dolgoplov [et al.] // Proceedings of the ASME Turbo Expo: 2006 ASME 51st Turbo Expo, 2006. Barcelona. P. 1025-1034. URL: <https://doi.org/10.1115/GT2006-91350>
11. **Arkhipov, A. N.** Probabilistic life assessment of turbine vanes / A. N. Arkhipov, Y. E. Krasnovskiy, I. V. Putschkov // Proceedings of the ASME Turbo Expo, Vancouver. BC. 2011. P. 733-740. URL: <https://doi.org/10.1115/GT2011-45841>
12. **Reuter, I.** Probabilistic Structure-Mechanical Assessment of Rotor Discs Considering Geometry Variations / I. Reuter, T. Weiss, M. Voigt, K. [et al.] // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition, V. 7A. USA. 2013. URL: <https://doi.org/10.1115/GT2013-94589>
13. **Beck, J.A.** Active Subspace Development of Integrally Bladed Disk Dynamic Properties due to Manufacturing Variations / J.A. Beck, J.M. Brown, A.A. Kaszynski, E.B. Carper. // ASME Turbo Expo. 2018. Oslo. URL: <https://doi.org/10.1115/1.4040869>
14. **Васильев, Б. Е.** Учет влияния возможных отклонений размеров в пределах технологических допусков на величины собственных частот колебаний рабочей лопатки компрессора в процессе ее отстройки от опасных резонансов / Б. Е. Васильев, А. В. Семенов, А. В. Сальников, А. Д. Бортников // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2019. № 1. С. 108–114. [B. E. Vasil'ev, A. V. Semenov, A. V. Sal'nikov, A. D. Bortnikov "Accounting for geometric scatter within manufacturing tolerances on the natural frequency values of compressor rotor blade during its detuning from dangerous resonances" // Aviatsionnaya tekhnika. 2019. № 1. S. 108-114.] URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36402689>
15. **Arkhipov, A. N.** Modeling of cyclic life for compressor rotor of gas turbine engine taking into account production deviations / A. N. Arkhipov, Y. A. Ravikovich, A. A. Matushkin, D. P. Kholobtsev // Proceedings of the ASME Turbo Expo: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. 2021. URL: <https://doi.org/10.1115/GT2020-16260>
16. **Архипов, А. Н.** Построение 3D моделей лопаток вентилятора газотурбинного двигателя в CAD-системе по данным контрольно-измерительных мероприятий / А. Н. Архипов, Ю. А. Равикович, И. М. Федоров, Д. П. Холобцев // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2017. Т. 16. № 3. С. 7–16. [A. N. Arkhipov, Y. A. Ravikovich, I. M. Fedorov, D. P. Kholobtsev "Build 3D models of fan blades of a gas turbine engine in the CAD system according to control-

*measuring activities* // Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie. 2017. Vol. 16, No. 3. Pp. 7-16.] URL: <https://journals.ssau.ru/vestnik/article/view/5222>

17. **Архипов, А. Н.** Автоматизированное построение параметрической модели рабочей лопатки вентилятора / А. Н. Архипов, Г. В. Кретинин, Ю. А. Равикович [и др.] // Вестник УГАТУ. 2019. Т. 23. № 4(86). С. 65–73. [A. N. Arkhipov, "Automated construction of a parametric model of the fan blade" / A. N. Arkhipov, G. V. Kretinin, Yu. A. Ravikovich [et al.] // Vestnik USATU. 2019. Т. 23. № 4(86). С. 65-73.] URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41827634>

18. **Arkhipov A. N.** Analysis of the Impact of Fan Blade Geometric Deviations on the Strength Properties / A. N. Arkhipov, A. A. Matushkin, Y. A. Ravikovich [et al.] // Russian Aeronautics. 2019. Vol. 62. No 4. P. 535-543 URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068799819040020>

19. **Arkhipov A. N.** Effect of a Model and Boundary Conditions on the Results of Analyzing the Stress-Strain State of a Low-Pressure Compressor Rotor / A. N. Arkhipov, A. A. Matushkin, Y. A. Ravikovich [et al.] // Russian Aeronautics. 2018. Vol. 61. No 4. P. 509 - 516. URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068799818040025>

20. **Архипов, А. Н.** Развитие критериев оценки эрозионной стойкости деталей авиационных двигателей из композиционных материалов / А. Н. Архипов, Ю. А. Равикович, Д. П. Холобтцев, А. С. Шахов // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2020. № 4. С. 116–120. [A. N. Arkhipov, Y. A. Ravikovich, D. P. Kholobtsev, A. S. Shakhov "Development of criteria for estimating the erosion resistance of aircraft engine parts from composite material" // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Aviatsionnaya tekhnika. 2020. № 4. P. 116-120.] URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44687144>

21. **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. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/868/1/012026>

22. **Ravikovich, Y. A.** Application of composite materials in an upgraded engine low-pressure compressor for a regional passenger aircraft / Y. Ravikovich, A. Arkhipov, A. Shakhov, T. Erofeev // Inventions. 2021. Vol. 6. No 3 URL: <https://doi.org/10.3390/inventions6030054>

23. **Архипов, А. Н.** Вероятностное моделирование ресурса деталей газотурбинного двигателя с учетом производственных отклонений / А. Н. Архипов, М. В. Волгина, А. А. Матушкин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2019. № 3. С. 95–102. [A. N. Arkhipov, M. V. Volgina, A. A. Matushkin, "Probabilistic assessment of life for gas turbine engine parts considering manufacture tolerances" / Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Aviatsionnaya tekhnika. 2019. № 3. P. 95-102.] URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41209994>

24. **Lomakin, I. V.** Design and Evaluation of an Experimental Technique for Mechanical and Fatigue Testing of Sub-Sized Samples / I. V. Lomakin, A. R. Arutyunyan, R. R. Valiev [et al.] // Exp Tech, V. 42. 2018. P. 261-270. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40799-017-0229-7>

25. **Петухов, А. Н.** Сопrotивление усталости дисков компрессоров / А.Н. Петухов, А.М. Вахрамеев // Проблемы прочности № 4 1983. Киев. 84–87 с. [A. N. Petukhov. A. M. Vakhrameev "Fatigue resistance of compressor discs" // Problemy prochnosti № 4 1983. Kiev. 84-87 p.]

26. **Петухов, А. Н.** Конструкционная прочность металлических материалов и основных деталей ГТД: Учеб. Пособие. / А.Н. Петухов, Ю.А. Равикович, М.: Изд-во МАИ. 2013. –128 с. [A. N. Petukhov. Y. A. Ravikovich "Structural strength of metal materials and main parts of GTE": Ucheb. Posobie. M.: Izd-vo MAI. 2013. -128 p.]

27. **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. № 49. URL: <https://doi.org/10.3390/inventions7030049>

#### ОБ АВТОРАХ

**РАВИКОВИЧ Юрий Александрович** проф., д-р техн. наук, и.о. проректора по научной работе, заведующий кафедрой «Конструкция и проектирование двигателей», МАИ (национальный исследовательский университет).

**ХОЛОБЦЕВ Дмитрий Петрович** нач. науч.-иссл. отдела, МАИ (национальный исследовательский университет).

**АРХИПОВ Александр Николаевич** канд. техн. наук, ст. науч. сотр. науч.-иссл. отдела, МАИ (национальный исследовательский университет).

**ШАХОВ Александр Сергеевич** асп., инж. науч.-иссл. отдела, МАИ (национальный исследовательский университет).

#### METADATA

**Title:** Calculation and experimental study of the dynamics and strength of the main parts of the gas turbine engine taking into account geometric deviations.

**Authors:** Y. A. Ravikovich<sup>1</sup>, D. P. Kholobtsev<sup>2</sup>, A. N. Arkhipov<sup>3</sup>, A. S. Shakhov<sup>4</sup>

**Affiliation:** <sup>1-4</sup>Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia.

**Email:** <sup>1</sup>jurav@mai.ru, <sup>2</sup>nio203\_mai@mai.ru, <sup>3</sup>arkhipov.48@list.ru, <sup>4</sup>shakhov\_alexander@mail.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), vol. 27, no. 1 (99), pp. 47-59, 2023. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The article describes a methodology for evaluation of the strength of parts of a low-pressure compressor (LPC) of a gas turbine engine (GTE) using coefficients of influence of geometric deviations. A method of advancing calculated and experimental evaluation of the durability of the main parts of the LPC is proposed, based on cyclic tests of structural elements (SE) cut from manufactured parts with the retention of the surface in the critical zone. The structural elements are developed on the basis of computational studies at the coincidence of the stress-strain state (SSS) with full-size parts of the gas turbine engine. The results of an experimental study of SE providing equivalence to bench tests are presented.

**About authors:**

**Ravikovich, Yuri Alexandrovich** Doctor of Sciences (Engineering); Acting Vice Rector for Scientific Affairs; Head of the Department "Construction and Design of Engines".

**KHOLOBTSEV, Dmitri Petrovich** Chief of the Research Department.

**ARKHIPOV, Alexander Nikolayevich** Candidate of Sciences (Engineering); Senior Researcher of the Research Department.

**SHAKHOV, Alexander Sergeevich** engineer of the Research Department.