

На правах рукописи

Печенина Екатерина Юрьевна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА СБОРКИ
РАБОЧИХ КОЛЁС С АНТИВИБРАЦИОННЫМИ ПОЛКАМИ
КОМПРЕССОРОВ АВИАЦИОННЫХ ГТД**

2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели
и энергоустановки летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Самара – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева» на кафедре технологий производства двигателей.

Научный руководитель:

Болотов Михаил Александрович, кандидат технических наук, доцент.

Официальные оппоненты:

Захаров Олег Владимирович, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», профессор кафедры «Технология машиностроения»;

Семенов Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева», профессор кафедры «Технология авиационных двигателей и общего машиностроения».

Ведущая организация: акционерное общество «Объединённая двигателестроительная корпорация», г. Москва.

Защита состоится 8 декабря 2023 года в 12:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.379.10, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» по адресу: 443086, Самара, ул. Московское шоссе, д. 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» и на сайте: https://ssau.ru/files/resources/dis_protection/Pechenina_E_YU_Sovershenstvovanie_processa_sborki_rabochih_.pdf.

Автореферат разослан _____ 2023 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.379.10

Виноградов
Александр Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Важным этапом производства и ремонта газотурбинных двигателей (ГТД) является их сборка. Технологические процессы сборки узлов ГТД оказывают существенное влияние на работоспособность, надёжность и другие эксплуатационные характеристики изделия. Сборка рабочих колёс компрессора ГТД является одной из ключевых операций технологического процесса. Большие сложности возникают при сборке рабочих колёс, лопатки которых имеют антивибрационные полки. Важным сборочным параметром названных рабочих колёс является натяг по антивибрационным полкам лопаток, который должен быть равномерным и соответствовать заданному допуску. Таким образом, точность сборки рабочих колёс можно оценить по среднеквадратическому отклонению (СКО) величин натягов по антивибрационным полкам. Неравномерность, т.е. разброс величин натягов, приводит к повышенным контактным напряжениям по поверхностям антивибрационных полок лопаток в случае увеличенных натягов, что вызывает их ускоренный износ, а в случае уменьшенных натягов – к увеличению вибронагруженности лопаток. В этом случае снижается их ресурс и создаётся опасность отрыва пера от хвостовика. Равномерность натягов в силу недостаточной геометрической точности лопаток обеспечивается путём их комплектации и расстановки в пазах диска. Ужесточение допусков и повышение точности изготовления лопаток может привести к значительным затратам, поэтому экономически целесообразнее улучшить процесс сборки рабочих колёс.

В настоящее время существующая на производстве практика обеспечения требуемой величины натягов заключается в 3-5 предварительных сборках, в каждой из которых специалисты изменяют расстановку лопаток с учётом измерений углов установки профилей, характеризующих возникающие натяги. Наличие предварительныхборок приводит к повышению трудоёмкости процесса и ухудшению геометрии полок и хвостовиков лопаток.

В этой связи перспективным направлением совершенствования сборочного процесса является замена предварительныхборок узлов компьютерным моделированием. Создание достоверной компьютерной модели процесса сборки рабочего колеса позволит оценивать натяги и определять вариант расстановки лопаток, обеспечивающий минимальную неравномерность натягов. Актуальной задачей является разработка методики автоматизированной сборки рабочих колёс компрессора ГТД в условиях использования цифрового производства.

В ходе обзора работ российских и зарубежных авторов по этой теме не было найдено комплексного решения поставленных задач применительно к рабочим колёсам компрессора с лопатками, оснащёнными антивибрационными полками. Изложенное позволяет охарактеризовать тему диссертационной работы: «Совершенствование процесса сборки рабочих колёс с антивибрационными полками компрессоров авиационных ГТД» как насущную и актуальную для двигателестроения.

Степень разработанности темы. Проблемами повышения точности и снижения трудоёмкости технологий сборки изделий занимались: Базров Б.М., Безъязычный В.Ф., Бочкарев П.Ю., Журавлев Д.А., Непомилуев В.В., Семенов А.Н.,

Слащев Е.С., Сибирский В.В., Чотчаева С.К., Осипович Д.А., Майорова Е.А., Kannan S.M., Shan H.S. и др.

При анализе предшествующих исследований выявлены два основных подхода к комплектации изделий и сборочных единиц. Первый подход основан на использовании пространственных размерных цепей. Второй на так называемом подходе «виртуальная сборка», предполагающим создание цифровых моделей объектов. Информация для создания цифровых моделей деталей и сборок формируется с использованием координатных средств измерений.

Следует отметить, что работы упомянутых выше авторов для рабочих колёс компрессора содержат только методики расстановки лопаток по статическим моментам как единственного критерия порядка их расстановки в диске. Однако, задача, связанная с разработкой методики для проведения точной сборки рабочих колёс компрессора ГТД с лопатками, оснащёнными антивибрационными полками, является на сегодняшний день не полностью решённой.

Цель работы. Повышение точности и снижение трудоёмкости сборки рабочих колёс компрессоров ГТД за счёт разработки модели оценки натягов по антивибрационным полкам лопаток, алгоритма расстановки лопаток и методики сборки с автоматизацией формирования схемы расстановки лопаток.

Задачи исследования.

1. Создание модели оценки натягов по антивибрационным полкам лопаток при их сборке в рабочем колесе, в которой используются отклонения геометрических параметров лопаток, пазов диска и учитывается влияние соседних лопаток.

2. Разработка алгоритма расстановки лопаток в рабочем колесе, направленного на минимизацию рассеивания величин натягов между лопатками, в котором в качестве критерия используются отклонения натягов по антивибрационной полке со стороны корыта и со стороны спинки от конструкторских значений.

3. Разработка методики сборки рабочих колёс компрессора ГТД с автоматизацией формирования схемы расстановки лопаток, позволяющей добиться снижения количества предварительных сборок.

4. Проведение теоретико-экспериментальных исследований погрешностей сборки рабочего колеса с использованием разработанных модели оценки натягов, алгоритма расстановки лопаток и методики сборки рабочих колёс.

5. Реализация в виде программной системы модели оценки натягов и алгоритма расстановки лопаток в рабочем колесе для использования в цеховых условиях.

Научная новизна.

1. Математическая модель оценки натягов лопаток по антивибрационным полкам при их сборке в рабочем колесе, отличающаяся от известных решений использованием данных по отклонениям геометрических параметров лопаток, пазов диска и учитывающая влияние соседних лопаток.

2. Алгоритм расстановки лопаток в рабочем колесе, позволяющий минимизировать рассеивание величин натягов между лопатками, учитывающий отклонения натягов по антивибрационной полке со стороны корыта и со стороны спинки от конструкторских значений.

3. Методика сборки рабочих колёс компрессора ГТД с автоматизацией формирования схемы расстановки лопаток в условиях использования цифрового

производства, позволяющая снизить количество предварительных сборок, отличающаяся тем, что при расстановке лопаток используются отклонения геометрических параметров лопаток, пазов диска, обобщённые в виде математической модели.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке методики сборки рабочих колёс компрессора ГТД, модели оценки натягов по антивибрационным полкам лопаток при их сборке в рабочем колесе, алгоритме расстановки лопаток в рабочем колесе.

Разработанная методика сборки рабочих колёс компрессора ГТД позволяет совершенствовать технологический процесс сборки за счёт использования геометрических отклонений лопаток и пазов диска для формирования плана расстановки лопаток в рабочем колесе на основе расчёта комплексных параметров – отклонения натяга со стороны спинки и со стороны корыта, характеризующих натяг.

Практическая значимость результатов работы заключается в реализации разработанных модели и алгоритма в программной системе, которая позволяет повысить точность и уменьшить трудоёмкость сборки рабочих колёс ГТД.

Программная система автоматизирует формирование плана наилучшего варианта расстановки лопаток в рабочем колесе на основе использования измеренных геометрических параметров деталей. Результаты работы могут быть использованы в цеховых условиях для сборки рабочих колёс компрессора ГТД с целью сокращения количества предварительныхборок и снижения неравномерности натягов по антивибрационным полкам лопаток.

Содержание диссертации соответствует пункту 9 «Теоретические основы и технологические процессы изготовления деталей двигателей и агрегатов летательных аппаратов, включая технологическую подготовку производства, в том числе автоматизированные системы проектирования и управления, технологические процессы и специальное оборудование для формообразования и обработки деталей двигателей, их защита» паспорта специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Методы и средства исследований.

В работе использовались теоретический и экспериментальный методы исследования. Теоретические исследования выполнялись с применением аппарата аналитической геометрии, матричных вычислений, теории алгоритмов и математического моделирования. Эксперименты проводились на рабочих колёсах компрессора среднего давления при их ремонте.

Объект исследований. Технологический процесс сборки рабочего колеса компрессора среднего давления ГТД.

Предмет исследований. Условия и параметры расстановки лопаток с антивибрационными полками в рабочем колесе при его сборке.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Методика сборки рабочих колёс компрессора ГТД с автоматизацией формирования схемы расстановки лопаток.
2. Модель оценки натягов по антивибрационным полкам лопаток при их сборке в рабочем колесе, реализованная в программной системе.

3. Алгоритм расстановки лопаток в рабочих колёсах, реализованный в программной системе.

Достоверность результатов обеспечивается обоснованностью принятых допущений в математических моделях; применением известных и проверенных численных методов, обладающих высокой точностью при проведении вычислительных экспериментов; использованием в процессе исследований поверенного метрологического оборудования и сертифицированного программного обеспечения.

Апробация работы. Основные результаты диссертации были представлены на всероссийских и международных конференциях, а именно: VI Международная конференция и молодёжная школа ИТНТ-2020, г. Самара, Самарский университет, 26-29 мая 2020 г.; III Международная конференция ICMSIT-III 2022 г.: Метрологическое обеспечение инновационных технологий, г. Санкт-Петербург, 3-5 марта 2022 г.; VIII Всероссийская научно-техническая конференция для молодых учёных и студентов с международным участием, г. Пенза, 17-18 марта 2022 г.; VI Всероссийская научно-практическая конференции с международным участием «Исследование и проектирование интеллектуальных систем в автомобилестроении, авиастроении и машиностроении» («ISMCA' 2022»), г. Таганрог, 15 апреля 2022 г.

Реализация результатов работы. Исследование выполнено при финансовой поддержке ИИФ СО в рамках научного проекта по договору № 1/3-АКД/2021 от 23.12.2021 г. Результаты работы внедрены на предприятии ООО «Самарские турбомоторы» (акт внедрения от 20.04.2023 г.) в виде технологической инструкции и использовались для улучшения технологического процесса сборки рабочих колёс компрессоров ГТД в филиале АО «ОДК» «НИИД» (Научно-исследовательский институт технологии и организации производства двигателей) (акт внедрения от 15.06.2023 г.). Материалы диссертационной работы нашли применение в учебном процессе Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева (акт внедрения от 13.04.2023 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 научных работ, в том числе 3 статьи опубликованы в периодических изданиях, включённых в перечень ВАК России, и 1 статья опубликована в издании, индексируемом в базе данных Scopus.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы. Общий объём диссертации составляет 147 страниц, 47 рисунков, 14 таблиц и 8 приложений. Список литературы включает 101 наименование.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, приведена краткая характеристика работы, сформулированы цель, задачи и изложена научная новизна исследований. Представлены основные положения, выносимые на защиту и сведения об апробации результатов работы.

В первой главе описан объект исследования, выполнен анализ проблем технологии сборки рабочего колеса с антивибрационными полками компрессора

ГТД. Сборка рабочих колёс должна обеспечивать величины натягов по антивибрационным полкам лопаток в заданных пределах, способствуя минимизации их неравномерности. Одной из значимых проблем технологического процесса сборки рабочих колёс, лопатки которых имеют антивибрационные полки, является определение наилучшего варианта расстановки лопаток при заданных временных, вычислительных и других ограничениях. Такой вариант расстановки лопаток достигается путём выполнения предварительных сборок рабочего колеса. При анализе существующих технологий сборки и комплектации рабочего колеса было выявлено отсутствие подходов к сборке, в которых ключевую роль играет обеспечение равномерности натягов с использованием автоматизированных средств формирования схемы расстановки лопаток.

Выполнен обзор публикаций по проблеме технологии сборки рабочего колеса. Выбран подход «виртуальная сборка», существенным преимуществом которого является возможность перебора множества вариантов комплектации изделий на компьютере, что значительно сокращает трудоёмкость процесса. Реализация виртуальной сборки возможна при наличии достоверных моделей процесса, использующих результаты измерений деталей, полученные с необходимой точностью.

Основными контролируруемыми параметрами лопаток (рисунок 1, а) при сборке являются: а) фактические значения стыковых размеров по рабочим торцам антивибрационных полок лопаток l_{sp} ; б) расстояние от центра до рабочего торца со стороны корыта l_p ; в) углы профилей торцов φ_p со стороны корыта и φ_s со стороны спинки в сечении полки г) фактические значения угла касательной к профилю в контрольных сечениях лопаток в свободном состоянии γ_b (угол установки).

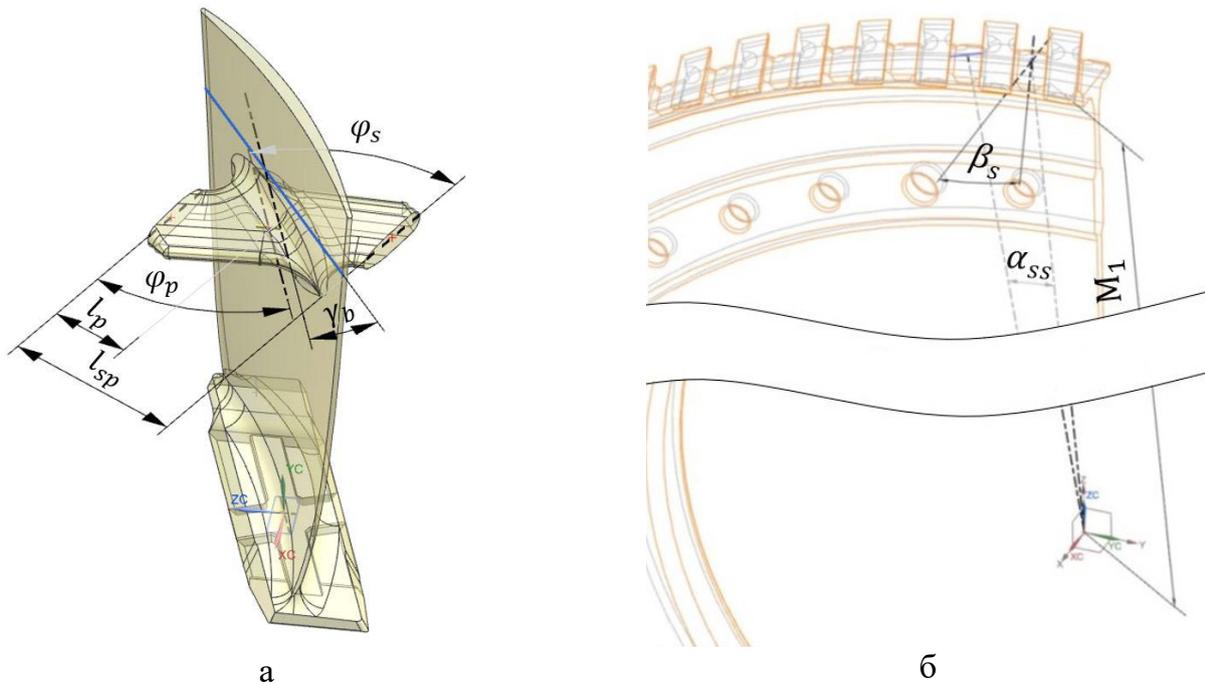


Рисунок 1 – Контролируемые параметры деталей

Основными контролируемыми параметрами дисков (рисунок 1, б) при сборке являются: а) расстояние от центра диска до плоскости паза, сопрягаемой с опорной

поверхностью хвостовика M_1 ; б) углы разворота пазов (между осью вращения диска и осями симметрии пазов) β_s ; в) величины углов деления пазов α_{ss} . В собранном рабочем колесе измеряют углы установки лопаток. Вычитая из углов установки в собранном состоянии углы установки в свободном состоянии, вычисляют характеризующие натяг изменения углов установки γ_{b_n} . Последние являются ключевым сборочным параметром рабочего колеса. Допустимый диапазон значений отклонения угла составляет от $+1^\circ$ до $+2^\circ 40'$ градусов.

В главе приведён обзор используемых средств измерений деталей рабочего колеса. Контроль геометрических параметров деталей на производстве выполняется с использованием координатно-измерительных машин (КИМ) и контрольно-измерительных приборов (КИП). Измерения размеров лопаток и дисков проводились на КИМ.

На основании проведённого обзора публикаций сформированы задачи исследования.

Вторая глава посвящена разработке методики, модели и алгоритма для повышения точности и снижения трудоёмкости сборки рабочих колёс. В первом разделе главы представлена методика сборки рабочих колёс компрессора ГТД с автоматизацией формирования схемы расстановки лопаток, основанная на модели оценки натягов по антивибрационным полкам лопаток и алгоритме расстановки лопаток в рабочих колёсах. Разработанная методика направлена на решение задачи оптимальной расстановки лопаток в рабочем колесе, которую можно описать в виде

$$\operatorname{argmin}_x SS(X) = \{x_{ij} \mid \forall x_{ik}: i = 1 \dots N, k \neq j, SS(\{x_{ik}\}) > SS(\{x_{ij}\})\}, \quad (1)$$

где $SS(X)$ – функционал, равный сумме квадратов отклонений от среднего выборочного всех натягов для одного из вариантов расстановки лопаток в пазах; $X = \{x_{ij}\}$ – множество вариантов установки $j = 1 \dots N$ лопаток в $i = 1 \dots N$ пазы диска, при котором $SS(X)$ минимален; k – порядковый номер лопатки; $\{x_{ik}\}$ – множество всех возможных вариантов установки лопаток при которых $SS(X)$ принимает не оптимальные значения. Методика базируется на модели оценки натягов и алгоритме расстановки лопаток, что позволяет при сборке выполнить расстановку комплекта лопаток в одном рабочем колесе ГТД.

Блок-схема методики представлена на рисунке 2.

Первый этап методики включает измерения геометрических параметров лопаток и пазов диска. Измерения осуществляются с использованием специальных приспособлений и оснастки или иных средств измерения согласно серийной технологии изготовления компрессора. Второй этап предусматривает обработку полученных на первом этапе геометрических параметров лопаток и пазов диска, позволяющую вычислить отклонения и статистические характеристики параметров. Третий этап предполагает выполнение расстановки лопаток в рабочем колесе по разработанному алгоритму. Выходные данные представлены в виде массивов порядковых номеров лопаток. Четвёртый этап предусматривает расчёт натягов со стороны спинки и корыта по отклонениям геометрических параметров деталей и их конструкторских размеров с использованием модели оценки натягов по антивибрационным полкам. На пятом этапе производят сборку рабочего колеса в соответствии с порядковыми номерами, полученными в результате выполнения

третьего и четвёртого этапов. В итоге достигается минимизация среднеквадратического отклонения натягов по антивибрационным полкам лопаток и снижение или полное устранение доли натягов, выходящих за границы поля допуска.

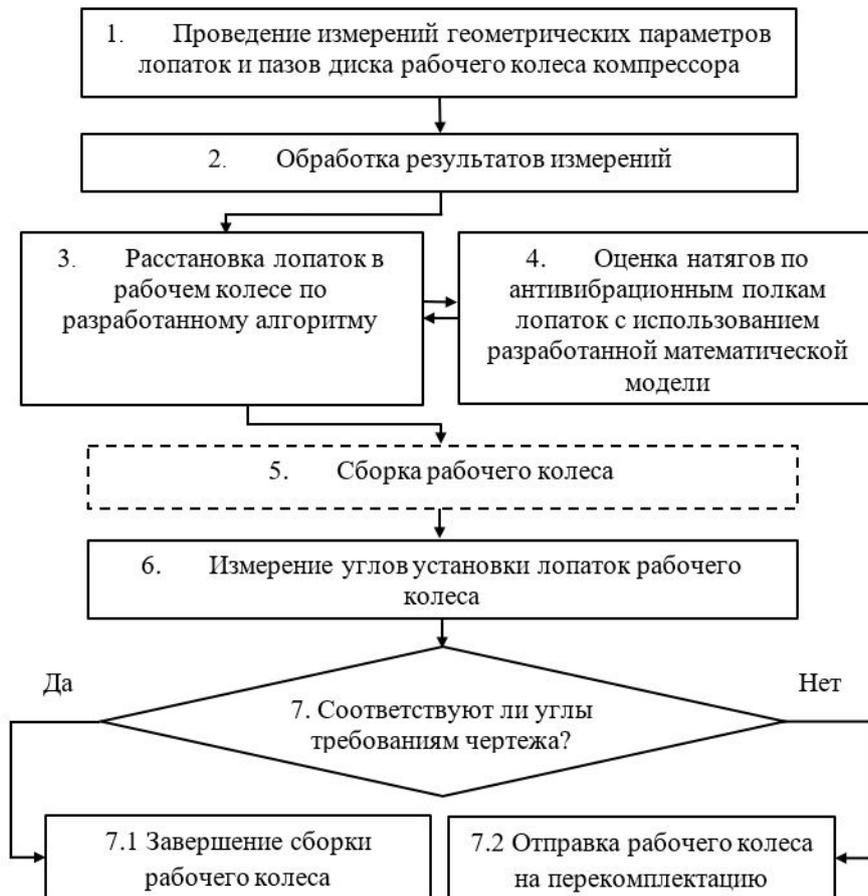
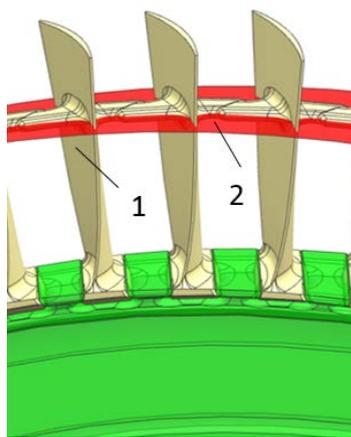


Рисунок 2 – Блок-схема методики сборки рабочих колёс компрессора ГТД

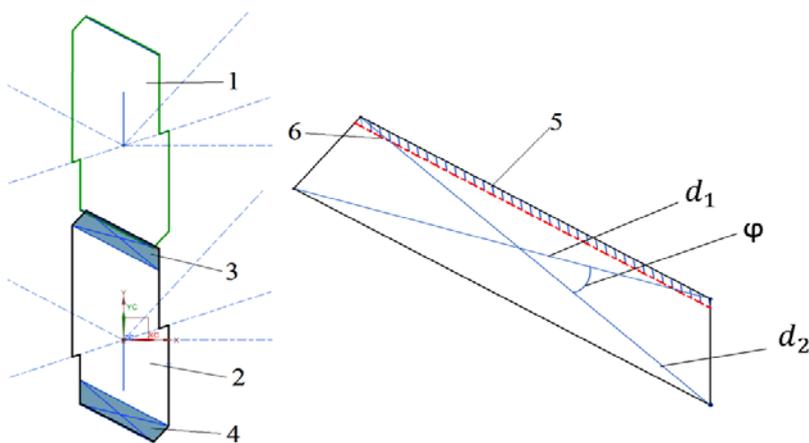
На заключительном этапе принимается решение о годности комплекта. Если комплект лопаток соответствует требованиям сборочного чертежа, то процесс сборки рабочего колеса завершается, если не соответствует, то рабочее колесо отправляют на перекомплектацию.

Во втором разделе главы описывается модель оценки натягов по антивибрационным полкам лопаток при их сборке в рабочем колесе. Модель предназначена для преобразования геометрических отклонений параметров лопаток и дисков в величины отклонения натягов со стороны корыта и спинки, характеризующих натяги по антивибрационным полкам лопаток. При моделировании рассматривалось сечение лопаток в месте антивибрационных полок (рисунки 3, 4). Другими допущениями, принятыми при разработке модели, являются: 1) лопатка представляет собой абсолютно жёсткое тело; 2) учитываются только отклонения параметров, влияющих на натяг, прочие геометрические параметры берутся номинальными по чертежу; 3) допускается, что средний натяг распределён равномерно в контакте между полками.



1 – лопатка; 2 – сечение в месте антивибрационной полки

Рисунок 3 – Пояснение к разработанной модели



1 – первая лопатка; 2 – вторая лопатка;
3 – отклонения натяга со стороны спинки, δS_{s2} ;
4 – отклонения натяга со стороны корыта, δS_{p1} ;
5 – отклонения натяга со стороны спинки; 6 – линия номинального натяга

Рисунок 4 – Графическая иллюстрация модели оценки натягов

Моделирование натяга сводится к расчёту отклонения натяга в плоскости между лопатками – фактически, к расчёту площадей взаимного пересечения полок. Отклонение натяга G между двумя лопатками представляет собой сумму отклонений натягов со стороны корыта первой лопатки δS_{p1} и спинки второй δS_{s2} :

$$G = \delta S_{p1} + \delta S_{s2}. \quad (2)$$

Для расчёта отклонений натягов (2) со стороны корыта и спинки каждой лопатки определяются координаты точек четырёхугольника, образованного пересечением антивибрационной полки с линией номинального отклонения натягов (рисунок 4). Координаты вершин четырёхугольника на рисунке 4, представляющего собой часть антивибрационной полки со стороны спинки, определяются фактическими размерами полок. Линия номинального отклонения натягов остаётся на прежнем месте, а фактическое отклонение натягов меняется. Аналогичные изменения отклонения натягов происходят и со стороны корыта. Расчёт площадей для вычисления отклонений натягов (2) производится по формуле:

$$S = d_1 \cdot d_2 \cdot \sin(\varphi) / 2, \quad (3)$$

где d_1 , d_2 – диагонали получающегося четырёхугольника; φ – угол между диагоналями.

Таким образом, используя измеренные и конструкторские значения параметров полок, модель позволяет для каждой лопатки рассчитывать величины отклонений натягов со стороны спинки и корыта, и натяги между лопатками.

Ввиду того, что пазы диска так же имеют значимые погрешности, необходимо учитывать их влияние на сдвиг и разворот лопаток, и, соответственно, на формируемые натяги между ними. В модели используются значения отклонения угла разворота паза $\delta\beta_s$ и угловой погрешности деления пазов $\delta\alpha_{ss}$, которые пересчитаны в линейную величину l_{ss} по выражению

$$l_{ss} = (M_1 + h_b) \cdot \operatorname{tg}(\delta\alpha_{ss}), \quad (4)$$

где M_1 – расстояние от оси вращения диска до опорной плоскости паза; h_b – высота от опорной поверхности хвостовика лопатки до рассматриваемого сечения в месте антивибрационной полки.

Каждая точка сечения лопатки с вектором координат $\vec{p}_{1 \times 2}$, устанавливаемой в паз с погрешностями l_{ss} (4) и $\delta\beta_s$, сдвигается и поворачивается на величины, погрешностей, новый вектор координат $\vec{p}_{n1 \times 2}$ вычисляется по выражению:

$$\vec{p}_{n1 \times 2} = (\vec{p}_{1 \times 2} \cdot \mathbf{R}_{2 \times 2}) + \vec{t}_{1 \times 2}, \quad (5)$$

где $\mathbf{R}_{2 \times 2}$ – матрица разворота профиля:

$$\mathbf{R}_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} \cos(\delta\beta_s) & -\sin(\delta\beta_s) \\ \sin(\delta\beta_s) & \cos(\delta\beta_s) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

а $\vec{t}_{1 \times 2}$ – вектор перемещения:

$$\vec{t}_{1 \times 2} = [0 \quad l_{ss}], \quad (7)$$

Соответственно, сечение перемещается относительно номинальных линий натяга, что приводит к изменению площадей (3) и отклонений натягов (2) в зависимости от погрешностей пазов.

Используя значения отклонений натягов (2) со стороны спинки и корыта лопаток, можно выполнить их расстановку, при которой натяги между парами лопаток будут распределены равномерно.

В третьем разделе представлен разработанный алгоритм расстановки лопаток в рабочих колёсах, блок-схема которого приведена на рисунке 5.

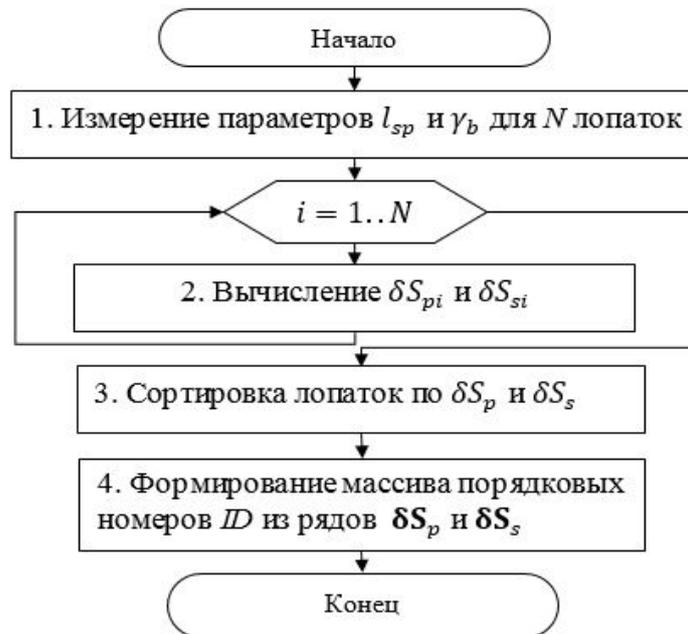


Рисунок 5 – Блок-схема алгоритма расстановки лопаток комплекта

Алгоритм включает в себя четыре этапа. На первом этапе производится измерение необходимых геометрических параметров лопаток и диска, описанных в первой главе диссертации. Второй этап в соответствии с моделью предусматривает вычисление отклонений натягов со стороны корыта δS_p и со стороны спинки δS_s для каждой лопатки.

В ходе третьего этапа производится сортировка лопаток по возрастанию отклонений натяга со стороны спинки и по убыванию со стороны корыта. Образуется два ряда лопаток, которые упорядочены по значениям отклонений натягов. На четвёртом этапе алгоритма формируется план расстановки лопаток в диске, представляющий массив их порядковых номеров.

В четвёртом разделе второй главы приведены теоретические исследования по определению влияния геометрических отклонений лопаток и пазов диска на получаемые в результате сборки натяги по антивибрационным полкам. Исследования содержат результаты моделирования ряда сборок рабочих колёс, расчёты величин натягов и оценки статистических характеристик их отклонений. Приведены результаты сравнения отклонения натягов с допуском на отклонение от номинального натяга. За счёт применения разработанного алгоритма расстановки лопаток СКО натягов снизилось в два раза, что говорит о повышении точности сборки рабочего колеса.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям по измерению деталей, сборке рабочих колёс и контролю углов установки лопаток.

В первом разделе приведено описание последовательности измерений геометрических параметров лопаток и диска. Все параметры лопаток, кроме угла установки γ_b , измерялись на портативной КИМ CimCore. На рисунке б, а показан процесс измерения лопатки. Измерение параметров пазов дисков производилось на контактной КИМ DEA Global Advantage.

Контроль углов установки лопаток γ_b выполняется в собранном состоянии с диском. На первом этапе лопатки собираются с диском через одну и контролируется угол их установки относительно диска. Сборка производится два раза, соответственно для нечётных и чётных лопаток. Затем рабочее колесо собирается полностью. Контролируются углы установки лопаток в уже собранном состоянии.

Измерения углов установки лопаток производились с помощью оптического угломера, который устанавливался на радиусе 395,5 мм от оси вращения диска, как показано на рисунке б, б.

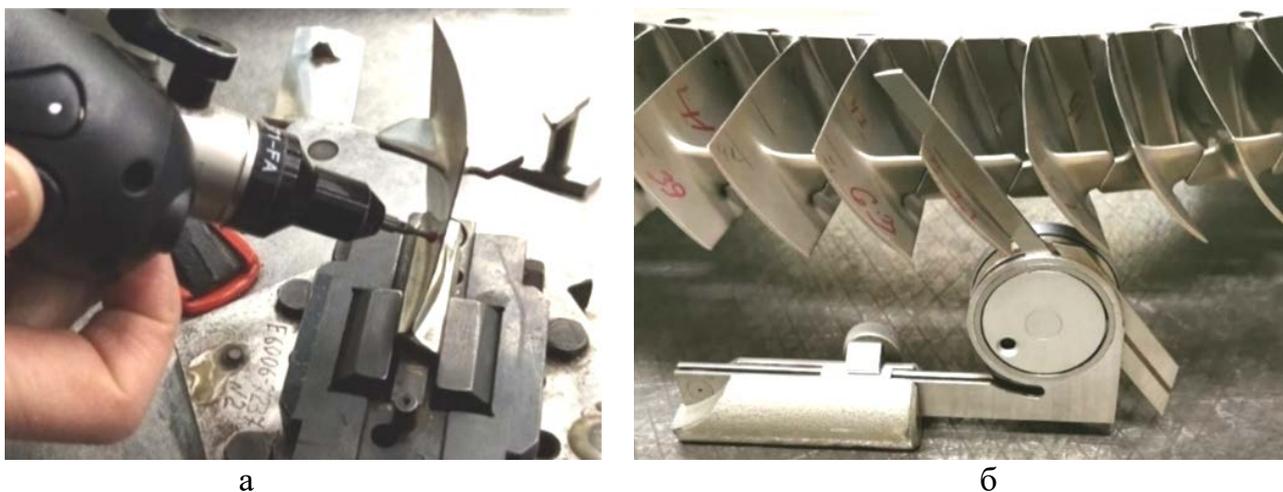


Рисунок 6 – Контроль лопаток на производстве:

а) контроль лопатки на КИМ CimCore; б) контроль углов установки лопаток

Во втором разделе описывается последовательность проведения предварительных сборок рабочих колёс при их ремонте. Проведены предварительные сборки двух рабочих колёс.

В третьем разделе анализируются результаты измерений лопаток, дисков и сборочных параметров комплектов рабочих колёс. Анализ производился с использованием разработанной методики обработки результатов экспериментальных исследований. В соответствии с технологией сборки рабочего колеса были проведены четыре сборки двух комплектов лопаток, согласно схемам их расстановки, полученным с использованием разработанной методики сборки рабочих колёс компрессора ГТД с автоматизацией формирования схемы расстановки лопаток.

На рисунке 7 приведены гистограммы распределений измеренных отклонений размеров l_{sp} для первого и второго рабочих колёс.

Согласно тесту Лилиефорса, нормальному закону подчиняются практически все измеренные параметры лопаток и дисков. Можно отметить, что отклонения параметров l_{sp} и γ_b лопаток превышают величину поля допуска в 2-3 раза.

На рисунке 8 приведены гистограммы распределений разности углов установки γ_{b_H} на втором комплекте при предварительной сборке и сборке по разработанной методике.

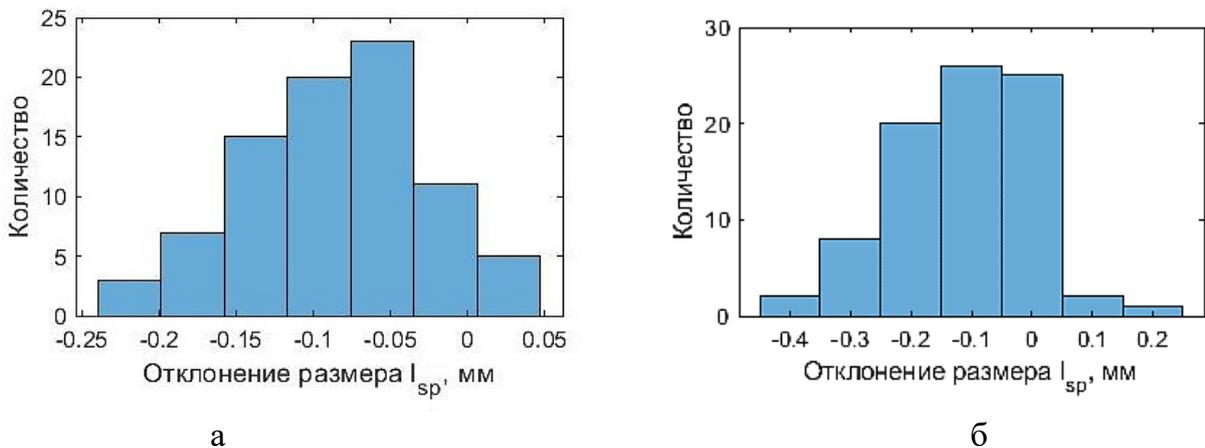


Рисунок 7 – Гистограммы распределения отклонений l_{sp} лопаток:
а) первое рабочее колесо; б) второе рабочее колесо

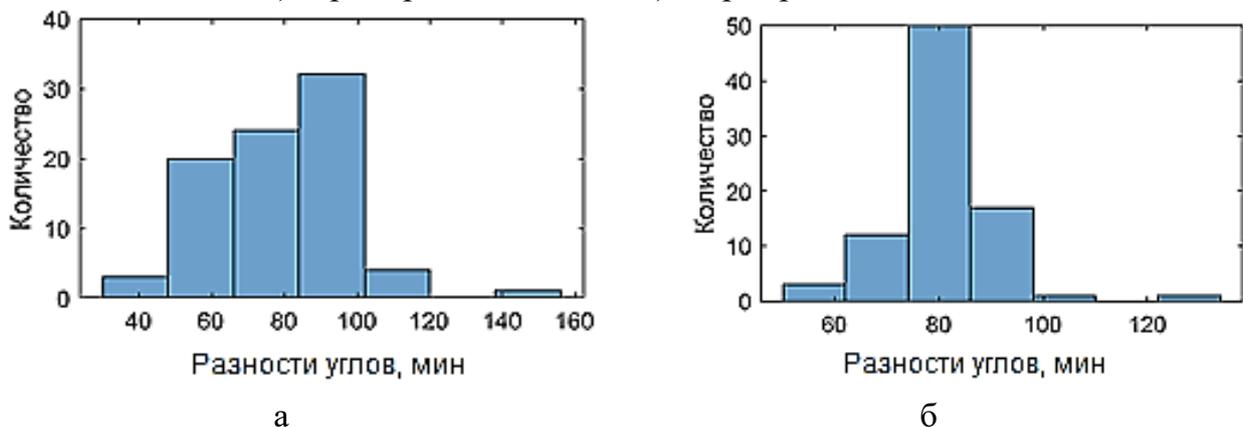


Рисунок 8 – Характеризующие натяги рабочего колеса разности углов:
а) предварительная сборка; б) сборка по разработанной методике

В таблице 1 приведены статистические характеристики углов γ_{b_n} : среднее выборочное $\mu_{\gamma_{b_n}}$, среднеквадратическое отклонение $\sigma_{\gamma_{b_n}}$, максимальное U_{CL} и минимальное L_{CL} значения, которые характеризуют натяги лопаток для шести проведённых сборок. Приведена доля ε_{γ} углов γ_{b_n} , выходящих за границы поля допуска (ниже 1°) на натяг.

Таблица 1 – Характеристики измеренных углов γ_{b_n} для выполненных сборок рабочих колёс

Параметр	Первый комплект			Второй комплект		
	Предварительная сборка	1 эксп.	2 эксп.	Предварительная сборка	3 эксп.	4 эксп.
$\mu_{\gamma_{b_n}}$, мин	78,93	77,98	80,24	77,8	75	78,04
$\sigma_{\gamma_{b_n}}$, мин	18,63	17,51	10,7	16,58	14,27	14,19
L_{CL} , мин	30	40	55	35	40	45
U_{CL} , мин	155	120	130	110	110	105
ε_{γ} , %	11,9	15,5	2,4	13,1	9,5	4,8

Представленные в таблице 1 характеристики сравнивались с данными, полученными в ходе сборки рабочих колёс по существующей на предприятии технологии. За счёт использования разработанной методики сборки рабочих колёс компрессора ГТД с автоматизацией формирования схемы расстановки лопаток, в первом комплекте $\mu_{\gamma_{b_n}}$ повысилось на 1,5', $\sigma_{\gamma_{b_n}}$ снизилось на 43%. Существенно снизилась доля лопаток, натяг которых находится ниже допустимой границы допуска: с 11,9% до 2,4%. При сборке второго комплекта с использованием разработанной методики $\mu_{\gamma_{b_n}}$ незначительно повысилось, в то время как $\sigma_{\gamma_{b_n}}$ снизилось на 14%. Существенно снизилась доля лопаток, лежащих ниже допустимой границы допуска: с 13,1% до 4,8%.

Трудоёмкость сборки участвующих в эксперименте рабочих колёс была сокращена с 12-16,5 часов до 7,1-7,2 часов, то есть на 41-56%. Использование разработанной методики при сборке рабочих колёс позволило сократить время формирования плана расстановки лопаток в 4 раза, а количество предварительных сборок в 2 раза.

В четвёртой главе представлена практическая реализация разработанных модели и алгоритма в виде программной системы, использование которой технологом в цехе позволит повысить точность и снизить трудоёмкость при расстановке лопаток в рабочем колесе компрессора на авиадвигателестроительных предприятиях.

Первый раздел главы содержит описание процесса разработки программной системы и включает в себя разработку требований к системе, архитектуры, базы данных, а также модуля интерфейса пользователя. Система реализована с использованием клиент-серверной архитектуры. Клиентская и серверная части реализованы на языке JAVA.

Во втором разделе четвёртой главы приводится описание работы программной системы. В этом разделе представлено подробное описание работы в графическом интерфейсе пользователя. Описаны условия выполнения программы, возможные действия с лопатками, дисками и сборками, приведены сообщения пользователю.

Выводы и основные результаты работы

В работе представлено решение значимой научно-технической задачи повышения точности и снижения трудоёмкости сборки рабочих колёс компрессоров ГТД за счёт разработки методики сборки с автоматизацией формирования схемы расстановки лопаток, модели оценки их натягов, и алгоритма расстановки лопаток.

В процессе выполнения работы были получены следующие результаты:

1. Создана математическая модель оценки натягов по антивибрационным полкам лопаток при их сборке в рабочем колесе, её отличительной особенностью является использование данных по отклонениям геометрических параметров лопаток, пазов диска и учёт влияния соседних лопаток. Данная модель позволяет на основании результатов измерений геометрических параметров рассчитывать величины натягов.

2. Разработан алгоритм расстановки лопаток в рабочем колесе, позволяющий минимизировать рассеивание величин натягов между лопатками по антивибрационным полкам, учитывающий отклонения натяга со стороны корыта и со стороны спинки от конструкторских значений. Результаты теоретических расчётов сравнивались с данными, полученными в ходе сборок рабочих колёс по существующей на предприятии технологии. Применение алгоритма расстановки лопаток в 2 раза позволило снизить рассеивание величины натягов между лопатками, при этом величина минимального натяга повысилась, а максимального – снизилась.

3. Разработана методика сборки рабочих колёс компрессора ГТД с автоматизацией формирования схемы расстановки лопаток, отличающаяся тем, что при расстановке лопаток используются отклонения геометрических параметров лопаток, пазов диска, обобщённые в виде математической модели. Использование разработанной методики позволило сократить количество предварительных сборок в 2 раза, снизить рассеивание натягов по антивибрационным полкам, увеличить минимальную разность угла установки, характеризующую минимальный натяг, с 30 до 55 угловых минут. В результате достигается повышение точности и снижение трудоёмкости сборочного процесса на 41-56%.

4. Проведены экспериментальные исследования по сборке рабочих колёс 8 ступени компрессора среднего давления в цеховых условиях с применением разработанной методики. Результаты теоретических расчётов показали снижение среднеквадратического отклонения натягов на 35-42%, а данные экспериментальной апробации методики – на 14-43%. Расхождение теории и эксперимента не превысило 21%.

5. Разработанная модель и алгоритм реализованы в виде программной системы на языке программирования JAVA. Предельное время, необходимое на формирование программой плана расстановки лопаток в рабочем колесе, составило 38 мс. Реализованная программная система позволяет использовать разработанную методику сборки рабочих колёс технологами авиадвигателестроительных предприятий.

Перспектива дальнейшего развития темы состоит в разработке и апробации методики комплектования лопатками нескольких рабочих колёс компрессора.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК России

1 **Печенина, Е.Ю.** Создание цифрового двойника процесса сборки рабочего колеса компрессора / Е.Ю. Печенина // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2023. – Т. 25. – № 1. – С. 28–35.

2 **Печенина, Е.Ю.** Разработка модели определения натягов по антивибрационным полкам лопаток / Е.Ю. Печенина, Е.В. Кудашов, В.А. Печенин // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2023. – Т. 22. – № 2. – С. 79–90.

3 **Печенина, Е.Ю.** Разработка алгоритма для комплектации рабочих колёс компрессора / Е.Ю. Печенина, М.А. Болотов, В.А. Печенин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2022. – № 69. – С. 14–22.

Статьи в издании, индексируемом базой данных Scopus

4 **Pechenina, E.Yu.** Development of the compressor impeller configuration algorithm / E. Yu. Pechenina, V.A. Pechenin, M.A. Bolotov // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Vol. 2373.

Публикации в других изданиях

5 Лунина, Е.А. Методика создания цифровых моделей лопаток ротора компрессора / Е.А. Лунина, **Е.Ю. Печенина**, В.А. Печенин // Сборник статей VIII Всероссийской научно-технической конференции для молодых учёных и студентов с международным участием «Инновации технических решений в машиностроении и транспорте». – 2022. – С. 138–142.

6 **Печенина, Е.Ю.** Разработка модели расчёта сборочного состояния рабочего колеса компрессора / Е.Ю. Печенина, Е.В. Кудашов, В.А. Печенин // Сборник трудов по материалам VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Исследование и проектирование интеллектуальных систем в автомобилестроении, авиастроении и машиностроении» («ISMCA' 2022»), Таганрог. – 2022. – С. 62–65.

7 Болотов, М.А. Цифровая модель оптимизации сборки ротора компрессора авиационного двигателя / М.А. Болотов, В.А. Печенин, **Е.Ю. Печенина**, Н.С. Голев // Сборник трудов по материалам VI Международной конференции и молодежной школ «Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2020)». – 2020. – С. 1–8.

Патенты

8 Свид. №2020618796 Российская Федерация. Программное обеспечение для повышения качества изделий посредством создания и использования их цифровых двойников / Печенин В.А., **Печенина Е.Ю.**, Кудашов Е.В., Грачев И.А.; заявитель ФГБОУ ВПО Самарский гос. аэрокосмический ун-т. – № 2020617756; заявл.15.07.2020; опубл. 04.08.2020. – 4 с.