

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 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»  
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ,  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 11 октября 2024 г. №7

о присуждении Болотову Михаилу Александровичу, гражданину Российской Федерации, учёной степени доктора технических наук.

Диссертация «Разработка методов создания цифровых технологических моделей деталей и узлов ГТД для повышения технических показателей их производства» по специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов принята к защите 24 мая 2024 г. (протокол заседания № 2) диссертационным советом 24.2.379.10, созданным на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (443086, г. Самара, Московское шоссе, 34), приказом Минобрнауки России от 14 февраля 2023 г. № 229/нк.

Соискатель Болотов Михаил Александрович, 23 сентября 1982 года рождения. Диссертацию «Разработка методики моделирования и исследование процесса измерения деталей ГТД на координатно-измерительных машинах» по специальности 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов на соискание учёной степени кандидата технических наук защитил 27 апреля 2012 года в диссертационном совете Д 212.215.02, созданном на базе ФГБОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)». Учёное звание доцента по специальности «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов» присвоено в 2020 году.

Болотов М. А. работает в должности доцента кафедры технологий производства двигателей федерального государственного автономного

образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена на кафедре технологий производства двигателей федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный консультант – д.т.н., доцент Хаймович Александр Исаакович, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», заведующий кафедрой технологий производства двигателей.

Официальные оппоненты:

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

Леонтьев Михаил Константинович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», профессор кафедры 203 «Конструкция и проектирование двигателей»;

Нихамкин Михаил Шмерович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», профессор кафедры «Авиационные двигатели», -

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург, в своём положительном отзыве подписанном доктором технических наук, профессором Болдыревым Юрием Яковлевичем, профессором Института передовых производственных технологий физико-механического института, и утверждённом проректором по научной работе кандидатом физико-математических наук Фоминым Юрием Владимировичем, указала что диссертационная работа Болотова М.А. является законченной научно-квалификационной работой, которая имеет важное значение для совершенствования технологии сборки ГТД и вносит



существенный вклад во внедрение цифровых технологий в разработку авиационных ГТД. Рассматриваемая диссертация выполнена на высоком научном уровне, носит законченный характер и соответствует пункту 9 Положения о присуждении учёных степеней, а её автор, Болотов М.А. заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Соискатель имеет 120 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 59 научных работ, из них 32 статьи опубликованы в научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, и 27 в журналах, входящих в международные базы данных «Scopus», получено 7 свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ и 4 патента. Суммарный объём принадлежащего соискателю опубликованного материала составляет 11,38 печатных листа.

Из материалов совместных публикаций лично соискателю принадлежат: состав, информационное содержание и основные принципы создания и применения проблемно-ориентированных действительных моделей деталей и сборочных единиц; метод определения действительных геометрических параметров деталей и сборочных параметров узлов с помощью виртуальных мер (ВМ) и комплектных виртуальных сборок (КВС); метод оценки параметров сопряжений деталей и узлов при учёте контактного взаимодействия их поверхностей с использованием действительных моделей; метод повышения точности сборки узлов за счёт автоматизации операции пригонки деталей с использованием их действительных моделей; метод снижения неуравновешенностей роторов ГТД с помощью балансировки с использованием цифровой модели; модель определения рациональных условий сборки узлов; алгоритм и модель определения рациональных условий сборки роторов ГТД. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем учёной степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

Наиболее значимые работы:

1. Печенин, В.А. Методика повышения точности механической обработки сложнопрофильных деталей / В.А. Печенин, А.Н. Жидяев, **М.А. Болотов** // Вестник машиностроения. – 2017. – № 8. – С. 35-40 (научная статья 0,38 п.л./0,13 п.л.).

2. **Болотов, М.А.** Модель сопряжения деталей с коническими поверхностями / **М.А. Болотов**, В.А. Печенин, Н.В. Рузанов, И.А. Грачев, И.В. Щербаков // СТИН. – 2017. – № 3. – С. 28-33 (научная статья 0,37 п.л./0,1 п.л.).

3. Болотов, М.А. Моделирование сопряжения деталей по плоскоцилиндрическим поверхностям / **М.А. Болотов**, В.А. Печенин, Н.В. Рузанов и др. // СТИН. – 2017. – № 3. – С. 22-28 (научная статья 0,44 п.л./0,31 п.л.).

4. Печенин, В.А. Модель распознавания элементов геометрии пера лопаток газотурбинных двигателей / В.А. Печенин, **М.А. Болотов**, Н.В. Рузанов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2018. – № 3. – С. 102-108 (научная статья 0,44 п.л./0,13 п.л.).

5. Елисеев, Ю.С. Прогнозирование погрешностей сборки изделий с использованием действительных моделей деталей / Ю.С. Елисеев, **М.А. Болотов**, В.А. Печенин, И.А. Грачев, Е.В. Кудашов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2019. – Т. 18, №2. – С. 128-137 (научная статья 0,62 п.л./0,4 п.л.).

6. **Болотов, М.А.** Алгоритм прогнозирования вибрационного состояния ротора турбины с использованием машинного обучения / **М.А. Болотов**, В.А. Печенин, Е.Ю. Печенина, Н.В. Рузанов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2020. – Т.19, №1. – С. 18-27 (научная статья 0,62 п.л./0,45 п.л.).

7. Хаймович, А.И. Модель виртуального уравнивания жёстких роторов / А.И. Хаймович, **М.А. Болотов**, Е.Ю. Печенина // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2021. – Т.21. № 1. – С. 99-109 (научная статья 0,69 п.л./0,4 п.л.).

8. Печенина, Е.Ю. Сравнительный анализ архитектур нейронных сетей для системы технического зрения предприятия / Е.Ю. Печенина, В.А. Печенин, **М.А. Болотов** // Насосы. Турбины. Системы. – 2021. – № 3 (40). – С. 96-104 (научная статья 0,56 п.л./0,13 п.л.).

9. **Болотов, М.А.** Метод оценки неопределённостей пространственного сопряжения высокоточных оптических и механических деталей / **М.А. Болотов**, В.А. Печенин, С.П. Мурзин // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 3. – С. 360-369 (научная статья 0,62 п.л./0,21 п.л.).

10. Pechenin, V.A. Mathematical models for forecast of geometrical parameters of assembly units / V.A. Pechenin, **M.A. Bolotov**, N.V. Ruzanov // CEUR Workshop Proceedings. – 2017. – V. 1904. – P. 23-28 (научная статья 0,37 п.л./0,2 п.л.).

11. **Bolotov, M.A.** Information model and software architecture for the implementation of the digital twin of the turbine rotor / **M.A. Bolotov**, V.A. Pechenin, N.V. Ruzanov, I.A. Grachev // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1368(5) (научная статья 0,62 п.л./0,5 п.л.).

12. Grachev, I.A. Problems and ways to reduce measurement uncertainties in



evaluating the geometric assembly parameters of gas turbine engine assemblies / I.A. Grachev, **M.A. Bolotov**, E.V. Kudashov etc. // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1515. Issue 5 (научная статья 0,37 п.л./0,25 п.л.).

13. Grachev, I.A. Comparative analysis of simulation options for the real geometry of the surfaces of gas turbine engine parts / I.A. Grachev, **M.A. Bolotov**, V.A. Pechenin etc. // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1745. Issue 1 (научная статья 0,68 п.л./0,5 п.л.).

14. Пат. 2639993 Российская Федерация МПК G01B 11/27. Устройство для автоматизированного контроля соосности и центровки механических конструкций [Текст] / Грачев И.А., **Болотов М.А.**, Печенин В.А., Рузанов Н.В.; заявитель и патентообладатель Самарский университет. - №2016141214; заявл. 19.10.2016; опубл. 25.12.2017, Бюл. № 36. (изобретение)

15. Пат. 2822671 Российская Федерация МПК G01M 15/14, G01M 1/00. Способ сборки и балансировки высокооборотных роторов и валопроводов авиационных и газоперекачивающих агрегатов [Текст] / Сусликов В.И., Сусликов С.В., **Болотов М.А.**; заявитель и патентообладатель Самарский университет. - №2016141214; заявл. 31.08.2022; опубл. 11.07.2024, Бюл. № 7. (изобретение)

На диссертацию и автореферат поступило девять отзывов от организаций:

1) ПАО «ОДК «Кузнецов», отзыв составлен и подписан Кретовым С. Ф., временно исполняющим обязанности технического директора, главным конструктором д.т.н., профессором Данильченко В. П.;

2) ПАО «ОДК-Сатурн», отзыв составлен и подписан экспертом по безопасности и надёжности конструкторского отдела исследований и надёжности д.т.н. Сарычевым С. В., ведущим специалистом службы главного конструктора к.т.н. Диденко Р. А., исполняющим обязанности генерального конструктора Старковым Р. Ю.;

3) АО «Новые инструментальные решения», отзыв составлен и подписан генеральным директором д.т.н. Коряжкиным А. А.;

4) АО «Казанское моторостроительное производственное объединение», отзыв составлен и подписан инженером-конструктором 2 категории службы главного конструктора ГТД к.т.н., доцентом Кусюмовым С. А., заместителем генерального директора по развитию – главным инженером Скащенко А. Ю.;

5) АО «Объединённая двигателестроительная корпорация», отзыв составлен и подписан заместителем главного конструктора ОГК НТЦ «МКБ «Гранит» ПК «Салют» АО «ОДК» к.т.н. Фетисовым М. В., директором по НИР и ОКР НТЦ «МКБ «Гранит» ПК «Салют» АО «ОДК» Потаповым А. Ю.;

6) ПАО «ОДК-УМПО», отзыв составлен и подписан ведущим

конструктором отдела 3000 к.т.н. Трешневской А.С., генеральным конструктором – директором ОКБ им. А.Люльки – филиала ПАО «ОДК-УМПО» Марчуковым Е. В.;

7) ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», отзыв составлен и подписан профессором кафедры технологии машиностроения д.т.н., профессором Смысловым А. М.;

8) ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет гражданской авиации», отзыв составлен и подписан заведующим кафедрой «Двигатели ЛА» д.т.н., профессором Машошиным О. Ф.;

9) ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО», отзыв составлен и подписан доцентом факультета систем управления и робототехники к.т.н. Абрамчуком А. М.

Критическими замечаниями из отзывов являются:

1. При совмещении номинальной поверхности и облака измеренных точек используется метод наименьших квадратов. Однако известно, что для оценки геометрических характеристик изделий предпочтительным является допуск минимальной зоны. Было бы целесообразно сравнить получаемые по этим двум методам результаты.

2. Стр. 69. Аббревиатура ПКИ (показатель качества изделия). Слишком общее понятие. Многообразие задач, где используются цифровые модели, определяет и многообразие ПКИ. Учитывая, что основные задачи в диссертации связаны с балансировкой было бы лучше и оставаться в области вибраций. Например, связать ПКИ с уровнем допустимых значений дисбалансов из ТУ на балансировку или из КД.

3. Стр. 211. В качестве рабочих и эксплуатационных параметров могут выступать такие параметры как суммарный дисбаланс, виброскорости на опорах, ожидаемые перемещения ротора в различных сечениях (в случае гибкого ротора), реакции сил на опорах ротора. Очень формализованная постановка для выбора критерия. Использование осесимметричной модели ротора даст только предварительную оценку. Реализация этой задачи в динамике требует использования высокоточных моделей роторных систем. Лучше оставаться на статических показателях качества – радиальных и торцовых биениях, проходных сечениях, зазоров в лабиринтах и натягов, значений дисбалансов. Дополнительным показателем качества сборки может явиться её соответствие распределению дисбалансов и их значениям, которые задаются конструктором или определяются прочнистом по динамическим коэффициентам податливости (ДКВ) с использованием полноценных моделей.



4. В п.3.4 задача определения узловых перемещений конечно-элементной модели формулируется в простейшей линейной постановке. Контактная задача механики деформируемого твердого тела – нелинейная, т.к. площадка контакта всегда неизвестна. В методе конечных элементов существует несколько подходов к её решению. В диссертации и автореферате моделирование контакта подробно не обсуждается. Поэтому неясно, каким образом рассчитано напряженно-деформированное состояние узлов в приведенных в диссертации примерах.

В полученных отзывах отмечено, что указанные замечания в целом не снижают высокой оценки работы, а сама диссертационная работа соответствует требованиям Положения о присуждении учёных степеней, предъявляемым к докторским диссертациям, и сделано заключение о возможности присуждения Болотову М.А. учёной степени доктора технических наук по специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Выбор Захарова О. В. в качестве официального оппонента обосновывается компетенциями исследований в области координатных измерений; теории механизмов и формообразования сложных поверхностей; моделирования и управления сборочными процессами деталей и узлов газотурбинных двигателей.

Выбор Леонтьева М. К. в качестве официального оппонента обосновывается компетенциями исследований в области теории динамики роторов, уравнивания машин и механизмов, технологических процессов сборки и балансировки роторов авиационных ГТД. Профессор Леонтьев М.К. является разработчиком отечественной системы DYNAMICS R4, применяемой для решения широкого спектра практических задач многовальной линейной и нелинейной роторной динамики.

Выбор Нихамкина М. Ш. в качестве официального оппонента обосновывается компетенциями исследований в области теории динамики роторов, уравнивания машин и механизмов, технологических процессов сборки и балансировки роторов авиационных ГТД.

Выбор федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» в качестве ведущей организации связан с наличием компетенций в области разработки цифровых двойников для различных отраслей промышленности, в том числе для авиационного двигателестроения, и обосновывается наличием компетентных специалистов, одним из которых является доктор технических наук, профессор Болдырев Ю. Я. – заслуженный работник высшей школы, профессор Института передовых

производственных технологий Физико-Механического института Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, **область компетенций, которого связана** с математическим моделированием сложных технических систем, включая авиационные газотурбинные двигатели.

**Диссертационный совет отмечает**, что на основании выполненных соискателем исследований:

**разработаны:**

– метод определения геометрических параметров деталей и сборочных параметров узлов по результатам анализа их измерений с помощью виртуальных мер и комплектных виртуальных сборок, позволяющий учитывать параметры сопряжений контактных поверхностей измеренных объектов в составе сборочных единиц;

– метод оценки параметров сопряжений деталей и узлов с учётом контактного взаимодействия их поверхностей с использованием действительных моделей, применяемых при выполнении расчётов размерных связей;

– метод повышения точности сборки узлов за счёт автоматизации операции пригонки деталей с использованием их действительных моделей, позволяющий повысить площадь контакта поверхностей и обеспечить точность взаимного расположения деталей;

– метод снижения неуравновешенностей роторов ГТД с помощью балансировки на цифровой модели, учитывающей погрешности сборочных параметров, за счёт обеспечения противонаправленности возмущающего воздействия от неуравновешенностей деталей и сборочных единиц, путём выбора оптимального положения деталей в окружном направлении;

– модель определения рациональных условий сборки узлов (рационального положения собираемых деталей в окружном направлении), в которой предварительно используется метод машинного обучения для сужения границ области решения, а затем производится уточнение определяемых параметров с применением численных моделей сопряжения деталей;

– алгоритм и модель определения рациональных условий сборки роторов ГТД для повышения точности их сборочных параметров и снижения трудоёмкости операций сборки, предусматривающие комплексный учёт требований к точности сборочных параметров, допустимому дисбалансу;

**предложены:**

– научная идея и сформулированы основные принципы, включающие разработку и сквозное использование действительных моделей объектов при решении технологических задач обеспечения качества сборочных операций при производстве и ремонте ГТД;



– критерии нахождения рациональных угловых положений деталей и узлов в составе ротора исходя из: а) наилучшего соответствия заданным параметрам качества сборки (с учётом торцевых и радиальных биений ротора); б) наилучшего соответствия эксплуатационных параметров изделия заданным требованиям (с учётом дисбалансов ротора); в) компромиссного решения по достижению наиболее значимых параметров качества и эксплуатационных параметров (с учётом биений и дисбалансов ротора);

**доказано, что использование:**

– метода определения действительных геометрических параметров деталей и сборочных параметров узлов с помощью виртуальных мер и комплектных виртуальных сборок позволяет снизить погрешность оценки действительных размеров деталей и сборочных параметров узлов на 20% по сравнению с существующими технологиями;

– метода оценки параметров сопряжений деталей и узлов при учёте контактного взаимодействия их поверхностей с использованием действительных моделей позволило снизить погрешность расчёта биений ротора в сборе на 25% по сравнению с методом размерных цепей;

– метода снижения неуравновешенностей роторов ГТД с помощью балансировки на цифровой модели позволит уменьшить вибрации на опорах ГТД в процессе его сборки не менее чем на 30% посредством учёта производственных погрешностей входящих в него деталей и узлов;

– модели определения рациональных угловых положений деталей ротора ГТД позволяет снизить погрешности сборочных параметров (торцевых и радиальных биений рабочих колес) в среднем на 23% и уменьшить величину дисбаланса на 80% по сравнению со сборкой ротора с произвольным положением ДСЕ в окружном направлении;

**введены новые термины:**

– «Цифровая технологическая модель, построенная на основе действительных параметров» (сокращённо «Действительная модель»), обозначающий цифровую модель сборочных единиц и/или производственных процессов технических объектов, содержащую совокупность действительных размеров, технических требований, физико-механических свойств, функциональных и иных условий работы, обладающую свойствами необходимости и достаточности её информационного содержания для решения конструкторских, технологических и иных задач;

– «Виртуальная мера» это цифровая модель объекта для определения с необходимой и достаточной точностью действительных размеров ДСЕ и их сборочных параметров, содержащая номинальные поверхности для имитации (моделирования) контактного взаимодействия с измеряемым объектом;

– «Комплектная виртуальная сборка» это совокупность виртуальных мер и действительных моделей объектов для определения действительных размеров ДСЕ и их сборочных параметров с помощью моделирования контактного взаимодействия, назначения размерных и функциональных связей и обеспечения возможности перемещения и изменения размеров сопрягаемых объектов.

**Теоретическая значимость исследования** обоснована тем, что:

**доказана** эффективность разработки и использования действительных моделей деталей и узлов ГТД для снижения погрешностей и трудоёмкости технологических процессов сборки роторов ГТД за счёт сокращения количества предварительных сборок с 4 до 2;

**изложены:**

– основные положения и подходы, касающиеся взаимосвязи конструкторских и технологических уровней подготовки производства ГТД, уровней функциональных связей, основных параметров и объектов, решаемых задач и этапов формирования и использования действительных моделей объектов для решения технологических задач;

– методика создания действительных моделей объектов, применимая для разных деталей и узлов ГТД;

– алгоритм построения конечно-элементных моделей для оценки вибраций роторов с использованием их действительных моделей;

**изучены:**

– статистические данные по отклонениям формы профилей цилиндрических и торцевых поверхностей деталей роторов ГТД, позволившие получить обобщённые параметры, характеризующие точность технологических процессов производства комплектов деталей;

– статистические данные измерений геометрии деталей и узлов ГТД с использованием координатно-измерительных машин, позволяющие произвести оценку геометрических параметров, полученные с использованием виртуальных мер и метода наименьших квадратов на основе информации по вероятностным отклонениям формы поверхностей;

– процесс балансировки роторов ГТД с точки зрения его модернизации за счёт использования цифровых моделей и оценки возможности снижения дисбалансов ротора;

– процесс балансировки ротора турбины низкого давления, что позволило получить: а) теоретические распределения результирующих дисбалансов ротора в зависимости от вероятностных смещений центров масс его деталей; б) зависимости относительных значений виброскоростей опор ГТД от углового положения и остаточного дисбаланса деталей в составе ротора;



– процесс сборки ротора компрессора низкого давления, что позволило получить зависимости биений ротора от величин отклонений формы торцевой и радиальной поверхностей его деталей.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики** подтверждается тем, что:

**разработаны и внедрены:**

– программное приложение и улучшенная модель расчёта дисбаланса ротора для его балансировки методом двухборок в ПАО «ОДК-Кузнецов» (акт внедрения от 28.02.2024 г.);

– технологические решения для снижения неуравновешенностей ротора НД в ходе его балансировки с использованием действительных моделей узлов на АО «Металлист-Самара» (акт от 26.02.2024 г.);

– технологические решения для улучшения технологии сборки в ходе ремонта ротора и камеры сгорания ГТД на основе использования результатов измерений в ООО «Газпром трансгаз Самара» (акт от 12.02.2024 г.);

– результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс института двигателей и энергетических установок Самарского университета (акт внедрения от 05.02.2024 г.);

**представлена**

комплексная методика обеспечения технических требований сборочных операций, включающая отдельные методики обеспечения геометрической точности и дисбалансов узлов, за счёт использования результатов измерений деталей и узлов, создания их действительных моделей, использования цифровых моделей процесса сборки и балансировки узлов.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

**для экспериментальных работ** результаты исследований получены на поверенных средствах измерений, аттестованном испытательном оборудовании и разработанном разгонно-балансирующем стенде, обеспечивающим воспроизводимость результатов исследования;

**теория** построена на известных, проверенных положениях математического анализа, линейной алгебры, теории вероятностей, математической статистики, аналитической геометрии, вычислительной математики, теории колебаний и конечных элементов и согласуется с опубликованными данными по теме диссертации и смежным темам;

**идея базируется** на анализе практики и обобщении передового опыта в области технологии сборки и балансировки роторов авиационных двигателей, заключающегося в оценке сборочных параметров и дисбалансов узлов, а также определении условий выполнения их сборки;

**установлено** качественное и количественное совпадение результатов численных и натурных экспериментов;

**использовано** лицензионное программное обеспечение (MATLAB, PC-DMIS, NX, ANSYS), языки программирования C++ и Python для разработки авторских модулей, а также известные численные методы, обладающие высокой точностью при проведении вычислительных экспериментов.

**Личный вклад соискателя состоит** в непосредственном участии в получении исходных данных и проведении теоретических и экспериментальных исследований и интерпретации полученных данных, в разработке методов, математических моделей и алгоритмов, апробации результатов исследования и подготовке основных публикаций по выполненной работе. Все результаты, выносимые на защиту, получены автором лично, либо при его определяющем участии.

В ходе защиты диссертационной работы были высказаны следующие критические замечания:

1. Цель работы включает повышение точности и снижение затрат. Со снижением затрат всё понятно. Точность задана конструктором на размеры и технические требования. Почему необходимо повышать точность сборки узлов?

2. Могут ли быть применимым Ваши разработки к ремонтному производству авиационных ГТД?

3. В автореферате высказана мысль, что Ваши разработки также будут полезны конструкторским службам предприятий? Поясните, для решения каких задач они могут быть использованы.

4. Разработанные Вами методы, наверное, можно использовать и для других объектов машиностроения? Обоснуйте пожалуйста отнесение Вашей диссертации к научной специальности 2.5.15.

5. Позволяет ли Ваш метод полностью уйти от балансировки?

Соискатель Болотов М. А. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привёл собственную аргументацию по высказанным замечаниям:

1. Между показателями качества изделий и погрешностью сборочных параметров узлов и деталей существуют взаимосвязи. Снижение погрешностей сборочных параметров узлов и деталей, в частности геометрических параметров и дисбалансов ротора, приводит к повышению межремонтного ресурса, уменьшению вероятности появлений повышенной вибрации при испытании изделий, а также благоприятно скажется на эксплуатационных характеристиках изделий. Это в свою очередь приводит к сокращению суммарных затрат, связанных с приобретением и эксплуатации изделия, что повышает конкурентоспособность выпускаемых изделий.



2. Для ремонтного производства разработки будут иметь большую актуальность, потому что в ремонтном производстве детали приходят с большими по сравнению с вновь изготовленными деталями геометрическими отклонениями и дисбалансами. Вопросы о том, каким образом комплектовать детали, их дорабатывать и взаимно ориентировать, являются в ремонте более актуальными.

3. Возможно два применения результатов для конструкторских служб. Первое – обоснованное назначение допусков и технических требований к деталям и узлам при их конструировании, основанное на результатах обобщения данных по геометрическим отклонениям деталей и узлов, а также новых возможностей моделирования размерных связей. Второе – для конструкторских отделов, которые сопровождают серийное производство. Модели могут помочь в принятии решения о допуске или не допуске деталей и узлов с повышенными геометрическими отклонениями к использованию в изделии.

4. Если говорить про тепловые двигатели летательных аппаратов, то в них есть отличительные особенности, которые заключаются в специфической конструкции, обуславливающей определённые соотношения геометрических отклонений деталей и узлов, жёсткостей, которые в других объектах не встречаются, например, жёсткость деталей и узлов газотурбинных агрегатов энергетического машиностроения выше. Проблем с недостаточной жёсткостью при сборке агрегатов энергетического машиностроения меньше. Специфика сборки авиационных ГТД подразумевает использование предварительных сборок. Роторы авиационных ГТД являются гибкими и балансируются на частотах вращения в несколько раз ниже рабочих. В ходе балансировки авиационных ГТД нужно создавать такие условия, которые позволят при работе изделий не превышать допустимых значений параметров, например, уровень вибрации не должен превышать заданного значения. Это достигается за счёт поэтапной сборки и балансировки деталей и узлов роторов, что позволяет достичь равномерность распределения масс ротора вдоль его оси. Энергетические турбины балансируются по другой технологии. Для таких турбин есть возможность разгона роторов до рабочих частот вращения. Совокупность этих условий обеспечивает отнесение диссертационной работы к специальности 2.5.15.

5. Полностью от балансировки роторов не уйти. После выполнения предварительного уравнивания ротора, то есть после выполнения мероприятий, которые формируют равномерность распределения масс ротора вдоль его оси, всё равно останутся остаточные неуравновешенности, обусловленные действием множества факторов. Устранение остаточного дисбаланса с помощью действительных моделей упирается в необходимость

повышения их детальности и вычислительной сложности. Проведение окончательной балансировки является необходимым. Важно то, что использование методов позволяет снизить начальный дисбаланс ротора за счёт повышения равномерности распределения его масс. Для гибких роторов это является значимым условием.

Полученные результаты диссертационного исследования могут быть использованы при производстве и ремонте авиационных ГТД и энергетических установок на предприятиях двигателестроения, таких как АО «ОДК-ПМ» (г. Пермь), ПАО «ОДК-УМПО» (г. Уфа), АО «ОДК-Газовые турбины» (г. Рыбинск), ПАО «ОДК-Сатурн» (г. Рыбинск), АО «218 AP3» (г. Гатчина) и АО НПЦ Газотурбостроения «Салют» (г. Москва), АО «ОДК-Климов» (г. Санкт-Петербург), АО «ММП имени В.В.Чернышева» (г. Москва), филиал АО «ОДК» «ОМО им. П.И. Баранова» (г. Омск), АО «НПП «Аэросила» (г. Ступино), ПАО «Силовые машины» (г. Санкт-Петербург) и иных.

Диссертация Болотова М.А. является законченной научно-квалификационной работой, соответствует специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов и отвечает критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора наук (пункт 9 Положения о присуждении учёных степеней). В диссертации содержится решение научной проблемы, направленной на повышение технологических характеристик двигателей в условиях цифрового производства применительно к операциям сборки и доводки, имеющей важное хозяйственное значение для развития авиационного двигателестроения.

На заседании 11 октября 2024 г. диссертационный совет принял решение присудить Болотову Михаилу Александровичу учёную степень доктора технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 12 человек, из них – 6 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 14 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 12, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Зам. председателя  
диссертационного совета 24.2.379.10  
д.т.н., профессор

  
Фалалеев Сергей Викторович

Учёный секретарь  
диссертационного совета 24.2.379.10  
д.т.н., доцент

  
Виноградов Александр Сергеевич

11.10.2024

