

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»**

На правах рукописи

ЕРМАКОВА МАРИЯ ОЛЕГОВНА

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ИСПЫТАНИЙ
ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

2.5.22. – Управление качеством продукции.
Стандартизация. Организация производства

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук.

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Монахова Вероника Павловна

Москва – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ	14
1.1. Исследовательские испытания электроракетных двигателей	14
1.2. Проблемы обеспечения качества процесса исследовательских испытаний электроракетных двигателей	32
1.3. Цель и задачи диссертационного исследования	36
ГЛАВА 2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ	37
2.1. Современные методы моделирования процессов	37
2.2. Функциональное моделирование процессов исследовательских испытаний электроракетных двигателей	43
2.3. Анализ структуры и взаимосвязей процессов исследовательских испытаний электроракетных двигателей	52
2.4. Выводы по главе 2	59
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА КВАЛИМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ.....	60
3.1. Квалиметрические методы оценки при управлении качеством исследовательских испытаний электроракетных двигателей.....	60
3.2. Построение квалиметрической модели оценки качества исследовательских испытаний электроракетных двигателей	63
3.3. Роль информационных технологий в системе управления качеством исследовательских испытаний электроракетных двигателей.....	79
3.4. Разработка программы для автоматизированного анализа и оценки уровня качества процесса испытаний электроракетных двигателей.....	83
3.5 Выводы по главе 3	89
ГЛАВА 4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ.....	91
4.1. Оценка качества процесса исследовательских испытаний электроракетных двигателей (текущее состояние)	91

4.1.1 Описание объекта исследования, экспериментального оборудования, методики измерений.....	91
4.1.2. Диагностирование текущего уровня качества процесса исследовательских испытаний ЭРД.....	95
4.2. Разработка и внедрение мероприятий по улучшению качества процесса исследовательских испытаний электроракетных двигателей.....	98
4.2.1 Разработка автоматизированной системы управления процессом и регистрации первичных данных.....	99
4.2.2 Разработка научно-программного комплекса статистической обработки результатов измерений.....	102
4.3. Оценка эффективности внедрения мероприятий по улучшению качества процесса исследовательских испытаний ЭРД.....	107
4.4 Выводы по главе 4	108
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	110
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	113
ПРИЛОЖЕНИЕ А	127
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	176
ПРИЛОЖЕНИЕ В	197
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	266
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	267
ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....	268
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж	269

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы

В настоящее время решение многих научных и прикладных задач в космосе связано с широким использованием космических электроракетных двигателей (ЭРД) [1]. Интерес к таким двигательным системам, построенным на основе ЭРД, обусловлен их высокой экономичностью, что позволяет снизить массу заправленных систем в разы по сравнению с системами на базе жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) [35]. К числу задач ЭРД относятся вопросы ориентации, стабилизации и коррекции орбит искусственных спутников и долговременных орбитальных станций, а также обеспечение межорбитальных и дальних космических полетов к планетам Солнечной системы [29]. За многие годы проведена большая работа по разработке ЭРД различных типов. В ходе проектирования и производства составляющие элементы, узлы, системы и электроракетный двигатель в целом подвергаются различным видам испытаний, начиная от простых контрольных до более трудоемких стендовых и летных испытаний [2]. В номенклатуру стендовых (наземных) испытаний входят исследовательские испытания, целью которых является изучение и анализ закономерностей функционирования как всей системы в целом, так и ее подсистем, включая отдельные элементы, а также влияния внешней среды, структуры системы, взаимодействия элементов системы, режимов функционирования [29].

В настоящее время в России разработкой, проектированием, изготовлением и испытаниями ЭРД занимаются: АО ОКБ «Факел», АО ГНЦ «Центр Келдыша», ФГБОУ ВО «МАИ (НИУ)», в том числе НИИ «Научно–исследовательский институт прикладной механики и электродинамики», ФГАОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана (НИУ)», ФГАОУ ВО «МФТИ (НИУ)», Бюро 1440, ООО «Орбитек». Однако, для обеспечения надежности и безопасности эксплуатации ЭРД,

необходимо проводить комплексные исследовательские испытания, которые требуют единого системного подхода к оценке их качества.

Оценка качества процессов исследовательских испытаний ЭРД включает в себя множество аспектов, таких как планирование и проведение эксперимента, анализ полученных данных, а также соответствие установленным стандартам и требованиям безопасности. Важность этих показателей трудно переоценить, так как они напрямую влияют на надежность и эффективность разрабатываемых систем. В условиях растущей конкуренции и стремительного развития технологий необходимо внедрение современных методов оценивания, которые позволят не только повысить качество исследовательских испытаний, но и сократить время их проведение. Подходы, связанные с применением статистических методов контроля процессов для анализа стабильности и предсказуемости испытаний, внедрением автоматизированных систем сбора и анализа данных для минимизации человеческих ошибок и реализации принципов «Всеобщего управления качеством» (Total Quality Control, TQM) для создания культуры непрерывного улучшения, позволяют не только повысить объективность и достоверность оценивания, но и оптимизировать временные затраты за счет сокращения повторных испытаний и исключения некорректных данных. Интеграция современных оценочных методик в систему менеджмента качества обеспечивает комплексное улучшение как самого процесса испытаний, так и итоговых характеристик разрабатываемых ЭРД.

Степень разработанности проблемы. Фундаментальная теоретическая и методологическая база в области управления качеством была сформирована благодаря значительному вкладу как зарубежных, так и отечественных исследователей. Так, зарубежные ученые заложили ключевые принципы: Шухарт У. и Деминг Э. разработали методологию статистического контроля процессов и циклического непрерывного улучшения; Джуран Дж. и Кросби Ф. сформулировали системный подход к планированию качества; а значительный вклад в развитие системного подхода к качеству внес Фейгенбаум А., который ввел и обосновал концепцию TQM, заключающуюся в том, что высокое качество

продукции должно формироваться на всех без исключения этапах ее жизненного цикла, начиная от проектирования и заканчивая послепродажным обслуживанием. В свою очередь, отечественная научная школа, представленная трудами В.В. Бойцова, Барвинок В.А., Азгальдова Г.Г., Белобрагина В.Я. и других, разработала теоретические основы квалиметрии и апробировала на практике комплексные системы управления качеством, что позволило успешно решать прикладные задачи повышения эффективности производства на отечественных предприятиях. Синтез этих достижений создал прочную основу для решения современных теоретических и практических задач в области менеджмента качества.

Ключевые научно-прикладные аспекты проведения исследовательских испытаний космических ЭРД были сформулированы и глубоко проанализированы в работах российских ученых – Хартова С.А., Гордеева С.В., Вавилова И.С., Кожевникова В.В., Козлова О.В., Мельникова А.В., а также зарубежных авторов – Хоффера Р.Р., Шастри Р. рассматриваются методы, методики и средства измерений при испытаниях ЭРД; в работах Вавилова И.С., Ячменева П.С. представлена методика определения малых тяг ионного двигателя аэродинамическим методом двойного угла ($AM\alpha\beta$ -методом) и конструкция испытательного стенда; в работах Кожевникова В.В. и Надирадзе А.Б. – особенности измерений параметров плазменных струй ЭРД различными типами зондов. В работах Торопова Г.П., Хартова С.А. и Фроловой Ю.В. поднимаются вопросы оценки погрешности результатов измерений исследуемых параметров, определения показателей сходимости и достоверности полученных результатов, вопросы переноса результатов измерений, полученных в стендовых условиях, на условия натурной эксплуатации.

Наиболее всесторонне проблема методологии процесса исследовательских испытаний ЭРД была рассмотрена Яковлевым Е.А., автор которой обращает внимание, что методология исследовательских испытаний должна быть основана на системном подходе и предполагать обеспечение возможности получения

требуемых количественных показателей, характеризующих эффективность функционирования как отдельных составляющих, так и всей системы в целом.

Цель работы – повышение качества процессов исследовательских испытаний электроракетных двигателей на основе проектирования процессных моделей и структурирования функции качества.

Задачи исследования:

1. Провести анализ состояния обеспечения качества процессов исследовательских испытаний электроракетных двигателей.
2. Разработать модели процессов исследовательских испытаний электроракетных двигателей, в которых учтена автоматизация элементов системы, влияющих на обеспечение достоверности результатов испытаний.
3. Разработать квалиметрическую модель оценки качества процессов исследовательских испытаний электроракетных двигателей.
4. Провести комплексную апробацию предложенных научно–технических решений на примере процессов исследовательских испытаний электроракетных двигателей – высокочастотного ионного двигателя.

Объектом исследования является процесс исследовательских испытаний электроракетных двигателей. **Предметом исследования** являются организационно-технические мероприятия по улучшению качества процесса испытаний электроракетных двигателей.

Область исследования диссертации соответствует пунктам 8, 9 и 13 паспорта научной специальности 2.5.22: «Разработка научно-практического статистического инструментария управления качеством»; «Разработка и совершенствование научных инструментов оценки, мониторинга и прогнозирования качества продукции и процессов»; «Научные основы цифровых, автоматизированных комплексных систем управления производством и качеством работ на базе технических регламентов и стандартов».

Научная новизна диссертации заключается в том, что в ней впервые:

1. Усовершенствованы общая и детализированная модели процессов исследовательских испытаний электроракетных двигателей, в которых учтена

автоматизация элементов системы, влияющих на обеспечение достоверности результатов испытаний.

2. Разработана квалиметрическая модель оценки качества процессов исследовательских испытаний электроракетных двигателей, основанная на анализе процессных моделей этапов исследовательских испытаний электроракетных двигателей, включающая в себя новую развернутую номенклатуру показателей качества процессов исследовательских испытаний электроракетных двигателей с системой весовых коэффициентов всех элементов и предложенными шкалами их оценки.

3. Разработан подход к оценке точности результатов исследовательских испытаний электроракетных двигателей на основе специализированного научно-программного комплекса с адаптацией современных методов обработки косвенных измерений для расчета интегральных параметров электроракетного двигателя – высокочастотного ионного двигателя.

4. Разработана процедура мониторинга и оценки уровня качества процессов исследовательских испытаний с обоснованием методов и инструментов управления качеством.

Практическая значимость.

Результаты исследования позволяют:

- определять последовательность формирования комплекса показателей качества процессов исследовательских испытаний ЭРД на основе разработанных в соответствии с нотацией BPMN 2.0 моделей процессов;
- диагностировать на основе разработанной квалиметрической модели оценки качества процессов исследовательских испытаний ЭРД фактический уровень качества процессов исследовательских испытаний в испытательной лаборатории;
- принимать решения о внедрении мероприятий для повышения качества процессов исследовательских испытаний на основе оценки показателей качества элементов системы, влияющих на обеспечение достоверности результатов испытаний.

Реализация результатов работы. Результаты работы используются в учебном процессе кафедры «Метрология, стандартизация и сертификация», кафедры «Электроракетные двигатели, энергетические и энергофизические установки» ФГБОУ ВО «МАИ (НИУ)», а также в АО ОКБ «Факел», ООО «Орбитек» при проведении научно-исследовательских работ в области испытаний ЭРД, что подтверждено соответствующими актами.

Положения, выносимые на защиту:

1. Усовершенствованные общая и детализированные модели процессов исследовательских испытаний электроракетных двигателей, в которых учтена расширенная номенклатура и автоматизация элементов системы, влияющих на обеспечение достоверности результатов испытаний.

2. Разработанная квалиметрическая модель оценки качества процессов исследовательских испытаний электроракетных двигателей, основанная на анализе процессных моделей этапов исследовательских испытаний электроракетных двигателей, включающая в себя новую развернутую номенклатуру показателей качества процессов исследовательских испытаний электроракетных двигателей с впервые предложенными системой весовых коэффициентов и шкалами оценки всех показателей.

3. Разработанный подход к оценке точности результатов исследовательских испытаний электроракетных двигателей на основе специализированного научно-программного комплекса с адаптацией современных методов обработки косвенных измерений для расчета интегральных параметров электроракетного двигателя – высокочастотного ионного двигателя.

4. Процедура мониторинга качества процессов исследовательских испытаний с обоснованием методов и инструментов управления качеством.

Апробация результатов исследования. Основные результаты работы были представлены на Общероссийской научно-технической конференции «Молодежь. Техника. Космос» на секции «Современные технологии в авиа- и ракетостроении» (г. Санкт-Петербург, БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова,

март 2023г. и март 2024г.); на Международной конференции «Авиация и космонавтика» на секции «Авиационные, ракетные двигатели и энергетические установки» (г. Москва, МАИ (НИУ), ноябрь 2022г., 2023г., 2024г.); на XLIX и L Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения» на секции «Авиационные, ракетные двигатели и энергетические установки» (г. Москва, МАИ (НИУ), апрель 2023г., 2024г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 18 работ, из них: 7 – в научных изданиях, входящих в перечень ВАК России (из них 5 – по специальности 2.5.22. «Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства»); 8 – в материалах и трудах международных и всероссийских научных конференций; 1 – патент на изобретение; 1 – свидетельство программы для ЭВМ; 1 – учебное издание.

Личный вклад автора. Постановка задач осуществлялась совместно с научным руководителем. Теоретические и практические исследования автором выполнены самостоятельно.

При непосредственном участии автора:

1. Разработана квалиметрическая модель оценки качества процессов исследовательских испытаний электроракетных двигателей, основанная на анализе процессных моделей этапов исследовательских испытаний электроракетных двигателей, включающая в себя новую развернутую номенклатуру показателей качества процессов исследовательских испытаний электроракетных двигателей с впервые предложенными системой весовых коэффициентов и шкалами оценки всех показателей.

2. Проведена оценка качества процесса исследовательских испытаний электроракетного двигателя – высокочастотного ионного двигателя в лабораторном комплексе «2ИУ-4В».

3. Проведена автоматизация управления процессом испытаний электроракетного двигателя – высокочастотного ионного двигателя, регистрации данных и обработки результатов измерений.

4. Разработана методика оценки точности результатов исследовательских испытаний электроракетных двигателей на основе унифицированного научно-программного комплекса с адаптацией современных методов обработки косвенных измерений (линеаризации, приведения, бутстрап) для расчета интегральных параметров электроракетного двигателя – высокочастотного ионного двигателя.

5. Разработана процедура мониторинга качества процессов исследовательских испытаний с обоснованием методов и инструментов управления качеством.

Связь работы с научными программами, темами, грантами. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSFF-2023-0006) в рамках государственного задания федерального государственного бюджетного образовательного учреждения «Московский авиационный институт (национальный исследовательских университет)».

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 109 наименования и 7 приложений. Общий объем диссертации составляет 269 страниц, 27 рисунков и 14 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель, задачи, научная новизна и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведены исследования и анализ проблем управления качеством исследовательских испытаний электроракетных двигателей. По результатам анализа систематизированы виды испытаний по основным признакам и выделены те виды испытаний, которым подвергаются при создании электроракетных двигателей его элементы, узлы, системы и весь двигатель в целом. В результате проведенной систематизации и анализа нормативно-технических документов по областям применения ракетно-космической техники, выявлена проблема отсутствия нормативно-технических документов национального уровня, регламентирующих понятие, порядок проведения,

управление качеством и оценку качества исследовательских испытаний электроракетных двигателей. Анализ состояния вопросов испытаний ЭРД показал, что проблема обеспечения их качества носит комплексный характер. Для её решения необходима интеграция трёх ключевых компонентов: внедрение процессного подхода, метрологических практик и философии TQM.

Во второй главе диссертационного исследования проанализированы основные методологии моделирования процессов. Разработана общая и детализированные модели основных этапов процесса исследовательских испытаний электроракетных двигателей с отображением потоков данных внутри каждого этапа. Разработан состав подпроцессов, а также сформулированы задачи каждого подпроцесса, представляющих в совокупности систему элементов управления процессом исследовательских испытаний электроракетных двигателей.

В третьей главе диссертационного исследования для изучения проблем обеспечения качества процесса исследовательских испытаний электроракетных двигателей разработана система показателей качества процесса исследовательских испытаний электроракетных двигателей, а также методика квалиметрической оценки качества, позволяющая учитывать большое количество показателей и, на основе расчета обобщенного комплексного показателя, принимать обоснованные решения по определению путей развития методологии и обеспечения качества исследовательских испытаний электроракетных двигателей.

В четвертой главе диссертационного исследования разработанная методика квалиметрической оценки качества процесса исследовательских испытаний электроракетных двигателей апробирована при проведении исследовательских испытаний по определению интегральных параметров высокочастотного ионного двигателя в ФГБОУ ВО «МАИ (НИУ)». Предложен унифицированный научно-программный комплекс статистической обработки результатов измерений исследовательских испытаниях электроракетного двигателя – высокочастотного ионного двигателя – «Специализированный

научно-программный комплекс для обработки результатов исследовательских испытаний высокочастотного ионного двигателя», позволяющий определить результат и погрешность результата измерений методами линеаризации, приведения и бутстрапа.

ГЛАВА 1. ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

1.1. Исследовательские испытания электроракетных двигателей

Рынок ЭРД демонстрирует устойчивый рост, обусловленный повышением спроса на энергоэффективные и долговечные двигательные системы в космической отрасли (рисунок 1.1) [20, 36, 85, 94]. Развитие малых спутников, увеличение числа межпланетных миссий и необходимость точного орбитального маневрирования стимулируют совершенствование технологий проектирования, производства и испытаний ЭРД [18, 46, 48, 76, 106]. Ключевыми тенденциями являются миниатюризация установок, повышение их мощности и надежности, а также расширение коммерческого применения.

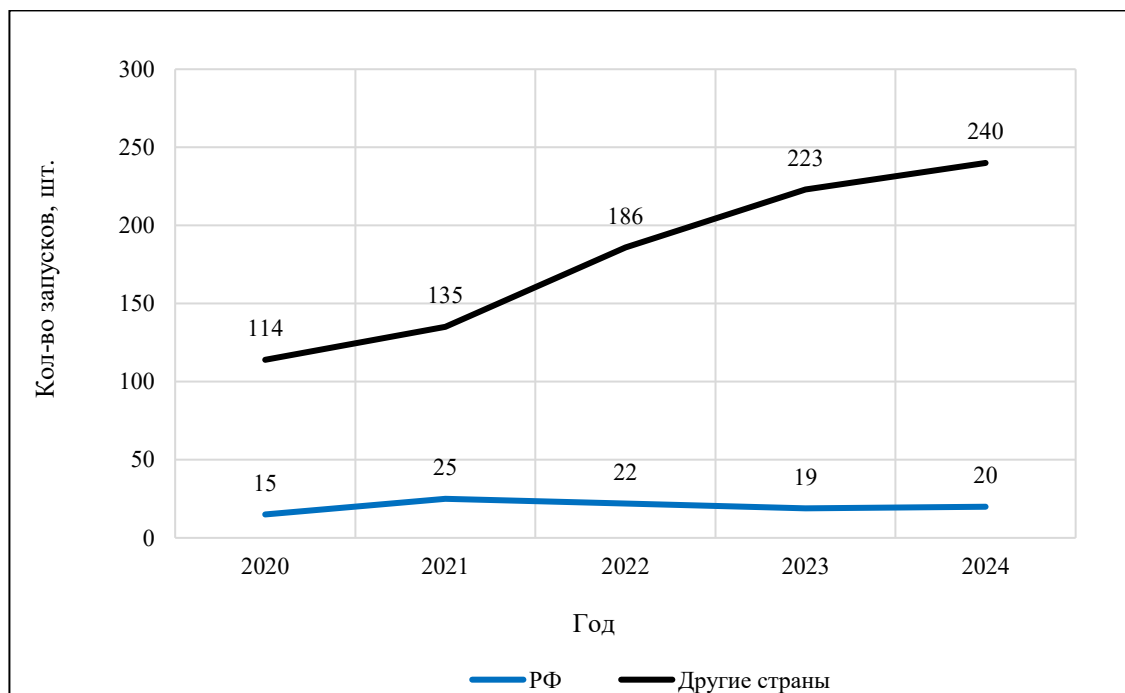


Рисунок 1.1 – Развитие запусков космических аппаратов с ЭРД.

Формирование устойчивого рыночного спроса на компактные спутниковые платформы, включая кубсаты и микроспутники, стимулирует развитие отрасли. Такие компании, как Бюро 1440, ООО «Орбитек», SpaceX (Starlink), OneWeb и Planet Labs, разрабатывают и производят ЭРД, которые затем применяются для коррекции орбиты и продления срока службы спутниковых группировок

(рисунок 1.2). Традиционные химические двигатели не подходят для таких аппаратов из-за габаритов и ограниченного запаса топлива, тогда как ионные и холловские двигатели малой мощности обеспечивают необходимую эффективность [20, 66].

Современные ЭРД в основном работают на ксеноне, однако его высокая стоимость и ограниченные запасы заставляют искать альтернативы [80]. Перспективным направлением стали йодные двигатели, как у РКК «Энергия» в Российской Федерации (РФ) [77], французской компании ThrustMe, успешно прошедшие испытания в 2018 и 2021 году соответственно. Йод дешевле, легко хранится в твердом виде и не требует сложных систем подачи. Другой вариант - криптоновые ЭРД, которые использует АО ОКБ «Факел» и SpaceX (Starlink), снижая себестоимость эксплуатации. В Московском авиационном институте (МАИ) ведутся работы по созданию ЭРД, использующих атмосферные газы в качестве рабочего тела. Двигатель ВК-100 способен работать на азотно-кислородной смеси, захватываемой на низких орбитах, что принципиально решает проблему ограниченного запаса ксенона [49]. Модификация стандартного СПД, разрабатываемая в АО ОКБ «Факел», адаптирована для работы на смеси ксенона с атмосферными газами [58]. В испытаниях демонстрирует стабильную работу при содержании до 30% азота в рабочем теле.

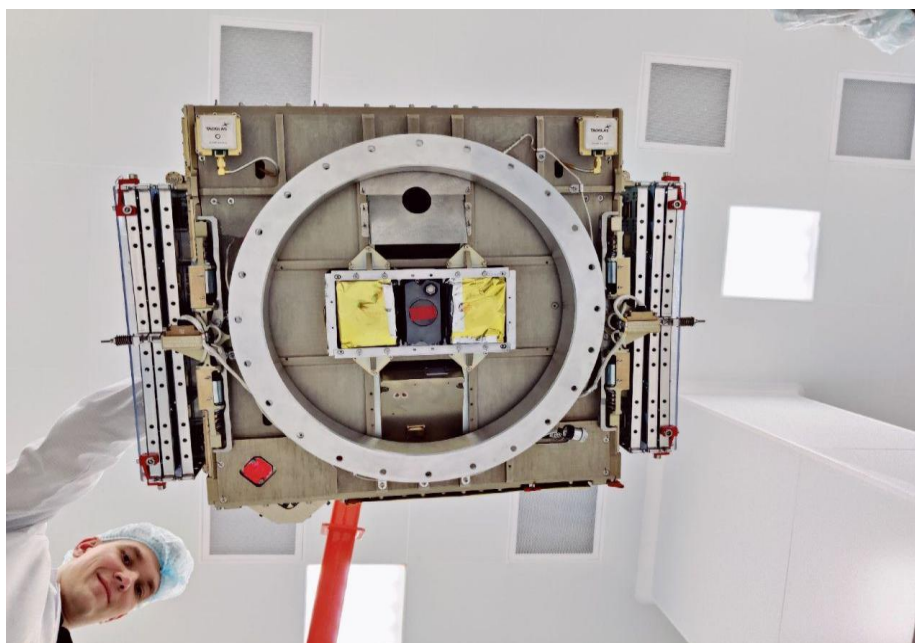


Рисунок 1.2 – Двигательная установка космического аппарата «Рассвет-1»

Создание ядерной энергодвигательной установки (ЯЭДУ) мегаваттного класса (ядерный буксир «Зевс», рисунок 1.3) – один из самых масштабных и технологически сложных проектов РФ в космической отрасли. Эта система сочетает ядерный реактор с электроракетными двигателями, что позволит осуществлять быстрые межпланетные перелеты. Работы ведутся в рамках сотрудничества «Роскосмоса» и предприятий «Росатома» [15, 22, 34, 36, 39, 85, 94].

МАИ и другие технические университеты России и зарубежных стран активно участвуют в создании перспективных ЭРД [90]. Особое внимание уделяется микродвигателям для малых космических аппаратов, а также новым схемам ускорения плазмы [52, 87, 109].

Российские ученые исследуют перспективные безэлектродные схемы ускорения плазмы, которые могут решить проблему эрозии электродов [56]. Разработки в этом направлении ведутся в МФТИ, АО ГНЦ «Центр Келдыша» и других научных центрах [20].

Рынок ЭРД находится на подъеме, и в ближайшие годы его рост ускорится благодаря коммерческим спутниковым группировкам, межпланетным миссиям и новым энергетическим технологиям. Уже к 2030 году можно ожидать появления двигателей с рекордным удельным импульсом, работающих на альтернативных топливах и интегрированных с ядерными энергоустановками. Это откроет новые возможности для освоения дальнего космоса и коммерциализации космических перевозок.

В свою очередь, ЭРД должен соответствовать установленным эксплуатационным параметрам и демонстрировать высокие показатели безотказности на протяжении всего расчетного ресурса в условиях космического пространства.

Соответствие действительных и проектных характеристик ЭРД может быть практически достигнуто и установлено только в результате осуществления

широкой программы опытной отработки и испытаний, в связи с этим все этапы жизненного цикла ЭРД – от проектирования до сборки – сопровождаются комплексными испытаниями.



Рисунок 1.3 – Облик ядерного буксира «Зевс»

Их спектр широк и варьируется от стандартных проверок компонентов до сложных наземных и летных испытаний готовой системы (рисунок 1.4) [25, 42, 62, 95, 103, 104, 105].



Рисунок 1.4 – Испытания электроракетных двигателей.

Эффективность и надежность космических ЭРД в значительной степени определяются качеством наземной испытательной базы и тщательностью проведения стендовых испытаний. Специализированные испытательные комплексы позволяют воссоздавать условия космического пространства и

режимы полета для всесторонней проверки двигателей (вибрации, перегрузки и пр.) [62, 71, 77, 103, 104].

Суть наземной имитации сводится не к точному повторению реальных космических условий, а к максимально полному и адекватному воспроизведению их эффектов на элементы и материалы двигательной установки.

Для проведения наземных испытаний ЭРД были разработаны специализированные стенды, оснащенные вакуумными камерами. Степень сложности конструкции этих стендов определяется тем, насколько полно необходимо имитировать условия космического пространства. Диапазон требований к испытаниям широк: от обеспечения необходимого вакуума до полномасштабной имитации всего спектра космических воздействий, таких как солнечная радиация, тепловое излучение планеты, а также потоки заряженных и метеорных частиц [59, 104].

Наземные испытания ЭРД – это высокотехнологичный процесс, основанный на детальной программе и сложном методическом обеспечении. Для их проведения требуется уникальная материально-техническая база, интегрирующая в себе самые современные научные и технические разработки.

Программы испытаний ЭРД необходимо разрабатывать таким образом, чтобы они гарантировали регистрацию необходимого массива данных, описывающих рабочий процесс двигателя. Методика испытаний представляет собой систематизированный свод методов, средств и фундаментальных принципов проведения испытаний на всех уровнях – от испытаний элементов и заканчивая ЭРД в целом.

Методика испытаний ЭРД базируется на принципах системного подхода. Ключевыми требованиями к испытаниям являются высокая информативность и обеспечение получения необходимых количественных характеристик, позволяющих оценить эффективность функционирования как составных элементов, так и совокупной системы.

Комплекс испытаний ЭРД включает методы имитации воздействий, возникающих в ходе космического полета. Поскольку двигатель в составе КА подвергается значительным механическим нагрузкам, прежде всего вибрации, обязательны испытания на виброустойчивость. Они предназначены для проверки сохранения функциональности и параметров изделия в условиях вибрационного воздействия в соответствии с требованиями научно-технической документации (НТД). Изделие считают выдержавшим испытание, если во время испытания оно нормально функционирует, погрешность не превышает допустимого значения и контролируемые технические характеристики находятся в пределах установленных для них норм.

Следующий вид испытаний ЭРД – проверка на стойкость к инерционным и ударным нагрузкам. Эти нагрузки возникают на элементах конструкции двигателя при ускорении космического аппарата. Сложность моделирования таких нагрузок на стенде заключается в невозможности полностью воспроизвести реальные условия. Главное препятствие – земная гравитация, вектор которой обычно не совпадает с направлением создаваемой перегрузки. Поэтому испытания позволяют достичь лишь той или иной степени приближения к реальности.

Общая задача испытаний ЭРД на ударные нагрузки заключается в верификации функциональной целостности двигателя и всех его элементов в условиях ударного воздействия и после него. Приоритетной задачей является обеспечение высокой степени корреляции между результатами стендовых испытаний и ожидаемым воздействием в реальных условиях эксплуатации.

Типовой ударный стенд содержит следующие ключевые модули: испытуемый образец с измерительными датчиками, силовую установку для создания ускорения, тормозную систему, блок управления, комплекс регистрирующей аппаратуры (включая первичные преобразователи), вспомогательные приборы контроля и источники электропитания.

В натурных условиях элементы конструкции КА подвергаются интенсивному акустическому нагружению. При работе двигательной установки

шум возникает не только от реактивных струй, но и от вибраций, например, от вибраций сопла и трубопроводов, вызванных воздействием на них колебаний давления в пограничном слое, непосредственных вибраций двигателей из-за несбалансированности вращающихся элементов, работы арматуры и т. д. [59].

Конструкционные элементы КА в реальных условиях подвергаются интенсивному акустическому воздействию. Источниками шума двигательной установки являются не только реактивные струи, но и вибрационные явления: колебания сопел и трубопроводов под воздействием пульсаций давления в пограничном слое, вибрации двигателей вследствие дисбаланса роторных компонентов, а также работа арматуры и вспомогательных систем.

Для изучения акустического воздействия на изделие проводят следующие испытания:

- наземные натурные непосредственно на изделии;
- на открытом стенде с работающим двигателем;
- в закрытых боксах с различными источниками шума;
- в акустических камерах.

Испытания на воздействие потоков заряженных частиц проводятся для оценки устойчивости различных материалов и компонентов, включая терморегулирующие покрытия, полупроводниковые элементы и другие радиационно-чувствительные материалы. Заряженные частицы в составе корпускулярных потоков инициируют поверхностную деградацию и структурные изменения материалов.

Моделирование воздействия корпускулярных потоков осуществляется на стендовом оборудовании, включающем различные генераторы и ускорители заряженных частиц. Ввиду значительного разнообразия энергетических и массовых спектров частиц в космическом пространстве, задача имитации требует создания узкоспециализированных установок, каждая из которых воспроизводит строго определённый тип воздействия.

Термовакuumные испытания предназначены для воссоздания комбинированного воздействия космического вакуума и солнечного излучения

на КЛА и его системы. Величина рабочего давления в испытательной камере устанавливается на основе комплексного анализа физических процессов, происходящих в условиях космического полета.

Для наземных испытаний и отработки объектов космической техники используются специализированные стенды, оборудованные вакуумными камерами. В этих камерах с помощью вакуумных систем создаётся и поддерживается требуемый уровень разрежения на протяжении всего процесса испытаний [71, 95, 103].

Для имитации тепловых режимов вакуумные камеры оснащаются имитаторами солнечного и планетного излучения, а также экранами, охлаждаемыми криогенными жидкостями. Все это позволяет проводить стендовые термовакуумные испытания объектов (КТ) [59, 104].

Таким образом, при создании ЭРД для космических летательных аппаратов проводится большое количество испытаний с использованием разнообразных испытательных установок и стендов (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Методы и средства испытаний ЭРД.

Виды испытаний	Вид стенда для проведения испытаний	Типы стендов	Принцип работы (описание)
Испытания на акустическое воздействие	Установка для испытания на бегущую волну высокой интенсивности	—	Создает в ограниченной испытательной зоне акустическое поле с распространяющейся высокоинтенсивной звуковой волной.
	Установка для испытания на бегущую и отраженную волну	—	Конструкция испытательной камеры обеспечивает когерентное сложение волн, отраженных от ограждающих поверхностей, что позволяет создавать звуковое поле повышенной интенсивности в заданной области.

Вибрационные испытания	Стенд для испытания на вибропрочность	—	В процессе проведения испытаний осуществляется определение резонансных частот. Их идентификация возможна по следующим признакам: изменение значений технических параметров, возникновение шумовых эффектов в объеме изделия, данные визуального наблюдения, а также показания специализированных измерительных приборов
	Стенд для испытания на виброустойчивость	Механические	Испытательный стенд транспортной тряски воспроизводит вибрационные воздействия, соответствующие условиям транспортировки грузов
		Электродинамические	Оба типа стендов используют общую базовую комплектацию: электронные генераторы сигналов, усилители мощности и регуляторы. Их ключевое отличие заключается в применении различных типов вибраторов – устройств, непосредственно создающих вибрационную нагрузку
		Электрогидравлические	
Испытания на перегрузки и на ударные нагрузки	Центрифуга	—	Испытательный стол выполнен в виде вращающейся вокруг вертикальной оси конструкции (платформы, фермы или крестовины). На её оконечностях расположены площадки для установки испытуемых образцов и балансировочных грузов
	Импульсные (ударные) стенды	—	Генерация последовательности импульсных нагрузок на

			испытываемое изделие, установленное на платформе испытательного стенда
Испытания в условиях динамической невесомости	Стенд для кратковременной имитации состояния невесомости (свободное падения испытываемого объекта)	Стенды с падающей платформой	Испытательная установка состоит из платформы крестообразной конфигурации, которая подвергается свободному падению, с размещенными на ней тестируемым изделием и компонентами измерительной системы
		Стенды, оборудованные башнями для имитации невесомости	Существует две возможные конфигурации испытательных стендов: 1) Вертикальная металлическая труба, смонтированная вне здания как самостоятельное строительное сооружение. 2) Специализированно е здание, в котором межэтажные перекрытия оснащены сбросовыми шахтами, позволяющими осуществлять свободное падение контейнера с объектом испытаний с верхнего этажа
		Имитация невесомости в летных условиях (специально оборудованный самолет)	При воспроизведении условий невесомости в полёте на борту летательной лаборатории устанавливается: – Комплекс контрольно- измерительных приборов; – Аппаратура для кино- и фотофиксации;

			– Осциллографы и регистрирующая аппаратура. Испытуемый образец монтируется в специализированном герметичном контейнере
		Применение ракет и КЛА для имитации невесомости	Моделирование невесомости на заданный временной интервал осуществляется путём установки регистрирующей аппаратуры на баллистические ракеты, запускаемые на большую высоту
Испытания на воздействие потоков заряженных частиц	Стенд для имитации корпускулярных потоков	Плазменная аэродинамическая труба с плазменным ускорителем	Характерной особенностью моделирования является то, что наряду с атомарными ионами O^+, N^+, H^+, He^+ должны присутствовать молекулярные ионы NO^+ и CO_2^+ с энергиями до 20 эВ
		Электронные и ионно-лучевые приборы: электронные и ионные пушки	Имитация воздействия солнечных корпускулярных потоков, состоящих из постоянного («солнечный ветер») и переменного (нестационарные плазменные образования) компонентов
		Электростатические ускорители, циклотроны и высоковольтные ускорители	Моделирование воздействия радиационных поясов
		Радиационные лаборатории	Исследование радиационной надёжности аппаратуры КЛА
Испытания на воздействие микрометеорных потоков	Легкогазовая пушка с подогревом	—	1. Ускорение твёрдых частиц с использованием кумулятивных зарядов на основе пороховых шашек, оснащённых коническими выемками; 2. Электродинамический метод разгона
	Инжектор заряженных частиц	—	

			мелкодисперсных твёрдых частиц посредством электростатических ускорителей; 3. Применение излучения рубинового лазера для генерации высокоскоростных частиц
Термовакuumные испытания	Стенд с вакуумной камерой	Для испытаний материалов	Испытания, связанные с прочностью и
		Для испытаний конструкций	Для испытания моделей
			Для испытания полноразмерный элементов и узлов
			Для испытания полноразмерных систем
			Для испытания полноразмерных КЛА и ЭРДУ со всеми системами

Исследовательские испытания проводятся на этапе исследований в процессе создания продукции для изучения определенных свойств объекта. Эта категория испытаний отличается большим разнообразием как по исследуемым объектам, так и по задачам испытаний [80, 82].

Исследовательские испытания представляют собой неотъемлемый компонент номенклатуры стендовых испытаний ЭРД [80, 104]. Их основной целью является системное изучение функциональных закономерностей работы, как комплексной системы в сборе, так и её отдельных подсистем и компонентов. В рамках данных испытаний осуществляется анализ влияния внешних факторов окружающей среды, структурной организации системы, характера взаимодействия между составными элементами, а также поведения системы в различных режимах эксплуатации.

В процессе наземной отработки исследуются интегральные характеристики электроракетного двигателя (мощность, тяга, удельный импульс) [4, 17, 24, 53, 70, 97], работа его элементов (например, источников электронов) [89], локальные параметры плазмы в разрядной камере

высокочастотных ионных двигателей [55, 56], параметры плазменных струй, формируемых во время работы двигателя [54, 91, 108].

Программа исследовательских испытаний включает верификацию интегральных характеристик двигателя (тяги, удельного импульса, мощности потребления), оценку работоспособности ключевых элементов конструкции (таких как катоды-нейтрализаторы и эмиттеры), диагностику локальных параметров плазменной среды в разрядной камере и измерение характеристик истекающей плазменной струи. Получаемые экспериментальные данные позволяют верифицировать математические модели рабочих процессов и оптимизировать конструктивные параметры двигателя [49].

В настоящее время многие исследователи рассматривают различные инженерно-технические аспекты процесса исследовательских испытаний космических электроракетных двигательных установок. Например, в работах [17, 24, 37, 52, 54-57, 69, 107] рассматриваются методы, методики и средства измерений при испытаниях ЭРД: в [17] представлена методика определения малых тяг ионного двигателя аэродинамическим методом двойного угла ($AM\alpha\beta$ -методом) и конструкция испытательного стенда; в [54] – особенности измерений параметров плазменных струй ЭРД различными типами зондов; в [37, 57, 69, 107] приведены конструкция и принципы использования плоских зондов (зонд Фарадея) [107], многосеточных зондов-энергоанализаторов [57], зондов Ленгмюра [69], $E \times B$ -зондов [37], накаливаемых зондов [69]. В работах [11, 67, 96] поднимаются вопросы оценки погрешности результатов измерений исследуемых параметров, определения показателей сходимости и достоверности полученных результатов, вопросы переноса результатов измерений, полученных в стендовых условиях, на условия натурной эксплуатации [96].

Еще одной важной особенностью является работа в экстремальных и продолжительных режимах, которые не предусмотрены для штатной эксплуатации. Двигатель могут намеренно доводить до критических состояний, чтобы изучить границы его устойчивой работы, определить механизмы отказа и выявить «слабые места» конструкции. Например, проводятся длительные

непрерывные испытания для оценки ресурса или циклы многократных включений и выключений [78]. Такой деструктивный анализ необходим для того, чтобы на последующих этапах разработки создать надежный и долговечный двигатель, способный работать в условиях космического вакуума годами.

Таким образом, результаты исследовательских испытаний служат основой для принятия ключевых решений при проектировании и создании ЭРД. Полученные данные позволяют оптимизировать геометрию двигателя, выбрать наиболее стойкие материалы, усовершенствовать систему подачи рабочего тела и конструкцию магнитной или электростатической системы. Успешное завершение этапа исследовательских испытаний ведет к созданию опытного образца и последующим, более затратным квалификационным испытаниям. Исследовательские испытания – это критически важный этап, снижающий технические и финансовые риски при создании новых перспективных образцов ЭРД.

В результате проведенной систематизации и анализа нормативно-технических документов по испытаниям ракетно-космической техники (РКТ), была выявлена проблема отсутствия нормативно-технических документов национального уровня, регламентирующих понятие и порядок проведения исследовательских испытаний ЭРД (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Нормативные документы по испытаниям РКТ.

НТД	Описание
ГОСТ РВ 0015-210-2020 «Система разработки и постановки на производство военной техники. Испытания опытных образцов изделий и опытных ремонтных образцов изделий. Основные положения»	Настоящий стандарт распространяется на опытные образцы изделий военной техники, изготовленные в ходе выполнения опытно-конструкторских работ, и опытные ремонтные образцы изделий военной техники, отремонтированные в ходе разработки ремонтной документации (опытного ремонта), и устанавливает основные категории и цели контрольных испытаний этих изделий, порядок проведения испытаний и реализации их результатов, основной состав документов, применяемых в процессе подготовки и проведения испытаний, и общие правила их оформления
ГОСТ РВ 15.211-2002 «Система разработки и постановки	Настоящий стандарт распространяется на опытные образцы изделий ВТ и опытные ремонтные образцы

продукции на производство. Военная техника. Порядок разработки программ и методик испытаний опытных образцов изделий. Основные положения»	изделий ВТ, подвергаемые испытаниям по ГОСТ РВ 0015-210-2020, и устанавливает порядок разработки, согласования и утверждения программ и методик предварительных и государственных (межведомственных) испытаний, а также требования к их структуре и содержанию
ОСТ 134-1040-2005 «Ракетно-космическая техника. Общие правила проведения и организации заводских контрольных испытаний»	Настоящий нормативный документ по стандартизации ракетно-космической техники распространяется на изделия ракетной и ракетно-космической техники, изготавливаемые в опытном и серийном производстве, и устанавливает общие правила проведения и организации заводских контрольных испытаний в контрольно-испытательном цехе или на контрольно-испытательной станции в составе цеха общей (главной) сборки
ОСТ 92-1640-77 «Документация технологическая на проведение испытаний изделий. Номенклатура и комплектность»	Настоящий стандарт распространяется на технологическую документацию, предназначенную для руководства при проведении стендовых испытаний изделий и их сборочных единиц (далее по тексту изделий) и работах с изделием и стендовыми системами в подразделениях испытательного комплекса и устанавливает номенклатуру, комплектность технологической документации на проведение стендовых испытаний, а также требования в её разработке, отработке и внедрению
ОСТ 92-1609-74 «Испытания изделий стендовые. Методика окончательной оценки погрешностей, измерений, медленноменяющихся параметров»	ОСТ 92-1609-74 «Испытания изделий стендовые. Методика окончательной оценки погрешностей, измерений, медленноменяющихся параметров»
ОСТ 92-4687-96 «Комплексная система норм испытаний при производстве ракетных, ракетно-космических комплексов и их частей. Ракеты, Ракеты-носители и их ступени. Нормы испытаний»	Настоящий стандарт распространяется на серийно изготавливаемые ракеты, ракеты-носители и их сборочные единицы - ступени (далее — изделия) и устанавливает нормы их испытаний. Стандарт является составной частью комплексной системы норм испытаний при производстве ракетных, ракетно-космических комплексов и их частей

Однако, ГОСТ Р 57945 «Система технологического обеспечения разработки и постановки на производство изделий космической техники. Термины и определения» устанавливает следующую классификацию стадий работ для планирования процессов жизненного цикла продукции (ЖЦП) РКТ: 1) создание изделия – работы, проводимые для выполнения технического задания на всех этапах научно-исследовательской работы, при проектировании и экспериментальной отработке, в производстве при натурных испытаниях и

подготовке документации к серийному производству; 2) разработка изделия – процесс, посредством которого осуществляется формулировка целей создания изделия, проводится анализ ресурсных и производственных возможностей, путей и способов достижения установленных показателей технологичности, качества и надежности, обоснование выбранного варианта, составление, обсуждение, принятие плановых, проектных, программных документов; и этапов работ: 1) научно-исследовательская работа по созданию продукции – комплекс исследований, проводимых с целью получения обоснованных исходных данных, изыскания принципов и путей создания новой или модернизации выпускаемой продукции; 2) опытно-конструкторская работа – комплекс работ по созданию конструкторской и технологической документации, изготовлению и испытаниям опытных или головных образцов или изделий единичного производства; 3) опытно-технологическая работа – комплекс работ по созданию технологической документации, а также ее последующей корректировке по результатам отработки новых технологических процессов на этапах создания новой продукции.

В соответствии с установленной [29] классификацией, исследовательские испытания должны быть отнесены к стадии «Разработка изделия», виды работ – «Научно-исследовательская работа по созданию продукции». Однако, в указанном стандарте отсутствует понятие исследовательских испытаний, хотя приводятся характеристики других видов испытаний: предварительных, приемочных, квалификационных, приемо-сдаточных, относящихся, в соответствии с ГОСТ 13504-81 «Межгосударственный стандарт. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения», к контрольным испытаниям, проводимым для контроля качества объекта (опытных образцов, установочной серии, готовой продукции). В связи с этим, необходимо руководствоваться, установленным ГОСТ 16504 «Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения», термином: исследовательские испытания –

испытания, проводимые для изучения определенных характеристик свойств объекта.

Анализ нормативных документов также показывает наличие дополнительных групп требований, определяющих качество проведения испытаний РКТ [25, 27, 30]. К ним относятся стандарты в области управления качеством, метрологического обеспечения, а также нормативы, устанавливающие требования к точности, воспроизводимости и достоверности результатов испытаний. Кроме того, важную роль играют документы, регулирующие стандартизацию процессов разработки и производства РКТ, включая методы контроля, сертификации и оценки соответствия (таблица 1.3).

Таблица 1.3 – Регламентирующие нормативные документы.

Область применения	Нормативно-технический документ
Метрологическое обеспечение	ГОСТ Р 56098-2014 «Системы космические. Метрологическая экспертиза конструкторской документации. Организация и порядок проведения»; ГОСТ Р 58274-2018 «Системы космические. Метрологическое обеспечение технологической подготовки производства. Основные положения»; ГОСТ Р 59156-2020 «Ракетно-космическая техника. Содержание и порядок изложения требований к метрологическому обеспечению в техническом задании»; ГОСТ Р 59157-2020 «Ракетно-космическая техника. Конструкторская и технологическая документация. Правила согласования с метрологической службой»; ГОСТ Р 59158-2020 «Ракетно-космическая техника. Планирование метрологического обеспечения космических комплексов. Основные положения»; ГОСТ Р 59159-2020 «Ракетно-космическая техника. Метрологическое обеспечение разработки. Основные положения»; ГОСТ Р 59160-2020 «Ракетно-космическая техника. Метрологическое обеспечение производства. Основные положения»; ГОСТ Р 59861-2021 «Ракетно-космическая техника. Аттестация специальных, особо ответственных технологических процессов изготовления изделий»; ОСТ 92-4288-75 «Информационно-измерительные системы. Технические средства. Термины и определения»; ОСТ 92-4986-2000 «Отраслевая система метрологического обеспечения качества. Изделия ракетной и ракетно-космической техники. Основные положения по метрологическому контролю и надзору»;

	ОСТ 92-4221-98 «Программа измерений для летних испытаний изделий. Содержание и форма программы измерений»
Качество	ГОСТ Р 53802-2010 «Системы и комплексы космические. Термины и определения»; ГОСТ Р 56518-2015 «Техника космическая. Требования к системам менеджмента качества организаций, участвующих в создании, производстве и эксплуатации»; ГОСТ Р 58780-2019 «Ракетно-космическая техника. Программа обеспечения качества. Общие положения»; ГОСТ Р 58781-2019 «Ракетно-космическая техника. Система менеджмента качества. Управление рисками при обеспечении качества изделий ракетно-космической техники»; ОСТ 134-1007-96 «Космическая техника научного и народнохозяйственного назначения. Система качества. Основные положения»
Разработка изделий	ГОСТ Р 55996-2014 «Системы космические. Требования к содержанию и построению разделов технического задания на разработку изделий космической техники научного и социально-экономического назначения»; ГОСТ Р 57945-2017 «Система технологического обеспечения разработки и постановки на производство изделий космической техники. Термины и определения»; ОСТ 134-1005-96 «Техническое задание на разработку космических комплексов научного и народнохозяйственного назначения и их составных частей. Структура и требования к содержанию и оформлению»; ОСТ 92-0594-2006 «Изделия ракетно-космической техники. Общие технические требования»
Стандартизация	ОСТ 134-1.0-94 «Система стандартизации Российского космического агентства. Основные положения»; ОСТ 134-1.2-99 «Порядок разработки нормативных документов по стандартизации»; ОСТ 134-1.5-99 «Построение, изложение и оформление нормативных документов по стандартизации ракетно-космической техники»; ОСТ 134-1.16-2009 «Порядок обеспечения предприятий нормативной документацией»; ОСТ 134-1020-2008 «Системы и комплексы космические. Термины и определения»; ОСТ 134-1.21-99 «Порядок разработки и внесения изменений в нормативные документы по стандартизации ракетно-космической техники»; ОСТ 134-1.27-99 «Порядок проверки действующих нормативных документов по стандартизации на соответствие современным требованиям»; ОСТ 134-1029-2001 «Комплексная система общих технических требований к изделиям космической техники научного и социально-экономического назначения. Общие положения»; ОСТ 134-1035-2003 «Комплексная система общих технических требований к изделиям космической техники научного и социально-экономического назначения. Общие технические требования по стандартизации и унификации»;

Комплексный учет этих аспектов позволяет обеспечить надежность и объективность испытаний, что особенно важно при внедрении новых технологий в области ЭРД.

1.2. Проблемы обеспечения качества процесса исследовательских испытаний электроракетных двигателей

Согласно принципам процессного подхода, закрепленным в стандартах серии ИСО 9000, любая деятельность, использующая ресурсы и управляемая с целью преобразования входов в выходы, может рассматриваться как процесс. В свою очередь, под процессным подходом понимаются последовательные и прогнозируемые результаты, которые достигаются более эффективно и результативно, когда деятельность осознается и управляется как взаимосвязанные процессы, которые функционируют как согласованная система, а оптимизация функционирования системы менеджмента качества (СМК) достигается через анализ взаимосвязей ее процессов и механизмов генерации результирующих показателей. Данный анализ обеспечивает базу для целенаправленного совершенствования как самой системы, так и итоговых результатов деятельности организации. К потенциальным основным преимуществам относятся:

- целенаправленное распределение усилий на основные процессы и перспективные направления для совершенствования;
- достижение стабильных и предсказуемых результатов за счет слаженного функционирования взаимосвязанных процессов;
- совершенствование операционной деятельности путем внедрения эффективного процессного управления, оптимизации ресурсозатрат и минимизации межфункциональных противоречий;
- формирование у заинтересованных сторон уверенности в стабильности, результативности и эффективности деятельности организации [31, 32].

Учитывая, что проведение исследовательских испытаний ЭРД представляет собой сложный, многокомпонентный процесс, то для достижения

требуемых показателей качества продукции необходима систематическая работа по его совершенствованию. Эффективное решение данной задачи заключается в применении методов и инструментов менеджмента качества. В частности, формализация процесса посредством внедрения СМК, соответствующей требованиям ИСО 9001-2015 «Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь», позволяет минимизировать вероятность организационных ошибок и влияние человеческого фактора, что является ключевым условием для повышения достоверности и воспроизводимости результатов испытаний [14, 32].

Для достижения максимального уровня качества продукции применяется философия TQM. Её формирование стало результатом длительной эволюции управленческой мысли, в основе которой лежат фундаментальные работы ряда исследователей [10, 19, 93]. У. Шухарта и Э. Деминга заложили интеллектуальные основы процессного подхода, сформировав ориентированное на процессы видение структуры организации. Их разработки, легшие в основу современных концепций управления качеством, стали методологической базой для принципов управления бизнес-процессами (Business Process Management, BPM) [74, 75]. Методологические принципы исследователей составили теоретический фундамент современной системы управления качеством, что объясняет устойчивую ассоциативную связь между процессным подходом и данной управленческой парадигмой. Так, М. Портер является автором концепции «процессной ориентации», утверждая, что основой эффективной деятельности организации выступает взаимодействие элементов, где создаётся ценность, – главный принцип деятельности организации.

Процессный подход, являясь основой управления качеством, требует, чтобы все операции процесса были регламентированы и стандартизированы. Однако, качество исследовательских испытаний ЭРД снижается из-за неадаптированности нормативной базы к перспективным разработкам. Существующие стандарты не учитывают особенности современных разработок, таких как двигатели на йоде или криптоне, атмосферные ЭРД или системы с

регулируемой тягой. Отсутствие унифицированных методик вынуждает исследовательские центры создавать временные регламенты, что снижает достоверность данных.

Этот подход приводит к проблемам при сопоставлении результатов испытаний, полученных в разных лабораториях. Разрозненные методики не обеспечивают единых критериев оценки, особенно при моделировании критических режимов работы. Например, характеристики плазменных потоков в условиях глубокого вакуума могут интерпретироваться по-разному из-за различий в подходах к измерениям.

В результате возрастает риск некорректного прогнозирования характеристик двигателей в реальных условиях эксплуатации. Нестандартизированные испытания затрудняют валидацию технологий и замедляют внедрение инновационных решений.

Отсутствие стандартизированных требований к проведению исследовательских испытаний ЭРД влечет за собой ряд системных проблем в процессе их разработки. Исследовательские испытания направлены на изучение физических процессов, проверку новых концепций и поиск оптимальных параметров работы двигателя, тогда как промышленные испытания ориентированы на подтверждение надежности, воспроизводимости и соответствия серийных изделий заданным техническим условиям.

Таким образом, проблема обеспечения качества исследовательских испытаний ЭРД носит комплексный характер и требует интеграции трех ключевых элементов: процессного подхода ИСО 9000 для создания формализованной и управляемой структуры, специализированных метрологических практик для управления неопределенностью и философии TQM для формирования ответственной кадровой среды.

Внедрение процессного подхода в соответствии с ИСО 9001 создает каркас для управления испытаниями, обеспечивая идентификацию, документирование и стандартизацию всех ключевых процедур – от подготовки образца до анализа данных. Это позволяет минимизировать вариабельность исполнения,

гарантировать повторяемость условий эксперимента и установить четкие зоны ответственности. Однако, в отличие от серийного производства, где процессы стабильны, исследовательские испытания требуют гибкости в рамках регламентированной структуры, что достигается через механизмы управления изменениями и оценку рисков на этапе планирования экспериментов.

Специализированные метрологические практики и статистические методы выступают инструментальной основой для контроля и снижения неопределенности. Для испытаний ЭРД это включает не только регулярную поверку средств измерений, но и разработку специфических методик оценки точности для косвенных измерений.

Формирование культуры качества (TQM) является критическим человеческим фактором, без которого даже самая совершенная система остается нежизнеспособной. Это подразумевает не только обучение персонала работе по новым процедурам, но и создание системы мотивации, поощряющей открытое сообщение о проблемах, инициативу по улучшениям и командную работу между подразделениями. Особое значение имеет развитие критического мышления и профессиональной ответственности у инженеров и техников, которые должны не просто механически следовать инструкциям, а понимать физическую сущность процессов, анализировать возможные погрешности и вносить осознанные предложения по совершенствованию методик. Именно человеческий фактор обеспечивает адаптивность системы к новым вызовам и ее способность к непрерывному развитию.

Эффективное решение данной проблемы заключается в разработке и внедрении адаптированной СМК испытаний, которая не является статичным набором документов, а представляет собой динамическую модель, непрерывно совершенствуемую на основе анализа данных и обратной связи по результатам каждого экспериментального цикла. Такая система обеспечивает прослеживаемость результатов – от первичных данных до итогового отчета, что является критически важным для обоснования принятия решений на дальнейших стадиях жизненного цикла создания космической техники.

1.3. Цель и задачи диссертационного исследования

Проведенный анализ развития рынка услуг отечественной и зарубежной космической индустрии в главе 1 показал стабильное увеличение количества запусков космических аппаратов и соответствующий рост производства электроракетных двигателей, а именно:

1. Рынок ЭРД переживает активный рост, который в ближайшие годы значительно ускорится. Это связано с увеличением спроса на коммерческие спутниковые группировки, расширением межпланетных миссий и развитием новых энергетических технологий. ЭРД, благодаря высокой удельной тяге и экономичности, становятся ключевым элементом современных космических аппаратов, что стимулирует инвестиции в их разработку и производство. Процесс создания ЭРД сопровождается большим объемом исследовательских испытаний, проводимых на специализированных стендах и установках. Эти испытания включают проверку рабочих характеристик, ресурсные испытания, оценку надежности и совместимости с космическими аппаратами.

2. Систематизация нормативно-технической документации в области ракетно-космической техники позволила выявить существенный нормативный пробел: на национальном уровне отсутствует комплекс стандартизированных требований, регламентирующих методологию проведения, систему управления качеством и критерии оценки исследовательских испытаний электроракетных двигателей.

3. При этом в результате анализа состояния вопросов обеспечения качества процессов исследовательских испытаний ЭРД было выявлено, что проблема обеспечения качества процесса испытаний является комплексной. Её решение лежит в плоскости интеграции следующих компонентов: процессный подход на основе стандартов ИСО 9000 обеспечивает формализованную структуру, метрологические практики позволяют управлять неопределённостью, а внедрение принципов TQM создаёт основу для ответственного отношения персонала.

Таким образом, решение научно-технической задачи повышения качества процесса исследовательских испытаний ЭРД должно начинаться с формулировки целей и основных задач, направленных на ее достижение.

Целью исследования является повышение качества процессов исследовательских испытаний электроракетных двигателей на основе проектирования процессных моделей и структурирования функции качества.

Задачи исследования:

1. Провести анализ состояния обеспечения качества процессов исследовательских испытаний электроракетных двигателей.
2. Разработать модели процессов исследовательских испытаний электроракетных двигателей, в которых учтена автоматизация элементов системы, влияющих на обеспечение достоверности результатов испытаний.
3. Разработать квалиметрическую модель оценки качества процессов исследовательских испытаний электроракетных двигателей.
4. Провести комплексную апробацию предложенных научно-технических решений на примере процессов исследовательских испытаний электроракетных двигателей – высокочастотного ионного двигателя.

ГЛАВА 2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

2.1. Современные методы моделирования процессов

Построение модели процесса представляет собой сложную задачу, решение которой требует применения специализированных методов и инструментов. Существует значительное разнообразие подходов к описанию бизнес-процессов. В одних случаях используются существующие методики и стандарты анализа и документирования деятельности организации, в других – разрабатываются оригинальные методы. Для каждого проекта определяется

конкретный способ представления процессов, который может включать стандартизированные блок-схемы, диаграммы или иные формализованные средства визуализации [74, 86, 102].

Визуализация бизнес-процессов предполагает разработку системы условных обозначений для графического представления их компонентов (участников, объектов, ресурсов) и взаимосвязей. Отсутствие единых правил визуализации ведет к противоречиям в интерпретации моделей, снижая ценность процессного описания. На сегодняшний день существует большое разнообразие методологий моделирования бизнес-процессов. Из них выделяют четыре основные группы (рисунок 2.1): структурные, объектно-ориентированные, имитационные, интегрированные [75].

Структурные методологии моделирования делятся на два основных типа: моделирующие функциональную структуру и моделирующие структуру данных. При анализе бизнес-процессов преимущественно используются функциональные модели, где базовым элементом выступает операция (действие). Такие модели представляют бизнес-процессы как многоуровневую иерархию, где на каждом уровне детализации отображаются последовательности операций с указанием входных/выходных потоков (материальных и информационных) и используемых [74].

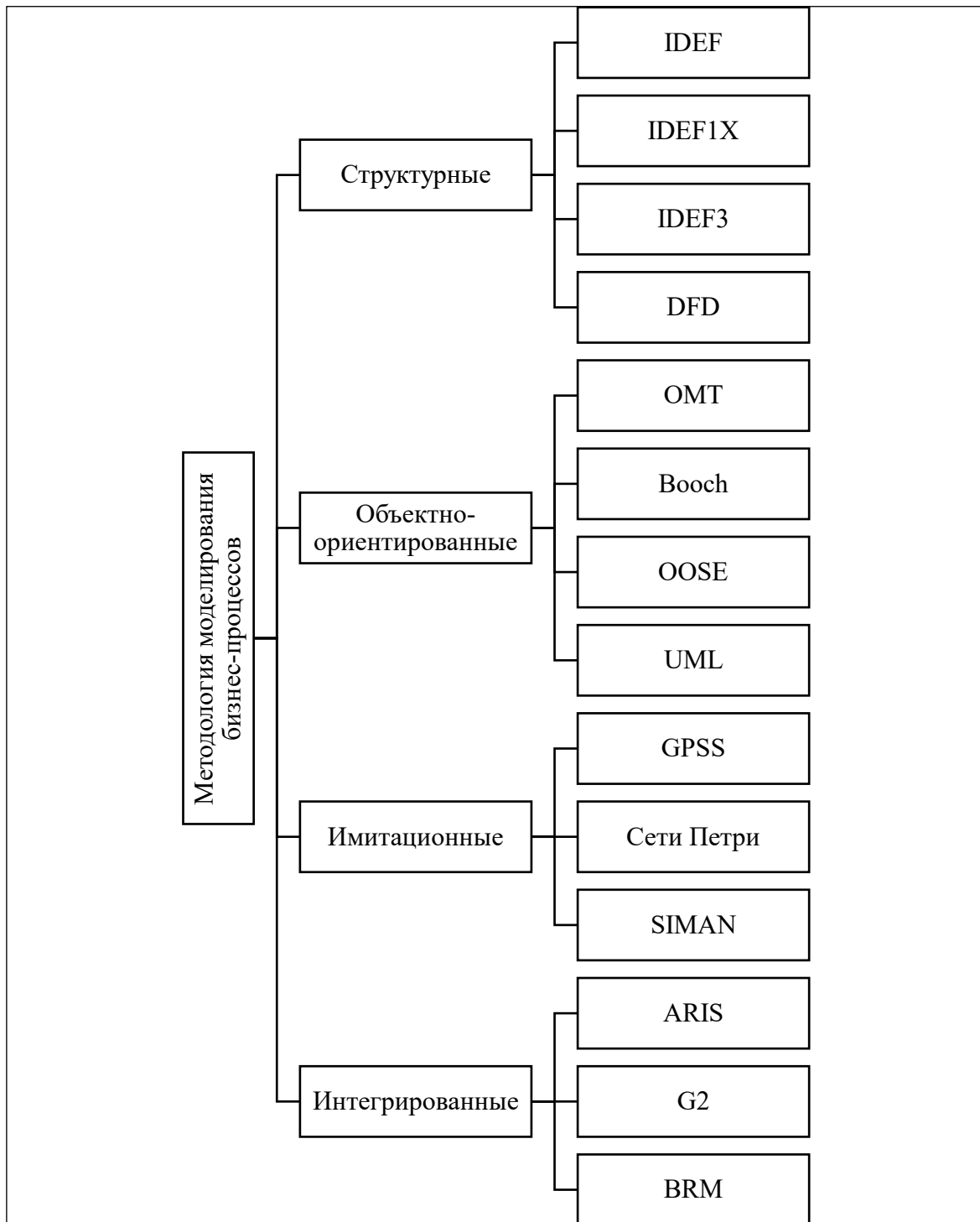


Рисунок 2.1 – Классификация методологий моделирования бизнес-процессов.

Наибольшее распространение получили следующие нотации структурного моделирования:

- IDEF0 – функциональные модели, основанные на методе структурного анализа и проектирования SADT (Structured Analysis and Design Technique) Дугласа Россса;
- IDEF1X – модели данных, основанные на диаграммах «сущность-связь» (ERD, Entity-Relationship Diagrams);
- IDEF3 – диаграммы потоков работ (Work Flow Diagrams);
- DFD (Data Flow Diagrams) – диаграммы потоков данных.

Первоначально объектно-ориентированное моделирование (ООМ) применялось исключительно в области разработки информационных систем – для создания моделей, трансформируемых в объектно-ориентированный код. Впоследствии методы ООМ нашли применение в более широком контексте, прежде всего – для анализа и оптимизации бизнес-процессов.

Основным структурообразующим элементом объектно-ориентированного подхода выступает объект. В области программирования объект представляет собой информационную структуру, которая объединяет данные (атрибуты) и методы (процедуры). Применительно к бизнес-моделированию объектами являются, в первую очередь, участники бизнес-процессов (активные объекты) – организационные единицы, исполнители, информационные системы, а также пассивные объекты — материалы, документы, оборудование, над которыми активные объекты выполняют действия. Таким образом, в ООМ модель бизнес-процессов формируется вокруг участников процессов и выполняемых ими операций.

Имитационное моделирование представляет собой компьютерное воспроизведение работы реальной системы с использованием специализированного программного обеспечения. Данные методы позволяют получить детальную картину состояния процесса в любой заданный момент времени. Они воссоздают бизнес-процессы путем визуализации их «живого» функционирования в режиме ускоренного времени. В таких моделях можно устанавливать временные и вероятностные параметры, такие как: время

поступления заявки в систему, определяемое по определенному закону распределения; длительность выполнения отдельных операций обработки заявки и другие характеристики.

К наиболее распространенным методам имитационного моделирования относятся:

- сети Петри и модификация этого метода – раскрашенные сети Петри (CPN, Colored Petri Nets);
- GPSS (General Purpose Simulating System) – унифицированный язык имитационного моделирования;
- SIMAN (SIMulation ANalysis) – язык визуального моделирования.

Интегрированные подходы к моделированию комбинируют разнородные модели, каждая из которых представляет определенный аспект системы. Методология ARIS (Architecture of Integrated Information System) обеспечивает многоперспективное представление деятельности предприятия, объединяя в единую модель: организационные структуры, функционал, данные и процессы. Современные методологии дополняют традиционное моделирование методами искусственного интеллекта, как в платформе G2, BRM (Business Rules Management) и BPMN-подходах (Business Process Management Notation).

Выбор оптимальной методологии моделирования представляет собой сложную, но решаемую задачу при условии четкого определения целей моделирования бизнес-процессов и планируемых способов использования созданных моделей. К числу ключевых задач анализа и моделирования можно отнести:

- определение системы процессов, необходимых ресурсов для их эффективного выполнения, используемых информационных систем и взаимосвязей между процессами
- автоматизацию исследуемой деятельности;
- внедрение и управление бизнес-процессами на основе разработанных моделей.

При ориентации на автоматизацию бизнес-процессов критически важен обоснованный выбор методологии моделирования. Для задач адаптации типовых информационных систем к организационной специфике рекомендуется использовать методологию ARIS с применением нотации eEPC, которая обеспечивает детальный анализ особенностей предприятия.

В случае, когда результат моделирования бизнес-процессов предполагается автоматизировать, а выполнять, контролировать их выполнение и управлять этими самыми бизнес-процессами предполагается с помощью систем управления бизнес-процессами (BPMS-системами), безусловно, стоит использовать методологию BPMN, тогда же, когда и при автоматизации процессов, подверженных изменениям, целесообразнее применять данную методологию.

Главная задача BPMN – это предоставление возможности описать и смоделировать бизнес-процессы таким образом, чтобы они были понятны всем пользователям. Поэтому модели, созданные с помощью BPMN, могут использоваться в рамках выполнения следующих работ:

- анализа и совершенствования бизнес-процессов;
- контроля за выполнением бизнес-процессов;
- улучшения бизнес-процессов (разработки модели оптимизированного процесса в режиме реального времени).

Проведенный анализ современных методологий моделирования бизнес-процессов показал преимущества концепции BPMN 2.0. Выбор данной методологии обусловлен ее комплексным характером, объединяющим стратегические ориентиры, целевые показатели, нормативы внутренних и внешних взаимодействий, организационную структуру, методологические подходы, регламентирующие документы и ИТ-инфраструктуру. Такой интегративный подход создает единую платформу для анализа, проектирования, внедрения и непрерывной оптимизации сквозных бизнес-процессов, а также формализации процессных взаимодействий.

2.2. Функциональное моделирование процессов исследовательских испытаний электроракетных двигателей

Для понимания содержательной части исследовательских испытаний их необходимо представить обобщенной единой моделью, характеризующей основные этапы данного процесса, во взаимосвязи между ними и с учетом влияния внешних факторов [3, 64].

Построение общей (рисунок 2.2) и детализированных моделей (рисунок 2.3-2.7) процесса исследовательских испытаний ЭРД осуществлялось с использованием методов и технологий системной инженерии, в частности, с помощью методологии моделирования бизнес-процессов BPMN 2.0, позволяющих формализовать и оптимизировать рассматриваемые процессы для их дальнейшей регламентации и автоматизации.

На этапе планирования (рисунок 2.3) процесса исследовательских испытаний ЭРД необходимо: выбрать критерии эффективности / показатели качества процесса исследовательских испытаний ЭРД; разработать модели системы и объекта испытаний; выбрать виды, объемы и последовательность испытаний; выбрать контролируемые переменные; разработать сбор и обработку априорной информации, разработать формы отчетной документации. Ключевым элементом, закладываемым на этом этапе, является внедрение автоматизированной системы «Анализ и оценка уровня качества процесса исследовательских испытаний ЭРД». Её задача — операционализировать выбранные критерии эффективности, сделав их измеримыми и отслеживаемыми на протяжении всего процесса испытаний. Таким образом, система обеспечивает непрерывный анализ выполнения установленных нормативов на каждом этапе испытаний, предоставляя объективные данные для управления процессом и гарантируя, что итоговые результаты будут соответствовать целевым показателям качества.

При разработке детализированных моделей основных этапов этап «Проведение испытаний» был разделен на два подэтапа – «Пуско-наладочные

работы» (рисунок 2.4) и «Испытания» (рисунок 2.5). Во время пуско-наладочных работ формируется комиссия, ответственная за ввод испытательного стенда в эксплуатацию; проводятся анализ комплектности и соответствия документации на систему и объект испытаний, а также проверка и настройка всех систем стенда, в том числе: проверка работоспособности стенда, диагностирование системы автоматизированного управления, диагностика информационно-измерительной системы и др.

На этапах анализа результатов исследовательских испытаний (рисунок 2.6) и принятия решений (рисунок 2.7) первостепенными задачами являются анализ и обработка экспериментальной информации; обоснование и разработка мероприятий по выполнению доводочных работ, а также диагностика технического состояния и надежности объекта и подготовка итогового отчета.

Усовершенствование общей и детализированной моделей процессов исследовательских испытаний ЭРД является ключевым шагом на пути к повышению их эффективности, достоверности и соответствия современным требованиям. На уровне общей модели это выражается в интеграции сквозных автоматизированных контуров управления, которые связывают ранее разрозненные этапы: от заложения критериев эффективности, а именно, показателей качества процесса в автоматизированную систему «Анализ и оценка уровня качества процесса исследовательских испытаний ЭРД» до автоматизированного управления режимами испытаний, регистрации первичных данных, их обработки и автоматизированной оценки уровня качества процесса. Такая интеграция позволяет рассматривать цикл испытаний не как набор отдельных операций, а как целостный, управляемый цифровыми протоколами процесс. Это минимизирует «человеческий фактор» на стыках этапов и создает основу для комплексного обеспечения качества на протяжении всего исследования.

На детализированном уровне ключевым улучшением становится автоматизация элементов системы, непосредственно влияющих на критически важные параметры испытаний. Например, модели теперь включают алгоритмы

активного управления вакуумным стендом. Автоматизированная система регистрации первичных данных становится центральным элементом усовершенствованной модели, кардинально трансформируя подход к сбору и первичной обработке информации. В отличие от традиционных методов, где данные снимаются оператором выборочно или записываются на отдельные регистраторы с последующим трудоемким сбором, современная система представляет собой единый цифровой контур. Она в реальном времени собирает сигналы со всех датчиков – расходомера, осциллографа, ВЧГ-генератора и датчика температуры – синхронизируя их с точностью до миллисекунд по единой временной метке. Это исключает расхождения в данных из-за разницы во времени их фиксации и обеспечивает целостную картину происходящих в двигателе и вакуумной камере процессов. Влияние данной автоматизации на обеспечение качества процесса испытаний проявляется, прежде всего, в значительном повышении точности и повторяемости результатов. Исключаются ошибки, связанные с ручным считыванием показаний приборов и запаздыванием реакции оператора на изменение режимов. Система в автоматическом режиме регистрирует тысячи параметров с высокой частотой, фиксируя даже кратковременные аномалии, которые могли бы остаться незамеченными при визуальном контроле.

Важным аспектом усовершенствованных моделей является встроенная система автоматизированного анализа и оценки уровня качества процесса исследовательских испытаний ЭРД. Данная система функционирует не на уровне сбора данных о работе двигателя, а осуществляет контроль работы всего контура испытаний в целом, постоянно анализируя показатели качества процесса на соответствие установленным регламентам и критериям. Если какой-либо показатель выходит за пределы допустимых границ, система не просто фиксирует отклонение, а автоматически классифицирует его по степени влияния на качество процесса: от предупреждения до приостановки испытаний. Это позволяет перейти от субъективной оценки качества к объективному, непрерывному и документированному контролю, гарантируя, что каждое

исследование проводится в строго контролируемых и соответствующих методике условиях, что является залогом научной ценности.

В итоге, внедрение усовершенствованных моделей, учитывающих глубокую автоматизацию, трансформирует процесс исследовательских испытаний ЭРД из трудоемкого эксперимента в высокотехнологичный, управляемый процесс.

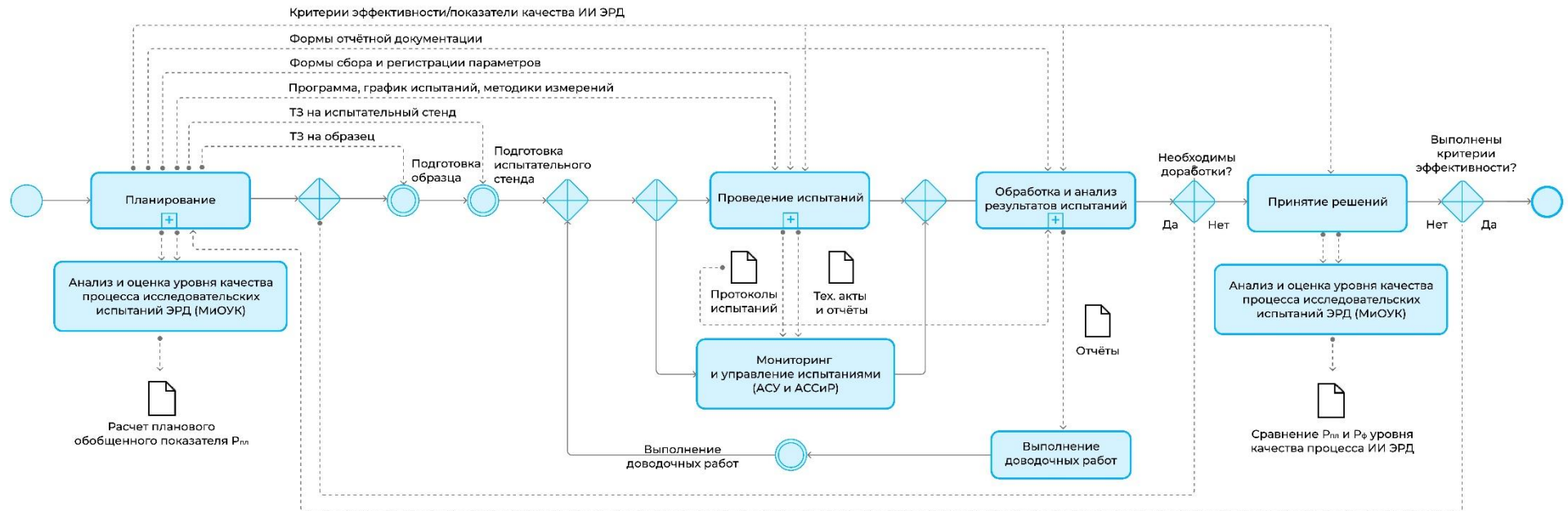


Рисунок 2.2 – Общая модель процесса исследовательских испытаний ЭРД.

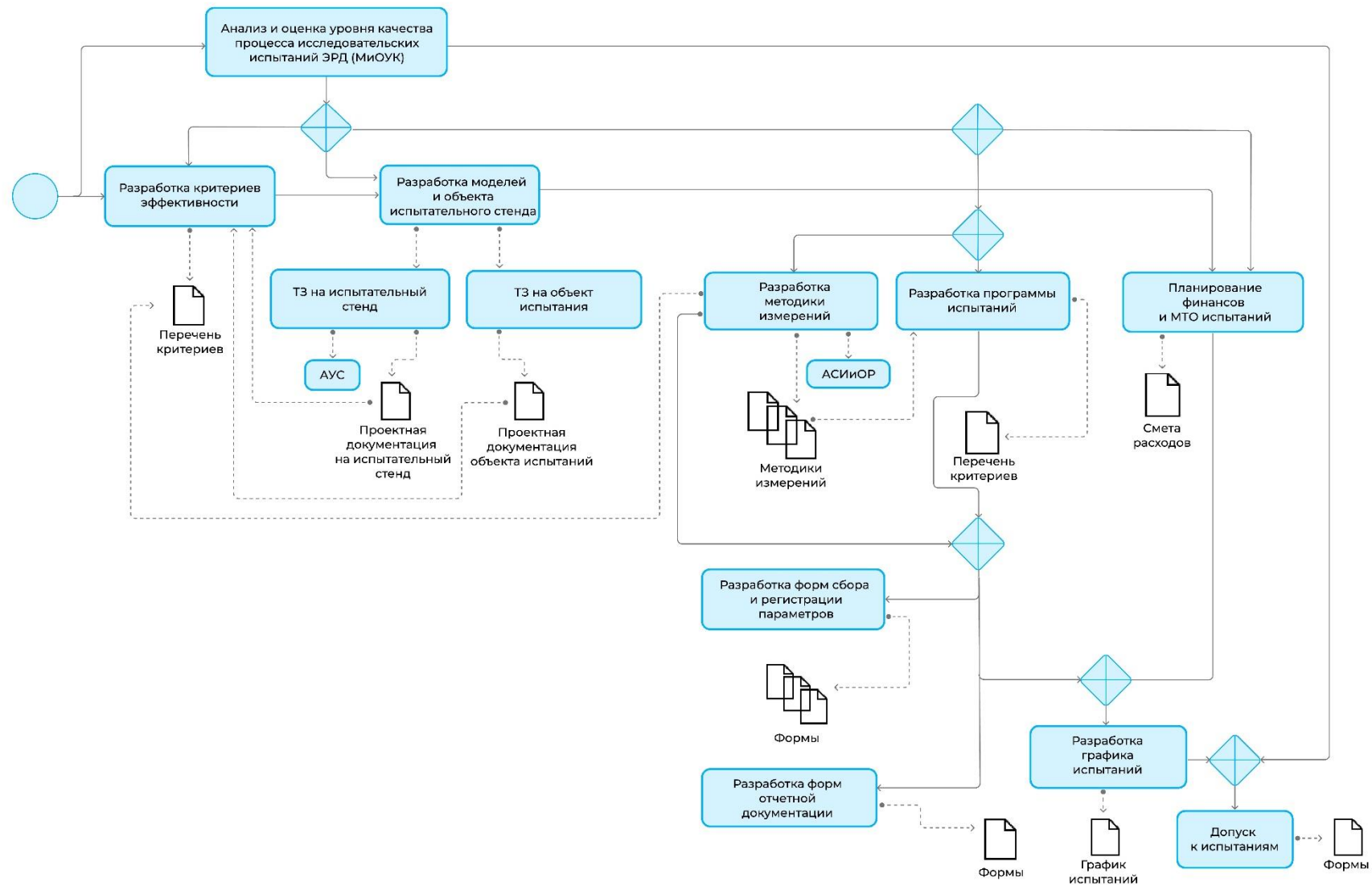


Рисунок 2.3 – Детализированная модель этапа «Планирование» процесса исследовательских испытаний ЭРД.



Рисунок 2.4 – Детализированная модель подэтапа «Пуско-наладочные работы» процесса исследовательских испытаний ЭРД.

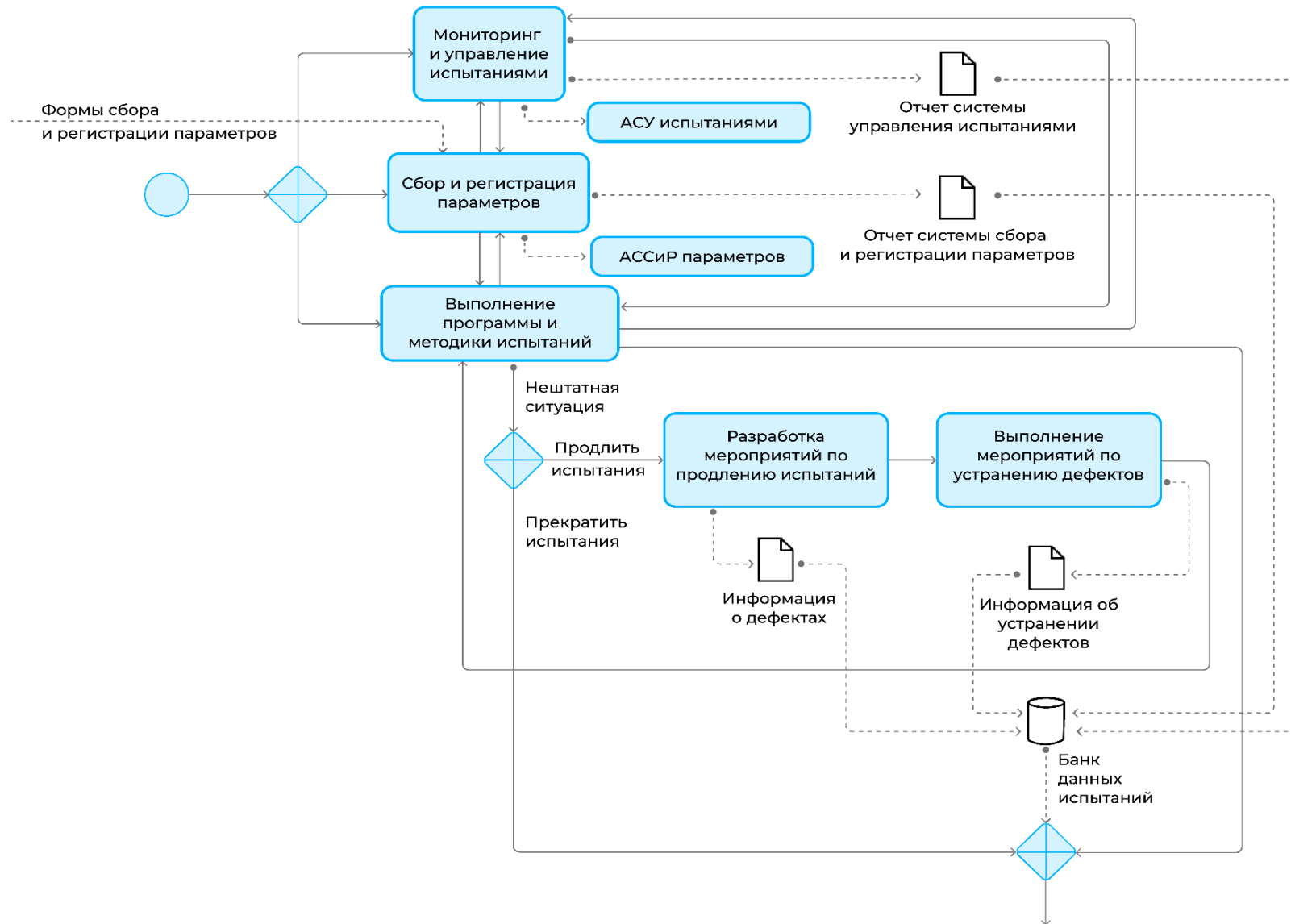


Рисунок 2.5 – Детализированная модель подэтапа «Испытания» процесса исследовательских испытаний ЭРД.

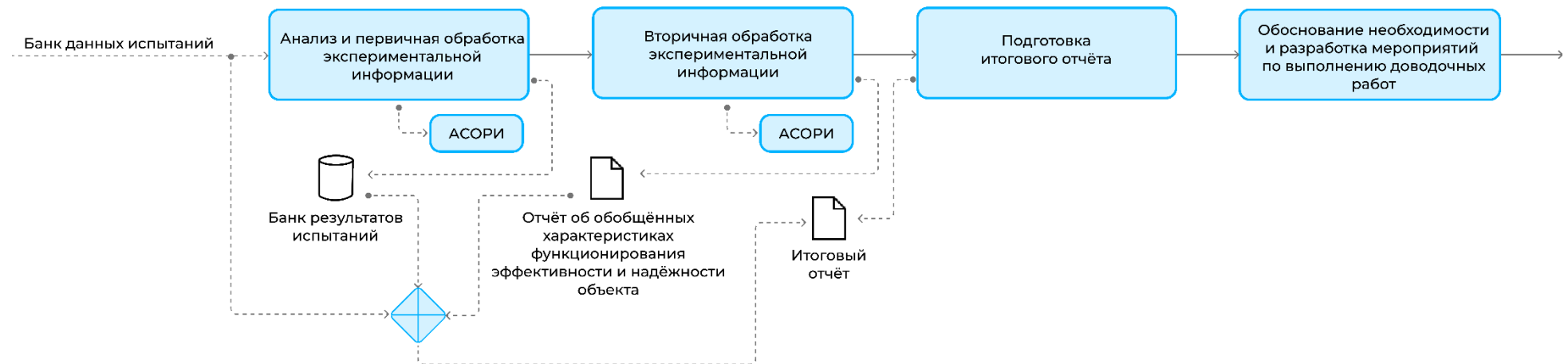


Рисунок 2.6 – Детализированная модель этапа «Обработка и анализ результатов испытаний» процесса исследовательских испытаний ЭРД.

2.3. Анализ структуры и взаимосвязей процессов исследовательских испытаний электроракетных двигателей

Проектирование общей и детализированных моделей основных этапов исследовательских испытаний ЭРД позволяет отобразить потоки данных внутри каждого этапа и разработать состав подпроцессов, а также, а также сформулировать задачи каждого подпроцесса, представляющих в совокупности систему элементов управления процессом исследовательских испытаний ЭРД (рисунок 2.8).

Этапы процесса исследовательских испытаний ЭРД	Планирование			Проведение испытаний						Обработка и анализ результатов			Принятие решений		
				Пуско-наладочные работы			Испытания								
	Элементы модели процесса исследовательских испытаний ЭРД		Регламентирующие нормативные документы	Элементы модели процесса исследовательских испытаний ЭРД		Регламентирующие нормативные документы	Элементы модели процесса исследовательских испытаний ЭРД		Регламентирующие нормативные документы	Элементы модели процесса исследовательских испытаний ЭРД		Регламентирующие нормативные документы			
	Подпроцессы	Основные задачи подпроцессов		Подпроцессы	Основные задачи подпроцессов		Подпроцессы	Основные задачи подпроцессов		Подпроцессы	Основные задачи подпроцессов				
Группа подпроцессов															
Функциональные															
Организационно-управленческие															
Финансово-экономические															

Рисунок 2.8 – Структура системы элементов модели управления процессом исследовательских испытаний ЭРД.

В таблицах 2.1-2.5 приведены подпроцессы и их задачи для основных этапов исследовательских испытаний ЭРД, при этом подпроцессы сгруппированы по трем классификационным признакам: функциональные, организационно-управленческие и финансово-экономические. Детализированные модели позволяют выделить факторы, влияющие на обеспечение достоверности результатов испытаний. Например, анализ элементов этапа «Планирование» (таблица 2.1) позволяет сделать вывод, что показатели эффективности испытаний и достоверности результатов эксперимента закладываются и, во многом обеспечиваются, при выполнении функциональных подпроцессов и их задач. Так, выполнение подпроцесса «Планирование эксперимента и разработка критериев эффективности испытаний» создает предпосылки для получения высокого качества результатов испытаний, так как позволяет исключить проведение некорректных

экспериментов, а правильный «Выбор (разработка новых) средств измерений» оказывает существенное влияние на качество измерений (проведение измерений средствами несоответствующего уровня точности может обесценить результаты измерений и привести к неверным научным выводам) и т.д.

Следует отметить, что большинство функциональных подпроцессов регламентированы нормативно-техническими документами разных уровней (см. таблицы 2.1-2.5), и их проектирование необходимо осуществлять с учетом установленных обязательных требований.

Таблица 2.1 – Элементы модели процесса исследовательских испытаний ЭРД, этап «Планирование».

Этапы процесса исследовательских испытаний ЭРД	Планирование		Регламентирующие нормативные документы
	Элементы модели процесса исследовательских испытаний ЭРД		
	Группа подпроцессов	Подпроцессы		Основные задачи подпроцессов
Функциональные	Планирование эксперимента и разработка критериев эффективности процессов	– установление подлежащих измерению физических величин или параметров объекта	№ 102-ФЗ от 26.06.2008; ГОСТ Р ИСО 5725-2002 (Ч. 1-6); ГОСТ 8.417-2002; ГОСТ Р 8.820-2013; ГОСТ Р 59159-2020; ГОСТ Р 59160-2020
		– установление требований к точности результата испытаний	№ 102-ФЗ от 26.06.2008; ГОСТ Р ИСО 5725-2002 (Ч. 1-6); ГОСТ 16504-81; ГОСТ Р 8.820-2013; ГОСТ Р 59159-2020; ГОСТ Р 59160-2020; РМГ 29-2013
		– установление объема испытаний (числа измерений)	№ 102-ФЗ от 26.06.2008; ГОСТ Р ИСО 5725-2002 (Ч. 1-6); ГОСТ 16504-81; ГОСТ Р 8.820-2013; ГОСТ Р 59159-2020; ГОСТ Р 59160-2020
		– установление требований к скорости получения измерительной информации, ее дискретности	ГОСТ 16504-81; ГОСТ Р 59159-2020; ГОСТ 34.201-2020; ГОСТ 34.602-2020
		– установление требований к уровню автоматизации испытаний	ГОСТ Р 59159-2020; ГОСТ 34.201-2020; ГОСТ 34.602-2020
		Разработка моделей объекта и испытательного стенда	– установление метода измерений, позволяющего решить конкретную задачу испытаний	№ 102-ФЗ от 26.06.2008; ГОСТ Р 8.820-2013; ГОСТ Р 59159-2020; ГОСТ Р 59160-2020
	– выбор (разработка новых) средств измерений, оптимальных с точки зрения метрологических характеристик, экономических и др. показателей		№ 102-ФЗ от 26.06.2008; ГОСТ Р 59159-2020; ГОСТ Р 59160-2020; РМГ 29-2013

		– разработка автоматизированной системы управления (АСУ) испытаниями	ГОСТ Р 59159-2020; ГОСТ 34.201-2020; ГОСТ 34.602-2020
		– разработка автоматизированной информационно-измерительной системы (АИИС) сбора, обработки и анализа экспериментальных данных	№ 102-ФЗ от 26.06.2008; ГОСТ Р ИСО 5725-2002 (Ч. 1-6); ГОСТ Р 8.820-2013; ГОСТ Р 59159-2020; ГОСТ 59160-2020; РМГ 29- 2013
		– разработка проектной документации на объект и испытательный стенд	ГОСТ Р 56098-2017; ГОСТ Р 8.1024-2023; РМГ 63-2003
	Разработка программы и методики испытаний	– унификация требований к модели, средствам измерений, условиям проведения, обработке экспериментальных данных, квалификации операторов, обработке и оформлению результатов измерений	№ 102-ФЗ от 26.06.2008; ГОСТ Р ИСО 5725-2002 (Ч. 1-6); ГОСТ Р 56098-2017; ГОСТ Р 8.1024-2023; ГОСТ Р 8.820-2013; ГОСТ Р 59159-2020; ГОСТ 59160-2020; РМГ 29-2013; РМГ 63-2003
Организационно-управленческие	Разработка графика испытаний	– планирование сроков проведения испытаний	-
	Разработка форм документации	– разработка форм сбора и регистрации параметров	-
		– разработка форм отчетной документации	-
Финансово-экономические	Планирование финансов и материально-технического обеспечения испытаний	– планирование материально-технического обеспечения испытаний	-
		– планирование затрат	-
		– планирование рисков	-

Таблица 2.2 – Элементы модели процесса исследовательских испытаний ЭРД, подэтап «Пуско-наладочные работы».

Этапы процесса исследовательских испытаний ЭРД	Пуско-наладочные работы		Регламентирующие нормативные документы
	Элементы модели процесса исследовательских испытаний ЭРД		
Группа подпроцессов	Подпроцессы	Основные задачи подпроцессов	
Функциональные	Проверка компетентности персонала и анализ комплектности и соответствия документации на систему и объект испытаний	– определение соответствия привлекаемого персонала установленным требованиям	ГОСТ ISO/IEC 17025-2019
		– определение комплектности и соответствия установленным требованиям проектно-конструкторской,	ГОСТ ISO/IEC 17025-2019

		эксплуатационной документации, документации системы охраны труда, документации на проведение испытаний	
	Монтаж, подготовка и проверка работоспособности системы и объекта испытаний	– подготовка и сборка испытательного стенда в соответствии с утвержденной проектно-конструкторской документацией	-
		– установление факта работоспособности системы и объекта испытаний	-
	Наладочные работы: индивидуальные испытания	– проведение пуско-наладочных работ: индивидуальные испытания составных частей испытательного стенда на заданных режимах	-
	Наладочные работы: комплексные испытания	– проведение пуско-наладочных работ: комплексные испытания на заданных режимах	-
Организационно-управленческие	Утверждение комиссии	– утверждение состава комиссии	-
	Принятие решения о начале испытаний	– принятие решения о начале испытаний	-
Финансово-экономические	-	-	-

Таблица 2.3 – Элементы модели процесса исследовательских испытаний ЭРД, подэтап «Испытания».

Этапы процесса исследовательских испытаний ЭРД	Испытания		Регламентирующие нормативные документы
	Элементы модели процесса исследовательских испытаний ЭРД		
Группа подпроцессов	Подпроцессы	Основные задачи подпроцессов	
Функциональные	Выполнение испытаний согласно программе и методике	– проведение испытаний согласно программе и методике	№ 102-ФЗ от 26.06.2008; Приказ Минпромторга России от 15.12.2015 №4091; Приказ Минпромторга России от 31.07.2020 №2510; ГОСТ ISO/IEC 17025-2019; ГОСТ Р 8.568-2017; РМГ 29-2013
	Мониторинг и управление испытаниями	– контроль соответствия условий окружающей среды	№ 102-ФЗ от 26.06.2008; Приказ Минпромторга России от 15.12.2015 №4091; Приказ Минпромторга России от 31.07.2020 №2510; ГОСТ ISO/IEC 17025-2019; ГОСТ Р 8.568-2017; РМГ 29-2013
		– мониторинг выполнения эксперимента согласно программе и методике	№ 102-ФЗ от 26.06.2008;

			Приказ Минпромторга России от 15.12.2015 №4091; ГОСТ ISO/IEC 17025-2019; РМГ 29-2013
		– управление режимами испытаний согласно программе и методике	№ 102-ФЗ от 26.06.2008; Приказ Минпромторга России от 15.12.2015 №4091; ГОСТ ISO/IEC 17025-2019; РМГ 29-2013
	Выполнение мероприятий по устранению дефектов	– выполнение разработанных мероприятий по устранению причин нештатной ситуации	-
Организационно-управленческие	Разработка мероприятий по продлению испытаний	– выяснение причин нештатной ситуации на основе анализа выявленных дефектов	-
		– разработка мероприятий по устранению причин нештатной ситуации	-
Финансово-экономические	-	-	-

Таблица 2.4 – Элементы модели процесса исследовательских испытаний ЭРД, этап «Обработка и анализ результатов».

Этапы процесса исследовательских испытаний ЭРД	Обработка и анализ результатов испытаний		Регламентирующие нормативные документы
	Элементы модели процесса исследовательских испытаний ЭРД		
Группа подпроцессов	Подпроцессы	Основные задачи подпроцессов	
Функциональные	Анализ и первичная обработка экспериментальной информации	– получение исправленного ряда измерений	№ 102-ФЗ от 26.06.2008; ГОСТ Р ИСО 5725-2002 (Ч. 1-6); РМГ 29-2013
	Вторичная обработка экспериментальной информации	– определение обобщенных характеристик функционирования эффективности и надежности объекта в соответствии с программой и методикой испытаний	№ 102-ФЗ от 26.06.2008; ГОСТ Р ИСО 5725-2002 (Ч. 1-6); РМГ 29-2013
Организационно-управленческие	Подготовка итогового отчета	– подготовка итогового отчета	-
	Принятие решения о необходимости выполнения доводочных работ	– принятие решения о необходимости выполнения доводочных работ	-
Финансово-экономические	-	-	-

Таблица 2.5 – Элементы модели процесса исследовательских испытаний ЭРД, этап «Принятие решений».

Этапы процесса исследовательских испытаний ЭРД	Принятие решений		Регламентирующие нормативные документы
	Элементы модели процесса исследовательских испытаний ЭРД		
Группа подпроцессов	Подпроцессы	Основные задачи подпроцессов	
Функциональные	Диагностика технического состояния и надежности объекта	– сравнение полученных данных с проектными данными	-
		– оценка технического состояния и надежности объекта	ГОСТ Р 27.102-2021 и т.д.
Организационно- управленческие	Подготовка итогового отчета	– подготовка итогового отчета	-
	Принятие решения	– принятие решения о техническом состоянии и надежности объекта	-
Финансово- экономические	Анализ затрат	– сравнение фактических расходов с плановыми показателями	-

2.4. Выводы по главе 2

1. Во второй главе проведен комплексный анализ современных методологий моделирования процессов. Установлено, что наиболее эффективным для описания процессов исследовательских испытаний являются процессно-ориентированные подходы, а именно, методология – BPMN 2.0. Выбранный метод позволил формализовать ключевые этапы исследовательских испытаний ЭРД и обеспечить их наглядное представление.

2. В ходе работы были разработаны и усовершенствованы обобщённая и детализированная модели процесса исследовательских испытаний ЭРД. Ключевым улучшением стал учёт внедрённой автоматизации элементов системы, обеспечивающих качество испытаний. Применяемые средства автоматизации обеспечивают систематический анализ состояния испытаний, что создаёт основу для анализа и совершенствования процессов и, как следствие, способствует повышению надёжности и эффективности создаваемой ракетно-космической техники. Разработанные детализированные модели позволили визуализировать потоки данных между подпроцессами, что способствует повышению прозрачности и управляемости цикла испытаний.

3. В рамках исследования определен состав подпроцессов, формирующих систему управления качеством испытаний ЭРД. Выявлена взаимосвязь этапов процесса, разработана система элементов модели управления процессом исследовательских испытаний ЭРД, определены основные задачи подпроцессов, классифицированных по 3 группам: функциональные, финансово-экономические и организационно-управленческие. Показан уровень нормативно-технического обеспечения каждого элемента системы.

4. Детальный анализ процесса и выстроенная система элементов модели управления процессом исследовательских испытаний ЭРД позволяют разработать систему показателей качества и квалиметрическую модель оценки качества процесса исследовательских испытаний ЭРД.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА КВАЛИМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

3.1. Квалиметрические методы оценки при управлении качеством исследовательских испытаний электроракетных двигателей

Исследовательские испытания ЭРД требуют высокоточной оценки технических характеристик, надежности и соответствия проектным параметрам. В условиях возрастающей сложности конструкций и ужесточения требований к качеству продукции особую актуальность приобретает применение квалиметрических методов, позволяющих формализовать и количественно оценить ключевые показатели эффективности [1].

Для изучения проблем обеспечения качества процесса исследовательских испытаний ЭРД необходима разработка методики квалиметрической оценки качества, позволяющая учитывать большое количество комплексных и единичных показателей и, на основе расчета обобщенного комплексного показателя, принимать обоснованные решения по определению путей развития методологии и обеспечения качества исследовательских испытаний ЭРД. Квалиметрические методы играют ключевую роль в управлении качеством исследовательских испытаний ЭРД. Квалиметрия позволяет перевести качественные характеристики (надежность, эффективность, стабильность работы системы) в измеримые количественные показатели. Это особенно важно для ЭРД, где точность измерений определяет достоверность полученных результатов и дальнейшее совершенствование процесса исследовательских испытаний. Применение квалиметрических методов обеспечивает системный подход к оценке качества на всех этапах испытаний – от планирования до анализа полученных данных. Кроме того, количественные критерии помогают выявлять отклонения от нормативов и своевременно корректировать процесс испытаний [2, 9, 50, 51].

Одним из основных подходов является применение статистических методов анализа данных. Например, дисперсионный анализ и регрессионные модели позволяют выявлять влияние отдельных факторов (напряжение в блоке питания, состав рабочего тела, давление в вакуумной камере) на выходные характеристики двигателя, получаемые в процессе испытаний.

Дополнением к формализованным методам анализа выступают экспертные оценки, играющие ключевую роль при испытаниях ЭРД. Для параметров, не поддающихся прямому инструментальному измерению (например, степень технического оснащения испытательного стенда), применяются балльные системы оценки с привлечением специалистов. Применение экспертных методов в квалиметрической модели обеспечивает системный подход к оценке сложного процесса испытаний ЭРД [8, 47, 60, 61, 63, 88, 99]. Назначение весовых коэффициентов экспертами позволяет ранжировать показатели качества по степени их значимости, отражая реальную важность каждого параметра для итоговой и объективной оценки [12]. Главной целью вычисления коэффициентов весомости свойств процесса является определение количественной меры влияния каждого отдельного свойства на общее восприятие качества. Поскольку разные свойства вносят неодинаковый вклад в конечную ценность, весовые коэффициенты позволяют перейти от набора разрозненных параметров к единому, интегральному показателю качества. Это объективизирует процесс оценки, делает возможным сравнение различных продуктов между собой, обоснование цены, выявление слабых мест и направлений для улучшения. Для достижения этой цели используются различные методы, которые можно условно разделить на четыре группы:

1. Стоимостный метод: в основе лежит предположение, что важность свойства пропорциональна затратам на его достижение или тем экономическим потерям, которые понесет потребитель при его отсутствии.

2. Вероятностный метод: этот подход использует данные о фактическом значении показателей у различных аналогов на рынке. Весомость

рассчитывается на основе статистических данных, например, как величина, обратная дисперсии показателя.

3. Экспертный метод: наиболее распространенный на практике подход. Он основан на получении и обработке качественных суждений группы специалистов-экспертов. Метод применяется тогда, когда невозможно прямое стоимостное или статистическое измерение важности, а также при оценке новых продуктов, аналогов которым нет на рынке. Его преимущество – простота организации и возможность учесть любые, даже субъективные, факторы.

4. Смешанный метод: представляет собой комбинацию вышеперечисленных подходов. Например, первоначальный набор весов может быть установлен экспертно, а затем скорректирован на основе стоимостного анализа или статистических данных [72].

В рамках данного исследования в качестве основополагающего использовался экспертный метод оценки качества процесса исследовательских испытаний ЭРД. Для определения степени согласованности экспертов используется специальная мера – коэффициент конкордации [101], который вычисляется по формуле:

$$W = \frac{S}{m^2 * (n^3 - n)}, \quad (3.1)$$

где S – отклонение суммы квадратов рангов от средней квадратов рангов; m – количество факторов (показателей); n – число экспертов (число наблюдений).

Значимость коэффициента конкордации проверяется на основе χ^2 – критерия Пирсона по формуле:

$$\chi^2 = \frac{12 * S}{m * n * (n - 1)} \quad (3.2)$$

Данный показатель преимущественно используется для оценки уровня согласованности мнений трёх и более независимых экспертов или источников информации. Его значения варьируются в интервале от 0 до 1: значение, приближающееся к нулю, свидетельствует о полном отсутствии согласия между

экспертами, тогда как значение, близкое к единице, указывает на практически полную согласованность оценок.

Исследование DataResearch Group в 2024 году показало, что использование коэффициента конкордации в экспертных оценках увеличивает точность решений на 37% в среднем по проектам [100]. Метод особенно эффективен для анализа сложных систем с высокой долей субъективных факторов.

3.2. Построение квалиметрической модели оценки качества исследовательских испытаний электроракетных двигателей

Для решения задач, связанных с обеспечением качества процесса исследовательских испытаний ЭРД, требуется разработка квалиметрической модели оценки качества, способной интегрировать значительное количество показателей в обобщенную комплексную оценку. Такая методика должна формализовать анализ данных процесса исследовательских испытаний, обеспечивая объективность и сопоставимость, и служить основой для принятия обоснованных решений, направленных на совершенствование методологии процесса исследовательских испытаний ЭРД.

В рамках настоящего исследования для построения квалиметрической модели оценки качества исследовательских испытаний ЭРД был разработан структурированный алгоритм (рисунок 3.1).

Данный алгоритм включает этапы формирования системы взаимоувязанных показателей, определения их коэффициентов весомости методами экспертных оценок с последующей статистической верификацией, нормализации разноразмерных характеристик и расчета интегрального показателя качества. Реализация алгоритма позволяет перейти от разрозненного анализа параметров к системной оценке, что является ключевым элементом в управлении качеством исследовательских испытаний ЭРД.

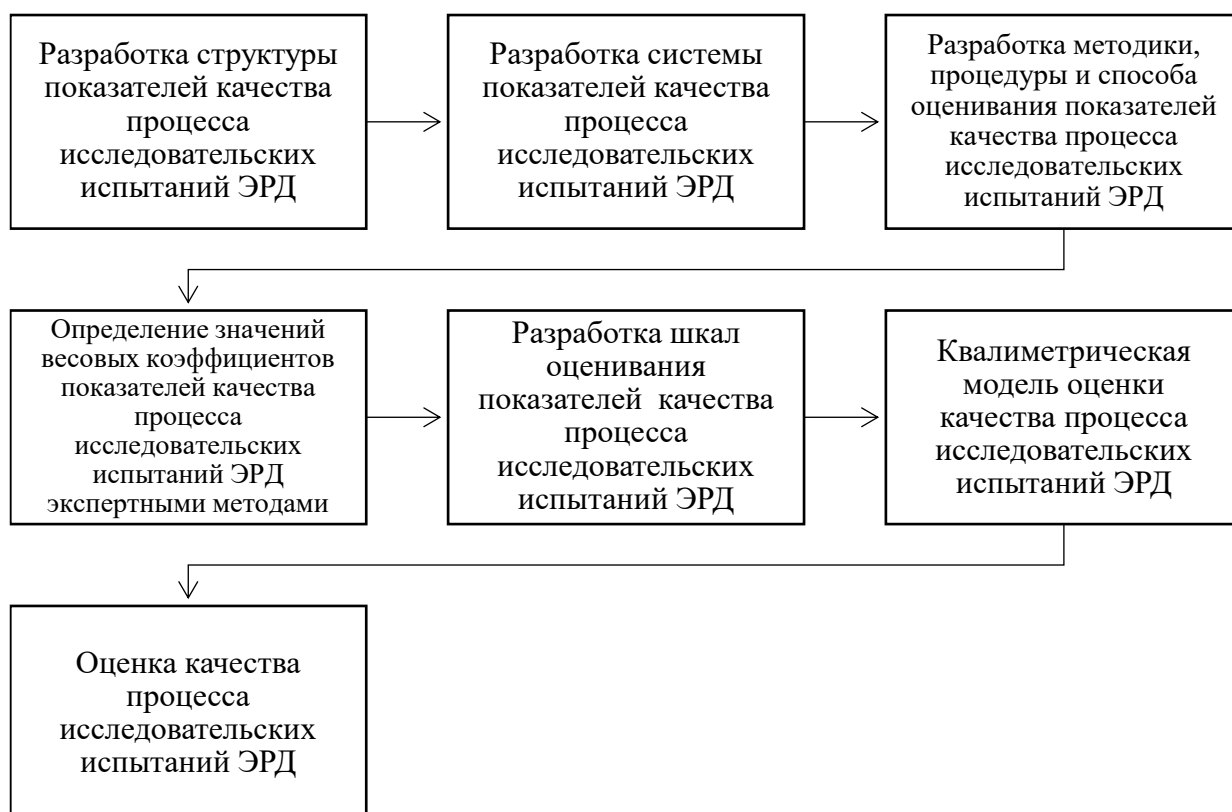


Рисунок 3.1 – Алгоритм разработки квалиметрической модели оценки качества процесса исследовательских испытаний ЭРД.

Для обеспечения результативности осуществления каждого, выделенного в ЖЦП Национальный стандарт РФ ГОСТ Р ИСО 9001-2015 «Системы менеджмента качества. Требования» рекомендует устанавливать конкретные цели, критерии и показатели (пп. 4.4.1, 8.1, 8.5.1, 9.3.2 и др.).

Анализ полученных данных при моделировании процесса исследовательских испытаний ЭРД позволил выделить комплексные и единичные показатели качества процесса и построить древовидную иерархическую структуру их связи, которая показана на (рисунок 3.2), отражающую взаимосвязь обобщенного комплексного показателя качества процесса (0-ой уровень) с комплексными и единичными показателями качества (1-ый, 2-ой и т.д. уровни).

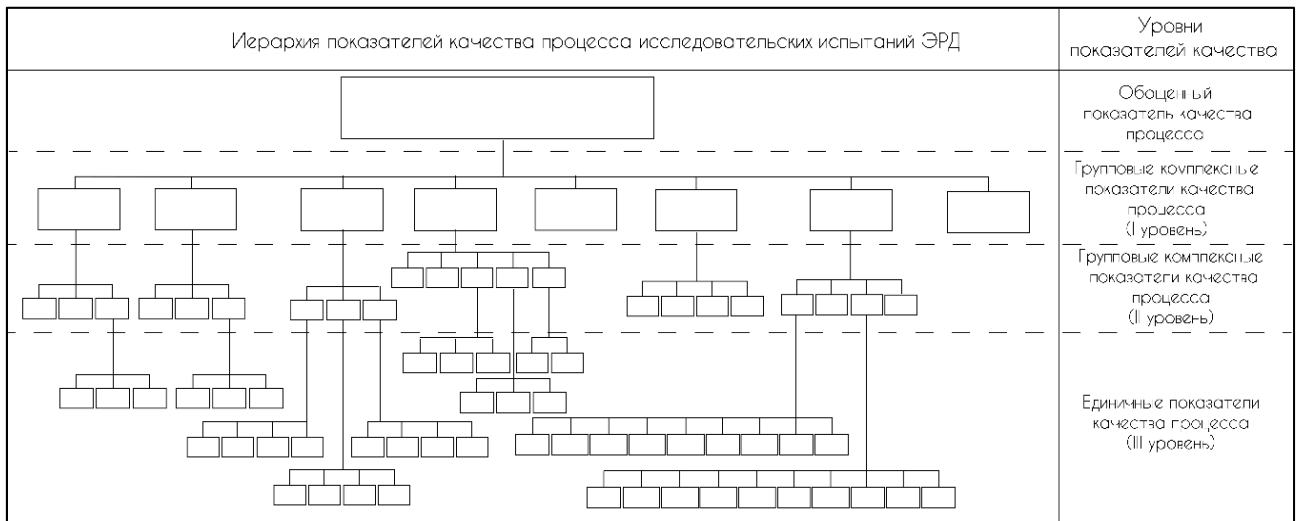


Рисунок 3.2 – Древоподобная иерархическая структура показателей качества процесса исследовательских испытаний ЭРД.

Структура и содержание всех выделенных комплексных и единичных показателей качества, представляющих собой систему показателей качества исследовательских испытаний ЭРД, представлены в таблице 3.1.

На основе разработанной системы показателей качества можно рассчитать обобщенный комплексный показатель качества процесса исследовательских испытаний ЭРД с использованием аддитивной или мультипликативной схемы свертки показателей качества низших уровней. Это означает, что оценку качества процесса исследовательских испытаний можно осуществлять на основе определения обобщенного комплексного показателя качества P в виде:

- средневзвешенного арифметического с помощью метода свертки комплексных и единичных показателей на основе аддитивной схемы с учетом весовых коэффициентов значимости показателей качества:

$$P = \sum_{i=1}^n P_i \alpha_i,$$

- средневзвешенного геометрического с помощью метода свертки комплексных и единичных показателей на основе мультипликативной схемы с учетом весовых коэффициентов значимости показателей качества:

$$Q = \prod_{i=1}^n (P_i)^{\alpha_i},$$

где P_i – комплексные и единичные показатели качества 1-го уровня; α_i – их весовые коэффициенты значимости ($\alpha_i > 0$; $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$).

Учитывая специфику подготовки и проведения исследовательских испытаний, в ходе которых не установлены доминирующие, лимитирующие качество всего процесса, единичные или комплексные показатели низшего уровня в качестве модели свертки принимается аддитивная свертка. Поэтому для проведения оценки было принято решение, что в данном случае в качестве оценочного обобщённого показателя целесообразно использовать средневзвешенное арифметическое.

Таким образом, обобщенный комплексный показатель качества формируется из следующих показателей первого уровня [40, 41, 43, 44] (см. таблица 3.1):

P_1 - качество объекта,

P_2 - качество испытательного стенда,

P_3 - качество автоматизации процесса испытаний,

P_4 - качество проведения испытаний,

P_5 - качество кадрового обеспечения,

P_6 - безопасность процесса испытаний,

P_7 - экономичность процесса испытаний,

P_8 - экологичность процесса испытаний.

Таблица 3.1 – Система показателей качества процесса исследовательских испытаний ЭРД.

Уровни показателей качества исследовательских испытаний ЭРД			
0-ой уровень	1-ый уровень	2-ой уровень	3-ий уровень
P- качество процесса исследовательских испытаний ЭРД	P ₁ - качество объекта	P _{1.1} - качество разработки модели объекта	.....
		P _{1.2} - качество изготовления объекта	.....
	P ₂ - качество испытательного стенда	P _{2.1} - качество разработки модели испытательного стенда	.....
		P _{2.2} - качество изготовления испытательного стенда	.....
		P _{2.3} - качество эксплуатации испытательного стенда	P _{2.3.1} - пуско-наладочные работы
			P _{2.3.2} - текущее состояние стендовых систем
			P _{2.3.3} - техническое обслуживание
	P ₃ - качество автоматизации процесса испытаний	P _{3.1} - качество автоматизации управления процессом	P _{3.1.1} - качество разработки автоматизированной системы управления процессом
			P _{3.1.2} - качество автоматизированной системы управления процессом
			P _{3.1.3} - качество автоматизации управления процессом
			P _{3.1.4} - качество эксплуатации автоматизированной системы управления процессом
		P _{3.2} - качество автоматизации регистрации первичных данных	P _{3.2.1} - качество разработки автоматизированной системы регистрации первичных данных
			P _{3.2.2} - качество автоматизированной системы регистрации первичных данных
			P _{3.2.3} - качество автоматизации регистрации первичных данных
			P _{3.2.4} - качество эксплуатации автоматизированной системы регистрации первичных данных
		P _{3.3} - качество автоматизации обработки результатов измерений	P _{3.3.1} - качество разработки автоматизированной системы обработки результатов измерений
			P _{3.3.2} - качество автоматизированной системы обработки результатов измерений
			P _{3.3.3} - качество автоматизации обработки результатов измерений
			P _{3.3.4} - качество эксплуатации автоматизированной системы обработки результатов измерений
	P ₄ - качество проведения испытаний	P _{4.1} - качество воспроизведения условий проведения эксперимента	.....
		P _{4.2} - качество используемого рабочего тела (чистота состава рабочего тела)	.....
			P _{4.3.1} - качество, получаемой измерительной информации

		$P_{4.3}$ - качество программы и методики испытаний (ПМИ)	$P_{4.3.2}$ - точность результатов измерений (правильность, прецизионность, повторяемость, воспроизводимость)
			$P_{4.3.3}$ - диапазон измерений
		$P_{4.4}$ - качество измерительной процедуры	$P_{4.4.1}$ - операционная сложность измеряемой процедуры
			$P_{4.4.2}$ - удобство считывания измерительной информации
			$P_{4.4.3}$ - удобство настройки средства измерений
		$P_{4.5}$ - стандартизованность методик измерений	$P_{4.5.1}$ - стандартизованность методики измерений
			$P_{4.5.2}$ - стандартизованность средства измерения
	P_5 - качество кадрового обеспечения	.....	.....
	P_6 - безопасность процесса испытаний	$P_{6.1}$ - безопасность объекта	.....
		$P_{6.2}$ - безопасность испытательного стенда	.....
		$P_{6.3}$ - безопасность средств измерения	.....
		$P_{6.4}$ - безопасность процесса испытаний (в части влияния на оператора и окружающую среду)	.....
	P_7 - экономичность процесса испытаний	$P_{7.1}$ - трудоемкость	$P_{7.1.1}$ - разработки модели объекта
			$P_{7.1.2}$ - изготовления объекта
			$P_{7.1.3}$ - разработки модели испытательного стенда
			$P_{7.1.4}$ - изготовления испытательного стенда
			$P_{7.1.5}$ - разработки ПМИ
			$P_{7.1.6}$ - разработки методики измерений
			$P_{7.1.7}$ - разработки автоматизированной системы управления процессом
			$P_{7.1.8}$ - разработки автоматизированной системы регистрации первичных данных
			$P_{7.1.9}$ - разработки автоматизированной системы обработки результатов измерений
		$P_{7.2}$ - время проведения исследовательских испытаний	.....
		$P_{7.3}$ - стоимость	$P_{7.3.1}$ - разработки модели объекта
			$P_{7.3.2}$ - изготовления объекта
			$P_{7.3.3}$ - разработки модели испытательного стенда
			$P_{7.3.4}$ - изготовления испытательного стенда
			$P_{7.3.5}$ - разработки ПМИ
			$P_{7.3.6}$ - разработки методики измерений
			$P_{7.3.7}$ - расходовемых в процессе испытаний материалов
			$P_{7.3.8}$ - разработки автоматизированной системы управления процессом
			$P_{7.3.9}$ - разработки автоматизированной системы регистрации первичных данных

			$P_{7.3.10}$ - разработки автоматизированной системы обработки результатов измерений
		$P_{7.4}$ - необходимая квалификация персонала	
	P_8 - экологичность процесса испытаний		

В результате обобщенный комплексный показатель может быть рассчитан по формуле:

$$P = P_1\alpha_1 + P_2\alpha_2 + P_3\alpha_3 + P_4\alpha_4 + P_5\alpha_5 + P_6\alpha_6 + P_7\alpha_7 + P_8\alpha_8.$$

В свою очередь $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8$ также определяются методом свертки с использованием измеряемых или оцениваемых экспертными методами комплексных или единичных показателей, но более низкого 2-го уровня и т.д. вплоть до требуемой глубины проводимых исследований.

Предлагаемая система показателей качества процесса исследовательских испытаний ЭРД послужила основой для разработки квалиметрической оценки качества данного процесса, что в свою очередь позволит на основе расчета обобщенного комплексного показателя принимать обоснованные решения по определению путей развития методологии и обеспечения качества исследовательских испытаний ЭРД [40].

Оценка качества процессов исследовательских испытаний ЭРД включает в себя множество аспектов, таких как точность измерений, воспроизводимость результатов, а также соответствие установленным стандартам и требованиям безопасности. Важность этих показателей трудно переоценить, так как они напрямую влияют на надежность и эффективность разрабатываемых систем. В условиях растущей конкуренции и стремительного развития технологий необходимо внедрение современных методов оценивания, которые позволят не только повысить качество исследовательских испытаний, но и сократить время их проведения.

В связи с этим возникает необходимость в разработке квалиметрической модели, которая позволит систематизировать подходы к оценке качества исследовательских испытаний ЭРД.

При разработке квалиметрической модели оценки качества процесса исследовательских испытаний ЭРД необходимо учитывать следующие отличительные особенности.

1. Для определения групповых комплексных (или комплексных) показателей был выбран метод средневзвешенных величин, позволяющий рассчитать

групповые комплексные (или комплексные) показатели путем усреднения оценок отдельных показателей с учетом их коэффициентов весомости.

При таком подходе обобщенный комплексный показатель определяется по формуле:

$$P = P_1\alpha_1 + P_2\alpha_2 + P_3\alpha_3 + P_4\alpha_4 + P_5\alpha_5 + P_6\alpha_6 + P_7\alpha_7 + P_8\alpha_8,$$

где P_1 - качество объекта, P_2 - качество испытательного стенда, P_3 - качество автоматизации процесса испытаний, P_4 - качество проведения испытаний, P_5 - качество кадрового обеспечения, P_6 - безопасность процесса испытаний, P_7 - экономичность процесса испытаний, P_8 - экологичность процесса испытаний; $\alpha_1 - \alpha_8$ - их весовые коэффициенты значимости; групповые комплексные показатели качества 1-го уровня – методом свёртки групповых комплексных показателей 2-го уровня, и т.д.

2. Была выбрана схема, при которой эксперты назначают коэффициенты весомости показателей качества и оценки единичных показателей (таблица 3.2), а групповые комплексные и комплексные показатели определяются расчетным путем.

3. В качестве обязательного элемента в методику был включен расчет коэффициента конкордации.

В таблице 3.2 приведена система показателей качества исследовательских испытаний ЭРД с назначенными экспертами весовыми коэффициентами значимости всех показателей. Согласованность мнений экспертов подтверждалась расчетом коэффициента конкордации.

Таблица 3.2 – Качество процесса исследовательских испытаний ЭРД.

Качество процесса исследовательских испытаний ЭРД								
Наименование комплексного показателя	Обозначение комплексного показателя, P_j	Значение комплексного весового коэффициента a_j	Наименование группового показателя	Обозначение группового показателя P_{jk}	Значение группового весового коэффициента a_{jk}	Наименование единичного показателя	Обозначение единичного показателя $P_{j k}$	Значение единичного весового коэффициента $a_{j k}$
Качество объекта	P_1	0.15	Качество разработки модели объекта	$P_{1.1}$	0.50	-	-	-
			Качество изготовления объекта	$P_{1.2}$	0.50	-	-	-
Качество испытательного стенда	P_2	0.15	Качество разработки модели испытательного стенда	$P_{2.1}$	0.33	-	-	-
			Качество изготовления испытательного стенда	$P_{2.2}$	0.33	-	-	-
			Качество эксплуатации испытательного стенда	$P_{2.3}$	0.34	Пуско-наладочные работы	$P_{2.3.1}$	0.20
						Текущее состояние стендовых систем	$P_{2.3.2}$	0.40
						Техническое обслуживание	$P_{2.3.3}$	0.40
Качество автоматизации процесса испытаний	P_3	0.1	Качество автоматизации управления процессом	$P_{3.1}$	0.33	Качество разработки автоматизированной системы управления процессом	$P_{3.1.1}$	0.30
						Качество автоматизированной системы управления процессом	$P_{3.1.2}$	0.30
						Качество автоматизации управления процессом	$P_{3.1.3}$	0.20
						Качество эксплуатации автоматизированной системы управления процессом	$P_{3.1.4}$	0.20

			Качество автоматизации регистрации первичных данных	$P_{3.2}$	0.33	Качество разработки автоматизированной системы регистрации первичных данных	$P_{3.2.1}$	0.30
						Качество автоматизированной системы регистрации первичных данных	$P_{3.2.2}$	0.30
						Качество автоматизации регистрации первичных данных	$P_{3.2.3}$	0.20
						Качество эксплуатации автоматизированной системы регистрации первичных данных	$P_{3.2.4}$	0.20
			Качество автоматизации обработки результатов измерений	$P_{3.3}$	0.34	Качество разработки автоматизированной системы обработки результатов измерений	$P_{3.3.1}$	0.30
						Качество автоматизированной системы обработки результатов измерений	$P_{3.3.2}$	0.30
						Качество автоматизации обработки результатов измерений	$P_{3.3.3}$	0.20
						Качество эксплуатации автоматизированной системы обработки результатов измерений	$P_{3.3.4}$	0.20
Качество проведения испытаний	P_4	0.15	Качество воспроизведения условий проведения эксперимента	$P_{4.1}$	0.35	-	-	-

			Качество используемого рабочего тела (чистота состава рабочего тела)	$P_{4.2}$	0.35	-	-	-
			Качество ПМИ	$P_{4.3}$	0.15	Качество получаемой измерительной информации	$P_{4.3.1}$	0.45
						Точность результатов измерений (правильность, прецизионность, повторяемость, воспроизводимость)	$P_{4.3.2}$	0.40
						Диапазон измерений	$P_{4.3.3}$	0.15
			Качество измерительной процедуры	$P_{4.4}$	0.10	Операционная сложность измеряемой процедуры	$P_{4.4.1}$	0.20
						Удобство считывания измерительной информации	$P_{4.4.2}$	0.40
						Удобство настройки средства измерений	$P_{4.4.3}$	0.40
			Стандартизованность МВИ	$P_{4.5}$	0.10	Стандартизованность методики измерений	$P_{4.5.1}$	0.4
						Стандартизованность средства измерения	$P_{4.5.2}$	0.6
Качество кадрового обеспечения	P_5	0.15	-	-	-	-	-	-
Безопасность процесса испытаний	P_6	0.15	Безопасность объекта	$P_{6.1}$	0.25	-	-	-
			Безопасность испытательного стенда	$P_{6.2}$	0.25	-	-	-
			Безопасность средств измерения	$P_{6.3}$	0.25	-	-	-
			Безопасность процесса испытаний (в части влияния на оператора и окружающую среду)	$P_{6.4}$	0.25	-	-	-

Экономичность процесса испытаний	P_7	0.05	Трудоемкость	$P_{7.1}$	0.3	Разработки модели объекта	$P_{7.1.1}$	0.1
						Изготовления объекта	$P_{7.1.2}$	0.1
						Разработки модели испытательного стенда	$P_{7.1.3}$	0.1
						Изготовления испытательного стенда	$P_{7.1.4}$	0.1
						Разработки ПМИ	$P_{7.1.5}$	0.15
						Разработки МВИ	$P_{7.1.6}$	0.15
						Разработки автоматизированной системы управления процессом	$P_{7.1.7}$	0.10
						Разработки автоматизированной системы регистрации первичных данных	$P_{7.1.8}$	0.10
						Разработки автоматизированной системы обработки результатов измерений	$P_{7.1.9}$	0.10
			Время проведения исследовательских испытаний	$P_{7.2}$	0.3	-	-	-
			Стоимость	$P_{7.3}$	0.1	Разработки модели объекта	$P_{7.3.1}$	0.10
						Изготовления объекта	$P_{7.3.2}$	0.10
						Разработки модели испытательного стенда	$P_{7.3.3}$	0.10
						Изготовления испытательного стенда	$P_{7.3.4}$	0.10
						Разработки ПМИ	$P_{7.3.5}$	0.10
						Разработки МВИ	$P_{7.3.6}$	0.10

						Расходуемых в процессе испытаний материалов	$P_{7.3.7}$	0.10
						Разработки автоматизированной системы управления процессом	$P_{7.3.8}$	0.10
						Разработки автоматизированной системы регистрации первичных данных	$P_{7.3.9}$	0.10
						Разработки автоматизированной системы обработки результатов измерений	$P_{7.3.10}$	0.10
			Необходимая квалификация персонала	$P_{7.4}$	0.3	-	-	-
Экологичность процесса испытаний	P_8	0.1	-	-	-	-	-	-

Для оценивания показателей качества процесса исследовательских испытаний ЭРД, разработаны шкалы оценки показателей качества (Приложение А).

Шкалы оценки включают различные уровни, отражающие степень соответствия показателей установленным требованиям. Каждый уровень сопровождается количественными или качественными характеристиками, что позволяет точно определить состояние процесса исследовательских испытаний. Применение таких шкал способствует выявлению слабых мест, оптимизации методов и повышению общей эффективности исследований ЭРД

Внедрение шкал оценки качества помогает формировать объективные отчёты и принимать обоснованные управленческие решения. Это особенно важно при работе с ЭРД, где точность и надёжность результатов критичны для дальнейших этапов разработки и производства. Таким образом, разработанные шкалы становятся неотъемлемым инструментом контроля и улучшения качества испытаний ЭРД.

Оценку уровня качества процесса исследовательских испытаний ЭРД предполагается проводить в соответствии с рассчитанным значением показателя P по таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Шкала диагностирования уровня качества процесса исследовательских испытаний ЭРД.

Оценка	Качество процесса исследовательских испытаний ЭРД
$P \geq 0,8$	очень высокое
$0,6 \leq P < 0,8$	высокое
$0,4 \leq P < 0,6$	среднее
$0,2 \leq P < 0,4$	низкое
$0 \leq P < 0,2$	очень низкое

Этот показатель отражает совокупное состояние всех ключевых параметров процесса исследовательских испытаний ЭРД и рассчитывается на основе экспертных оценок по ряду комплексных критериев. Методика определения P включает агрегирование значений по выбранной диагностической шкале, что обеспечивает объективную и сопоставимую оценку уровня качества.

Диагностическая шкала, применяемая для интерпретации значения показателя P , разработана таким образом, чтобы отразить различные градации качества: от низкого и требующего немедленных улучшений до высокого, соответствующего установленным стандартам. В зависимости от того, в какой диапазон попадает рассчитанное значение P , можно делать выводы о текущем состоянии процесса исследовательских испытаний, его устойчивости, эффективности и соответствии нормативным требованиям. Это позволяет системно подходить к оценке, избегая субъективных трактовок.

Применение показателя P в сочетании с диагностической шкалой открывает возможности для мониторинга динамики изменений качества испытаний во времени. Повторная оценка, проводимая после реализации мероприятий по улучшению, позволит определить, насколько эффективно были устранены выявленные ранее недостатки. Таким образом, методика становится не только средством текущей диагностики, но и инструментом планирования и

оценки результативности совершенствования процессов в области исследовательских испытаний ЭРД.

3.3. Роль информационных технологий в системе управления качеством исследовательских испытаний электроракетных двигателей

Информационные технологии (ИТ) играют ключевую роль в системе управления качеством исследовательских испытаний ЭРД, обеспечивая высокий уровень автоматизации, точности и оперативности процессов. В условиях постоянно возрастающих требований к надежности и эффективности КТ, применение современных ИТ-решений становится необходимым условием для обеспечения достоверности и воспроизводимости данных испытаний [92].

Информационные системы позволяют централизованно управлять всеми этапами испытаний – от подготовки оборудования до анализа и хранения результатов.

Одним из важнейших направлений использования информационных технологий является автоматизация сбора и обработки экспериментальных данных. Современные программные средства обеспечивают непрерывный мониторинг параметров работы ЭРД с высокой точностью и скоростью, позволяя фиксировать даже кратковременные отклонения. Это значительно снижает риск ошибок, связанных с человеческим фактором, и обеспечивает объективность результатов. Кроме того, возможность мгновенного отображения данных в виде графиков и таблиц упрощает первичный анализ и принятие оперативных решений.

Информационные технологии также способствуют стандартизации процедуры испытаний. Внедрение специализированных программных комплексов позволяет формализовать последовательность действий персонала, регламентировать методы оценки параметров и автоматически формировать отчеты в соответствии с установленными шаблонами. Это не только ускоряет процесс документации, но и повышает прозрачность и прослеживаемость всех

этапов испытаний, что важно при проведении внешнего аудита или сертификации.

Особое значение IT-технологии имеют в области анализа и управления качеством. Системы обработки больших данных и элементы искусственного интеллекта дают возможность выявлять скрытые закономерности в поведении двигателя при различных режимах работы, прогнозировать возникновение сбоев и формировать рекомендации по оптимизации процессов испытаний. Такая аналитика становится основой для принятия обоснованных решений по корректировке методик и повышению надежности ЭРД.

Наконец, информационные технологии обеспечивают эффективное взаимодействие между всеми участниками процесса испытаний. Использование единой цифровой среды позволяет инженерам, исследователям и управленческому персоналу получать доступ к актуальной информации в режиме реального времени, отслеживать прогресс работ, вносить корректировки и оперативно реагировать на выявленные отклонения. Таким образом, ИТ становятся неотъемлемой частью современного управления качеством в сфере исследовательских испытаний электроракетных двигателей, способствуя повышению их научной и технической обоснованности.

При проведении анализа оценки влияния степени использования ИТ на обобщённый показатель качества процессов исследовательских испытаний ЭРД, была составлена аналитическая матрица, отражающая взаимосвязь между уровнями автоматизации отдельных параметров системы и итоговыми значениями качества. Основной целью данного подхода стало выявление зависимости между уровнем внедрения ИТ и результативностью исследовательских процедур. Для систематизации результатов и получения объективной картины применялись методы планирования эксперимента, включая факторный анализ и метод факторного плана с тремя уровнями [68] (таблица 3.4):

$$P = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 + \beta_{123} X_1 X_2 X_3,$$

Переменные X_i принимают значения «-1», «0», «+1» - низкий, средний и высокий уровни автоматизации соответственно, где X_1 - автоматизация управления процессом (АУП); X_2 - автоматизация регистрации первичных данных (АРПД); X_3 - автоматизированная обработка результатов измерений (АОРИ).

Таблица 3.4 – Матрица планирования эксперимента.

№	X_1	X_2	X_3	Вклад в R_{Σ} , %	Описание состояния системы
1.	-1	-1	-1	0	АУП, АРПД, АОРИ не автоматизированы
2.	-1	-1	0	0,50	АУП - средний уровень; АОРИ и АРПД отсутствуют
3.	-1	-1	+1	1,25	АУП - полная автоматизация; АОРИ и АРПД отсутствуют
4.	-1	0	-1	1,50	АРПД - средний уровень; АОРИ и АУП отсутствуют
5.	-1	0	0	2,00	АРПД и АУП - средний уровень; АОРИ отсутствует
6.	-1	0	+1	2,75	АРПД - средний; АУП - полный; АОРИ отсутствует
7.	-1	+1	-1	2,25	АРПД - полное; АОРИ и АУП отсутствуют
8.	-1	+1	0	3,00	АРПД - полное; АУП - средний; АОРИ отсутствует
9.	-1	+1	+1	4,00	АРПД и АУП - полные; АОРИ отсутствует
10.	0	-1	-1	2,50	АОРИ - средний; АРПД и АУП отсутствуют
11.	0	-1	0	3,00	АОРИ - средний; АУП - средний; АРПД отсутствует
12.	0	-1	+1	3,75	АОРИ - средний; АУП - полный; АРПД отсутствует
13.	0	0	-1	4,00	АОРИ и АРПД - средние; АУП отсутствует
14.	0	0	0	4,50	АУП, АРПД, АОРИ на среднем уровне
15.	0	0	+1	5,25	АОРИ и АРПД - средние; АУП - полная автоматизация
16.	0	+1	-1	5,25	АОРИ - средний; АРПД - полное; АУП отсутствует
17.	0	+1	0	6,00	АОРИ - средний; АРПД - полное; АУП - средний
18.	0	+1	+1	7,00	АОРИ - средний; АРПД и АУП - полные
19.	+1	-1	-1	4,75	АОРИ - полный; АРПД и АУП отсутствуют
20.	+1	-1	0	5,50	АОРИ - полный; АУП - средний; АРПД отсутствует
21.	+1	-1	+1	6,50	АОРИ и АУП - полные; АРПД отсутствует

22.	+1	0	-1	6,00	АОРИ - полный; АРПД - средний; АУП отсутствует
23.	+1	0	0	6,75	АОРИ - полный; АРПД и АУП - средние
24.	+1	0	+1	7,75	АОРИ и АУП - полные; АРПД - среднее
25.	+1	+1	-1	7,75	АОРИ и АРПД - полные; АУП отсутствует
26.	+1	+1	0	8,50	АОРИ и АРПД - полные; АУП - средний
27.	+1	+1	+1	10	АУП, АРПД, АОРИ на высоком уровне (полная автоматизация)

Матрица включила в себя ряд переменных, отражающих конкретные аспекты использования ИТ: автоматизация управления процессом исследовательских испытаний ЭРД; автоматизация регистрации первичных данных исследовательских испытаний ЭРД; автоматизированная обработка результатов измерений исследовательских испытаний ЭРД. Каждому из этих параметров был присвоен уровень автоматизации – от ручного до полностью автоматического. Далее, с помощью статистических методов определялось влияние каждого из параметров на итоговый обобщённый показатель качества процесса испытаний.

Результаты анализа показали, что наибольшее влияние на повышение качества оказывает, как минимум средний уровень автоматизации управления процессом исследовательских испытаний ЭРД и автоматизированная обработка результатов измерений, когда регистрация первичных данных должна находиться на высоком уровне автоматизации. Это позволило сформулировать рекомендации по рациональному распределению ресурсов: в первую очередь автоматизировать те процессы, которые в наибольшей степени влияют на точность и воспроизводимость результатов.

Установлено, что совокупный вклад ИТ в обобщённый показатель качества составляет около 10%, что указывает на весомую роль информационных технологий в обеспечении эффективности процесса испытаний. Это подтверждает необходимость системного подхода к внедрению ИТ-решений в сферу исследовательских испытаний ЭРД.

Таким образом, применение методов планирования эксперимента в сочетании с матричным анализом позволило не только количественно оценить вклад ИТ в качество исследовательских испытаний ЭРД, но и определить приоритетные направления для дальнейшего цифрового развития. Полученные результаты могут быть использованы для стратегического планирования модернизации испытательной инфраструктуры и обоснования инвестиций в ИТ-решения в данной области.

3.4. Разработка программы для автоматизированного анализа и оценки уровня качества процесса испытаний электроракетных двигателей

Процесс исследовательских испытаний ЭРД сопряжён с высокой сложностью, большим объёмом данных и необходимостью строгого контроля параметров. Традиционные методы анализа и оценки качества испытаний часто требуют значительных временных и трудовых затрат, а также подвержены влиянию человеческого фактора.

В связи с этим на языке программирования Python разработано программное обеспечение для автоматизированного анализа и оценки уровня качества процесса исследовательских испытаний ЭРД, способное оперативно обрабатывать данные о состоянии процесса испытаний и выявлять отклонения (рисунок 3.2) [26, 28].

Программа позволяет сократить время анализа и минимизировать риски ошибок, что в конечном итоге приведёт к увеличению надёжности и эффективности процессов испытаний [38, 64].

Важным источником входных данных для автоматизированной системы анализа и оценки качества являются экспертные анкеты (таблица 3.5), содержащие балльные оценки по ключевым показателям. Такие анкеты формируются специалистами в области испытаний ЭРД, что особенно ценно при анализе сложных или неоднозначных ситуаций, когда автоматизированные алгоритмы требуют дополнительной верификации.

```

=====
# Чтение данных со второго столбца включительно - для отображения
df_with_names = pd.read_excel(file_path, header=None, skiprows=2)
self.file_path = file_path

# Чтение данных с третьего столбца и далее
df_with_names = df_with_names.iloc[:, 1:]

# Расчет количества считанных столбцов
self.num_columns = df_with_names.shape[1]

# Проверка данных на числовой тип и преобразование, с пропуском
# столбца с наименованиями
for col in df_with_names.columns[1:]:
    if not pd.api.types.is_numeric_dtype(df_with_names[col]):
        try:
            df_with_names[col] = pd.to_numeric(df_with_names[col],
errors='coerce')
        except Exception:
            messagebox.showwarning("Некорректные данные", f"В столбце
'{col}' есть некорректные значения.")

    if df_with_names.isnull().values.any():
        messagebox.showwarning("Некорректные данные",
            "Обнаружены некорректные значения (пустые ячейки). Они будут
заменены на NaN.")

    self.data_with_names = df_with_names

=====
# Чтение только значений оценок экспериментов
df = pd.read_excel(file_path, header=None, skiprows=2)
self.file_path = file_path

# Чтение данных с третьего столбца и далее
df = df.iloc[:, 2:]

# Расчет количества считанных столбцов
self.num_columns = df.shape[1]

# Проверка данных на числовой тип и преобразование

```

Рисунок 3.2 – Фрагмент кода программного обеспечения для автоматизированного анализа и оценки уровня качества процесса испытаний электроракетных двигателей.

Таблица 3.5 – Форма анкеты по оценке качества процесса исследовательских испытаний ЭРД.

Обозначение и наименование комплексных показателей качества	Обозначение и наименование показателей качества нижнего уровня, оцениваемых экспертами	Эксп. 1	Эксп. 2	Эксп. 3	Эксп. 4	Эксп. 5
		Оценка в баллах				

P1 - Качество объекта	P1.1 - Качество разработки модели объекта					
	P1.2 - Качество изготовления объекта					
P2 - Качество испытательного стенда	P2.1 - Качество разработки модели испытательного стенда					
	P2.2 - Качество изготовления испытательного стенда					
	P2.3 - Качество эксплуатации испытательного стенда					
	P2.3.1 - Пуско-наладочные работы					
	P2.3.2 - Текущее состояние стендовых систем					
	P2.3.3 - Техническое обслуживание					
P3 - Качество автоматизации процесса испытаний	P3.1 - Качество автоматизации управления процессом					
	P3.1.1 - Качество разработки автоматизированной системы управления процессом					
	P3.1.2 - Качество автоматизированной системы управления процессом					
	P3.1.3 - Качество автоматизации управления процессом					
	P3.1.4 - Качество эксплуатации автоматизированной системы управления процессом					
	P3.2 - Качество автоматизации регистрации первичных данных					
	P3.2.1 - Качество разработки автоматизированной системы регистрации первичных данных					
	P3.2.2 - Качество автоматизированной системы регистрации первичных данных					
	P3.2.3 - Качество автоматизации регистрации первичных данных					
	P3.2.4 - Качество эксплуатации автоматизированной системы регистрации первичных данных					
	P3.3 - Качество автоматизации обработки результатов измерений					
	P3.3.1 - Качество разработки автоматизированной системы обработки результатов измерений					
	P3.3.2 - Качество автоматизированной системы обработки результатов измерений					
	P3.3.3 - Качество автоматизации обработки результатов измерений					

	Р3.3.4 - Качество эксплуатации автоматизированной системы обработки результатов измерений					
Р4 - Качество проведения испытаний	Р4.1 - Качество воспроизведения условий проведения эксперимента					
	Р4.2 - Качество используемого рабочего тела (чистота состава рабочего тела)					
	Р4.3 - Качество ПМИ					
	Р4.3.1 - Качество получаемой измерительной информации					
	Р4.3.2 - Точность результатов измерений (правильность, прецизионность, повторяемость, воспроизводимость)					
	Р4.3.3 - Диапазон измерений					
	Р4.4 - Качество измерительной процедуры					
	Р4.4.1 - Операционная сложность измеряемой процедуры					
	Р4.4.2 - Удобство считывания измерительной информации					
	Р4.4.3 - Удобство настройки средства измерений					
	Р4.5 - Стандартизованность МВИ					
	Р4.5.1 - Стандартизованность методики измерений					
	Р4.5.2 - Стандартизованность средства измерения					
Р5 - Качество кадрового обеспечения	-					
Р6 - Безопасность процесса испытаний	Р6.1 - Безопасность объекта					
	Р6.2 - Безопасность испытательного стенда					
	Р6.3 - Безопасность средств измерения					
	Р6.4 - Безопасность процесса испытаний (в части влияния на оператора и окружающую среду)					
Р7 - Экономичность процесса испытаний	Р7.1 - Трудоемкость					
	Р7.1.1 - Разработки модели объекта					
	Р7.1.2 - Изготовления объекта					
	Р7.1.3 - Разработки модели испытательного стенда					
	Р7.1.4 - Изготовления испытательного стенда					
	Р7.1.5 - Разработки ПМИ					
	Р7.1.6 - Разработки МВИ					

	P7.1.7 - Разработки автоматизированной системы управления процессом					
	P7.1.8 - Разработки автоматизированной системы регистрации первичных данных					
	P7.1.9 - Разработки автоматизированной системы обработки результатов измерений					
	P7.2 - Время проведения исследовательских испытаний					
	P7.3 - Стоимость					
	P7.3.1 - Разработки модели объекта					
	P7.3.2 - Изготовления объекта					
	P7.3.3 - Разработки модели испытательного стенда					
	P7.3.4 - Изготовления испытательного стенда					
	P7.3.5 - Разработки ПМИ					
	P7.3.6 - Разработки МВИ					
	P7.3.7 - Расходуемых в процессе испытаний материалов					
	P7.3.8 - Разработки автоматизированной системы управления процессом					
	P7.3.9 - Разработки автоматизированной системы регистрации первичных данных					
	P7.3.10 - Разработки автоматизированной системы обработки результатов измерений					
	P7.4 - Необходимая квалификация персонала					
P8 - Экологичность процесса испытаний	-					

Разработанная автоматизированная система осуществляет комплексный анализ экспертных анкет, преобразуя качественные оценки в количественные показатели уровня качества процесса исследовательских испытаний ЭРД.

Для повышения модульности и читаемости программного кода реализовано разделение функционала визуализации на независимые компоненты. Специализированные функции, ответственные за генерацию радарных диаграмм, ограничивают логику построения графиков и принимают параметризованные

входные данные, обеспечивая унифицированный интерфейс для отрисовки. Аналогичным образом организованы модули формирования и отображения результатов анализа в табличном представлении, что абстрагирует процесс визуализации данных от вычислительной логики.

Для более наглядного отображения ситуации по диагностированному уровню качества процесса исследовательских испытаний ЭРД и выявления возможных направлений для внедрения улучшений автоматизированной системой строится радарная диаграмма (рисунок 3.3). Этот визуальный инструмент позволяет в одном графике отразить сразу несколько комплексных показателей качества, упрощая восприятие и анализ полученных данных. Каждая ось диаграммы соответствует отдельному показателю, например, качеству – объекта, проведения испытаний, экономичности и другим параметрам, влияющим на общее качество процесса испытаний.

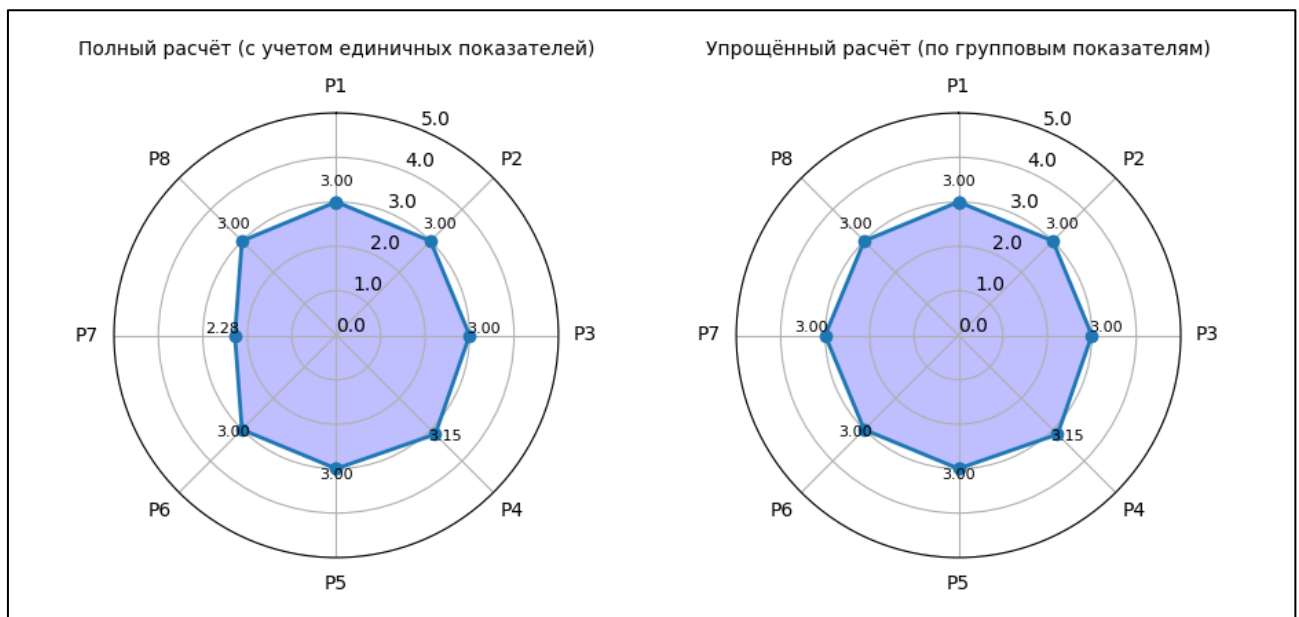


Рисунок 3.3 – Форма представления результатов распределения оценочных показателей качества процесса исследовательских испытаний ЭРД в программном обеспечении.

На радарной диаграмме может быть представлено сравнение фактических значений, полученных в ходе экспертного анкетирования, с эталонными значениями, отражающими оптимальный или нормативный уровень качества.

Такое сопоставление позволяет быстро определить, в каких областях достигается высокий уровень соответствия требованиям, а где наблюдаются отклонения, требующие внимания. Визуальный дисбаланс между контурами фактических и эталонных оценок чётко указывает на проблемные зоны и потенциальные точки роста.

Использование радарной диаграммы облегчает принятие управленческих решений и выработку стратегий по улучшению качества исследовательских испытаний ЭРД. Она может служить основой для построения плана корректирующих действий, позволяя целенаправленно внедрять улучшения в те аспекты, где фактические показатели существенно уступают эталонным. Таким образом, диаграмма становится не просто средством визуализации, а эффективным инструментом диагностики и управления качеством.

3.5 Выводы по главе 3

1. В результате формализации функции качества процессов исследовательских испытаний ЭРД создана иерархическая система из 48 показателей, структурированных по 8 комплексным показателям, обеспечивающих всестороннюю оценку качества: P_1 «Качество объекта», P_2 «Качество испытательного стенда», P_3 «Качество автоматизации процесса исследовательских испытаний», P_4 «Качество проведения процесса испытаний», P_5 «Качество кадрового обеспечения», P_6 «Безопасность испытаний», P_7 «Экономичность», P_8 «Экологичность процесса исследовательских испытаний».

2. Разработана квалиметрическая модель оценки качества процессов исследовательских испытаний ЭРД, включающая в себя развернутую номенклатуру показателей оценки качества процессов исследовательских испытаний ЭРД с системой весовых коэффициентов всех элементов и предложенными шкалами их оценки.

3. Реализована автоматизация квалиметрической оценки качества испытательных процессов ЭРД посредством разработки специализированного

программного комплекса «Анализ и оценка качества процесса исследовательских испытаний ЭРД».

4. Интеграция методов планирования эксперимента с матричным анализом позволила не только количественно оценить вклад информационных технологий в обобщенный показатель качества процесса исследовательских испытаний ЭРД, но и определить приоритетные направления для дальнейшего цифрового развития.

ГЛАВА 4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

4.1. Оценка качества процесса исследовательских испытаний электроракетных двигателей (текущее состояние)

4.1.1 Описание объекта исследования, экспериментального оборудования, методики измерений

Разработанная квалиметрическая модель оценки качества процесса исследовательских испытаний ЭРД была апробирована в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) на стенде «2ИУ-4В» в ходе проведения исследовательских испытаний высокочастотного ионного двигателя (ВЧИД) малой мощности (ММ).

В рамках государственных программ Российской Федерации в МАИ проводилась разработка ВЧИД ММ для электроракетной двигательной установки (ЭРДУ) малого космического аппарата (МКА), позволяющего обеспечить повышенные сроки его активного существования, ограниченные только ресурсом других бортовых систем спутника [85, 94]. Для достижения заявленных требований заказчика при разработке опытного образца ВЧИД ММ, учеными МАИ был создан ряд лабораторных образцов двигателя для проведения комплексного исследования ВЧИД ММ [4, 7, 17, 24, 52, 53, 55, 56, 65, 69, 70, 89, 97].

В качестве объекта испытаний был выбран лабораторный образец ВЧИД ММ, работающий на газообразном рабочем теле (рисунок 4.1) [52].

Лабораторный образец ВЧИД ММ предназначен для проведения исследовательских испытаний – испытаний, проводимых с целью определения основных интегральных параметров двигателя. Исследовательские испытания проводятся согласно документу ПМИ 208-207-25 «Программа и методика

проведения исследовательских испытаний высокочастотного ионного двигателя с повышенной экономичностью» (Приложение Б) [82].

Целью исследовательских испытаний лабораторного образца ВЧИД ММ является определение его основных интегральных параметров.

Задача исследовательских испытаний лабораторного образца ВЧИД ММ состоит в проведении комплекса испытаний по оценке возможностей использования метода управления подводимой мощностью и расходом рабочего тела для оптимизации рабочих режимов с повышенной экономичностью.

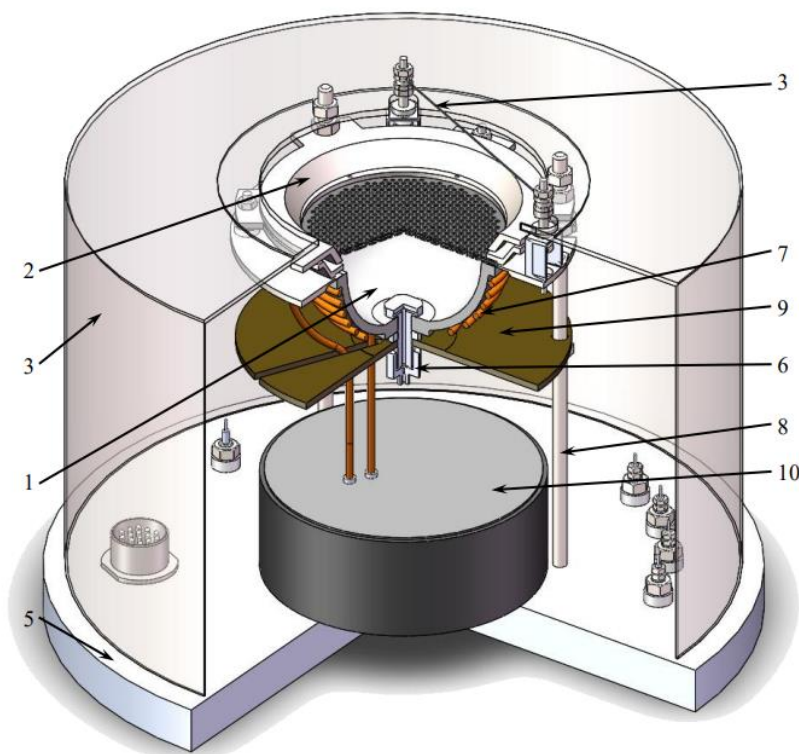


Рисунок 4.1 – Трехмерная визуализация конструкции лабораторной модели ВЧИД ММ:

- Поз. 1 – разрядная камера; Поз. 2 – ионно-оптическая система;
 Поз. 3 – кожух; Поз. 4 – нить накала; Поз. 5 – монтажный фланец;
 Поз. 6 – узел газораспределителя; Поз. 7 – полусферический индуктор;
 Поз. 8 – шпилька; Поз. 9 – стеклотекстолитовый диск; Поз. 10 – ВЧГ.

Все исследовательские испытания лабораторной модели ВЧИД ММ, описанные в диссертации, производились на установке «2ИУ-4В» МАИ. На рисунках 4.2-4.3 приведены фотографии установки и лабораторной модели

ВЧИД ММ в ходе проведения исследовательских испытаний на данной установке. Установка «2ИУ-4В» состоит из: вакуумной камеры, системы вакуумных магистралей и насосов, системы электропитания и измерения интегральных параметров лабораторной модели ВЧИД ММ, системы регулировки расхода рабочего тела (РТ).

Исследовательские испытания ВЧИД включают в себя 2 этапа: первый - подготовка и испытания ЭРД, а именно, внешний осмотр ВЧИД, проверка качества сборки, проверка электрического сопротивления изоляции и сопротивления электрических цепей; второй – испытания по определению интегральных параметров ВЧИД ММ [83]. Для ВЧИД ММ интегральными характеристиками являются параметры, представленные в таблице 4.1.



Рисунок 4.2 – Фотография установки «2ИУ-4В».

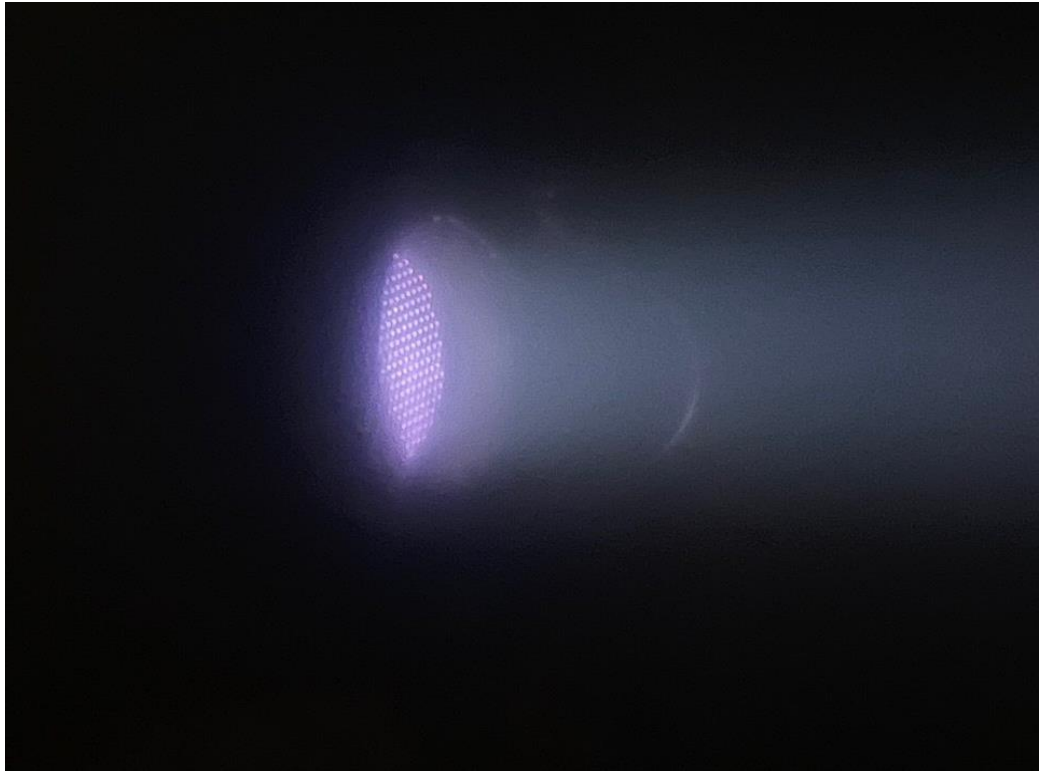


Рисунок 4.3 – Фотография лабораторной модели ВЧИД ММ
в ходе исследовательских испытаний.

Таблица 4.1 – Интегральные параметры ВЧИД ММ.

Наименование параметра	Обозначение	Единицы измерения	Измеренное значение
Потребляемая мощность	N	Вт	$N = N_{\Pi} + N_{\text{ВЧГ}} + N_{\text{КН}}$, где $N_{\Pi} = I_{\Pi} \cdot U_{\text{ЭЭ}}$ – мощность пучка; $N_{\text{ВЧГ}} = I_{\Pi} \cdot C_i$ – мощность, затраченная на ионизацию (C_i – цена иона (Вт/А)); $N_{\text{КН}}$ – мощность, затрачиваемая на нагрев нити накала катода нейтрализатора
Энергетическая цена иона	C_i	Вт/А	$C_i = \frac{N_{\text{ВЧГ}}}{I_{\Pi}}$
Коэффициент использования рабочего тела	η_m	-	$\eta_m = \frac{I_{\Pi}}{(e/M_i) \cdot \dot{m}_{\Sigma}}$, где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ [Кл] – заряд электрона; $M_i = 2,18 \cdot 10^{-25}$ [кг] – масса иона ксенона; $M_i = 1,4 \cdot 10^{-25}$ [кг] – масса иона криптона;

			$\dot{m}_{\Sigma} = \dot{m}_{\Pi} + \dot{m}_{\text{Н}}$ [кг] – полный расход рабочего тела; $\dot{m}_{\Pi}$ – расход рабочего тела через газоразрядную камеру (РК); $\dot{m}_{\text{Н}}$ – расход рабочего тела через катод-нейтрализатор (КН), если он присутствует
Энергетический коэффициент полезного действия (КПД)	$\eta_{\text{Э}}$	-	$\eta_{\text{Э}} = \frac{U_{\text{ЭЭ}}}{U_{\text{ЭЭ}} + C_i}$
Удельный импульс тяги	$I_{\text{уд}}$	м/с	$I_{\text{уд}} = \eta_m \cdot \eta_{\alpha} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot q_i}{M_i}} \cdot U_{\text{ЭЭ}},$ где q_i – величина заряда иона рабочего тела, равная 1, 01 заряда электрона e, (по оценкам доля многозарядных ионов в пучке не более $\sim 1\%$); $\eta_{\alpha} = \frac{1 + \cos \alpha}{2}$ – КПД по расходимости пучка ионов (α [°] – угол расходимости ионного пучка)
Тяговый КПД	$\eta_{\text{Т}}$	-	$\eta_{\text{Т}} = \eta_m \cdot \eta_{\alpha} \cdot \eta_{\text{Э}}$
Мощность, потребляемая двигателем	N	Вт	$N = \frac{N_{\Pi}}{\eta_{\text{Э}}}$
Тяга ВЧИД	T	мН	$T(\alpha, I_{\Pi}, U_{\text{ЭЭ}}) = I_{\Pi} \frac{1 + \cos \alpha}{2} \sqrt{\frac{2 \cdot U_{\text{ЭЭ}} \cdot M_i}{q_i}}$

4.1.2. Диагностирование текущего уровня качества процесса исследовательских испытаний ЭРД

Для диагностирования уровня качества процесса исследовательских испытаний ВЧИД ММ было проведено анкетирование специалистов МАИ в области исследовательских испытаний ЭРД по представленным шкалам оценки качества процесса в главе 3 данной диссертации. На основании индивидуальных экспертных мнений были рассчитаны значения единичных показателей, отражающих коллективное восприятие качества процессов исследовательских испытаний ВЧИД ММ. Такой подход позволил устранить влияние субъективных факторов и обеспечить более объективную картину оценки.

Итогом анализа стала автоматизированная интеграция оценок в комплексные показатели качества, учитывающие сразу несколько критериев – от модели объекта до стоимости и экологичности процесса исследовательских испытаний (рисунок 4.4).

Расчёт обобщённого показателя качества процесса ИИ ЭРД					Расчёт групповых комплексных показателей качества процесса ИИ ЭРД				
					Загрузить Excel		Выгрузить результаты в Excel		
Таблица исходных данных excel файла									
Обозначение и наименование показателей качества »		Эксп. 1	Эксп. 2	Эксп. 3	Эксп. 4				
P1.1 - Качество разработки модели объекта		3	3	3	3				
P1.2 - Качество изготовления объекта		3	3	3	3				
P2.1 - Качество разработки модели испытательного с		3	3	3	3				
P2.2 - Качество изготовления испытательного стенда		3	3	3	3				
P2.3 - Качество эксплуатации испытательного стенда		3	3	3	3				
«									
Полный расчёт (с учетом единичных показателей)									
Качество		Значение							
P1 - Качество объекта		3.00							
P2 - Качество испытательного стенда		3.00							
P3 - Качество автоматизации процесса испытаний		0.00							
P4 - Качество проведения испытаний		2.24							
P5 - Качество кадрового обеспечения		2.40							
P6 - Безопасность процесса испытаний		3.20							
P7 - Экономичность процесса испытаний		2.28							
P8 - Экологичность процесса испытаний		3.00							
Упрощённый расчёт (по групповым показателям)									
Качество		Значение							
P1 - Качество объекта		3.00							
P2 - Качество испытательного стенда		3.00							
P3 - Качество автоматизации процесса испытаний		0.00							
P4 - Качество проведения испытаний		2.24							
P5 - Качество кадрового обеспечения		2.40							
P6 - Безопасность процесса испытаний		3.20							
P7 - Экономичность процесса испытаний		2.28							
P8 - Экологичность процесса испытаний		3.00							

Рисунок 4.4 – Фрагмент расчета показателей качества процесса исследовательских испытаний ВЧИД ММ.

Групповые комплексные показатели представляют собой обобщённую характеристику, необходимую для последующей оптимизации процедур испытаний ВЧИД ММ, выявления слабых мест и выработки рекомендаций по повышению эффективности всей системы исследовательских испытаний (рисунок 4.5).

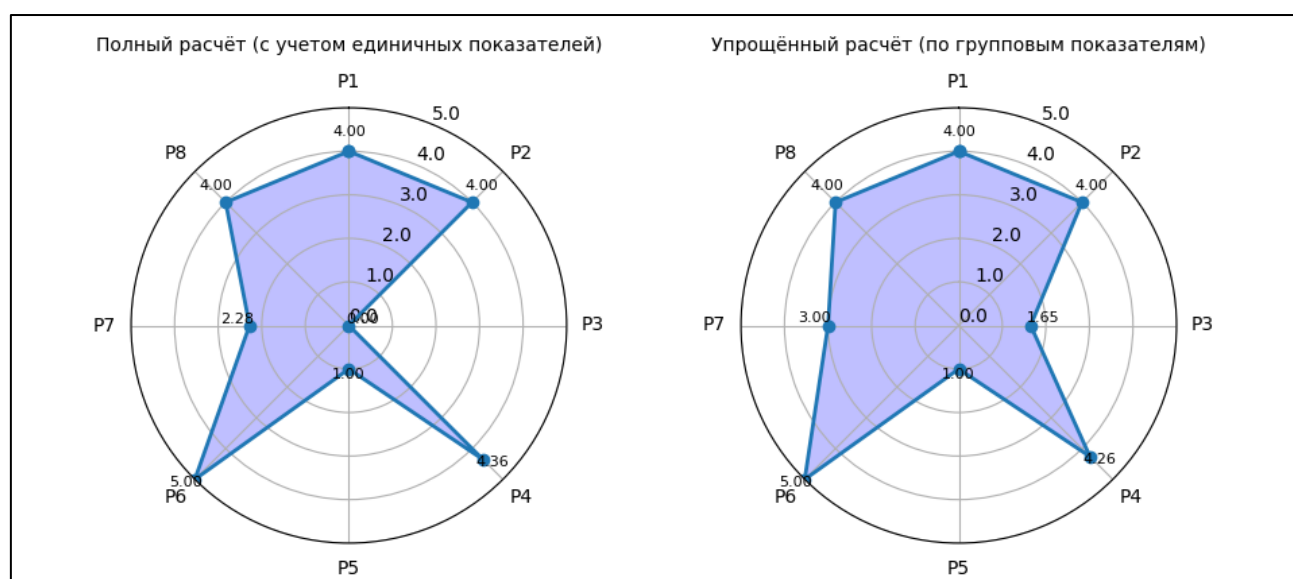


Рисунок 4.5 – Распределение оценочных показателей качества

процесса исследовательских испытаний ВЧИД ММ

$$(P_{\Sigma} = 0,55)$$

Для идентификации ситуации по диагностированному уровню качества процесса исследовательских испытаний ВЧИД ММ использовалась разработанная в главе 3 шкала диагностирования. Анализ показал, что рассчитанный уровень качества процесса исследовательских испытаний $P = 0,55$ относится к среднему уровню и характеризует ситуацию как удовлетворительную, но требующую улучшений. Средний уровень качества означает, что часть испытаний проходит успешно, но в то же время наблюдаются отклонения, которые могут влиять на достоверность и воспроизводимость результатов.

Анализ выявил, что самыми уязвимыми местами процесса исследовательских испытаний оказались: качество автоматизации, кадровое обеспечение и экономичность процесса.

Экономичность процесса – ключевая проблема. Высокие затраты на оборудование, материалы и энергоресурсы делают испытания финансово обременительными, что ограничивает масштабы исследований. Неоптимальное использование ресурсов, включая их перерасход или простои оборудования, усугубляет ситуацию. Внедрение методов бережливого производства и энергосберегающих технологий могло бы снизить себестоимость испытаний без ущерба для их качества.

Низкий уровень автоматизации приводит к повышенной доле ручного труда, что увеличивает риск человеческих ошибок и снижает воспроизводимость результатов. Отсутствие современных программных решений для обработки данных и управления оборудованием замедляет процесс испытаний и снижает их точность. Это существенно влияет на общий показатель качества, указывая на необходимость внедрения цифровых технологий.

Кадровое обеспечение также оказалось слабым звеном. Нехватка квалифицированных специалистов, недостаточный уровень подготовки

сотрудников и высокая текучесть кадров негативно сказываются на стабильности процесса. Кроме того, отсутствие системы непрерывного обучения и мотивации персонала приводит к тому, что даже имеющиеся ресурсы используются неэффективно. Улучшение кадровой политики, включая переподготовку и привлечение экспертов, могло бы значительно повысить качество испытаний.

Связь между этими тремя факторами очевидна: недостаточная автоматизация увеличивает нагрузку на персонал, что влечет за собой рост затрат и снижение экономичности. Для комплексного решения проблемы требуется системный подход, включающий инвестиции в цифровизацию, оптимизацию штата и пересмотр финансовой модели процесса. Например, внедрение автоматизированных систем управления, сбора и обработки данных сократит зависимость от человеческого фактора и уменьшит операционные расходы.

Таким образом, улучшение качества исследовательских испытаний ВЧИД ММ невозможно без устранения ключевых уязвимостей. Приоритетным направлением должна стать автоматизация всех систем, а именно, автоматизация управления процессом, сбора и регистрации первичных данных, а также обработка результатов измерений, полученных в ходе процесса исследовательских испытаний ВЧИД ММ. Только комплексный подход позволит вывести процесс на уровень $P > 0,6$, что будет соответствовать высокой степени надежности и эффективности.

4.2. Разработка и внедрение мероприятий по улучшению качества процесса исследовательских испытаний электроракетных двигателей

Для повышения показателя качества процесса исследовательских испытаний ВЧИД ММ были разработаны и внедрены специализированные информационные инструменты, направленные на совершенствование автоматизации процесса испытаний. Первым ключевым шагом стало создание интегрированной системы управления процессом и регистрации первичных данных, что позволило существенно снизить влияние человеческого фактора и минимизировать ошибки ввода. Система обеспечивает

централизованный сбор информации с измерительных приборов в режиме реального времени, исключив необходимость ручной фиксации данных. Это не только повышает точность результатов испытаний, но и ускоряет процесс их проведения.

4.2.1 Разработка автоматизированной системы управления процессом и регистрации первичных данных

Разработанная интегрированная система управления процессом и регистрации первичных данных представляет собой комплексное решение – измерительную цепь, реализованную в среде графического программирования LabVIEW (рисунок 4.6) [6, 23, 26, 28, 45].

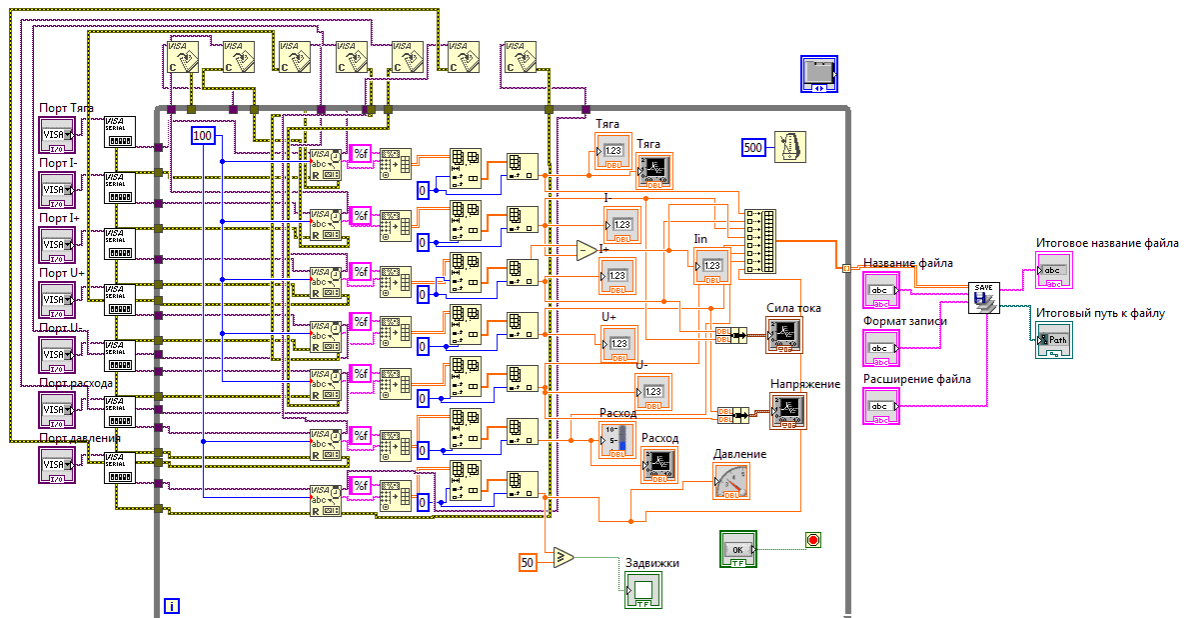


Рисунок 4.6 – Блок-диаграмма системы управления и регистрации первичных данных исследовательских испытаний ВЧИД ММ.

Система обеспечивает сквозную автоматизацию сбора, обработки и хранения первичных данных, позволяет принимать и управлять данными на периферийных устройствах стенда. Архитектура системы построена по модульному принципу и включает: интерфейс сопряжения с измерительным оборудованием, механизмы валидации данных в реальном времени, базу данных для структурированного хранения результатов и модуль визуализации.

Лицевая панель разработанного программного обеспечения, представленная на рисунке 4.7, обладает интуитивно понятным интерфейсом, разделенным на функциональные зоны для удобства оператора. В левой части интерфейса расположена панель управления с основными параметрами испытаний, включающая:

1. Выбор СОМ-порта – выпадающий список с автоматическим определением доступных последовательных портов, позволяющий оперативно подключиться к контроллеру стенда. Рядом расположены кнопки «Подключение» и «Обновить список портов» для управления соединением.
2. Поля ввода параметров питания - цифровые элементы управления для установки.
3. Блок управления испытанием – кнопки «Старт/Стоп» для запуска процесса, «Аварийное отключение» (красного цвета) и «Сохранить параметры» для записи настроек в конфигурационный файл.

Визуализация и отображение данных содержит схематическое изображение испытательного стенда «2ИУ-4В» с цифровыми индикаторами текущих значений параметров:

- Напряжения на эмиссионном и ускоряющем электродах;
- Сила тока на эмиссионном и ускоряющем электродах;
- Тяга ВЧИД ММ;
- Расход РТ;
- Напряжение на блоке питания.

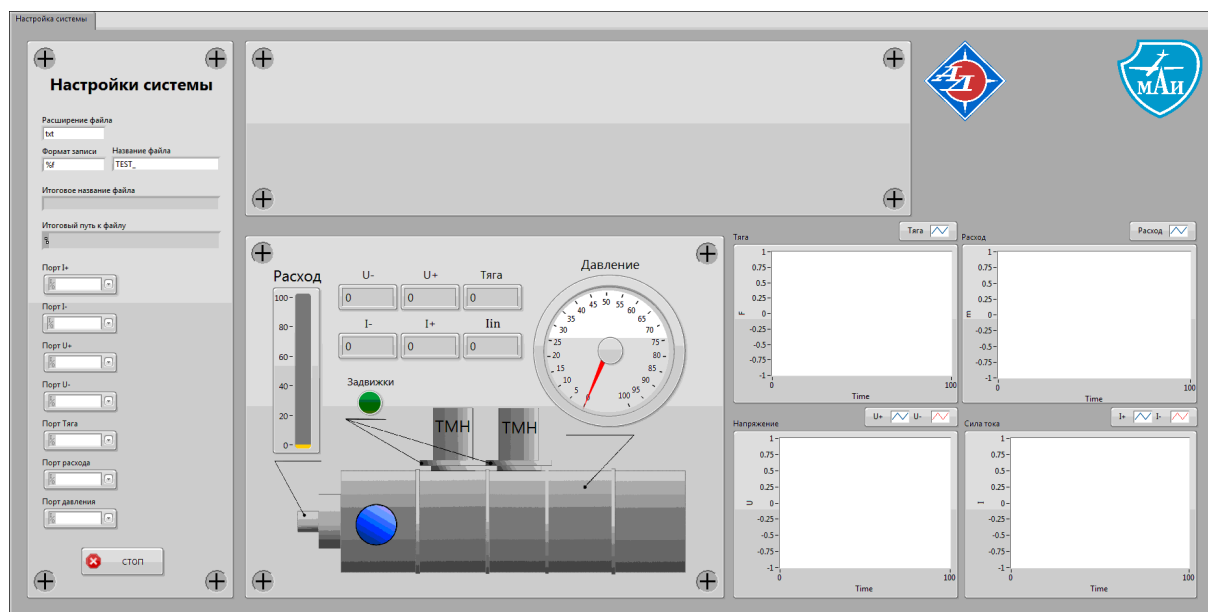


Рисунок 4.7 – Лицевая панель системы измерения
характеристик ВЧИД ММ.

Функциональные возможности системы включают в себя:

1. Автоматизированный сбор данных с частотных преобразователей через стандартные интерфейсы (GPIB, USB);
2. Программную фильтрацию сигналов с применением адаптивных алгоритмов;
3. Контроль допустимых диапазонов измеряемых параметров с генерацией ошибок;
4. Ведение электронного протокола испытаний с привязкой метаданных (условия проведения и параметры оборудования).

Реализация в LabVIEW обеспечила возможность создания специализированных виртуальных приборов для каждого типа измерений, при этом сохраняя единый интерфейс управления. Особое внимание уделено механизмам синхронизации данных от различных источников – применена техника временных меток с точностью до 100 мкс, что критически важно для высокочастотных измерений.

Преимущества разработанного решения являются: снижение времени подготовки к испытаниям и уменьшение ошибок регистрации данных.

Система поддерживает экспорт данных в форматы CSV и XML для последующего анализа в других программных средах.

4.2.2 Разработка научно-программного комплекса статистической обработки результатов измерений

Вторым важным этапом стало внедрение научно-программного комплекса статистической обработки результатов измерений. Анализ косвенных измерений и методы обработки результатов косвенных измерений, приведенные в Приложении Б (п. 7 ПМИ-208-207-25 «Программа и методика проведения исследовательских испытаний высокочастотного ионного двигателя с повышенной экономичностью») стали фундаментом для разработки научно-программного комплекса статистической обработки данных исследовательских испытаний ВЧИД ММ [73, 84]. В отличие от прямых измерений, где параметры определяются непосредственно приборами, косвенные измерения требуют сложных математических преобразований исходных данных. Особую роль это играет при работе с ЭРД, где ключевые характеристики (удельный импульс, КПД, тяга) часто не могут быть измерены напрямую. Комплекс реализует современные математические подходы к обработке таких измерений, обеспечивая высокую точность и достоверность результатов. Разработанный модуль реализован на языке программирования Python, что обеспечивает высокую гибкость и производительность при обработке экспериментальных данных [26, 28, 81]. Выбор Python обусловлен наличием мощных научных библиотек, развитых средств визуализации и возможностью интеграции с оборудованием через различные интерфейсы. Комплекс использует объектно-ориентированный подход, что позволяет легко расширять его функциональность для новых типов измерений.

Метод линеаризации, реализованный в комплексе, является одним из основных подходов к оценке косвенно измеряемых параметров ВЧИД ММ. Этот метод основан на разложении функции связи в ряд Тейлора в окрестностях рабочей точки с последующим сохранением только линейных членов. Для

испытаний ВЧИД ММ это особенно актуально при определении таких параметров, как удельный импульс, где зависимость от измеряемых величин (расхода рабочего тела, мощности) часто носит нелинейный характер. Комплекс автоматически определяет область применимости линеаризации и предупреждает оператора при выходе за её границы (рисунок 4.8).

Особенность реализации на Python заключается в:

1. Автоматическом вычислении частных производных через символьное дифференцирование;
2. Векторизации вычислений с помощью NumPy для обработки массивов данных.

Для типовых задач обработки данных ЭРД разработаны шаблоны с предустановленными функциями связи и параметрами точности.

Метод приведения, включенный в арсенал комплекса, особенно эффективен при обработке параметров ВЧИД ММ с ярко выраженными нелинейными зависимостями. Суть метода заключается в специальном преобразовании измеряемых величин, приводящем функциональную зависимость к линейному виду. В испытаниях ВЧИД ММ это находит применение при анализе вольтамперных характеристик плазменных ускорителей или при обработке данных спектроскопической диагностики. Реализация метода приведения в Python представлена на рисунке 4.8.

Инновационной особенностью комплекса стала реализация бутстрап-метода для оценки погрешностей косвенных измерений характеристик ВЧИД (рисунок 4.9). Метод основан на многократном повторном выборе с возвращением из исходной выборки данных и последующем анализе распределения получаемых оценок. В комплексе реализованы адаптивные алгоритмы, автоматически определяющие необходимое количество бутстрап-повторений для достижения заданной точности. Метод реализован с использованием библиотеки NumPy для численных операций.

```

# метод линеаризации
for group in averages:
    if group not in method_linearization:
        method_linearization[group] = []
        method_linearization_error[group] = []

    #-----
    # energy_value
    if averages[group][current_beam_column] != 0:
        energy_value = averages[group][power_column] / averages[group][current_beam_column]
    else:
        energy_value = None
    method_linearization[group].append(energy_value)

    # energy_value_error
    energy_value_error = (((1 / averages[group][current_beam_column]) ** 2) * msq[group][power_column] + (((averages[group][
    method_linearization_error[group].append(energy_value_error)

    #-----
    # power_consumption
    power_consumption = averages[group][current_beam_column] * averages[group][voltage_energy_column] + averages[group][power
    method_linearization[group].append(power_consumption)

    # power_consumption_error
    power_consumption_error = averages[group][current_beam_column] * ((msq[group][voltage_energy_column] + msq[group][power
    method_linearization_error[group].append(power_consumption_error)

    #-----
    # k_gas
    if gas_mass != 0 and averages[group][consumption_column] != 0:
        k_gas = averages[group][current_beam_column] / ((electron/gas_mass) * averages[group][consumption_column])

```

Рисунок 4.8 – Фрагмент программного кода,
«Метод Линеаризации», «Метод Приведения».

```

# метод линеаризации
for group in averages:
    if group not in method_linearization:
        method_linearization[group] = []
        method_linearization_error[group] = []

    #-----
    # energy_value
    if averages[group][current_beam_column] != 0:
        energy_value = averages[group][power_column] / averages[group][current_beam_column]
    else:
        energy_value = None
    method_linearization[group].append(energy_value)

    # energy_value_error
    energy_value_error = (((1 / averages[group][current_beam_column]) ** 2) * msq[group][power_column] + (((averages[group][
    method_linearization_error[group].append(energy_value_error)

    #-----
    # power_consumption
    power_consumption = averages[group][current_beam_column] * averages[group][voltage_energy_column] + averages[group][power
    method_linearization[group].append(power_consumption)

    # power_consumption_error
    power_consumption_error = averages[group][current_beam_column] * ((msq[group][voltage_energy_column] + msq[group][power
    method_linearization_error[group].append(power_consumption_error)

    #-----
    # k_gas
    if gas_mass != 0 and averages[group][consumption_column] != 0:
        k_gas = averages[group][current_beam_column] / ((electron/gas_mass) * averages[group][consumption_column])

```

Рисунок 4.9 – Фрагмент программного кода,
«Метод бутстрап».

Разработанный научно-программный комплекс объединяет все три метода в единую систему обработки данных исследовательских испытаний ВЧИД ММ, позволяя исследователю выбирать оптимальный подход для каждой конкретной

задачи. Особое внимание уделено визуализации результатов: комплекс автоматически строит графики распределений и погрешностей (рисунок 4.10). Реализована система экспорта результатов в форматы, совместимые с научными пакетами обработки данных.

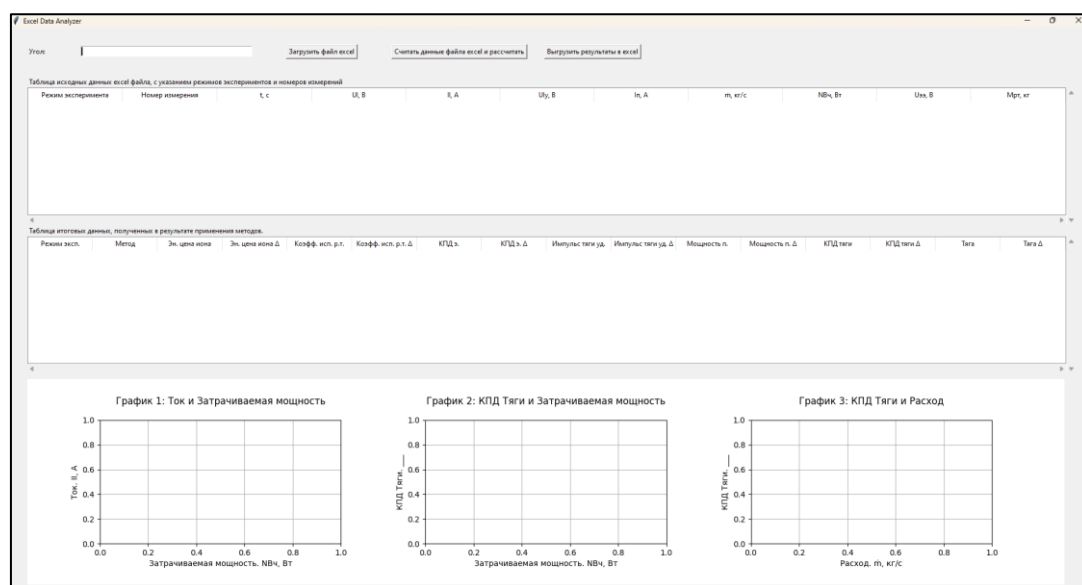


Рисунок 4.10 – Интерфейс пользователя научно-программный комплекса

Научно-программный комплекс статистической обработки результатов измерений позволил автоматизировать анализ больших массивов данных, выявлять закономерности и аномалии, а также формировать отчеты в стандартизированном виде. Использование современных методов и алгоритмов математической обработки повысило достоверность выводов и сократило время на интерпретацию результатов.

Интеграция двух систем – «Управление процессом, регистрация первичных данных» и «Обработка результатов измерений» обеспечила сквозную автоматизацию процесса – от сбора первичных данных до формирования итоговых отчетов. Все этапы исследовательских испытаний ВЧИД ММ теперь документируются в единой цифровой среде, что упрощает аудит и анализ возможных отклонений. Это особенно важно для сложных испытаний ВЧИД ММ, где даже незначительные погрешности могут привести к существенным искажениям результатов.

Внедрение автоматизированного научно-программного комплекса привело к существенному повышению обобщенного показателя качества процесса исследовательских испытаний ВЧИД ММ – с $P=0,55$ до $P=0,65$ (рисунок 4.11). Такой рост свидетельствует о переходе процесса испытаний на качественно новый уровень, соответствующий требованиям исследовательской деятельности. Особенно важно, что улучшение показателя было достигнуто за счет системного подхода к автоматизации всех этапов процесса испытаний – от сбора первичных данных до формирования итоговых отчетов.

Рост показателя качества обусловлен несколькими принципиальными улучшениями:

1. Снижением человеческого фактора при обработке данных;
2. Увеличением точности измерений ключевых параметров;
3. Сокращением времени обработки результатов измерений;
4. Повышением воспроизводимости испытаний;
5. Уменьшением количества повторных испытаний.

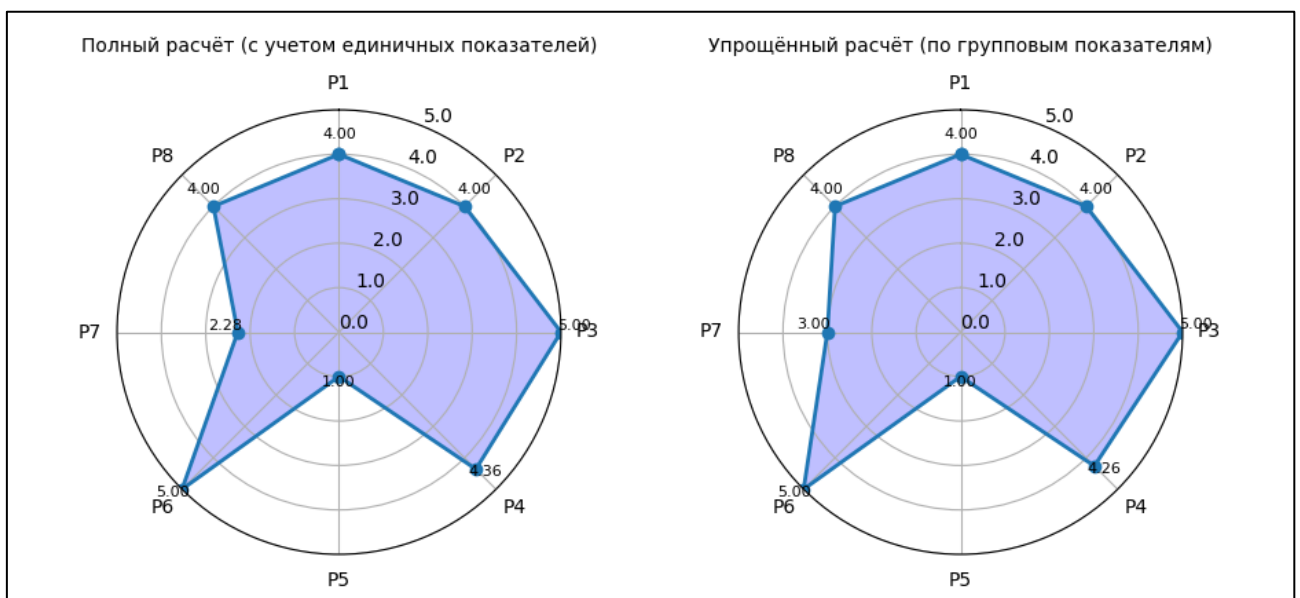


Рисунок 4.11 – Распределение оценочных показателей качества автоматизации процесса исследовательских испытаний ВЧИД ММ

Эти улучшения стали возможны благодаря комплексной автоматизации и внедрению интеллектуальных алгоритмов обработки данных.

Повышение показателя качества до **0,65** коренным образом изменило организацию исследовательских работ:

1. Специалисты получили возможность проводить в несколько раз больше испытаний за тот же период;
2. Сократилось время принятия решений по результатам испытаний;
3. Появилась возможность проводить более сложные комплексные испытания.

4.3. Оценка эффективности внедрения мероприятий по улучшению качества процесса исследовательских испытаний ЭРД

Анализ современных подходов к управлению качеством в ракетно-космической отрасли выявил необходимость разработки специализированной документированной процедуры для исследовательских испытаний ЭРД (Приложение В) [14, 27, 30-32, 84]. На основании требований международных стандартов ИСО 9001:2015 «Системы менеджмента качества. Требования», которые устанавливают базовые принципы создания документированных процедур, включая необходимость их постоянного актуализирования и привязки к конкретным производственным процессам, сформулированы базовых принципах разработки процедуры:

1. Принцип адекватности, предполагающий точное соответствие создаваемого регламента реальным условиям и требованиям исследовательских испытаний ЭРД.
2. Принцип системности, предполагающий охват всех этапов процесса исследовательских испытаний ЭРД.
3. Принцип адаптивности, позволяющий оперативно вносить изменения в процедуру процесса испытаний ЭРД при модернизации испытательного оборудования или изменении методик.

В документированной процедуре требования стандарта ИСО 9001:2015 «Системы менеджмента качества. Требования» к процессному подходу реализованы через четкое определение входов и выходов процесса мониторинга;

ответственных за выполнение операций; критериев оценки эффективности; взаимосвязей с другими процессами системы менеджмента качества.

Документ регламентирует методику проведения мониторинга, включая перечень контролируемых параметров, способы их измерения и критерии оценки. В процедуре детально описана система принятия управленческих решений на основе результатов мониторинга. Разработана градация отклонений по степени критичности с соответствующими алгоритмами реагирования: от оперативной корректировки параметров испытаний до остановки процесса и проведения дополнительных исследований. Для каждого типа несоответствий предусмотрены формализованные процедуры анализа причин, разработки и реализации корректирующих мероприятий, а также последующей верификации их эффективности. Документ также устанавливает требования к отчетности, включая формы протоколов, порядок их утверждения и архивирования.

Таким образом, разработана комплексная документированная процедура, основанная на принципах процессного подхода и требованиях международных стандартов качества. Процедура интегрирует современные методы квалитетической оценки качества, передовые практики управления процессами испытаний и отраслевые стандарты РКТ.

4.4 Выводы по главе 4

В четвертой главе исследования проведена комплексная апробация предложенных научно-технических решений в области оценки качества процессов исследовательских испытаний ЭРД, а именно:

1. Разработанная модель квалитетической оценки качества процесса исследовательских испытаний ЭРД апробирована при проведении исследовательских испытаний по определению интегральных параметров высокочастотного ионного двигателя в ФГБОУ ВО «МАИ (НИУ)».

2. Разработан автоматизированный комплекс управления процессом исследовательских испытаний ЭРД, регистрации первичных данных и обработки результатов измерений на стенде «2ИУ-4В».

3. Разработан унифицированный научно-программный комплекс статистической обработки результатов измерений исследовательских испытаниях ЭРД – высокочастотного ионного двигателя – «Специализированный научно-программный комплекс для обработки результатов исследовательских испытаний высокочастотного ионного двигателя», позволяющий определить результат и погрешность результата измерений методами линеаризации, приведения и бутстрапа.

4. Внедрение результатов диссертационного исследования позволило провести оценку качества проведения исследовательских испытаний ЭРД на стенде «2ИУ-4В» ФГБОУ ВО «МАИ (НИУ)», выявить основные технические и организационные проблемы. Применение разработанных автоматизированных комплексов управления процессом, регистрации первичных данных и статистической обработки результатов измерений привело к повышению обобщенного комплексного показателя качества исследовательских испытаний ЭРД со среднего уровня (0,55) до высокого (0,65).

5. В рамках исследования рассмотрены методологические подходы к созданию документированной процедуры в области управления качеством, с учетом специфики исследовательских испытаний ЭРД. Проанализированы требования международных стандартов серии ИСО 9000 и ведомственных положений в области системы менеджмента качества. На основе проведенного анализа сформулированы принципы разработки процедуры мониторинга и оценки качества, включающие системность, объективность, воспроизводимость и адаптивность к изменяющимся условиям испытаний, а также разработана документированная процедура «Мониторинг и оценка уровня качества процесса исследовательских испытаний ЭРД».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении представлены основные результаты и выводы диссертационной работы.

В результате проведенного исследования решена важная научная задача в области обеспечения и повышения качества процесса исследовательских испытаний ЭРД, и достигнута цель диссертационного исследования на примере повышения качества процесса исследовательских испытаний ВЧИД ММ:

1. Усовершенствованы общая и детализированные модели процессов исследовательских испытаний ЭРД. Ключевым улучшением стал учёт внедрённой автоматизации элементов системы, обеспечивающих качество испытаний. Применяемые средства автоматизации обеспечивают систематический анализ состояния испытаний, что создаёт основу для анализа и совершенствования процессов и, как следствие, способствует повышению надёжности и эффективности создаваемой ракетно-космической техники. Выявлена взаимосвязь этапов процесса, разработана система элементов модели управления процессом исследовательских испытаний ЭРД, определены основные задачи подпроцессов, классифицированных по 3 группам: функциональные, финансово-экономические и организационно-управленческие. Показан уровень нормативно-технического обеспечения каждого элемента системы.

2. В результате структурирования функции качества процесса исследовательских испытаний электроракетных двигателей разработана система показателей качества процесса исследовательских испытаний ЭРД, включающая 48 комплексных и единичных показателей качества, характеризующих качество исследовательских испытаний ЭРД по 8 выделенным основным группам: качество объекта, качество испытательного стенда, качество автоматизации процесса исследовательских испытаний, качество проведения процесса испытаний, качество кадрового обеспечения, безопасность испытаний, экономичности, экологичности процесса исследовательских испытаний. Модель оценки качества процесса включает в себя новую развернутую номенклатуру

показателей качества процессов исследовательских испытаний ЭРД с системой весовых коэффициентов всех элементов и предложенными шкалами их оценки.

3. Разработан подход к оценке точности результатов исследовательских испытаний ЭРД, основанный на применении специализированного научно-программного комплекса. Ключевой особенностью методики является адаптация современных статистических методов к обработке косвенных измерений, что позволяет количественно оценить погрешность интегральных характеристик двигателя и повысить достоверность получаемых результатов (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025682898. Заявл. № 2025682127 от 25.08.2025. Оpubл. 28.08.2025).

4. Внедрение результатов диссертационного исследования позволило провести оценку качества проведения исследовательских испытаний ЭРД на стенде «2ИУ-4В» в ФГБОУ ВО «МАИ (НИУ)», выявить основные технические и организационные проблемы. Применение разработанных автоматизированных комплексов управления процессом, регистрации первичных данных и статистической обработки результатов измерений обеспечило рост показателя качества автоматизации процесса P_3 – с 0 до 10%, в результате обобщенный комплексный показатель качества процесса исследовательских испытаний ЭРД повысился со среднего уровня (0,55) до высокого (0,65). Также, реализованные мероприятия позволили снизить временные затраты на проведение полного цикла испытаний: с 24 часов до 2 часов.

5. Разработана и внедрена регламентированная процедура «Мониторинг и оценка уровня качества процесса исследовательских испытаний электроракетных двигателей». Документ устанавливает единую методику контроля, фиксируя перечень критически важных параметров, методы их измерений и критерии оценки. Ключевым элементом процедуры является формализованный алгоритм принятия управленческих решений по результатам мониторинга, который обеспечивает интеграцию принципов непрерывного улучшения в практику испытаний. Данный подход позволяет перейти от разовых

корректировок к системному совершенствованию процесса, формируя замкнутый контур управления качеством на основе объективных данных.

6. Эффективность предложенных решений подтверждена практическим внедрением в исследовательскую деятельность промышленных предприятий. Разработанная методика обеспечения качества процесса исследовательских испытаний ЭРД успешно апробирована и внедрена в учебный процесс ФГБОУ ВО «МАИ (НИУ)», что зафиксировано соответствующими актами.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

Научные и практические результаты диссертационного исследования рекомендуется применять при проведении исследовательских испытаний электроракетных двигателей в целях обеспечения качества и эффективного управления процессом. Перспективой дальнейшей разработки темы диссертации является совершенствование методик и инструментария повышения эффективности и качества процесса исследовательских испытаний иных видов электроракетных двигателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азгальдов Г.Г. Теория и практика оценки качества товаров (основы квалиметрии). М.: Экономика, 1982. 256 с.
2. Азгальдов Г.Г., Азгальдова Л.А. Количественная оценка качества (квалиметрия). Библиография. – М.: Издательство стандартов, 1971 г. – 176 с.
3. Аникейчик Н.Д., Кинжагулов И.Ю., Федоров А.В. Планирование и управление НИР и ОКР. Учебное пособие. – СПб: Университет ИТМО, 2016. – 192 с.
4. Антропов Н.Н., Ахметжанов Р.В., Богатый А.В., Гришин Р.А., Кожевников В.В., Плохих А.П., Попов Г.А., Хартов С.А. Экспериментальные исследования высокочастотного ионного двигателя. // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2016. - № 2, С. 4-14.
5. А.С. Четвериков, В.В., Салмин, М.Ю. Гоголев. Расчёт проектно-баллистических характеристик и формирование проектного облика межорбитальных транспортных аппаратов с электрореактивной двигательной установкой с использованием информационных технологий: учеб. пособие / В.В. Салмин, А.С. Четвериков, М.Ю. Гоголев. – Самара: Изд-во Самарского ун-та, 2019. – 196 с.
6. Архицкая К.А., Ермакова М.О., Монахова В.П. Оценка качества измерительных процессов при проведении исследовательских испытаний сложных технических систем // 22-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2023». 20–24 ноября 2023 года. Москва. Тезисы. – М.: Издательство «Перо», 2023.
7. Ахметжанов Р.В., Богатый А.В., Дронов П.А., Дьяконов Г.А., Иванов А.В. Высокочастотный ионный двигатель малой мощности // Вестник Сибирского гос. аэрокосмического универс. им. акад. М.Ф. Решетнева. 2015. Т. 16. № 2. С. 378–385.
8. Бабкина Н.А. Метод экспертных оценок. Учебно-методическое пособие. / Благовещенск, Амурский государственный университет. 2005 г.

9. Барвинок В.А., Чекмарев А.Н., Еськина Е.В. Роль квалиметрии в повышении конкурентоспособности изделий машиностроения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, том 16, №6 (2), 2014.
10. Басовский, Л.Е. Управление качеством: Учебник / Л.Е. Басовский, В. Б. Протасьев. – М.: ИНФРА-М, 2004. – 212 с.
11. Богатый А.В. Электромагнитный абляционный импульсный плазменный двигатель для малых космических аппаратов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук.: 05.07.05. - Защищена 23.12.2021 г. - ФГБОУ ВО «МАИ (НИУ)», Москва, 2021 - 159 с.
12. Бойко, А. А. Метод оценки весовых коэффициентов элементов организационно-технических систем / А. А. Бойко, И. С. Дегтярев // Системы управления, связи и безопасности. – 2018. – № 2. – С. 245-266.
13. Бойцов Б. Согласование метрик качества при модернизации автоматизированной системы предприятия / Б. Бойцов, Артамонов, Денискин // Труды МАИ, Выпуск № 49, Файл_old: 49-53.
14. Борисова Л.В. Практические аспекты реализации процессного подхода в системе менеджмента качества / Л.В. Борисова, В.П. Димитров, О.В. Пантюхин // Тула – 2023
15. В.В. Кошляков, Н.И. Архангельский, Л.Э. Захаренков, А.В. Каревский, Е.Ю. Кувшинова, Е.И. Музыченко, А.В. Семёнкин, А.Е. Солодухин. Применение мощных энергодвигательных систем для выполнения транспортных задач в космосе// Наука и инновации – 2022. – № 8.
16. В.П. Монахова, А.М. Ерикова, М.О. Ромашова, И.Н. Мирзоян. Статистические методы контроля и управления качеством продукции. Основные инструменты системы качества. Учебное пособие/ под редакцией В.П. Монаховой. – М.: Изд-во МАИ, 2023. – 100 с.
17. Вавилов И.С., Ячменев П.С., Жариков К.И., Федянин В.В., Степень П.В., Лукьянчик А.И. Определение тяги ионного двигателя аэродинамическим методом двойного угла ($AM\alpha\beta$ – метод). // Динамика систем, механизмов и машин. – 2021. – Т. 9, № 2, С. 248-255.

18. Важенин Н.А., Обухов В.А., Плохих А.П., Попов Г.А. Электрические ракетные двигатели космических аппаратов и их влияние на радиосистемы космической связи. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012.
19. Васильев, В. А. Управление качеством / В. А. Васильев. – Москва: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2022. – 160 с.
20. Васин А.И., Коротеев А.С., Ловцов А.С., Муравлев В.А., Шагайда А.А., Шутов В.Н. Обзор работ по электроракетным двигателям в Государственном научном центре ФГУП «Центр Келдыша» // Труды МАИ. 2012. № 60. Р. 9
21. Введенский Н.Ю., Пустобоев М.В. Анализ отработки космической техники на механические воздействия в США, ЕС и РФ // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2012, № 5, с. 19-26.
22. Власов Ю.В., Кузин А.И. Мировые тенденции развития технологий производства ракетно-космической техники. Перспективные решения ФГУП «НПО «ТЕХНОМАШ» // Вестник «НПО «ТЕХНОМАШ». – 2021. - №4, с. 4-19.
23. Гончаров П.С., Шуневич Н.А., Копейка А.Л., Бабин А.М. Система измерения силы тяги электрического ракетного двигателя // Известия тульского государственного университета. Технические науки. – 2021, №10, с. 573-577.
24. Гордеев С.В., Канев С.В., Мельников А.В., Назаренко И.П., Хартов С.А. Исследование высокочастотного ионного двигателя с прямоточной конфигурацией разрядной камеры. // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2022. - № 5 (125).
25. ГОСТ 13504-81. Межгосударственный стандарт. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения: дата введения 01.01.1982г. / Постановление комитета СССР по стандартам. – Изд. официальное. – Москва Стандартиформ, 2011.
26. ГОСТ 19.101-2024. Единая система программной документации. Виды программ и программных документов. Дата введения: 30.01.2025 г.

Межгосударственным техническим комитетом по стандартизации МТК 022 «Информационные технологии». – 2025 г.

27. ГОСТ Р 56518-2015. Национальный стандарт Российской Федерации. Техника космическая. Требования к системам менеджмента качества организаций, участвующих в создании, производстве и эксплуатации: дата введения 08.07.2015г. / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – Изд. официальное. – Москва Стандартинформ, 2015.

28. ГОСТ Р 56939-2024. Национальный стандарт Российской Федерации. Защита информации. Разработка безопасного программного обеспечения. Общие требования. Дата введения: 20.12.2024 г. Техническим комитетом по стандартизации ТК 362 «Защита информации». – 2024 г.

29. ГОСТ Р 57945-2017. Национальный стандарт Российской Федерации. Система технологического обеспечения разработки и постановки на производство изделий космической техники. Термины и определения: дата введения 14.11.2017г. / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – Изд. официальное. – Москва Стандартинформ, 2018.

30. ГОСТ Р 58781-2019. Национальный стандарт Российской Федерации. Ракетно-космическая техника. Система менеджмента качества. Управление рисками при обеспечении качества изделий ракетно-космической техники: дата введения 25.12.2019г. / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – Изд. официальное. – Москва Стандартинформ, 2020.

31. ГОСТ Р ИСО 9000-2015. Национальный стандарт Российской Федерации. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь: дата введения 28.09.2015г. / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – Изд. официальное. – Москва Стандартинформ, 2015.

32. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Национальный стандарт Российской Федерации. Системы менеджмента качества. Требования: дата введения 28.09.2015г. / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – Изд. официальное. – Москва Стандартинформ, 2015.

33. Григорьев П.А., Ермошкин Ю.М. Обзор состояния и тенденций развития электрореактивных двигателей за рубежом // Материалы конференции «Решетневские чтения». – 2017, с. 204-205.
34. Григорьян В.Г., Евдокимов К.В. Энергоустановки космических летательных аппаратов: Учебное пособие. – М.: Изд-во МАИ, 2007. – 84 с.
35. Гусев Ю.Г., Пильников А.В. Роль и место электроракетных двигателей в Российской космической программе // Труды МАИ. 2012. № 60. С. 1-20.
36. Гусев Ю.Г., Пильников А.В., Суворов С.Е. Сравнительный анализ выбора ЭРДУ большой мощности на основе отечественных ЭРД и перспективы их применения в системах межорбитальной транспортировки и для исследования дальнего космоса // Космическая техника и технологии. – 2019. - № 4, с. 45-55.
37. Диагностика плазмы /Под ред. Р. Хаддлстоуна, С. Леонарда. М.: Мир, 1967. 515 с.
38. Елисеева Т.А. Снижение риска производителя технических систем на этапе проектирования совершенствованием оценки надежности. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук.: 05.02.23. – Тульский государственный университет, г. Тула, 2017 - 137 с.
39. Еремин А.Г., Ромашова М.О., Ромадова Е.Л., Белоглазов А.П. Холодильник-излучатель космического аппарата // Патент: RU 2784226 С1, 04.08.2022. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт».
40. Ермакова М.О. Оценка качества процесса исследовательских испытаний электроракетных двигателей // Стандарты и качество. – 2025. – № 5.
41. Ермакова М.О., Ерикова А.М., Монахова В.П. Управление процессом исследовательских испытаний электроракетных двигателей, их элементов и агрегатов // Труды XVI Общероссийской научно-технической конференции «Молодежь. Техника. Космос», направление 1 «Ракетно-космическая и авиационная техника», март 2024.

42. Ермакова М.О., Ерикова А.М., Монахова В.П., Карепин П.А. Исследовательские испытания электроракетных двигателей. Методология и управление процессом // Компетентность / Competency (Russia). – 2024. – № 9–10.
43. Ермакова М.О., Ерикова А.М., Монахова В.П., Карепин П.А., Хартов С.А. Обеспечение качества процесса исследовательских испытаний электроракетных двигателей // Компетентность / Competency (Russia). – 2025. – № 5.
44. Ермакова М.О., Монахова В.П. Показатели качества процесса исследовательских испытаний электроракетных двигателей // АВИАЦИЯ И КОСМОНАВТИКА. Тезисы 23-ой Международной конференции. Москва, 2024.
45. Ермакова М.О., Монахова В.П., Хартов С.А. Автоматизированная система испытаний стенда «Исследование характеристик ЭРД» // 22-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2023». 20–24 ноября 2023 года. Москва. Тезисы. – М.: Издательство «Перо», 2023.
46. Ерофеев А.И., Суворов М.О., Никифоров А.П., Сырин С.А., Попов Г.А., Хартов С.А. Разработка воздушного прямоточного электрореактивного двигателя для компенсации аэродинамического // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2016. № 3. С. 104-110.
47. Зацаринный А.А., Ионенков Ю.С. О применении экспертных методов при оценке эффективности и качества информационных систем // Системы и средства информатики. – 2022. – № 2., стр. 47-57.
48. Звездин И. Малые космические аппараты: перспективы рынка // Взлет. 2005. № 1. С. 50-55.
49. Канев С.В., Кожевников В.В., Хартов С.А. Физико-математическая модель процессов в ионизационной камере электроракетного двигателя, использующего атмосферные газы в качестве рабочего тела // Известия Российской академии наук. – 2017. - №3, с. 21-30.

50. Квалиметрия и управление качеством. Ч.1. Квалиметрия: учебное пособие / А.Н. Чекмарев. – Самара: Изд-во Самара гос. аэрокосм. ун-та, 2010. – 172 с.
51. Квалиметрия: малая энциклопедия / А. И. Субетто. — Вып. 1. — СПб. :
52. Кожевников В.В. Исследование локальных параметров плазмы в разрядной камере высокочастотного ионного двигателя малой мощности. Москва, МАИ, 2017, 139 с.
53. Кожевников В.В., Мельников А.В., Назаренко И.П., Хартов С.А. Высокочастотный ионный двигатель с дополнительной магнитной системой. // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2019. - № 3, С. 4-51.
54. Кожевников В.В., Надирадзе А.Б., Назаренко И.П., Фролова Ю.Л., Хартов С.А. Лабораторные исследования струй электроракетных двигателей зондовыми методами. // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2018. - № 4, С. 150-153.
55. Кожевников В.В., Хартов С.А. Исследование локальных параметров плазмы в разрядной камере высокочастотного ионного двигателя малой мощности. // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2017. - № 3, С. 13-20.
56. Кожевников В.В., Хартов С.А. Исследование многоэлектродными зондами локальных параметров плазмы в разрядной камере высокочастотного ионного двигателя малой мощности. // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2016. - № 2, С. 26-33.
57. Козлов О.В. Электрический зонд в плазме. М.: Атомиздат, 1969. 293 с.
58. Козубский К.Н., Корякин А.И., Мурашко В.М. История космических стационарных плазменных двигателей и их применение в России, США и Европе. Новые вызовы для стационарных плазменных двигателей. К 40-летию первых космических испытаний стационарных плазменных двигателей // Труды МАИ. – 2012, № 60, с. 24.

59. Колесников А.В. Лекции по курсу «Испытания конструкций и систем космических аппаратов» (специальность 1307, 10-ый семестр), 2007 г.
60. Комков Н.И., Кротова М.В., Романцов В.С. Подготовка к проведению прогнозных исследований по импортозамещению на основе опроса экспертов // Научные труды: институт народнохозяйственного прогнозирования РАН – 2015. – том 13.
61. Корниенко В.Д., Ежов Г.А., Наркевич М.Ю., Логунова О.С. Классификация исходных данных для интеллектуальной системы экспертной оценки визуально определяемых дефектов и повреждений // Вестник ЧГУ – 2022. – № 6.
62. Кубрак М.В., Леонов С.Н. Современные системы испытаний ракетно-космической техники // Материалы конференции «Решетневские чтения», 2017 г.
63. Курицына В.В., Курицын Д.Н. Инструментальные средства MATLAB SIMULINK в задачах экспертной оценки технологических систем по параметрам качества изготовления изделий точного машиностроения // Труды ГОСНИТИ – 2016. – №1.
64. Куркова О. П. Организация и планирование научно-технических исследований и разработок [Электронный ресурс]: монография. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2018. – 245 с.
65. Лёб Х.В., Попов Г.А., Обухов В.А. Лаборатория высокочастотных двигателей Московского авиационного института - новая форма Российско-Германского сотрудничества // Труды МАИ. 2012. № 60. С. 1-13.
66. Ловцов А.С., Кравченко Д.А., Томилин Д.А., Шагайда А.А. Современное состояние разработок и применения электрических ракетных двигателей основных типов // Физика плазмы. – 2022. - №9, с. 792-822.
67. Любинская Н.В. Абляционный импульсный плазменный двигатель для перспективных малоразмерных космических аппаратов. Диссертация на

соискание ученой степени кандидата технических наук.: 05.07.05. - Защищена 28.12.2020 г. - ФГБОУ ВО «МАИ (НИУ)», Москва, 2020 - 164 с.

68. Макриденко Л.А., Геча В.Я., Сидняев Н.И., Онуфриев В.В., Говор С.А. Определение высотных характеристик электрических ракетных двигателей космического аппарата методами планирования эксперимента // Проблемы управления. – 2017, №1, с. 75-87.

69. Мельников А.В. Высокочастотный ионный двигатель с дополнительным постоянным магнитным полем. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук.: 05.07.05. - Защищена 09.12.2019 г. - ФГБОУ ВО «МАИ (НИУ)», Москва, 2019 - 157 с.

70. Мельников А.В., Хартов С.А. Экспериментальное исследование высокочастотного ионного двигателя с дополнительным магнитным полем. // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2018. - № 3, С. 4-11.

71. Методология экспериментальной отработки ЖРД и ДУ, основы проведения испытаний и устройства испытательных стендов: монография [Электронный ресурс] / А.Г. Галеев, В.Н. Иванов, А.В. Катенин, В.А. Лисейкин, В.П. Пикалов, А.Д. Поляхов, Г.Г. Сайдов, А.А. Шибанов. – Электрон. текст. дан. (1 файл 9,7 Мб). – Киров: МЦНИП, 2015. – 436 с.

72. Методы оценки и управления качеством продукции: методические указания по выполнению самостоятельных работ / Л.В. Макарова, Р.В. Тарасов; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Ю.П. Скачкова. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 40 с.

73. МИ 2083-90. Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения косвенные. Определение результата измерений и оценивание их погрешностей. Дата введения: 01.01.1992 г. / Издательство стандартов. – Москва, Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1991.

74. Моделирование бизнес-процессов: учебник и практикум для вузов //О. И. Долганова, Е. В. Виноградова, А. М. Лобанова; под редакцией О. И. Долгановой. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2023. – 322 с.

75. Моделирование и анализ бизнес-процессов: учеб. пособие / В.А. Силич, М.П. Силич. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники, 2011. — 212 с.

76. Нечаев И.Л. Исследование перспективных схем абляционного импульсного плазменного двигателя с повышенными характеристиками. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук.: 05.07.05. - ФГБОУ ВО «МАИ (НИУ)», Москва, 2019 - 166 с.

77. Островский В.Г. Стенд для испытания электроракетного двигателя на йоде и способ испытания на стенде электроракетного двигателя, работающего на рабочем теле йоде // Патент: RU 2412373 С2, 20.02.20211. Открытое акционерное общество "Ракетно-космическая корпорация "Энергия" имени С.П. Королева".

78. Паничкин Н.Г., Золкин Н.Н., Цветков А.Б. Вопросы совершенствования и повышения эффективности экспериментальной отработки ракетно-космической техники // Научно-практическая конференция с международным участием «Космонавтика XXI века». – 2016.

79. Погорелов В.И. Система и ее жизненный цикл: введение в CALS-технологии: учебное пособие / Балт. Гос. Техн. Ун-т. – СПб., 2010. – 182 с.

80. Подгуйко Н.А. Полный магнетронный катод для электроракетных двигателей и ускорителей плазмы. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук.: 2.5.15. – ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана (НИУ)», Москва, 2024 - 160 с.

81. Ровкина А.Э., Ермакова М.О. Разработка программного обеспечения для обработки косвенных измерений интегральных параметров ВЧИД // I Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения», 2024. Москва. Тезисы. - М.: Издательство «Перо», 2024.

82. Ромашова М.О., Монахова В.П. Методика исследовательских испытаний электроракетных двигателей // Труды XV Общероссийской научно-технической конференции «Молодежь. Техника. Космос», направление 1 «Ракетно-космическая и авиационная техника», март 2023.

83. Ромашова М.О., Монахова В.П. Подтверждение компетентности лаборатории вуза в области исследовательских испытаний двигателей летательных аппаратов // XLIX Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения», 2023. Тезисы. – М.: Издательство «Перо», 2023.

84. Ромашова М.О., Монахова В.П., Ерикова А.М., Хартов С.А. Метрологическое обеспечение испытаний двигателей летательных аппаратов в системе менеджмента качества научно-исследовательской деятельности вуза // 21-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2022». 21–25 ноября 2022 года. Москва. Тезисы. – М.: Издательство «Перо», 2022.

85. Роскосмос. Обсуждение стратегии развития госкорпорации [Электронный ресурс]. URL: <https://www.roscosmos.ru/23380/> (дата обращения: 13.06.2019).

86. Свод знаний по управлению бизнес-процессами. BPM СВОК 3.0: Учебное пособие / под ред. А.А. Белаичук - Москва: Альпина Пабли., 2016. – 480

87. Севастьянов Н.Н., Бранец В.Н., Панченко В.А., Казинский Н.В. Анализ современных возможностей создания малых космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли // Труды МФТИ. 2009. Т. 1. № 3. С. 15- 23.

88. Семенов С.С. Оценка качества и технического уровня сложных систем: Практика применения метода экспертных оценок. Учебник. Изд. стереотип. 2019 г. – 352 с.

89. Смирнов П.Е., Хартов С.А., Кашулин А.П. Экспериментальное исследование работы катода-нейтрализатора с высокочастотным разрядом. // Вестник Московского авиационного института. – 2018. – Т. 25, № 2, С. 117-124.

90. Смолина Е.Ю., Ерыгин Ю.В. Инструменты оценки конкурентоспособности новых образцов отечественных космических аппаратов на рынке космических услуг // ЦИТИСЭ – 2019. – № 5.

91. Торопов Г.П., Хартов С.А. Модель распространения струи плазменного двигателя при его испытаниях в вакуумной камере с учетом влияния

электрического поля// Вестник Московского авиационного института. – 2011. – Т. 18, № 2, С. 83-88.

92. Тушавин В.А. Методология управления качеством процессов информационного обеспечения наукоемкого производства. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук.: 05.02.23. – ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», г. Санкт-Петербург, 2020 – 315 с.

93. Управление качеством продукции. Инструменты и методы менеджмента качества: учебное пособие / С.В. Пономарев [и др.]. – М.: РИА "Стандарты и качество", 2005. – 248 с.

94. Федеральная космическая программа России на 2016 – 2025 годы: утв. постановлением Правительства Рос. Федерации от 23 марта 2016 г. № 230.

95. Федоровский А.А., Строгалева В.П., Владыкин Е.Н. Обоснование системы технического контроля при разработке и испытаниях объектов ракетной и космической техники // Наука и образование МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электронный журнал – 2015. – № 08., стр. 63-74

96. Фролова Ю.Л. Влияние давления остаточной атмосферы вакуумной камеры на расходимость струи стационарного плазменного двигателя. Москва, МАИ, 2021, 161 с.

97. Харлан Я.Ю., Оссовский А.В., Харлан А.А. Исследовательские испытания высокочастотного ионного двигателя для малых космических аппаратов. // Решетневские чтения. – 2017. – Т.1, С. 385-386.

98. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов // Под ред. А.С. Коротеева. – М.: Машиностроение, 2008. – 280 с.

99. Челенко А.В. Формирование параметров качества продукции машиностроения методом экспертной оценки // Автоматизация в промышленности – 2023. – №9.

100. Что Показывает Коэффициент Конкордации [Электронный ресурс]. – URL: <https://ssl-team.com/blog/chto-pokazyvaet-koeffitsient-konkordatsii/> (дата обращения: 15.03.2025 г.).
101. Шамсувалеева А.М., Орлов А.И. Использование коэффициентов корреляции и конкордации // Тринадцатые Чарновские чтения. Сборник трудов XIII Всероссийской научной конференции по организации производства. Москва, –2023. – стр. 171-180.
102. Шанта М.В. Модели и процедуры контроля и обеспечения качества при производстве бытовой техники. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук.: 05.02.23. – ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», г. Санкт-Петербург, 2019 – 186 с.
103. Швечков Е.И. Анализ российских и зарубежных методов испытаний на статическую трещиностойкость авиационных материалов // Технология легких сплавов. – 2016, №1, с. 99-106.
104. Яковлев Е.А. Испытания космических электроракетных двигательных установок: Учебник для вузов. – М: Машиностроение, 1981. – 105 с.
105. Bhattacharya, J 2015 Quality risk management – understanding and control the risk in pharmaceutical manufacturing industry International Journal of Pharmaceutical Science Invention 4 (1) 29-41.
106. Groh K.H., Loeb H.W. State-of-Art of Radio-Frequency Ion Thrusters // J. Propulsion. July-August 1991. Vol. 7. No. 4. pp. 573-579
107. Hofer R.R., Peterson P.Y., Gallimore A.D. Characterizing Vacuum Facility Backpressure Effects on the Performance of Hall Thrusters // IEPC-01-045 [Electronical Resource].
108. Nadiradze A.B., Kochura S.G., Maximov I.A., Tikhomirov R.E., Balashov S.V. Influence of plasma jets of electric jet engines on spacecraft functional

characteristics // SIBERIAN JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY. – 2020, №4, p. 524-534.

109. Walther R.J., Schaefer M., Freisinger J. Plasma Diagnostics of the RF-Ion Thruster «RIT-10» // AIAA 9th Electric Propulsion Conference. Bethesda, MD, USA. April 1972. Vol. AIAA-72-472. pp. 1-8.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Шкала оценки качества процесса исследовательских испытаний ЭРД

Наименование комплексного показателя	Наименование группового показателя	Критерии оценки группового показателя	Наименование единичного показателя	Критерии оценки единичного показателя
Качество объекта	Качество разработки модели объекта	0 – полное несоответствие техническому заданию и базовым требованиям; ошибки в расчетах параметров (удельный импульс, тяга, КПД); неработоспособность ключевых систем (ионный источник, ускоритель, нейтрализатор); отсутствие экспериментальных данных или их недостоверность; невозможность применения даже в тестовом режиме 1 – частичное соответствие ТЗ с существенными отклонениями; низкие показатели эффективности (КПД <50%, малый ресурс); проблемы с устойчивостью разряда или эрозией электродов; ограниченные испытания без подтверждения заявленных характеристик; необходимость кардинального изменения конструкции 2 – соответствие основным требованиям, но с замечаниями; стабильная	–	–

		работа только в узком диапазоне режимов; средние показатели (удельный импульс 2000–3000 с, КПД 50–60%); наличие проблем с деградацией материалов или колебаниями тяги; требует доработок для практического использования 3 - полное соответствие заявленным характеристикам; устойчивая работа в расчетных режимах (удельный импульс 3000–4000 с, КПД 60–70%); проведен полный цикл испытаний с положительными результатами; отсутствие критических недостатков, но есть потенциал для оптимизации; 4 - превышение базовых требований по ключевым параметрам; высокая эффективность (удельный импульс > 4000 с, КПД > 70%); долгий ресурс работы (более 10 000 часов); успешные испытания в условиях, близких к эксплуатационным; применение перспективных технологий (магнитоплазменное ускорение, новые материалы); готовность к использованию в реальных миссиях		
--	--	--	--	--

		5 – рекордные показатели (удельный импульс > 5000 с, КПД > 80%); исключительная надежность и ресурс (> 20 000 часов); подтверждение характеристик в натурных космических испытаниях; использование инновационных решений (безэлектродные схемы, альтернативные рабочие тела); соответствие требованиям будущих межпланетных миссий; потенциал для коммерциализации и массового применения		
	Качество изготовления объекта	0 - критические дефекты сборки, делающие двигатель неработоспособным; значительные отклонения от КД; нарушение герметичности камеры, и утечка рабочего тела; несоответствие материалов техническим требованиям; полная непригодность к эксплуатации; 1 - многочисленные дефекты изготовления, влияющие на работоспособность; существенные отклонения геометрических параметров; проблемы с вакуумной плотностью соединений; видимые дефекты поверхности	-	-

		электродов и других критических элементов; требует значительных доработок перед испытаниями; 2 - соответствие основным требованиям с допустимыми отклонениями; наличие незначительных дефектов, не влияющих на основные характеристики; небольшие отклонения в геометрии элементов (в пределах допусков); требует отдельных корректировок перед эксплуатацией; пригоден для испытаний в ограниченном режим; 3 - полное соответствие технической документации; минимальные отклонения от проектных параметров; качественная сборка всех узлов и систем; отсутствие видимых дефектов критических элементов; готов к испытаниям; 4 - прецизионное соответствие всем проектным требованиям; идеальная подгонка всех компонентов; использование материалов высшего качества; отсутствие даже минимальных дефектов; полная готовность к		
--	--	--	--	--

		эксплуатации в штатном режиме; 5 - превышение всех требований к точности изготовления; применение передовых технологий производства; идеальные характеристики всех компонентов; дополнительные усовершенствования по сравнению с проектом; готовность к длительной эксплуатации в экстремальных условиях		
Качество испытательного стенда	Качество разработки модели испытательного стенда	0 - полное несоответствие требованиям к моделированию рабочих процессов; критические ошибки в математическом описании физических процессов; отсутствие ключевых модулей (вакуумная система, диагностика, управление); невозможность адекватного прогнозирования поведения реального стенда; 1 - упрощенное описание основных систем с грубыми допущениями; учет только базовых параметров без детализации процессов;	-	-

		серьезные расхождения с реальными физическими процессами; пригодна только для концептуальных оценок первого приближения; 2 - учет основных систем стенда с приемлемой точностью; наличие модулей вакуумной системы и базовой диагностики; ограниченные возможности прогнозирования нештатных ситуаций; требует существенной доработки для практического применения; 3 - полноценное описание всех основных систем стенда; адекватное моделирование рабочих процессов ЭРД; возможность прогнозирования стандартных; режимов работы пригодна для предварительной отработки испытательных процедур; 4 - детализированное описание всех подсистем с учетом взаимовлияний; модули диагностики высокой точности; возможность моделирования нештатных ситуаций; валидация на реальных экспериментальных данных; пригодна для оптимизации параметров стенда;		
--	--	--	--	--

		5 - полное физически обоснованное описание всех процессов; интеграция с CAD-моделями оборудования; возможность цифрового двойника стенда; высокая точность прогнозирования (погрешность <1%); использование для виртуальных испытаний новых ЭРД		
	Качество изготовления испытательного стенда	0 - грубые нарушения технологических процессов сборки; несоответствие конструкции проектным чертежам более чем на 15%; наличие критических дефектов сварных швов и вакуумных соединений; негерметичность основных систем более допустимых норм в 10 раз; 1 - многочисленные отклонения от проектной документации (5-15%); видимые дефекты механической обработки деталей; нестабильная работа вакуумных насосов; проблемы с калибровкой измерительных систем; 2 - допустимые отклонения в пределах 3-5% от проекта; незначительные дефекты неответственных элементов;	-	-

		стабильная работа в номинальных режимах; периодические сбои в работе диагностического оборудования; требует дополнительной настройки перед испытаниями; 3 - полное соответствие проектной документации; качественная сборка всех узлов и систем; стабильная работа вакуумной системы (остаточное давление $<10^{-5}$ Па); точная калибровка измерительных приборов; готовность к проведению большинства испытаний 4 - прецизионное соответствие проекту (отклонения $<1\%$); использование высококачественных материалов и комплектующих; идеальная герметичность всех систем; автоматизированная система контроля параметров; возможность работы в экстремальных режимах; 5 - превышение проектных характеристик; применение передовых технологий изготовления; наличие дополнительных усовершенствований		
--	--	---	--	--

	Качество эксплуатации испытательного стенда	0 - регулярные критические отказы оборудования; превышение допустимых параметров работы; полное отсутствие системы технического обслуживания; частые повреждения испытываемых ЭРД; эксплуатация запрещена надзорными органами; 1 - частые простои из-за технических неисправностей; нарушения регламентов технического обслуживания; работа на предельных режимах без мониторинга; отсутствие системы предупреждения аварий; повышенный износ критического оборудования; требуется капитальный ремонт; 2 - периодические технические проблемы; базовое соблюдение регламентов ТО; работа преимущественно в штатных режимах; элементарная система мониторинга параметров; средний уровень износа оборудования; требуются улучшения в системе управления; 3 - стабильная работа в штатных режимах; регулярное техническое обслуживание;	Пуско-наладочные работы	0 - критические нарушения технологического процесса; не выполнены основные проверки и тесты; отсутствие документации по наладке; выявлены грубые ошибки монтажа; требуется полный пересмотр работ; 1 - выполнены только базовые операции; частичное соответствие техническим требованиям; отсутствие системы контроля качества; многочисленные замечания по наладке; необходимы существенные доработки; 2 - соблюдены основные технологические нормы; проведены ключевые испытания; имеются незначительные отклонения; требуется дополнительная регулировка; локальные недочеты в документации; 3 - полное соответствие техническому заданию; качественное выполнение всех этапов; минимальное количество замечаний; полный комплект исполнительной документации; готовность к эксплуатационным испытаниям; 4 - превышение требований технической документации; использование передовых методик наладки; автоматизированный контроль параметров; идеальное состояние документации; полная готовность к штатной эксплуатации;
--	--	---	--------------------------------	--

		наличие системы мониторинга основных параметров; минимальное количество нештатных ситуаций; умеренный износ оборудования; соответствие отраслевым стандартам; 4 -бесперебойная работа всех систем; оптимальные режимы эксплуатации; автоматизированная система диагностики; прогнозирующее техническое обслуживание; минимальный износ компонентов; регулярные модернизации и улучшения; 5 баллов - прецизионное управление всеми параметрами; интеллектуальная система прогноза отказов; нулевой неплановый простой; соответствие международным стандартам передового опыта		5 - совершенство всех технологических процессов; применение инновационных решений; полная цифровизация процессов контроля; документация соответствует международным стандартам; возможность использования как образца для других проектов
			Текущее состояние стендовых систем	0 - критический износ основных компонентов; многочисленные неисправности оборудования; превышение допустимых параметров работы; 1 - высокая степень износа оборудования; частые отказы и сбои в работе; ограниченная функциональность; 2 - средний уровень износа компонентов; периодические технические проблемы; работа в ограниченных режимах; 3 - незначительный износ оборудования; стабильная работа в штатных режимах; 4 - минимальный износ компонентов; бесперебойная работа всех систем; 5 - полная исправность всех систем; автоматизированный контроль параметров;
			Техническое обслуживание	0 - отсутствие технического обслуживания; необходимость полной замены систем; 1 - отсутствие плановых ремонтов; требуется капитальный ремонт;

				2 - проведение текущих ремонтов; необходимость модернизации; 3 - полное соответствие техническим требованиям; регулярное техническое обслуживание; 4 - наличие систем мониторинга состояния; профилактическое обслуживание; 5 - предиктивная система обслуживания
Качество проведения испытаний	Качество воспроизведения условий проведения эксперимента	0 - критические отклонения от требуемых параметров (>50%); невозможность поддержания стабильного вакуума; систематические искажения измеряемых параметров; отсутствие контроля; ключевых характеристик эксперимента; 1 - грубые отклонения основных параметров (20-50%); нестабильность рабочих режимов; ограниченный контроль измеряемых величин; значительные погрешности диагностики; данные требуют серьезной корректировки; 2 - допустимые отклонения параметров (10-20%); возможность поддержания базовых условий; наличие основных систем измерения; периодические сбои в работе	-	-

		систем; данные пригодны для ориентировочных оценок; 3 - незначительные отклонения (<10%); стабильное поддержание рабочих условий; полный набор измерительных систем; минимальные искажения измеряемых параметров; данные пригодны для технических отчетов; 4 - точное воспроизведение условий (<5%); прецизионные системы контроля; автоматическая стабилизация параметров; 5 - эталонное воспроизведение условий (<1%); системы активной коррекции в реальном времени; верифицированная методика измерений		
	Качество используемого рабочего тела (чистота состава рабочего тела)	0 - концентрация примесей >10%; наличие недопустимых химических соединений; загрязнение механическими частицами; вызывает эрозию электродов; полностью нарушает рабочий процесс ЭРД; 1 - примеси 5-10% от общего состава; наличие нежелательных химических элементов; видимые признаки	-	-

		загрязнения; существенно снижает ресурс двигателя; 2 - примеси 1-5%; допустимые, но неоптимальные примеси; минимальные механические загрязнения; допустимо для кратковременных испытаний; умеренное влияние на ресурс; 3 - примеси 0.1-1%; соответствует базовым техническим требованиям; нет критических загрязнений; подходит для большинства эксплуатационных режимов; незначительное влияние на долговечность; 4 - примеси 0.01-0.1%; специальная очистка и подготовка оптимальный состав для конкретного типа ЭРД; минимальное влияние на характеристики двигателя; соответствует требованиям длительных миссий; 5 - примеси <0.01%; специальные условия хранения и подачи; максимальный ресурс и эффективность двигателя		
	Качество ПМИ	0 - отсутствие системного подхода к измерениям; критические ошибки в выборе измеряемых параметров;	Качество получаемой измерительной информации	0 - отсутствие методик обработки и верификации данных; полученные результаты не представляют научно-технической ценности;

		несоответствие средств измерения техническим требованиям; 1 - учет только базовых параметров (тяга, потребляемый ток); использование не поверенного оборудования; отсутствие методик оценки погрешностей; нет плана калибровок и поверок; 2 - измерение основных рабочих характеристик ЭРД; наличие поверенного оборудования; частичный учет погрешностей измерений; элементарная система документирования данных; 3 - полный набор измеряемых параметров согласно ТЗ; использование сертифицированного оборудования; применение стандартных методик оценки погрешностей; регулярные калибровки измерительных каналов; 4 - комплексный контроль всех значимых параметров; использование прецизионного измерительного комплекса; автоматизированный сбор и первичная обработка данных;		1 - данные требуют существенной перепроверки; 2 - результаты требуют существенной доработки для точных исследований; 3 - данные пригодны для технических отчетов; 4 - данные полные, подходят для научного анализа и сравнения испытаний; 5 - измерения максимально точные, откалиброванные, синхронизированы; позволяют проводить глубокий анализ, моделирование и оптимизацию параметров ЭРД
			Точность результатов измерений (правильность, прецизионность, повторяемость, воспроизводимость)	0 - результаты сильно отклоняются от истинного значения, значения нестабильны, нет воспроизводимости и повторяемости, полное несоответствие стандартам; 1 - правильность измерений нарушена, данные случайны, разброс значений велик, повторные измерения часто дают разные результаты, воспроизводимость практически отсутствует; 2 - повторяемость слабая, воспроизводимость неудовлетворительная; правильность нестабильна; 3 - допустимый уровень отклонений; правильность приемлема, прецизионность умеренная; повторяемость достигается при

		применение современных методов верификации; 5 - полноценный мониторинг всех параметров в реальном времени; использование эталонных измерительных систем; интегрированная система оценки достоверности данных; автоматическая коррекция методик по результатам измерений; соответствие международным стандартам космических испытаний		стабильных условиях; воспроизводимость ограниченная; 4 - результаты близки к истинным значениям, измерения стабильны, хорошо воспроизводимы; прецизионность высокая, отклонения минимальны; 5 - максимально возможная правильность и прецизионность; повторяемость и воспроизводимость полностью соответствуют требованиям стандартов и методик; результаты надёжны и воспроизводимы в любых условиях
			Диапазон измерений	0 - диапазон измерений не охватывает ключевые параметры работы ЭРД; данные некорректны или отсутствуют; 1 - диапазон сильно ограничен; основные характеристики двигателя не могут быть оценены; наблюдаются значительные погрешности; 2 - частично охвачены основные параметры; остаются существенные пробелы в измерениях; точность данных на грани допустимой; 3 - охвачены большинство рабочих режимов; погрешности в допустимых пределах; данных достаточно для общего анализа; 4 - широкий и детализированный диапазон измерений; высокая точность; зафиксированы все ключевые режимы;

				5 - полный охват всех возможных режимов работы; эталонная точность; данные позволяют проводить углублённый анализ
	Качество измерительной процедуры	0 - полное отсутствие стандартизированного подхода к измерениям; критические методические ошибки в последовательности и технике измерений; использование непригодного оборудования (неповеренного, несоответствующего ТЗ); отсутствие контроля условий измерений (температура, вибрации, эм-помехи); данные не подлежат обработке и не могут быть использованы для анализа; 1 - минимальный набор измерений (только основные параметры: ток, напряжение); ручные измерения без автоматизации; отсутствие плана калибровки и поверки оборудования; нет учета внешних факторов, влияющих на точность; данные требуют полной; перепроверки из-за высокой погрешности; 2 - измерение ключевых параметров (тяга, удельный импульс кпд); частичная автоматизация сбора данных;	Операционная сложность измеряемой процедуры	0 - полное отсутствие методики измерений; необходимое оборудование недоступно; технические требования невыполнимы в имеющихся условиях; 1 - требуется разработка уникальной измерительной системы; необходимо специальное обучение персонала; каждое измерение требует ручной настройки; 2 - используется нестандартное измерительное оборудование; требуется значительная подготовка перед каждым измерением; процедура содержит множество ручных операций; 3 - применяется стандартное, но специализированное оборудование; требуется предварительная настройка системы; 4 - используются серийные измерительные комплексы; минимальная ручная настройка; 5 - полностью автоматизированная измерительная система; стандартные процедуры измерений; минимальное участие оператора; возможность дистанционного управления; готовая методика с подробными инструкциями
				0 - отсутствие визуализации данных; показания невозможно считать; нет доступа к измерительным каналам;
			Удобство считывания измерительной информации	

		периодическая калибровка оборудования; учет основных погрешностей (но без детального анализа); данные пригодны для предварительных выводов, но с ограничениями; 3 - полный набор измерений, согласно ТЗ, автоматизированный сбор данных с фиксацией временных меток регулярные калибровки и поверки оборудования контроль внешних условий (температура, влажность, вибрации) данные достоверны и могут использоваться для отчетов и сертификации; 4 - высокоточные измерения всех параметров, включая второстепенные автоматическая коррекция погрешностей в реальном времени; резервирование измерительных каналов для повышения надежности; использование эталонных датчиков для верификации; 5 - прецизионные измерения с погрешностью менее 0,1%; полная автоматизация и цифровизация процесса измерений; интеграция с системой управления		1 - требуется ручная расшифровка; отсутствие единого интерфейса; частые ошибки отображения; 2 - данные разрознены; ограниченная визуализация; неудобный формат представления; требуется дополнительная обработка; 3 - основные параметры видны; есть базовая визуализация; данные доступны в одном интерфейсе; требуется минимальная интерпретация; 4 - четкая организация данных; хорошая визуализация; автоматическое обновление; удобная навигация по параметрам; 5 - интуитивно понятный интерфейс; адаптивное отображение; многоканальная визуализация; возможность настройки представления;
			Удобство настройки средства измерений	0 - отсутствуют регулировочные элементы; нет доступа к параметрам конфигурации; требуется заводское вмешательство; 1 - необходим специальный инструмент; требуется физическое вмешательство в конструкцию; отсутствует документация; высокий риск повреждения оборудования;

		испытаниями (обратная связь); метрологическое сопровождение на всех этапах; данные признаются эталонными и используются для калибровки других стендов		2 - многоступенчатый сложный процесс; ручной ввод множества параметров; отсутствие автоматизированных процедур; необходим высококвалифицированный персонал; 3 - наличие базовых инструкций; стандартный набор регулировок; частичная автоматизация процесса; требуется средняя квалификация оператора; 4 - интуитивно понятный интерфейс; наличие шаблонов настроек; минимальное количество ручных операций; быстрая калибровка; 5 - полностью автоматизированный процесс; самонастраивающаяся система; интеллектуальные помощники; мгновенное применение изменений; возможность дистанционной конфигурации
	Стандартизованность МВИ	0 - испытания проводятся по произвольным, недокументированным процедурам; нет ссылок на нормативные документы или стандарты; каждый эксперимент проводится по уникальной схеме; результаты невозможно сравнивать между собой;	Стандартизованность методики измерений	0 - методика измерений отсутствует или носит исключительно экспериментальный характер; отсутствуют документированные процедуры; повторяемость измерений не обеспечивается; 1 - методика существует, но слабо формализована; не закреплена в официальных документах; результаты слабо воспроизводимы между

		1 - имеется базовое описание процедуры испытаний; частичное соответствие некоторым отраслевым рекомендациям; отсутствие строгих требований к условиям проведения; нет системы контроля соблюдения методики; требуется существенная доработка для воспроизводимости; 2 - соответствие отдельным национальным стандартам; определены ключевые параметры контроля; имеются шаблоны протоколов испытаний; недостаточно детализированы критические процедуры; 3 - четкие требования ко всем этапам испытаний; использование поверенного оборудования; наличие системы контроля качества измерений; возможность воспроизведения результатов на аналогичных стендах; 4 - включение передовых методов контроля и измерений; автоматизированная система документирования; регулярные аудиты соответствия методики;		различными лабораториями или операторами; 2 - методика частично формализована, но используются разные подходы в разных организациях; частично описаны условия и процедуры измерений; результаты ограниченно сравнимы; 3 - методика формализована в рамках одной или нескольких организаций; имеются внутренние стандарты; обеспечена приемлемая воспроизводимость; возможна адаптация под международные требования; 4 - методика документирована в виде национального стандарта (например, ГОСТ, ТУ); выполнение измерений возможно в различных лабораториях с высокой степенью согласованности; поддерживается прослеживаемость; 5 - полная стандартизация; методика признана на международном уровне (например, ISO); поддерживается калибровка, верификация и валидация; обеспечена высокая точность и воспроизводимость в любых условиях
			Стандартизованность средства измерения	0 - измерительное средство отсутствует или представляет собой лабораторную сборку без стабильных характеристик; нет данных о точности и поверке; 1 - используется уникальное или самодельное устройство без верифицированной конструкции;

		возможность кросс-валидации с другими лабораториями; 5 - полное соответствие требованиям космических агентств; интеграция с системами менеджмента качества; постоянный мониторинг и улучшение процедур; используется для сертификации других испытательных центров		отсутствуют документы на допуски и погрешности; результаты нестабильны; 2 - средство измерений создано по типовой схеме, но без сертификации; частично известны характеристики; возможно повторение измерений в тех же условиях; 3 - средство разработано по внутренним стандартам организации; имеется техническая документация; параметры стабильны; возможна поверка внутри организации; 4 - средство имеет национальную сертификацию (например, внесено в реестр средств измерений); известны метрологические характеристики; возможно использование в аккредитованных лабораториях; 5 - средство измерений сертифицировано по международным стандартам (например, ISO); прошла государственную поверку; применимо для точных измерений с международной прослеживаемостью
Качество автоматизации процесса испытаний	Качество автоматизации управления процессом	0 - не удовлетворяет установленным требованиям пользователей; 1 - частичная автоматизация системы управления процессом (от 1 до 25 % параметров); 2 - частичная автоматизация системы управления процессом (от 25 % до 50 % параметров); 3 - частичная автоматизация	Качество разработки автоматизированной системы управления процессом	0 - не удовлетворяет установленным требованиям пользователей; 1 - частичная автоматизация системы управления процессом (от 1 до 25 % параметров); 2 - частичная автоматизация системы управления процессом (от 25 % до 50 % параметров); 3 - частичная автоматизация системы управления процессом

		системы управления процессом (от 50 % до 75 % параметров); 4 - полностью удовлетворяет установленным требованиям пользователей (от 75 % до 100 % параметров); 5 - "восхищенные требования" (интеграция систем управления процессом и регистрации данных и/или обработки результатов измерений)		(от 50 % до 75 % параметров); 4 - полностью удовлетворяет установленным требованиям пользователей (от 75 % до 100 % параметров); 5 - "восхищенные требования" (интеграция автоматизированных систем управления процессом и регистрации данных и/или обработки результатов измерений)
			Качество автоматизированной системы управления процессом	0 - не автоматизировано; 1 - присутствуют грубые ошибки в статическом/динамическом/переходном режимах системы управления процессом (от 66% до 100%); 2 - присутствуют ошибки в статическом/динамическом/переходном режимах системы управления процессом (от 33% до 66%); 3 - присутствуют частичные ошибки в статическом/динамическом/переходном режимах системы управления процессом (от 1% до 33%); 4 - ошибки в статическом/динамическом/переходном режимах системы управления процессом отсутствуют; 5 - "восхищенные требования"
			Качество автоматизации	0 - не удовлетворяет установленным требованиям пользователей;

			управления процессом	1 - частичная автоматизация системы управления процессом (от 1 до 25 % параметров); 2 - частичная автоматизация системы управления процессом (от 25 % до 50 % параметров); 3 - частичная автоматизация системы управления процессом (от 50 % до 75 % параметров); 4 - полностью удовлетворяет установленным требованиям пользователей (от 75 % до 100 % параметров); 5 - "восхищенные требования" (интеграция систем управления процессом и регистрации данных и/или обработки результатов измерений)
			Качество эксплуатации автоматизированной системы управления процессом	0 - не эксплуатируется; 1 - эксплуатируется частично (от 1 до 25 % параметров); 2 - эксплуатируется частично (от 25 % до 50 % параметров); 3 - эксплуатируется частично (от 50 % до 75 % параметров); 4 - эксплуатируется полностью (от 75 % до 100 % параметров); 5 - "восхищенные требования" (эксплуатируется методом интеграции автоматизированных систем управления процессом и регистрации данных и/или обработки результатов измерений)

	Качество автоматизации регистрации первичных данных	0 - не удовлетворяет установленным требованиям пользователей; 1 - частичная автоматизация регистрации первичных данных (от 1 до 25 % параметров); 2 - частичная автоматизация регистрации первичных данных (от 25 % до 50 % параметров); 3 - частичная автоматизация регистрации первичных данных (от 50 % до 75 % параметров); 4 - полностью удовлетворяет установленным требованиям пользователей (от 75 % до 100 % параметров); 5 - "восхищенные требования" (интеграция систем управления процессом и регистрации данных и/или обработки результатов измерений)	Качество разработки автоматизированной системы регистрации первичных данных	0 - не удовлетворяет установленным требованиям пользователей; 1 - частичная автоматизация системы регистрации первичных данных (от 1 до 25 % параметров); 2 - частичная автоматизация системы регистрации первичных данных (от 25 % до 50 % параметров); 3 - частичная автоматизация системы регистрации первичных данных (от 50 % до 75 % параметров); 4 - полностью удовлетворяет установленным требованиям пользователей (от 75 % до 100 % параметров); 5 - "восхищенные требования" (интеграция автоматизированных систем регистрации данных и обработки результатов измерений)
			Качество автоматизированной системы регистрации первичных данных	0 - не удовлетворяет установленным требованиям пользователей; 1 - частичная автоматизация системы регистрации первичных данных (от 1 до 25 % параметров); 2 - частичная автоматизация системы регистрации первичных данных (от 25 % до 50 % параметров); 3 - частичная автоматизация системы регистрации первичных данных (от 50 % до 75 % параметров); 4 - полностью удовлетворяет установленным требованиям пользователей (от 75 % до 100 % параметров);

				5 - "восхищенные требования" (интеграция системы управления процессом с системой регистрации данных и/или обработки результатов измерений)
			Качество автоматизации регистрации первичных данных	0 - не удовлетворяет установленным требованиям пользователей; 1 - частичная автоматизация регистрации первичных данных (от 1 до 25 % параметров); 2 - частичная автоматизация регистрации первичных данных (от 25 % до 50 % параметров); 3 - частичная автоматизация регистрации первичных данных (от 50 % до 75 % параметров); 4 - полностью удовлетворяет установленным требованиям пользователей (от 75 % до 100 % параметров); 5 - "восхищенные требования" (интеграция систем управления процессом и регистрации данных и/или обработки результатов измерений)
			Качество эксплуатации автоматизированной системы регистрации первичных данных	0 - не эксплуатируется; 1 - эксплуатируется частично (от 1 до 25 % параметров); 2 - эксплуатируется частично (от 25 % до 50 % параметров); 3 - эксплуатируется частично (от 50 %

				до 75 % параметров); 4 - эксплуатируется полностью (от 75 % до 100 % параметров); 5 - "восхищенные требования" (эксплуатируется методом интеграции автоматизированных систем регистрации данных и обработки результатов измерений)
	Качество автоматизации обработки результатов измерений	0 - не удовлетворяет установленным требованиям пользователей; 1 - частичная автоматизация обработки результатов измерений (от 1 до 25 % параметров); 2 - частичная автоматизация обработки результатов измерений (от 25 % до 50 % параметров); 3 - частичная автоматизация обработки результатов измерений (от 50 % до 75 % параметров); 4 - полностью удовлетворяет установленным требованиям пользователей (от 75 % до 100 % параметров); 5 - "восхищенные требования" (интеграция систем регистрации данных и обработки результатов измерений)	Качество разработки автоматизированной системы обработки результатов измерений	0 - не удовлетворяет установленным требованиям пользователей; 1 - частичная автоматизация системы обработки результатов измерений (от 1 до 25 % параметров); 2 - частичная автоматизация системы обработки результатов измерений (от 25 % до 50 % параметров); 3 - частичная автоматизация системы обработки результатов измерений (от 50 % до 75 % параметров); 4 - полностью удовлетворяет установленным требованиям пользователей (от 75 % до 100 % параметров); 5 - "восхищенные требования" (обработка результатов измерений по нескольким методам: линеаризации, приведения, бутстрап)
			Качество автоматизированной системы обработки результатов измерений	0 - не удовлетворяет установленным требованиям пользователей; 1 - частичная автоматизация системы обработки результатов измерений (от 1 до 25 % параметров); 2 - частичная автоматизация системы обработки результатов измерений (от

				25 % до 50 % параметров); 3 - частичная автоматизация системы обработки результатов измерений (от 50 % до 75 % параметров); 4 - полностью удовлетворяет установленным требованиям пользователей (от 75 % до 100 % параметров); 5 - "восхищенные требования" (интеграция системы регистрации данных с автоматизированной системой обработки результатов измерений)
			Качество автоматизации обработки результатов измерений	0 - не удовлетворяет установленным требованиям пользователей; 1 - частичная автоматизация обработки результатов измерений (от 1 до 25 % параметров); 2 - частичная автоматизация обработки результатов измерений (от 25 % до 50 % параметров); 3 - частичная автоматизация обработки результатов измерений (от 50 % до 75 % параметров); 4 - полностью удовлетворяет установленным требованиям пользователей (от 75 % до 100 % параметров); 5 - "восхищенные требования" (интеграция систем регистрации данных и обработки результатов измерений)
			Качество эксплуатации	0 - не эксплуатируется; 1 - эксплуатируется частично (от 1 до

			автоматизированной системы обработки результатов измерений	25 % параметров); 2 - эксплуатируется частично (от 25 % до 50 % параметров); 3 - эксплуатируется частично (от 50 % до 75 % параметров); 4 - эксплуатируется полностью (от 75 % до 100 % параметров); 5 - "восхищенные требования" (графическое представление (сравнение) трех методов обработки результатов измерений: линеаризации, приведения, бутстрап)
Качество кадрового обеспечения	-	0 - полное отсутствие квалифицированного персонала; нет разделения обязанностей между операторами; отсутствие программ подготовки и аттестации; частые аварии из-за человеческого фактора; невозможность проведения полноценных испытаний 1 - наличие 1-2 специалистов с базовой подготовкой; нет четкого распределения зон ответственности; случайное обучение без системы; высокая зависимость от отдельных сотрудников; частые ошибки при проведении сложных испытаний 2 - укомплектованный штат с основными специалистами;	-	-

		есть разделение по основным направлениям работ; периодическое обучение без системы сертификации; средний уровень профессиональных ошибок; способность проводить только стандартные испытания 3 - полный штат квалифицированных специалистов; четкое распределение функциональных обязанностей; регулярное обучение и внутренняя аттестация; наличие методических документов и инструкций; возможность проведения большинства типов испытаний 4 - штат высококвалифицированных специалистов; глубокая специализация по направлениям работ; система непрерывного профессионального развития; возможность проведения сложных и ответственных испытаний; наличие кадрового резерва 5 - команда экспертов международного уровня; перекрестная специализация сотрудников; собственная		
--	--	---	--	--

		система подготовки и сертификации; участие в международных образовательных программах; возможность разработки новых методик испытаний; постоянное совершенствование профессиональных стандартов		
Безопасность процесса испытаний	Безопасность объекта	0 - отсутствие систем аварийной защиты ЭРД; регулярные критические 1 - примитивные аварийной средства защиты ЭРД; 2 - базовые защитные системы с ограниченной эффективностью; 3 - полный набор стандартных защитных систем ЭРД; 4 - продвинутое системы защиты и аварийного отключения ЭРД; 5 - многоуровневая система защиты с резервированием; предиктивная аналитика для предупреждения аварий	-	-
	Безопасность испытательного стенда	0 - полное отсутствие систем безопасности; частые аварии с повреждением оборудования; открытые высоковольтные цепи; неконтролируемые выбросы плазмы; отсутствие аварийных протоколов; 1 - минимальные меры безопасности; устаревшие	-	-

		системы защиты; периодические утечки рабочего тела; отсутствие автоматического отключения; 2 - условно безопасный стенд - базовые системы защиты; ручное аварийное отключение; 3 - полный комплект защитных систем; автоматическое отключение при авариях; 4 - дублированные системы защиты; непрерывный мониторинг параметров; автоматизированные протоколы безопасности; 5 - "умные" системы предиктивной безопасности; полная автоматизация защитных процессов; нулевая аварийность		
	Безопасность средств измерения	0 - отсутствие защиты от высокого напряжения; измерительные цепи не изолированы; нет защиты от электромагнитных помех; 1 - минимальная изоляция токоведущих частей; отсутствие защиты от перегрузок; эпизодические сбои в работе; использование устаревшего оборудования; требуется постоянный контроль оператора.	-	-

		2 - базовая изоляция и защита; наличие простейших предохранителей; периодические поверки оборудования; соответствие минимальным требованиям; 3 - полная гальваническая развязка; автоматическая защита от перегрузок; 4 - двойная изоляция и защита; встроенные системы диагностики; автоматический контроль параметров; 5 - полная защита всех цепей; "умные" системы самодиагностики; резервирование измерительных каналов		
	Безопасность процесса испытаний (в части влияния на оператора и окружающую среду)	0 - постоянное превышение ПДК вредных веществ; отсутствие средств индивидуальной защиты; неизолированные высоковольтные элементы в зоне доступа; неконтролируемые выбросы токсичных продуктов реакции; регулярные аварии с угрозой жизни персонала; 1 - периодическое превышение ПДК в 5-10 раз; минимальные СИЗ (респираторы, перчатки); ограниченный мониторинг параметров среды;	-	-

		эпизодические утечки рабочего тела; риск профессиональных заболеваний; 2 - превышение ПДК в 2-5 раз; базовый комплект СИЗ; локальная вентиляция; плановые замеры среды; возможны незначительные инциденты; 3 - соответствие ПДК; полный комплект СИЗ; принудительная вентиляция; непрерывный мониторинг; 4 - показатели ниже ПДК; индивидуальные датчики состояния; автоматизированная система защиты; регулярные медосмотры; 5 - полная изоляция опасных процессов; "умные" системы защиты оператора; замкнутый цикл работы		
Экономичность процесса испытаний	Трудоемкость	0 - полностью ручной процесс; подготовка занимает 2+ недели; особо сложные настройки; обработка данных вручную; требуется 13+ специалистов; необходимы работы в несколько смен; 1 - преимущественно ручные операции; длительная подготовка (неделя); сложная калибровка оборудования; трудоемкая обработка	Разработки модели объекта	0 - моделирование не проводится; 0 ч; 1 - используется готовая упрощённая модель или шаблон; минимальные доработки; до 10 ч; 2 - создаётся простая аналитическая или эмпирическая модель; ограниченное число параметров; 10–50 ч; 3 - разрабатывается полуэмпирическая или физическая модель с верификацией; требует расчетов и начальной автоматизации; 50–200 ч;

		результатов; задействовано 9-12 человек 2 - комбинированные процессы (авто+ручные); многоступенчатая подготовка (2-3 дня); комплексная настройка параметров; ручная обработка части данных; требуется команда 6-8 специалистов; 3 - частичная автоматизация; несколько ручных операций; подготовка занимает 1 рабочий день; полуавтоматическая обработка данных; задействовано 4-5 человек; 4 - автоматизированные основные процессы; минимальное ручное вмешательство; быстрая подготовка (до 4 часов); автоматическая обработка результатов; требуется 2-3 специалиста; 5 - полностью автоматизированный процесс; отсутствие ручных операций; самонастраивающиеся системы; мгновенная обработка данных; требуется 1 оператор для контроля		4 - строится комплексная модель с учётом нескольких физических процессов (электрических, тепловых); используются специализированные программные среды; 200–600 ч; 5 - многокомпонентная и многопараметрическая модель с высокой степенью детализации (например, МКЭ + управление + термомеханика); требует междисциплинарного подхода и моделирования на уровне системы; от 600 ч и выше, вплоть до 1500+ ч.
			Изготовления объекта	0 - изготовление не требуется; 0 ч; 1 - сборка из готовых или стандартных компонентов; до 20 ч; 2 - простая сборка с частичной механической обработкой; 20–80 ч; 3 - точная сборка, изготовление некоторых уникальных деталей; 80–250 ч; 4 - сложные компоненты, нестандартные детали, требуются специализированные технологии; 250–800 ч; 5 - многоступенчатая сборка, высокая точность, прецизионная обработка, работа в специализированных условиях; от 800 ч и выше, до 2000+ ч.
			Разработки модели испытательного стенда	0 - модель стенда не разрабатывается; используется типовая стенд без адаптации или моделирования; 0 ч;

				1 - используется готовая или сильно упрощённая схема, не учитывающая реальные процессы; до 20 ч; 2 - создаётся простая модель с базовыми компонентами (вакуум, питание, крепёж); ориентирована на концептуальную проверку; 20–80 ч; 3 - разрабатывается функциональная модель стенда с учётом размещения ЭРД, потоков, систем измерения; возможно 3D-моделирование и первичная проверка на симуляторах; 80–250 ч; 4 - комплексная модель с интеграцией всех подсистем (вакуум, электропитание, датчики, системы управления); имитация рабочих режимов; используется САПР/CAE-среда; 250–700 ч; 5 - высокоточная цифровая модель с полной интеграцией физики процессов (газодинамика, электрика, теплопередача, механика); предназначена для проверки поведения реального ЭРД в условиях испытаний; от 700 ч и выше, до 1500+ ч.
			Изготовления испытательного стенда	0 - испытательный стенд не изготавливается; 0 ч; 1 - сборка из готовых модулей и стандартных компонентов, простая конструкция; до 30 ч; 2 - изготовление и сборка стенда с использованием некоторых нестандартных деталей, базовые

				системы управления и измерений; 30–100 ч; 3 - изготовление стенда с уникальными узлами, интеграция нескольких подсистем (вакуум, питание, датчики), тестирование; 100–300 ч; 4 - сложный стенд с высокой точностью компонентов, специализированным оборудованием, сложной электрикой и автоматикой; 300–800 ч; 5 - крупномасштабный высокотехнологичный стенд, требующий прецизионного изготовления, монтажа, калибровки, работы в чистых помещениях, междисциплинарной команды; от 800 ч и выше, до 2000+ ч.
			Разработки ПМИ	0 - программа методики не разрабатывается; отсутствует формальная документация; 0 ч; 1 - составлен минимальный черновой вариант документа с основными пунктами; не более нескольких страниц; до 10 ч; 2 - разработан базовый документ с описанием основных процедур и требований; минимальная структура и оформление; 10–40 ч; 3 - создана подробная методика с разделами по подготовке, проведению и обработке результатов измерений; оформлены схемы и таблицы; 40–120 ч;

				4 - программа методики включает детальные инструкции, требования к оборудованию, меры контроля качества, примеры расчётов; согласование с экспертами; 120–300 ч; 5 - разработан комплексный стандартный документ, включающий подробную регламентацию, нормативные ссылки, процедуры валидации, регламентированное оформление, многократные рецензии и согласования; от 300 ч и выше, до 700+ ч.
			Разработки МВИ	0 - методика не разрабатывается; испытания выполняются без регламентированных процедур; 0 ч; 1 - составлен упрощённый черновик методики с базовыми шагами; минимальное оформление; до 15 ч; 2 - разработан базовый документ с основными этапами испытаний, требованиями к оборудованию и безопасности; простая структура; 15–50 ч; 3 - создана подробная методика с описанием процедур, параметров измерений, критериев оценки результатов и оформления протоколов; оформлены схемы и таблицы; 50–150 ч; 4 - методика включает детальные инструкции по подготовке, проведению и анализу испытаний, требования к калибровке и контролю

				качества, рекомендации по устранению неисправностей; согласование с экспертами; 150–350 ч; 5 - комплексный стандартный документ с нормативными ссылками, многоступенчатыми процедурами, регламентом по безопасности и контролю, требованиями к персоналу и оборудованию, многоуровневой валидацией; от 350 ч и выше, до 800+ ч.
			Разработки автоматизированной системы управления процессом	0 - система не разрабатывается; управление испытаниями осуществляется вручную; 0 ч; 1 - разработка простого скрипта или программы для частичной автоматизации одного этапа испытаний; минимальный функционал; до 40 ч; 2 - создание базового программного обеспечения с простым пользовательским интерфейсом, автоматическим сбором данных с ограниченным набором функций управления; 40–150 ч; 3 - разработка системы с расширенным функционалом: управление несколькими устройствами, мониторинг параметров в реальном времени, базовые алгоритмы контроля и безопасности; интеграция с оборудованием; 150–400 ч; 4 - создание комплексной автоматизированной системы с

				пользовательским интерфейсом, гибкими настройками, обработкой данных, логированием и средствами диагностики; обеспечение отказоустойчивости; 400–1000 ч; 5 - разработка масштабируемой, модульной системы управления с интеграцией ИИ-алгоритмов, комплексным контролем всех параметров, системой безопасности, поддержкой удалённого доступа и полной валидацией; от 1000 ч и выше, до 2500+ ч.
			Разработки автоматизированной системы регистрации первичных данных	0 - система регистрации данных не разрабатывается; данные фиксируются вручную; 0 ч; 1 - простая программа или скрипт для сбора данных с одного датчика или прибора; базовая запись в файл; до 30 ч; 2 - разработка системы сбора данных с нескольких приборов, простая обработка и сохранение в стандартном формате (например, CSV); минимальный интерфейс; 30–100 ч; 3 - создание более функциональной системы с автоматической синхронизацией данных, проверкой целостности, базовыми средствами визуализации и экспортом данных; интеграция с оборудованием; 100–300 ч; 4 - комплексная система регистрации с расширенными возможностями:

				многоканальный сбор, фильтрация, предварительная обработка, управление базой данных, создание отчетов; высокая надежность и безопасность данных; 300–800 ч; 5 - масштабируемая модульная система с возможностью интеграции в общую автоматизированную систему управления, продвинутыми алгоритмами обработки и анализа данных, веб-интерфейсом и поддержкой удалённого доступа; полная валидация и сопровождение; от 800 ч и выше, до 2000+ ч.
			Разработки автоматизированной системы обработки результатов измерений	0 - обработка результатов проводится вручную, без автоматизации; 0 ч; 1 - простая программа для базовой обработки данных (например, усреднение, фильтрация); ограниченный функционал; до 40 ч; 2 - разработка системы с набором стандартных функций обработки (статистический анализ, базовая визуализация), автоматическим формированием простых отчетов; 40–120 ч; 3 - создание программного обеспечения с расширенными функциями: комплексный статистический анализ, многоформатный экспорт, графическая визуализация, поддержка различных форматов входных данных; 120–350 ч;

				4 - комплексная система обработки с возможностью настройки алгоритмов, автоматическим выявлением аномалий, интеграцией с базами данных и системой отчетности; использование методов обработки косвенных измерений; высокая надежность и масштабируемость; 350–900 ч; 5 - модульная, масштабируемая система обработки с применением машинного обучения и интеллектуальных алгоритмов анализа, поддержкой многопользовательского режима, веб-интерфейсом, полной валидацией и сопровождением; использование методов обработки косвенных измерений; от 900 ч и выше, до 2000+ ч.
	Время проведения исследовательских испытаний	0 - использование существующего лабораторного оборудования; кратковременные тесты (до 1 часа); стандартные рабочие тела; минимальное потребление энергии; не требуется дополнительный персонал; 1 - применение доступных компонентов; испытания продолжительностью 1-4 часа; 2 - использование специализированного оборудования; тесты длительностью 4-12 часов;	-	-

		3 - задействование уникальных стендов; многосуточные испытания; комплексная диагностика; использование дорогостоящих материалов; 4 - эксклюзивное испытательное оборудование; ресурсные тесты (недели работы); 5 - проектирование специального стенда; месяцы непрерывных испытаний; уникальные измерительные системы		
	Стоимость	0 - испытания не проводятся; 0 у.е.; 1 - базовые испытания на минимальном оборудовании с ограниченным набором измерений; до 10 000 у.е.; 2 - испытания с использованием стандартного стенда, базовое оборудование, ограниченный цикл тестов; 10 000–50 000 у.е.; 3 - комплексные испытания с несколькими режимами работы, использование специализированных приборов и стендов; 50 000–150 000 у.е.; 4 - многоэтапные испытания с применением уникального оборудования, дополнительными	Разработки модели объекта	0 - модель не разрабатывается; 0 у.е.; 1 - создание простой упрощённой модели на основе готовых шаблонов или данных; минимальные затраты; до 5 000 у.е.; 2 - разработка базовой аналитической или эмпирической модели с ограниченным числом параметров; использование стандартных программных средств; 5 000–20 000 у.е.; 3 - создание полуэмпирической или физической модели с необходимостью проведения расчетов и начальной валидации; использование специализированных программных комплексов; 20 000–60 000 у.е.; 4 - разработка комплексной модели с учётом множества физических процессов, интеграция с внешними

		измерениями и анализом, привлечением сторонних экспертов; 150 000–500 000 у.е.; 5 - масштабные испытания с использованием передового оборудования, созданием опытных образцов, проведением длительных циклов, привлечением большой команды и высокотехнологичных ресурсов; от 500 000 у.е. и выше		системами, подробная валидация и оптимизация; 60 000–150 000 у.е.; 5 - создание многопараметрической, детализированной модели с использованием МКЭ, управления, термомеханики и других сложных методов; привлечение междисциплинарных команд и длительная валидация; от 150 000 у.е. и выше
			Изготовления объекта	0 - изготовление не производится; 0 у.е.; 1 - изготовление прототипа из стандартных и недорогих компонентов; минимальные затраты; до 10 000 у.е.; 2 - изготовление простого ЭРД с использованием некоторых нестандартных деталей, базовые материалы; 10 000–50 000 у.е.; 3 - изготовление ЭРД со сложными узлами, применением специализированных материалов и технологий; 50 000–150 000 у.е.; 4 - производство высокоточного ЭРД с применением дорогих материалов, прецизионной обработки, частичной автоматизацией; 150 000–400 000 у.е.; 5 - изготовление опытного или опытно-промышленного образца с использованием новейших материалов и технологий, сложной электроники и механообработки; от 400 000 у.е. и выше

			Разработки модели испытательного стенда	0 - модель не разрабатывается; 0 у.е.; 1 - создание простой упрощённой модели стенда, базовые расчёты и эскизы; до 5 000 у.е.; 2 - разработка базовой 3D-модели с основными элементами, базовые инженерные расчёты; 5 000–20 000 у.е.; 3 - создание детальной модели с учётом функциональных подсистем, проведение инженерного анализа (технические, тепловые, механические); 20 000–60 000 у.е.; 4 - разработка комплексной модели с точной геометрией, интеграцией всех систем, численным моделированием процессов (например, CFD, МКЭ); 60 000–150 000 у.е.; 5 - создание многопараметрической модели с учётом взаимодействия физических процессов, оптимизацией, валидацией и подготовкой для цифрового двойника; от 150 000 у.е. и выше
			Изготовления испытательного стенда	0 - испытательный стенд не изготавливается; 0 у.е.; 1 - простой стенд из стандартных компонентов, базовые функциональные возможности; до 20 000 у.е.; 2 - стенд с некоторыми нестандартными элементами, ограниченный набор функций и оборудования; 20 000–70 000 у.е.;

				3 - полноценный стенд с интеграцией нескольких систем (вакуум, электропитание, измерения), использование специализированных компонентов; 70 000–200 000 у.е.; 4 - сложный стенд с прецизионным оборудованием, автоматикой и системой управления, высокая надежность и безопасность; 200 000–500 000 у.е.; 5 - крупномасштабный, высокотехнологичный стенд с уникальными характеристиками, полным комплексом измерений, автоматизацией и контролем в реальном времени; от 500 000 у.е. и выше
			Разработки ПМИ	0 - программа методики не разрабатывается; 0 у.е.; 1 - подготовка упрощенного черновика с основными пунктами; минимальное оформление; до 1 000 у.е.; 2 - создание базового документа с описанием основных процедур и требований; простая структура и оформление; 1 000–5 000 у.е.; 3 - разработка подробной методики с разделами по подготовке, проведению и обработке результатов измерений; оформление схем и таблиц; 5 000–15 000 у.е.; 4 - программа методики с детальными инструкциями, требованиями к оборудованию, контролем качества,

				согласованием с экспертами; 15 000–40 000 у.е.; 5 - комплексный документ с нормативными ссылками, процедурами валидации, регламентированным оформлением, множественными рецензиями и согласованиями; от 40 000 у.е. и выше
			Разработки МВИ	0 - программа методики не разрабатывается; 0 у.е.; 1 - подготовка упрощённого черновика с базовыми шагами и минимальным оформлением; до 1 500 у.е.; 2 - создание базового документа с основными этапами испытаний, требованиями к оборудованию и безопасности; простая структура; 1 500–6 000 у.е.; 3 - разработка подробной методики с описанием процедур, параметров измерений, критериев оценки результатов и оформления протоколов; оформление схем и таблиц; 6 000–18 000 у.е.; 4 - программа методики включает детальные инструкции по подготовке, проведению и анализу испытаний, требования к калибровке и контролю качества, рекомендации по устранению неисправностей; согласование с экспертами; 18 000–45 000 у.е.; 5 - комплексный стандартный документ с нормативными ссылками, многоступенчатыми процедурами,

				регламентом по безопасности и контролю, требованиями к персоналу и оборудованию, многоуровневой валидацией; от 45 000 у.е. и выше
			Расходуемых в процессе испытаний материалов	0 - материалы не расходуются, испытания не требуют затрат на материалы; 0 у.е.; 1 - используются минимальные объемы или дешевые материалы, очень низкая стоимость, от 1 до 10 у.е.; 2 - материалы небольшого количества или средней цены, низкая стоимость, от 11 до 50 у.е.; 3 - расходуются материалы средней стоимости или в умеренных количествах, средняя стоимость, от 51 до 100 у.е.; 4 - используются дорогие материалы или большие объемы, высокая стоимость, от 101 до 200 у.е.; 5 - значительные затраты на редкие или специализированные материалы, очень высокая стоимость, свыше 200 у.е.
			Разработки автоматизированной системы управления процессом	0 - разработка не требуется, затраты отсутствуют, 0 у.е.; 1 - минимальная разработка с базовым функционалом, очень низкая стоимость, от 1 до 50 у.е.; 2 - ограниченный функционал, небольшое количество модулей, низкая стоимость, от 51 до 200 у.е.; 3 - разработка со средним функционалом и интеграцией, средняя стоимость, от 201 до 500 у.е.;

				4 - расширенный функционал, высокая степень автоматизации и надежности, высокая стоимость, от 501 до 1000 у.е.; 5 - комплексная система с полной автоматизацией, адаптивностью и поддержкой, очень высокая стоимость, свыше 1000 у.е.
			Разработки автоматизированной системы регистрации первичных данных	0 - разработка не требуется, затраты отсутствуют, 0 у.е.; 1 - минимальная разработка с простым интерфейсом и базовым функционалом, очень низкая стоимость, от 1 до 30 у.е.; 2 - ограниченный функционал с базовой обработкой данных, низкая стоимость, от 31 до 100 у.е.; 3 - система со средней сложностью, включая автоматический сбор и хранение данных, средняя стоимость, от 101 до 300 у.е.; 4 - расширенный функционал с возможностью интеграции с другими системами и аналитикой, высокая стоимость, от 301 до 700 у.е.; 5 - комплексная система с полной автоматизацией, масштабируемостью и поддержкой в реальном времени, очень высокая стоимость, свыше 700 у.е.
			Разработки автоматизированной системы обработки результатов измерений	0 - разработка не требуется, затраты отсутствуют, 0 у.е.; 1 - минимальная разработка с базовой обработкой данных и простым интерфейсом, очень низкая стоимость, от 1 до 40 у.е.;

				2 - ограниченный функционал с базовыми алгоритмами анализа, низкая стоимость, от 41 до 150 у.е.; 3 - система средней сложности с расширенными методами обработки и визуализацией данных, средняя стоимость, от 151 до 400 у.е.; 4 - расширенный функционал с интеграцией в другие системы и поддержкой сложных моделей, высокая стоимость, от 401 до 900 у.е.; 5 - комплексная система с полной автоматизацией, адаптивными алгоритмами и поддержкой в реальном времени, очень высокая стоимость, свыше 900 у.е.
Экологичность процесса испытаний	Экологичность процесса испытаний	0 - полное отсутствие экологических мер; выброс токсичных веществ без очистки; опасные отходы не утилизируются; грубые нарушения всех норм; прямая угроза здоровью; 1 - минимальное соблюдение требований; примитивные методы очистки (<50% эффективности); нерегулярный вывоз отходов; нет мониторинга загрязнений; превышения ПДК; 2 - частичное соответствие стандартам; базовые системы очистки (50-70% эффективности);	-	-

		периодический контроль выбросов; утилизация с нарушениями; превышения ПДК в 2-5 раз; 3 - полное соответствие национальным нормам; стандартные очистные системы (70-85% эффективности); регулярный экологический мониторинг; организованная утилизация; незначительные превышения ПДК; 4 - соответствие международным стандартам; продвинутые системы очистки (85-95% эффективности); непрерывный мониторинг; современная переработка отходов; отсутствие превышений ПДК; использование экологических рабочих тел; 5 - превышение строгих международных норм; замкнутые циклы (>95% эффективности); полная переработка отходов; "зеленые" технологии; постоянное улучшение экопоказателей		
--	--	--	--	--

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

**Программа и методика проведения исследовательских испытаний
высокочастотного ионного двигателя с повышенной экономичностью**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»
(МАИ)**

**ПРОГРАММА И МЕТОДИКА
ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ИСПЫТАНИЙ
ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОВЫШЕННОЙ
ЭКОНОМИЧНОСТЬЮ**

ПМИ-208-207-25

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	178
1 Объект испытаний, его состав и назначение	179
2 Нормативные ссылки	179
3 Условные обозначения и сокращения	180
3.1 Условные обозначения	180
3.2 Сокращения	180
4 Требования к проведению измерений и программа методика испытаний	181
4.1 Требования к средствам измерения	181
4.2 Требования к метрологическому обеспечению измерений	181
4.3 Требования к условиям проведения исследовательских испытаний	182
5 Методика исследовательских испытаний ВЧИД.....	182
5.1 Внешний осмотр ВЧИД, проверка комплектности, проверка качества сборки	182
6.1 Испытания по определению параметров ВЧИД	183
7 Обработка результатов измерений	188
8 Отчетность	192
Приложение А.....	193
Перечень средств измерения и оборудования для контроля и испытаний ВЧИД..	193
Приложение Б.....	194
Циклограмма запуска ВЧИД с лабораторными блоками питания.....	194
Приложение В.....	195
Форма протокола испытаний.....	195

Введение

Настоящий документ «Программа и методика проведения исследовательских испытаний высокочастотного ионного двигателя с повышенной экономичностью» предусматривает оценку возможностей использования метода управления подводимой мощностью и расходом рабочего тела для оптимизации рабочих режимов высокочастотного ионного двигателя с повышенной экономичностью с различными значениями показателей точности измерений.

Необходимый уровень точности измерений определяется экономической целесообразностью и экономическим интересом, а также назначением результатов измерений с учетом соблюдения требований нормативных правовых актов Российской Федерации к показателям точности измерений.

1 Объект испытаний, его состав и назначение

1.1 Объектом испытаний (исследовательских испытаний) является лабораторный образец высокочастотного двигателя (ВЧИД), работающий на газообразном рабочем теле.

1.2 Лабораторный образец ВЧИД предназначен для проведения исследовательских испытаний – испытаний с целью определения основных интегральных параметров двигателя.

1.3 В состав лабораторного образца ВЧИД входят:

- двигательный блок (1 штука), включающий следующие основные подузлы: устройство ионизации – разрядная камера (РК) с индуктором;
- узел ускорения – ионно-оптическая система (ИОС), нейтрализатор электрического заряда струи (КН);
- защитный кожух;
- монтажно-установочный (вакуумный) фланец (1 штука) с электро- и газосводами.

1.4 Целью исследовательских испытаний лабораторного образца ВЧИД является определение его основных интегральных параметров.

1.5 Задача исследовательских испытаний лабораторного образца ВЧИД состоит в проведении комплекса испытаний по оценке возможностей использования метода управления подводимой мощностью и расходом рабочего тела для оптимизации рабочих режимов с повышенной экономичностью.

1.6 Исследовательские испытания ВЧИД обеспечиваются средствами по следующим позициям:

- контрольно-измерительные средства при проведении проверок до и после испытаний;
- объект испытаний – лабораторный образец ВЧИД;
- расходные материалы системы подачи (газы – ксенон, криптон);
- кабели технологические.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие документы:

- ТУ 20.11.11-003- 39791733-2017. Технические условия на ксенон особой чистоты
- ТУ 2114-004-39791733-2002. Технические условия на криптон особой чистоты
- ОСТ 92-1640-77. Документация технологическая на проведение испытаний изделий. Номенклатура и комплектность.
- ОСТ 92-1641-76. Стенды для испытания изделий. Эксплуатационные документы

- ГОСТ Р 51318.11-2006. Совместимость технических средств электромагнитная. Промышленные, научные, медицинские и бытовые (ПНМБ) высокочастотные устройства
- ГОСТ Р 8.568. ГСИ. Аттестация испытательного оборудования
- ГОСТ 8.417-2002. Государственная система обеспечения единства Измерений. Единицы физических величин.
- ГОСТ 8.563. ГСИ. Методики (методы) измерений.
- МИ 2083-90. Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей.

3 Условные обозначения и сокращения

3.1 Условные обозначения

Основные условные обозначения, применяемые в настоящем документе, приведены в табл. 3.1.

Табл. 3.1. Основные условные обозначения

Kr	химический символ криптона
Xe	химический символ ксенона.
$\dot{m}$	расход рабочего тела в РК
I_{Π}	ток ионного пучка
$U_{\text{ЭЭ}}$	напряжение на эмиссионном электроде
$I_{\text{УЭ}}$	ток в цепи ускоряющего электрода
$U_{\text{УЭ}}$	напряжение на ускоряющем электроде
$N_{\text{ВЧ}}$	падающая мощность ВЧГ
$N_{\text{ОТ}}$	отраженная мощность

3.2 Сокращения

БН – блок питания накала нейтрализатора;
 БУЭ – блок питания ускоряющего электрода;
 БЭЭ – блок питания эмиссионного электрода;
 ВЧГ – высокочастотный генератор;
 ВЧИД - высокочастотный ионный двигатель;
 РК – разрядная камера

ИОС – ионно-оптическая система;
КН – катод-нейтрализатор;
КТ – кабель технологический;
ПМИ – программа и методики измерений;
СУ – согласующее устройство;
ТБ – техника безопасности;
ТЗ – техническое задание;
УЭ – ускоряющий электрод;
ЭИ – экспериментальные исследования;
ЭРД – электрический ракетный двигатель;
ЭЭ – эмиссионный электрод

4 Требования к проведению измерений и программа методика испытаний

4.1 Требования к средствам измерения

4.1.1. Перечень рекомендуемого оборудования и средств измерений для проведения испытания двигателя приведен в приложении А.

4.2 Требования к метрологическому обеспечению измерений

4.2.1 Исследовательские испытания должны проводиться с соблюдением требований единства и точности измерений, в том числе с соблюдением однотипности методов измерений, средств измерений, пределов измерений.

4.2.2 Рекомендуемый перечень испытательного оборудования и средств измерения для экспериментальных исследований ВЧИД приведён в приложении А. Допускается использовать средства измерения других типов и марок, обладающих заданными характеристиками и точностью.

4.2.3 Средства измерений, используемые при проведении испытаний и подлежащие государственному метрологическому контролю и надзору, должны быть поверены в установленные сроки в соответствии с Приказом Минпромторга № 2510, а средства контроля должны пройти процедуру калибровки в соответствии с действующим законодательством об обеспечении единства измерений.

4.2.4 Испытательное оборудование должно быть аттестовано по ГОСТ Р 8.568.

4.2.5 Единицы физических величин, их наименования, обозначения и правила применения должны соответствовать ГОСТ 8.417.

4.2.6 Методики выполнения измерений, применяемые для контроля параметров образца при испытаниях, должны соответствовать требованиям ГОСТ 8.010.

4.2.7 Методика обработки результатов измерений должна соответствовать требованиям МИ 2083-90.

4.2.8 Пределы допускаемых погрешностей измерения аналоговых параметров должны быть не хуже 0,5 %.

4.2.9 Методика проведения исследовательских испытаний должна соответствовать объёму и последовательности операций, изложенных в разделах 6.5–6.6 настоящего документа.

4.3 Требования к условиям проведения исследовательских испытаний

4.3.1 Все виды проверок и испытаний, если иное не оговорено в настоящей программе и методике, должны проводиться при следующих параметрах окружающей среды:

- давление нормальное атмосферное (760 ± 50) мм рт. ст. ($101,3 \pm 6,7$) кПа;
- температура окружающей среды от плюс 7 °С до плюс 35 °С;
- относительная влажность воздуха до 85 % при температуре 20 °С;
- пары кислот и щелочей отсутствуют;
- запыленность приземного воздуха с концентрацией пыли до 2 г/м³.

5 Методика исследовательских испытаний ВЧИД

5.1 Внешний осмотр ВЧИД, проверка комплектности, проверка качества сборки

5.1.1 Внешний осмотр ВЧИД, проверка качества сборки проводится визуально. При этом необходимо проверить:

- 1) качество и правильность крепления деталей и узлов;
- 2) качество контактных электрических соединений (кабельной сети, разъемов).

5.1.2 Проверка электрического сопротивления изоляции и сопротивления электрических цепей

5.1.3 Проверка электрического сопротивления изоляции и сопротивления электрических цепей выполняется при нормальных атмосферных условиях (п.5.5.1 настоящего стандарта).

5.1.4 Проверка электрического сопротивления изоляции проводится между электрически изолированными цепями, а также между этими цепями и корпусом ВЧИД при напряжении 1000 В для высоковольтных цепей и 10 В для низковольтных цепей.

Порядок проверок:

1) для контроля сопротивления изоляции электрических цепей эмиссионного и ускорительного электродов последовательно подсоединять клеммы измерителя сопротивления изоляции к выводам ЭЭ и корпусу ВЧИД, к УЭ и корпусу; фиксировать значения сопротивления изоляции, которое во всех случаях должно быть не менее 20 мегаом при напряжении 1000 В;

2) осуществить кратковременное воздействие напряжением 2500 В (длительностью не более 30 с каждое) на электрические цепи ЭЭ – корпус, УЭ – корпус);

3) проконтролировать сопротивление изоляции между эмиссионным и ускоряющим электродами, между трубкой подачи газа и корпусом ВЧИД, для чего последовательно подсоединить клеммы измерителя сопротивления изоляции к выводам ЭЭ и УЭ, к штуцеру трубки подачи газа и корпусу; фиксировать значение сопротивления изоляции, которое во всех случаях должно быть не менее 20 мегаом при напряжении 1000 В;

4) для контроля сопротивления изоляции индуктора и катода нейтрализатора последовательно подключать измеритель сопротивления изоляции к их выводам и корпусу ВЧИД; сопротивление изоляции при всех измерениях должно быть не ниже 20 мегаом при напряжении 10 В.

5) контроль сопротивления электрических цепей проводится в цепи катода нейтрализатора; с помощью мультиметра провести измерение сопротивления нити накала, которое не должно превышать 1 Ом.

6.1 Испытания по определению параметров ВЧИД

Порядок проведения испытаний

6.1.1 Провести контроль по п. 5.1 настоящего документа.

6.1.2 Установить изделие на фланце вакуумной камеры и собрать схему испытаний в соответствии с рисунком 1.

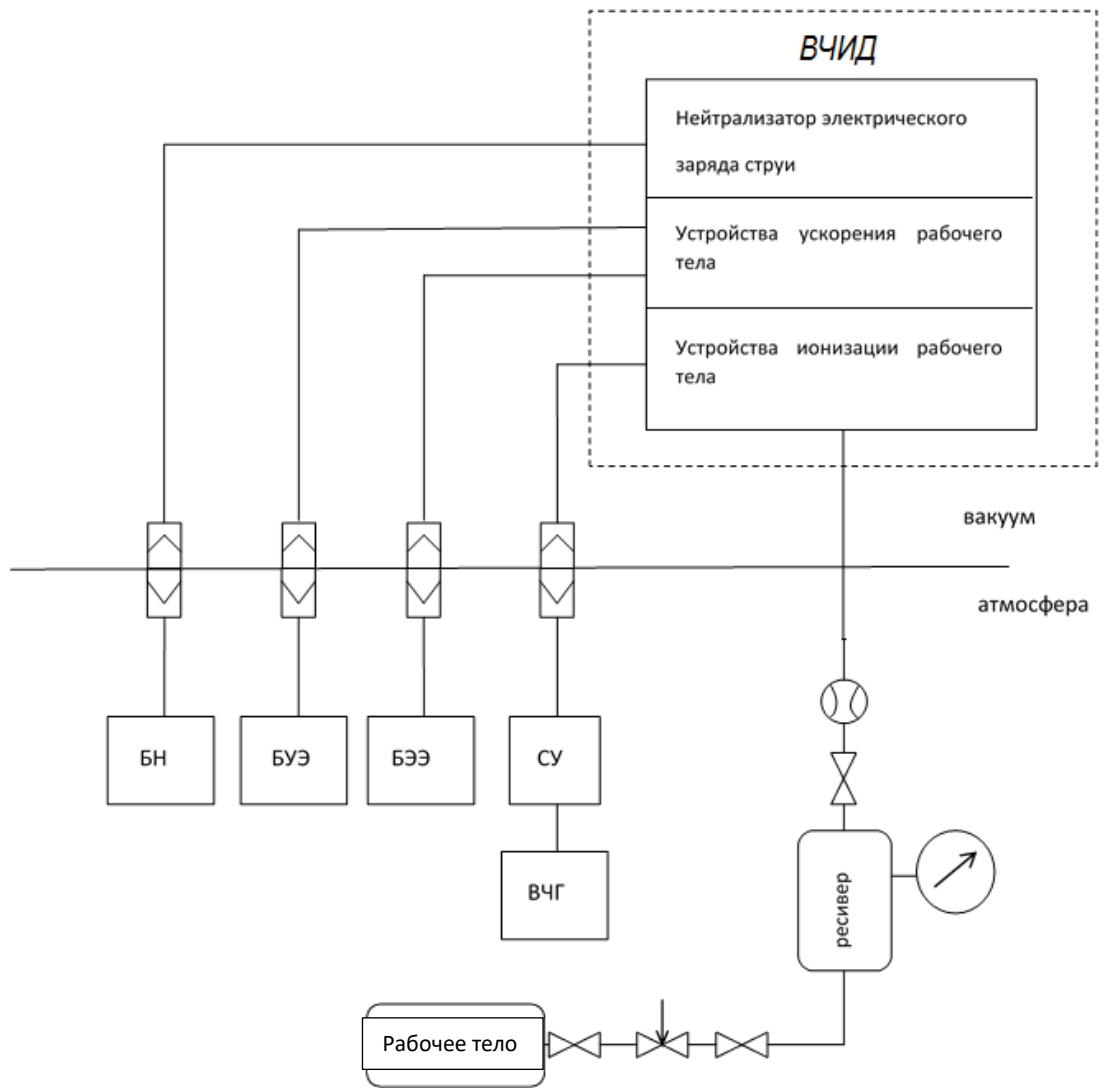
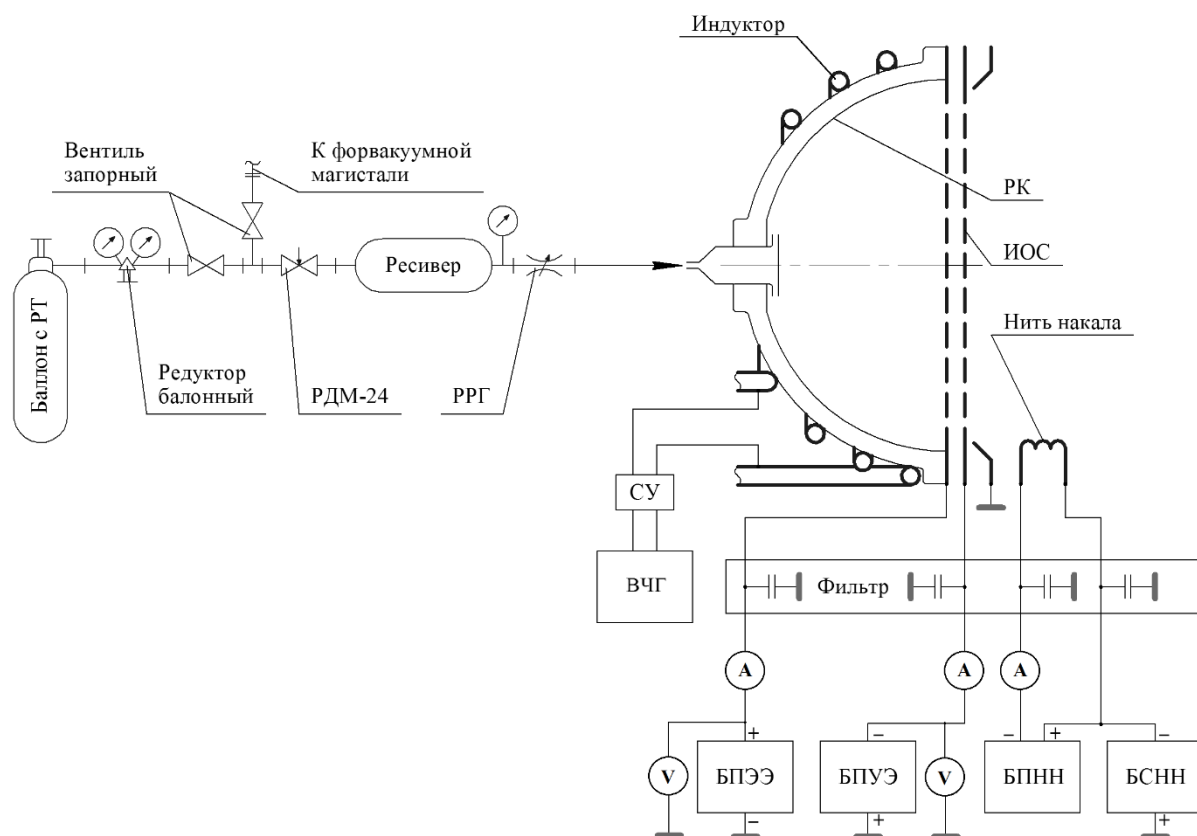


Рисунок 1 – Схема соединений при испытаниях ВЧИД в вакуумной камере.



РК – разрядная камера; ИОС – ионно-оптическая система; ВЧГ – высокочастотный генератор; СУ – согласующее устройство; БПЭЭ – блок питания эмиссионного электрода; БПУЭ – блок питания ускоряющего электрода; БПНН – блок питания нити накала; БПСН – блок смещения нити накала; V – вольтметр; А – амперметр; РДМ-24 – механический регулятор давления; РРГ – регулятор и измеритель расхода газа; круги со стрелками – механические манометры.

Рисунок 2 – Схема измерений.

- 6.1.3 Откачать вакуумную камеру до давления $\leq 0,001$ Па (1×10^{-5} мм рт. ст.).
- 6.1.4 С помощью стеновой системы подачи задать значение расхода ксенона (или криптона) в РК ВЧИД согласно плана-графика проведения экспериментальных исследований.
- 6.1.5 Включить блоки ВЧГ, БН, БУЭ, БЭЭ системы электропитания.
- 6.1.6 Осуществить запуск ВЧИД согласно циклограмме включения двигателя (Приложение Б настоящего стандарта).
- 6.1.7 Установить на электродах ИОС ВЧИД номинальные значения потенциалов ($U_{ЭЭ}$ – напряжение на ЭЭ, $U_{УЭ}$ – напряжение на УЭ) согласно плана-графика проведения экспериментальных исследований.

6.1.8 Провести оптимизацию частоты работы ВЧГ по критерию максимального тока ионного пучка (I_{Π}).

6.1.9 Скорректировать номинальные значения потенциалов на электродах ИОС и установить режим стабильного горения разряда.

6.1.10 Визуально контролировать работу двигателя наблюдая через иллюминатор в вакуумной камере.

Примечание: во время начала работы ВЧИД после переборки возможны кратковременные электрические пробой на электродах ИОС в течении диапазона времени от 10 до 20 минут.

6.1.11 Выдержать двигатель на режиме стабильного горения разряда не менее 20 минут (ориентировочное время стабилизации величины ионного тока пучка) и оценить соотношение величины I_{Π} и ток перехвата I_{-} (ток перехвата должен составлять 1-3%). Провести измерения следующих параметров:

- $\dot{m}$;
- I_{Π} ;
- $U_{\text{ЭЭ}}$;
- $I_{\text{УЭ}}$;
- $U_{\text{УЭ}}$;
- $N_{\text{ВЧ}}$;
- $N_{\text{ОТ}}$.

6.1.12 Рассчитать значения:

- потребляемой мощности

$$N = N_{\Pi} + N_{\text{ВЧГ}} + N_{\text{КН}}, \quad (1)$$

где: $N_{\Pi} = I_{\Pi} \cdot U_{\text{ЭЭ}}$ – мощность пучка, $N_{\text{ВЧГ}} = I_{\Pi} \cdot C_i$ – ВЧ мощность, затраченная на ионизацию (C_i – цена иона (Вт/А)), $N_{\text{КН}}$ – мощность, затрачиваемая на нагрев нити накала катода нейтрализатора.

- энергетической цены иона:

$$C_i = \frac{N_{\text{ВЧ}}}{I_{\Pi}}, \text{ [Вт/А];} \quad (2)$$

- коэффициента использования рабочего тела:

$$\eta_m = \frac{I_{\Pi}}{\left(\frac{e}{M_i}\right) \dot{m}_{\Sigma}}, \quad (3)$$

где:

$e = 1.6 \times 10^{-19}$ Кл – заряд электрона;

$M_i = 2,18 \times 10^{-25}$ кг – масса иона ксенона, $M_i = 1,4 \times 10^{-25}$ кг – масса иона криптона;

$\dot{m}_{\Sigma} = \dot{m}_{\Pi} + \dot{m}_H$ – полный расход рабочего тела;

$\dot{m}_{\Pi}$ – расход рабочего тела через газоразрядную камеру (РК);

$\dot{m}_H$ – расход рабочего тела через катод–нейтрализатор (КН) если он присутствует;

– энергетического коэффициента полезного действия (КПД):

$$\eta_{\Sigma} = \frac{U_{\Sigma\Sigma}}{U_{\Sigma\Sigma} + C_i}; \quad (4)$$

– удельный импульс тяги $I_{y\partial}$, будет рассчитываться с учетом измерения $U_{\Sigma\Sigma}$:

$$I_{y\partial} = \eta_m \eta_{\alpha} \sqrt{\frac{2q_i}{M_i} U_{\Sigma\Sigma}}, \quad (5)$$

где q_i – величина заряда иона рабочего тела, равная 1,01 заряда электрона e , при оценке доли двухзарядных ионов в пучке не более ~1 % (по данным экспериментальных измерений [Loeb, H.W. Principle of Radio-Frequency Ion Thrusters RIT. – Giessen University, Giessen, Germany. – 2010]);

$$\eta_{\alpha} = \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad \text{– КПД по расходимости пучка ионов}; \quad (6)$$

где α – угол расходимости ионного пучка (по данным экспериментальных измерений [Loeb, H.W. Principle of Radio-Frequency Ion Thrusters RIT. – Giessen University, Giessen, Germany. – 2010] и расчетов угол изменяется в пределах от 20° до 30° в зависимости от геометрических параметров ионно-оптической системы (ИОС);

– тяговый КПД равен:

$$\eta_T = \eta_m \eta_{\alpha} \eta_{\Sigma}; \quad (7)$$

– мощность, потребляемая двигателем N , может быть выражена через мощность пучка N_{Π} и энергетический КПД $\eta_{\text{Э}}$:

$$N = \frac{N_{\Pi}}{\eta_{\text{Э}}}, \quad (8)$$

где мощность пучка, определяется соотношением: $N_{\Pi} = I_{\Pi} U_{\text{ЭЭ}}$.

Для определения тяги двигателя по косвенным измерениям используют выражение, полученное с учетом связи расхода рабочего тела через РК, тока ионного пучка и удельного импульса тяги:

$$\dot{m} = \frac{I_{\Pi}}{\frac{q_i}{M_i} \eta_m} = \frac{T}{I_{\text{уд}}} \quad (9)$$

Выражение для оценки тяги имеет вид:

$$T(\alpha, I_{\Pi}, U_{\text{ЭЭ}}) = I_{\Pi} \frac{1 + \cos \alpha}{2} \sqrt{\frac{2U_{\text{ЭЭ}} M_i}{q_i}} \quad (10)$$

Для проверки расчетов можно использовать данные измерения потребляемой мощности:

$$N = \frac{I_{\text{уд}} T}{2\eta_t} \quad (11)$$

Зафиксировать полученные данные в протоколе эксперимента.

6.1.13 Выключить ВЧИД. Отключить ВЧГ и блоки питания БУЭ, БЭЭ.

6.1.14 Выровнять давление в вакуумной камере с атмосферным. Открыть камеру.

6.1.15 Разобрать схему испытаний, соблюдая меры безопасности.

6.1.16 Выполнить проверки изделия по 5.1.2 настоящего документа.

7 Обработка результатов измерений

Обработка результатов косвенных измерений п. 6.1.12, полученных в ходе исследовательских испытаний ВЧИД, проводится тремя методами статистической обработки данных.

7.1 Для косвенных измерений при нелинейных зависимостях и некоррелированных погрешностях измерений аргументов применяется метод линеаризации. Метод линеаризации предполагает разложение нелинейной функции в ряд Тейлора:

$$f(a_1, \dots, a_m) = f(\widetilde{a}_1, \dots, \widetilde{a}_m) + \sum_{i=1}^m \frac{\partial f}{\partial a_i} \Delta a_i + R,$$

где $f(a_1, \dots, a_m)$ - нелинейная функциональная зависимость измеряемой величины от измеряемых аргументов a_i ; $\frac{\partial f}{\partial a_i}$ - первая производная от функции f по аргументу a_i , вычисленная в точке $\widetilde{a}_1, \dots, \widetilde{a}_m$; Δa_i - отклонение результата измерения аргумента a_i от его среднего арифметического; R - остаточный член.

Остаточным членом $R = \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^m \frac{\partial^2 f}{\partial a_i \partial a_j} (\Delta a_i \cdot \Delta a_j)$ пренебрегают, если

$$R < 0,8 \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial a_i}\right)^2 \cdot S^2(\widetilde{a}_i)},$$

где $S^2(\widetilde{a}_i)$ - среднее квадратическое отклонение случайных погрешностей результата измерения a_i -го аргумента.

1) Потребляемая мощность (N):

$$R_N = 0;$$

$$S(\widetilde{N}) = \sqrt{(U_{\Sigma} + C_i)^2 \cdot S^2(\widetilde{I}) + I_{\Sigma}^2 \cdot (S^2(\widetilde{U}_{\Sigma}) + S^2(\widetilde{C}_i))};$$

$$\varepsilon(p) = t_q \cdot S(\widetilde{N});$$

2) Энергетическая цена иона (C_i):

$$R_{C_i} = \frac{N_{ВЧГ}}{I_{\Sigma}^3} \cdot \Delta I = \frac{C_i}{I_{\Sigma}^2} \cdot \Delta I;$$

$$S(\widetilde{C}_i) = \frac{N_{ВЧГ}}{I_{\Sigma}^2} \cdot S(\widetilde{I}) = \frac{C_i}{I_{\Sigma}} \cdot S(\widetilde{I});$$

$$\varepsilon(p) = t_q \cdot S(\widetilde{C}_i);$$

3) Коэффициент использования рабочего тела (η_m):

$$R_{\eta_m} = 0;$$

$$S(\widetilde{\eta}_m) = \frac{M_i}{e \dot{m}_{\Sigma}} \cdot S(\widetilde{I});$$

$$\varepsilon(p) = t_q \cdot S(\widetilde{\eta}_m);$$

4) Энергетический коэффициент полезного действия (η_{Σ}):

$$R_{\eta_{\Sigma}} = \frac{1}{2 (U_{\Sigma} + C_i)^3} \cdot ((2 \cdot (U_{\Sigma} \cdot (\Delta C_i)^2 - C_i \cdot (\Delta U)^2) + (U_{\Sigma} - C_i) \cdot \Delta U \cdot \Delta C_i));$$

$$S(\widetilde{\eta}_{\Sigma}) = \frac{1}{2 (U_{\Sigma} + C_i)^2} \cdot \sqrt{C_i^2 - S^2(\widetilde{U} + U_{\Sigma}^2 \cdot S^2(\widetilde{C}_i));$$

$$\varepsilon(p) = t_q \cdot S(\widetilde{\eta}_{\Sigma});$$

5) Удельный импульс тяги ($I_{уд}$):

$$R_{I_{уд}} = \frac{\eta_{\alpha} * \Delta U * \sqrt{2q_i M_i}}{4e\dot{m}_{\Sigma} * \sqrt{U_{\Sigma}}} * \left(\Delta I - \frac{I_{п} * \Delta U}{2U_{\Sigma}} \right) = \frac{\eta_{\alpha} * \Delta U * \sqrt{2M_i}}{4e\dot{m}_{\Sigma} * \sqrt{U_{\Sigma}}} * \left(\Delta I - \frac{I_{п} * \Delta U}{2U_{\Sigma}} \right);$$

$$S(\widetilde{I_{уд}}) = \frac{\eta_{\alpha} * \sqrt{2q_i M_i}}{2e\dot{m}_{\Sigma}} * \sqrt{\frac{4U_{\Sigma}^2 * S^2(\tilde{I}) + I_{п}^2 * S^2(\tilde{U})}{U_{\Sigma}}} = \frac{\eta_{\alpha} * \sqrt{2M_i}}{2e\dot{m}_{\Sigma}} * \sqrt{\frac{4U_{\Sigma}^2 * S^2(\tilde{I}) + I_{п}^2 * S^2(\tilde{U})}{U_{\Sigma}}};$$

$$\varepsilon(p) = t_q * S(\widetilde{I_{уд}});$$

6) Тяговый КПД (η_T):

$$R_{\eta_T} = \frac{\eta_{\alpha} * M_i}{2 * e * \dot{m}_{\Sigma} * (U_{\Sigma} + C_i)^2} * \left(\frac{I_{п}}{U_{\Sigma} + C_i} (2 * (U_{\Sigma} * (\Delta C)^2 - C_i(\Delta U)^2 + (U_{\Sigma} - C_i) * \Delta U * \Delta C)) + \Delta I(C_i * \Delta U - U_{\Sigma} * \Delta C) \right);$$

$$S(\widetilde{\eta_T}) = \frac{\eta_{\alpha} * M_i}{2e\dot{m}_{\Sigma} * (U_{\Sigma} + C_i)} * \sqrt{\frac{I_{п}^2}{U_{\Sigma} + C_i}} * \left(C_i^2 * S^2(\tilde{U}) + U_{\Sigma}^2 * S^2(\tilde{C}) \right) + U_{\Sigma}^2 * S^2(\tilde{I});$$

$$\varepsilon(p) = t_q * S(\widetilde{\eta_T});$$

7) Мощность, потребляемая двигателем (N):

$$R_N = \frac{\Delta I}{2} (\Delta C + \Delta U);$$

$$S(\tilde{N}) = (U_{\Sigma} + C_i) * S(\tilde{I});$$

$$\varepsilon(p) = t_q * S(\tilde{N});$$

8) Тяга ВЧИД ($T(\alpha, I_{п}, U_{\Sigma})$):

$$R_{T(\alpha, I_{п}, U_{\Sigma})} = \frac{\eta_{\alpha} * \Delta U * \sqrt{2M_i}}{4\sqrt{U_{\Sigma} * q_i}} * \left(\Delta I - \frac{I_{п} * \Delta U}{2U_{\Sigma}} \right) = \frac{\eta_{\alpha} * \Delta U * \sqrt{2M_i}}{4\sqrt{U_{\Sigma}}} * \left(\Delta I - \frac{I_{п} * \Delta U}{2U_{\Sigma}} \right);$$

$$S(T(\alpha, \widetilde{I_{п}}, U_{\Sigma})) = \frac{\eta_{\alpha}}{2} * \sqrt{\frac{2M_i}{q_i}} * \sqrt{\frac{4U_{\Sigma}^2 * S^2(\tilde{I}) + I_{п}^2 * S^2(\tilde{U})}{U_{\Sigma}}} = \frac{\eta_{\alpha} \sqrt{2M_i}}{2} * \sqrt{\frac{4U_{\Sigma}^2 * S^2(\tilde{I}) + I_{п}^2 * S^2(\tilde{U})}{U_{\Sigma}}}$$

$$\varepsilon(p) = t_q * S(T(\alpha, \widetilde{I_{п}}, U_{\Sigma})).$$

7.2 При наличии корреляции между погрешностями измерений аргументов для определения результатов косвенных измерений п. 6.1.12 и их погрешности применяется метод приведения, который предполагает наличие ряда отдельных значений измеряемых аргументов, полученных в результате многократных измерений (табл. 7.1).

Табл. 7.1. Форма представления обработки результатов измерений
по методу приведения

Результат косвенного измерения	Среднее квадратическое отклонение случайных	Доверительные границы случайной	Погрешность результат
--------------------------------	---	---------------------------------	-----------------------

	погрешностей результата косвенного измерения	погрешности для результата измерения	ата косвенн ого измерен ия
$\tilde{N} = \sum_{j=1}^L \frac{N_j}{L}$	$S(\tilde{N}) = \sqrt{\sum_{j=1}^L \frac{(N_j - \tilde{N})^2}{L(L-1)}}$	$\Delta = T \cdot S(\tilde{N})$	$\tilde{N} \pm \Delta(P)$
$\tilde{C}_l = \sum_{j=1}^L \frac{C_{lj}}{L}$	$S(\tilde{C}_l) = \sqrt{\sum_{j=1}^L \frac{(C_{lj} - \tilde{C}_l)^2}{L(L-1)}}$	$\Delta = T \cdot S(\tilde{C}_l)$	$\tilde{C}_l \pm \Delta(P)$
$\tilde{\eta}_m = \sum_{j=1}^L \frac{\eta_{mj}}{L}$	$S(\tilde{\eta}_m) = \sqrt{\sum_{j=1}^L \frac{(\eta_{mj} - \tilde{\eta}_m)^2}{L(L-1)}}$	$\Delta = T \cdot S(\tilde{\eta}_m)$	$\tilde{\eta}_m \pm \Delta(P)$
$\tilde{\eta}_\varepsilon = \sum_{j=1}^L \frac{\eta_{\varepsilon j}}{L}$	$S(\tilde{\eta}_\varepsilon) = \sqrt{\sum_{j=1}^L \frac{(\eta_{\varepsilon j} - \tilde{\eta}_\varepsilon)^2}{L(L-1)}}$	$\Delta = T \cdot S(\tilde{\eta}_\varepsilon)$	$\tilde{\eta}_\varepsilon \pm \Delta(P)$
$\tilde{\eta}_T = \sum_{j=1}^L \frac{\eta_{Tj}}{L}$	$S(\tilde{\eta}_T) = \sqrt{\sum_{j=1}^L \frac{(\eta_{Tj} - \tilde{\eta}_T)^2}{L(L-1)}}$	$\Delta = T \cdot S(\tilde{\eta}_T)$	$\tilde{\eta}_T \pm \Delta(P)$
$\tilde{N} = \sum_{j=1}^L \frac{N_j}{L}$	$S(\tilde{N}) = \sqrt{\sum_{j=1}^L \frac{(N_j - \tilde{N})^2}{L(L-1)}}$	$\Delta = T \cdot S(\tilde{N})$	$\tilde{N} \pm \Delta(P)$
$T(\alpha, \tilde{I}_\Pi, \tilde{U}_{\varepsilon\varepsilon}) = \sum_{j=1}^L \frac{T(\alpha, I_\Pi, U_{\varepsilon\varepsilon})_j}{L}$	$S(\tilde{\eta}_m) = \sqrt{\sum_{j=1}^L \frac{(T(\alpha, I_\Pi, U_{\varepsilon\varepsilon})_j - T(\alpha, \tilde{I}_\Pi, \tilde{U}_{\varepsilon\varepsilon}))^2}{L(L-1)}}$	$\Delta = T \cdot S(T(\alpha, \tilde{I}_\Pi, \tilde{U}_{\varepsilon\varepsilon}))$	$T(\alpha, I_\Pi, U_\varepsilon) \pm \Delta(P)$

Где:

- L - число отдельных значений измеряемой величины;
- T - коэффициент, зависящий от вида распределения отдельных значений измеряемой величины, выбранной доверительной вероятности.

7.3 Для оценки статистических характеристик результатов косвенных измерений п. 6.1.12 применяется метод бутстрап, когда связь результатов измерений с непосредственно измеряемыми параметрами задана функциональной зависимостью.

$$SE_{boot}(\tilde{\theta}) = \sqrt{\frac{1}{B-1} \sum_{b=1}^B (\hat{\theta}_b^* - \bar{\theta}^*)^2},$$

Где:

- B — количество бутстрап-повторений,
- $\hat{\theta}_b^*$ - оценка статистики в b-й бутстрап-выборке,

- $\overline{\theta^*}$ - среднее значение статистики по всем бутстрап-выборкам.

8 Отчетность

В процессе проведения исследовательских испытаний, при необходимости, составляются первичные документы (журналы испытаний), содержащие данные измерений.

По выполнении каждого испытания выпускается протокол испытаний с указанием исполнителей, времени и места проведения испытаний, результатов испытаний (образец протокола приведен в Приложении В настоящего документа).

В протокол вносятся все первичные данные, получаемые в процессе исследований и результаты расчетов, предусмотренные разделом 6.1 настоящего документа.

В согласованных случаях допускается оформлять одним протоколом данные, полученные при испытаниях по нескольким пунктам программы.

По результатам исследований, в течение трех дней, составляется акт испытаний ВЧИД.

Акт испытаний должен содержать:

- подтверждение выполнения программы исследований;
- оценку результатов исследований с конкретными, точными формулировками, отражающими соответствие параметров лабораторного образца ВЧИД требованиям ТЗ;
- выводы по результатам исследований.

К акту прилагаются протоколы испытаний по пунктам документа.

Приложение А
(рекомендуемое)

**Перечень средств измерения и оборудования для контроля и испытаний
ВЧИД**

Наименование оборудования, обозначение	Технические характеристики, класс точности	Назначение
Стенд вакуумный	Объём вакуумной камеры: 0,7 м ³	Испытания ВЧИД в условиях вакуума
ВЧГ Seren Industrial Power Systems R1001	1,7-2,1 МГц	Питание индуктора ВЧИД
СУ MFJ 9982	2,5 кВт 12,5-800 Ом в диапазоне от 1,8 до 13,56 МГц	Осуществление связи между ВЧГ и индуктором
БН Изготовитель ООО Platar	80 В, 20 А	Питание нити накала нейтрализатора
БУЭ Изготовитель ООО Platar	До 300 В (-), 500 мА	Питание ускоряющего электрода
БЭЭ Изготовитель ООО Platar	До 5000 В (+), 2 А	Питание эмиссионного электрода
Мультиметр SUNWA YX360TRE-B	$\pm 0,2 \%$	Измерение сопротивления нити накала катода нейтрализатора
Измеритель сопротивления изоляции 2803 IN	$U_{\text{исп.}} = 500, 1000,$ 2500, 5000 В, $\pm 5,2 \%$	Измерение сопротивления изоляции высоковольтной части
Термометр лабораторный ТЛ5	От 0 °С до 75 °С	Измерение температуры окружающей среды
Линейка металлическая	0–500 мм ± 1 мм	Измерение габаритных размеров
Штангенциркуль ШЦ-1	(0-150) мм	Измерение конструктивных размеров

Примечание: допускается использование других приборов и оборудования с заданными характеристиками.

Приложение Б

Циклограмма запуска ВЧИД с лабораторными блоками питания

1. Включается ВЧГ и выставляется требуемая частота и ВЧ-мощность.
2. Осуществляется первичное согласование сигнала ВЧГ и индуктора ВЧИД.
3. Включаются блоки питания БН, БУЭ, БЭЭ.
4. На эмиссионный электрод подается напряжение в диапазоне от 30 до 100 В.
5. На нить накала подается увеличивающийся ток до момента поджига разряда.
6. После поджига разряда одновременно выкручивается на «0» ручка тока нити накала и устанавливается напряжение на ускоряющем электроде в диапазоне от 40 до 100 В.
7. Устанавливается рабочее напряжение на эмиссионном электроде в соответствии с планом эксперимента и на ускоряющем электроде 10 % от рабочего напряжения на эмиссионном электроде.
8. Выключается блок питания БН нити накала.

Приложение В

Форма протокола испытаний

ПРОТОКОЛ
испытания по пункту № _____
Программы и методик исследовательских испытаний лабораторного образца ВЧИД

№ _____

«_____» _____ 20 ____ г.

1. Объект испытания: лабораторный образец высокочастотного двигателя (ВЧИД), разработанный и изготовленный в соответствии с эскизной конструкторской документацией в количестве 1 шт., № _____, акт изготовления № _____, от «_____» _____ 20 ____ г.

2. Цель испытания: определение основных интегральных параметров.

3. Дата начала испытания: «_____» _____ 20 ____ г.

4. Дата окончания испытания: «_____» _____ 20 ____ г.

5. Место проведения испытания:

6. Средства проведения испытаний

а)

б)

в)

Табл. В1 – Измерения параметров работы ВЧИД

Наименование параметра	Ед. изм.	Измеренное значение	Погрешность измерения
расход рабочего тела в РК	мг/с		
расход рабочего тела через КН	мг/с		
ток ионного пучка	А		
напряжение на ЭЭ	В		
ток в цепи УЭ	А		
напряжение на УЭ	В		
падающая мощность ВЧГ	Вт		
отраженная мощность ВЧГ	Вт		

5. Используемые константы:

- заряд электрона – $e = 1.6 \times 10^{-19}$ Кл;
- масса иона ксенона – $M_i = 2.18 \times 10^{-25}$ кг;
- масса иона криптона – $M_i = 1,4 \times 10^{-25}$ кг;
- угол расходимости ионного пучка – 15°

7. Результаты расчетов (см. табл. В2).

Табл. В2 – Результаты расчета параметров ВЧИД

Наименование параметра	Ед. изм.	Расчетное значение
Энергетическая цена иона	Вт/А	
Коэффициент использования рабочего тела	-	
Энергетический КПД	-	
удельный импульс тяги	м/с	
КПД по расходимости пучка ионов	-	
Тяговый КПД	-	
Мощность пучка	Вт	
Мощность, потребляемая двигателем	Вт	
Величина тяги	мН	

8. Замечания и рекомендации

9. Выводы

Объект испытания лабораторный образец ВЧИД выдержал (не выдержал) испытание по пункту № _____ Программы и методики исследовательских испытаний лабораторного образца ВЧИД.

Испытание проводили:

Должность

Ф.И.О.

Должность

Ф.И.О.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Документированная процедура «Мониторинг и оценка уровня качества процесса исследовательских испытаний электроракетных двигателей»

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»
(МАИ)**

ДОКУМЕНТИРОВАННАЯ ПРОЦЕДУРА

**МОНИТОРИНГ И ОЦЕНКА УРОВНЯ КАЧЕСТВА
ПРОЦЕССА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ИСПЫТАНИЙ
ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

СМК-ДП-207-25

СОДЕРЖАНИЕ

1. НАЗНАЧЕНИЕ ДОКУМЕНТА	199
2. НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ.....	199
3. ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ	200
4. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ	201
5. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	201
6. ОРГАНИЗАЦИЯ МОНИТОРИНГА И ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ИСПЫТАНИЙ ЭРД.....	203
7. ПРОЦЕДУРА ДЕЙСТВИЙ ПРИ НЕСООТВЕТСТВИИ УРОВНЯ КАЧЕСТВА ИСПЫТАНИЙ ЭРД	205
8. ОТВЕТСТВЕННОСТЬ И ПОЛНОМОЧИЯ	206
9. ЗАПИСИ.....	206
ПРИЛОЖЕНИЕ А	208
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	214
ПРИЛОЖЕНИЕ В	219
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	222
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	227
ПРИЛОЖЕНИЕ Е	261
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж	265

НАЗНАЧЕНИЕ ДОКУМЕНТА

Настоящая документированная процедура «Мониторинг и оценка уровня качества процесса исследовательских испытаний электроракетных двигателей» предназначена для систематического контроля и анализа выполнения исследовательских испытаний электроракетных двигателей (ЭРД) с целью обеспечения соответствия установленным требованиям, стандартам и критериям качества. Она определяет порядок сбора данных, выявления отклонений, оценки эффективности этапов испытаний и разработки корректирующих мер для повышения надежности и точности результатов. Процедура способствует минимизации рисков, улучшению воспроизводимости испытаний и обеспечению достоверности данных. Данная процедура соответствует выполнению требований ГОСТ Р ИСО 9001-2015 «Системы менеджмента качества. Требования».

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

- ГОСТ Р ИСО 9000-2011 «Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь»;
- ГОСТ Р ИСО 9001-2015 «Системы менеджмента качества. Требования»;
- СТБ ISO 9004 «Менеджмент для достижения устойчивого успеха организации. Подход на основе менеджмента качества»;
- ИСО/МЭК 31010 «Менеджмент риска. Методы оценки риска»;
- ГОСТ 16504-81 «Межгосударственный стандарт. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения»;
- Политика МАИ в области качества на 2022-2025 годы. Приказ №113 от 05.03.2022 г.;
- МАИ-077-СМК-ДП-001 «Управление документацией»;
- МАИ-077-СМК-ДП-002 «Внутренний аудит»;
- МАИ-077-СМК-ДП-003 «Управление рисками и возможностями»;

- МАИ-077-СМК-ДП-004 «Анализ системы менеджмента качества со стороны высшего руководства».

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Электроракетный двигатель – ракетный двигатель, принцип работы которого основан на преобразовании электрической энергии в направленную кинетическую энергию частиц.

Исследовательские испытания – испытания, проводимые для изучения определенных характеристик свойств объекта

Процессный подход – последовательные и прогнозируемые результаты достигаются более эффективно и результативно, когда деятельность осознается и управляется как взаимосвязанные процессы, которые функционируют как согласованная система.

Качество – степень соответствия совокупности присущих характеристик объекта требованиям.

Планирование качества – часть менеджмента качества, направленная на установление целей в области качества и определяющая необходимые операционные процессы и соответствующие ресурсы для достижения целей в области качества.

Обеспечение качества – часть менеджмента качества, направленная на создание уверенности, что требования к качеству будут выполнены.

Управление качеством – часть менеджмента качества, направленная на выполнение требований к качеству.

Оценка качества – систематическая проверка, насколько объект способен выполнять установленные требования.

Мониторинг – определение статуса системы, процесса, продукции, услуги или действия.

Квалиметрическая модель оценки качества исследовательских испытаний ЭРД – статистическая модель, основанная на количественной оценке различных качеств процесса исследовательских испытаний ЭРД.

Процесс – совокупность взаимосвязанных и(или) взаимодействующих видов деятельности, использующие входы для получения намеченного результата.

Эффективность – соотношение между достигнутым результатом и использованными ресурсами.

Системы менеджмента качества – часть системы менеджмента применительно к качеству.

Показатели – количественные или качественные характеристики/критерии, анализ которых позволяет оценить степень результативности процесса.

Соответствие – выполнение требования.

Несоответствие – невыполнение требования

Отчет – итоговый текстовый, графический документ или документ другой формы, подтверждающий факт выполнения работ.

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Документированная процедура «Мониторинг и оценка уровня качества процесса исследовательских испытаний электроракетных двигателей» распространяется на все лабораторные комплексы по исследованию ЭРД федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

5.1. Мониторинг и оценка качества направлены на сбор объективных и достоверных данных о текущем состоянии и эффективности процессов исследовательских испытаний ЭРД. Анализ данных позволяет принимать корректирующие и предупреждающие меры, а также вносить улучшения в процессы и систему управления качеством в целом.

5.2. Данная процедура предусматривает мероприятия, направленные на обеспечение качества процесса исследовательских испытаний ЭРД.

5.3. В рамках процедуры решаются задачи, направленные на мониторинг входных и выходных данных, этапов процесса исследовательских испытаний ЭРД, показателей качества процесса, а также ресурсов. Выбор номенклатуры показателей осуществляется с учетом их соответствия требованиям адекватности, полноты и объективности, а также частоты сбора данных и ресурсов, необходимых для их обработки. Система показателей качества охватывает качественные и количественные стороны процессов; форма представления информации максимально четкая, понятная, однозначная.

5.4. В качестве методов оценки качества и анализа могут использоваться: методы сравнения (сопоставление достигнутых результатов с количественно определенными целями), расчетные, экспертные; радарная диаграмма, показывающая соотношение фактических и эталонных оценок по каждому анализируемому показателю качества; частотные гистограммы – обеспечивающие визуальную демонстрацию изменчивости данных; методы моделирования, планирования эксперимента.

При выборе методов измерения и анализа руководствуются принципом необходимости и достаточности для получения объективных, достоверных данных результатов анализа и возможности осуществления предупреждающих/корректирующих, улучшающих действий.

Для каждого параметра и показателя указывается форма представления результата, размерность, единица измерения – баллы и проценты.

5.5. Вид контроля, периодичность, а также ответственных за проведение контроля и оценку качества исследовательских испытаний ЭРД на каждом этапе процесса устанавливает владелец процесса.

5.6. Оценка эффективности процесса (уровня качества) исследовательских испытаний ЭРД основывается на данных, полученных в ходе мониторинга процесса.

Ответственность за мониторинг процесса несет владелец процесса.

Показатели качества, методики их расчета, плановые значения и веса (значимость) показателей качества устанавливаются владельцами процессов для каждого процесса исследовательских испытаний ЭРД.

5.7. Собранная информация структурируется обеспечивающим процессом «Управление документацией» (МАИ-077-СМК-ДП-001) и анализируется в руководящем процессе «Анализ системы менеджмента качества со стороны высшего руководства» (МАИ-077-СМК-ДП-004), управляется в соответствии с процессом «Управление рисками и возможностями» (МАИ-077-СМК-ДП-003).

5.8.

ОРГАНИЗАЦИЯ МОНИТОРИНГА И ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ИСПЫТАНИЙ ЭРД

6.1. Объект и критерии оценки

Объектом мониторинга и оценки качества являются исследовательские испытания электроракетных двигателей (Приложение А).

Предметом мониторинга и оценки качества являются процессы и подпроцессы исследовательских испытаний электроракетных двигателей (Приложение Б).

Для обеспечения эффективности (уровня качества) каждого выделенного процесса и подпроцесса рекомендуется устанавливать конкретные цели, критерии и показатели.

Структура и содержание всех выделенных комплексных и единичных показателей качества, представляющих собой систему показателей качества исследовательских испытаний ЭРД, представлена в Приложении В.

Для оценки качества исследовательских испытаний ЭРД используются 8 групповых показателей качества 1-ого уровня: P_1 - качество объекта, P_2 - качество испытательного стенда, P_3 - качество автоматизации процесса испытаний, P_4 - качество проведения испытаний, P_5 - качество кадрового обеспечения, P_6 - безопасность процесса испытаний, P_7 - экономичность процесса испытаний, P_8 - экологичность процесса испытаний, которые в свою

очередь определяются методом свёртки групповых комплексных показателей 2-го уровня, и т.д.; $\alpha_1 - \alpha_8$ – их весовые коэффициенты значимости (Приложение Г).

Коэффициенты весомости показателей качества и оценки единичных показателей определяются экспертным методом, а групповые комплексные и комплексные показатели определяются расчетным путем.

Для оценивания показателей качества процесса исследовательских испытаний ЭРД используются пятибалльные шкалы оценки показателей качества (Приложение Д). Шкалы оценки включают различные уровни, отражающие степень соответствия показателей установленным требованиям. Каждый уровень сопровождается количественными или качественными характеристиками, что позволяет точно определить состояние процесса исследовательских испытаний.

Для анкетирования специалистов используется установленная форма (Приложение Е).

Оценка уровня качества процесса исследовательских испытаний ЭРД проводится в соответствии с рассчитанным значением показателя P по таблице 1.

Табл. 1. Шкала диагностирования уровня качества процесса исследовательских испытаний ЭРД

Оценка	Качество процесса исследовательских испытаний ЭРД
$P \geq 0,8$	очень высокое
$0,6 \leq P < 0,8$	высокое
$0,4 \leq P < 0,6$	среднее
$0,2 \leq P < 0,4$	низкое
$0 \leq P < 0,2$	очень низкое

Этот показатель отражает совокупное состояние всех ключевых параметров процесса исследовательских испытаний ЭРД и рассчитывается на основе экспертных оценок по ряду комплексных критериев. Методика определения P включает агрегирование значений по выбранной диагностической шкале, что обеспечивает объективную и сопоставимую оценку уровня качества.

Использование показателя P в сочетании с диагностической шкалой позволяет отслеживать изменения качества процесса испытаний ЭРД в динамике. Повторная оценка, проводимая после реализации мероприятий по улучшению, позволяет определить, насколько эффективно были устранены выявленные ранее недостатки.

Для более наглядного отображения ситуации по диагностированному уровню качества процесса исследовательских испытаний ЭРД и выявления возможных направлений для внедрения улучшений используется радарная диаграмма (рис. 1)

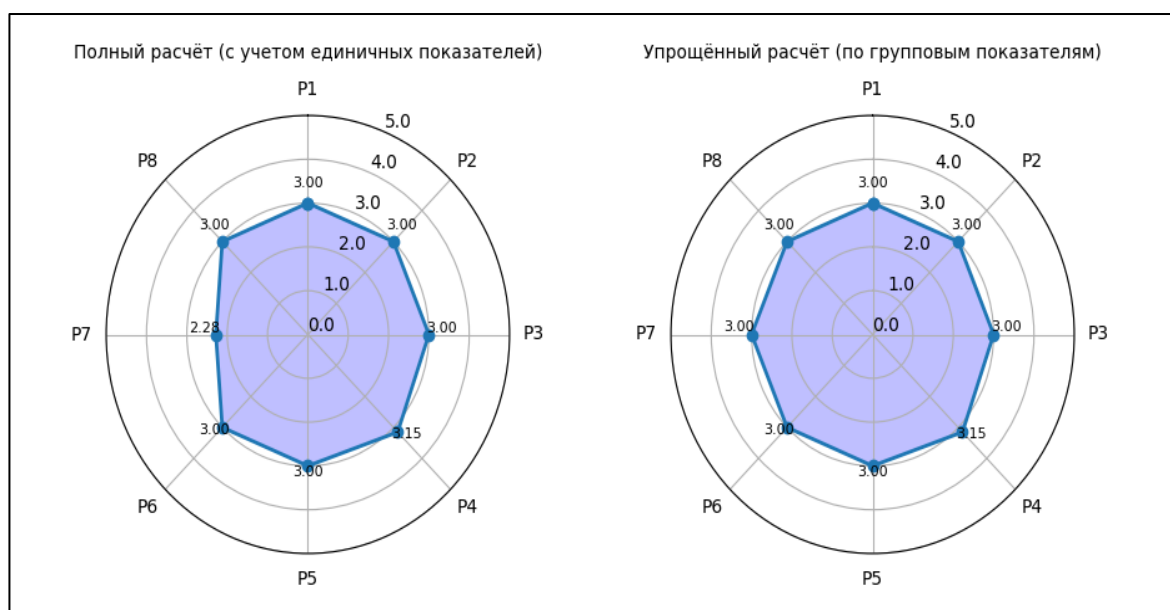


Рис. 1. Форма результатов распределения оценочных показателей качества процесса исследовательских испытаний ЭРД

ПРОЦЕДУРА ДЕЙСТВИЙ ПРИ НЕСООТВЕТСТВИИ УРОВНЯ КАЧЕСТВА ИСПЫТАНИЙ ЭРД

Фиксация и классификация несоответствия

При выявлении отклонения уровня качества процесса исследовательских испытаний ЭРД от нормативного значения $P=0,6$ ответственный исполнитель обязан зафиксировать факт несоответствия в протоколе несоответствий (Приложение Ж) с указанием:

- конкретного показателя качества или группы показателей, выходящих за допустимые пределы;

- степени отклонения (незначительное, существенное, критическое);
- возможного влияния на достоверность результатов испытаний.

Инициирование корректирующих мероприятий

В зависимости от категории несоответствия запускается соответствующий алгоритм действий:

- **Незначительные отклонения:** испытания продолжаются с усиленным контролем параметров, ответственный персонал вносит оперативные корректировки в процесс.
- **Существенные отклонения:** испытания приостанавливаются, созывается экспертная группа для анализа причин и разработки корректирующих мер.
- **Критические отклонения:** испытания прекращаются, иницируется полный анализ системы с привлечением технических специалистов и руководства, составляется акт о несоответствии.

ОТВЕТСТВЕННОСТЬ И ПОЛНОМОЧИЯ

8.1 Ответственность и полномочия при выполнении мониторинга и оценки качества процесса исследовательских испытаний ЭРД устанавливаются стандартами ФГБОУ ВО «МАИ (НИУ)» и документированными процедурами в соответствии с пунктом 5.6 настоящей документированной процедуры.

ЗАПИСИ

9.1 Записи результатов мониторинга и оценки качества осуществляются в следующих документах:

- Протоколы несоответствий (Приложение Ж).
- Рекомендации для улучшения по итогам мониторинга.

9.2 Записями результатов оценки качества процесса исследовательских испытаний ЭРД являются решения (протоколы, приказы), распоряжения, отчеты и планы мероприятий.

9.3 Ответственность за ведение записей определяется руководителем структурного подразделения, в котором хранятся документы, указанные в пунктах 5.6 и 8.1.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Общая и детализированные модели процесса исследовательских испытаний ЭРД

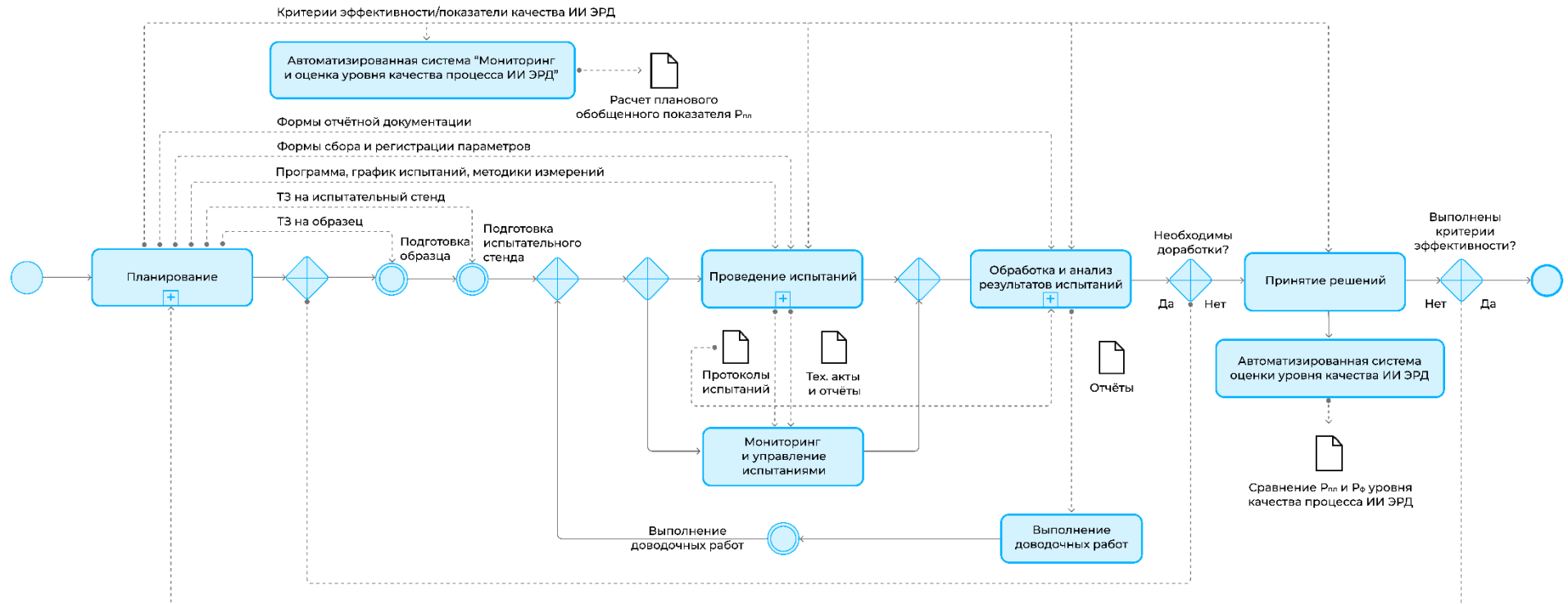


Рисунок А1 – Общая модель процесса исследовательских испытаний ЭРД

Рисунок А2 – Детализированная модель этапа «Планирование» процесса исследовательских испытаний ЭРД



Рисунок А3 – Детализированная модель подэтапа «Пуско-наладочные работы»
процесса исследовательских испытаний ЭРД

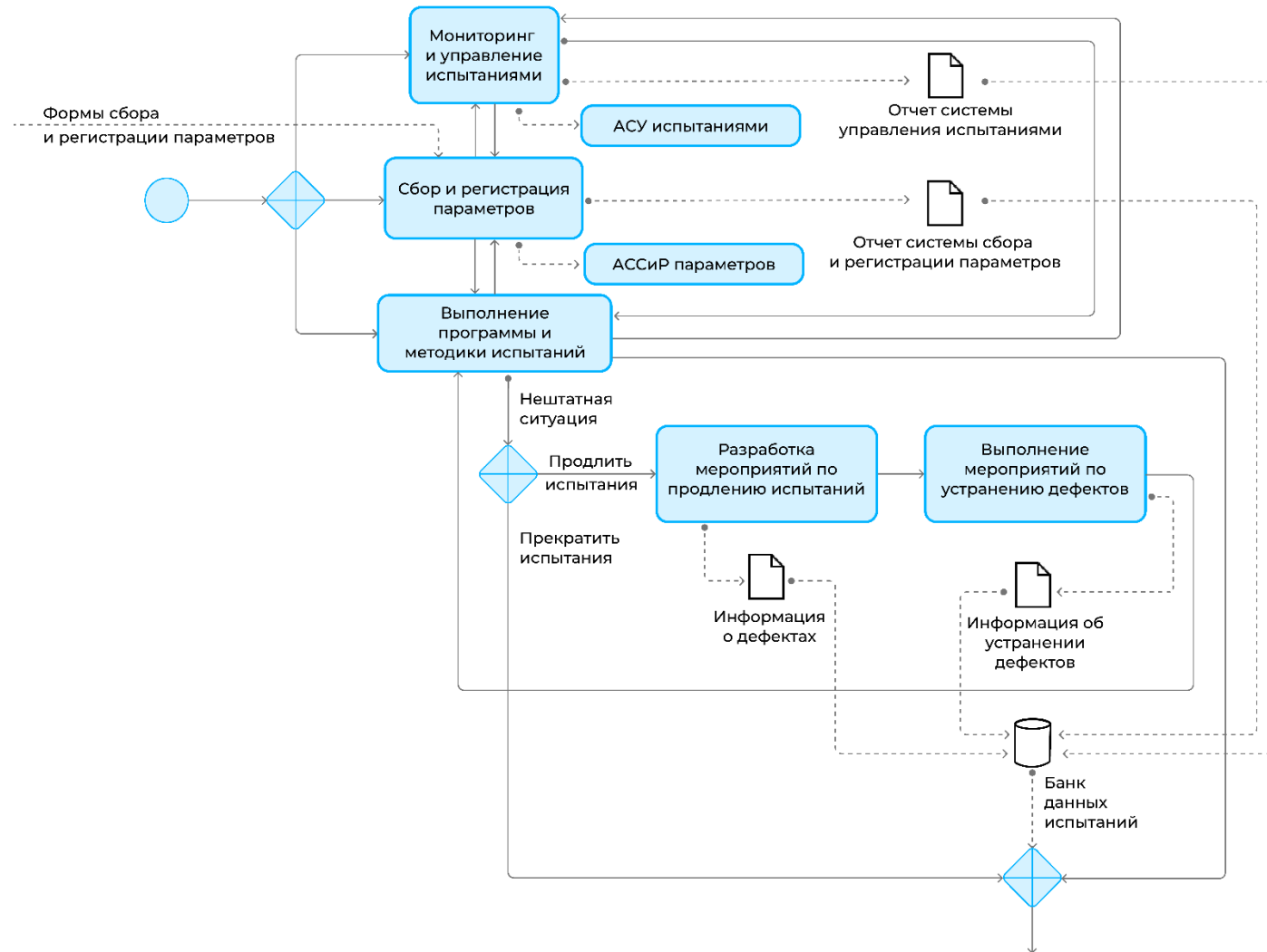


Рисунок А4 – Детализированная модель этапа «Испытания» процесса исследовательских испытаний ЭРД

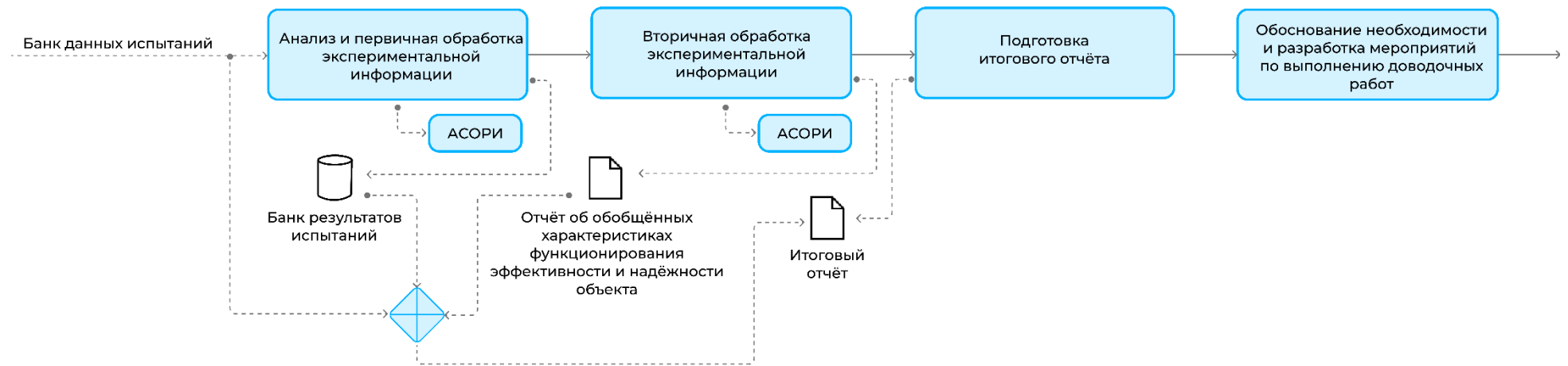


Рисунок А5 – Детализированная модель этапа «Обработка и анализ результатов испытаний»
процесса исследовательских испытаний ЭРД

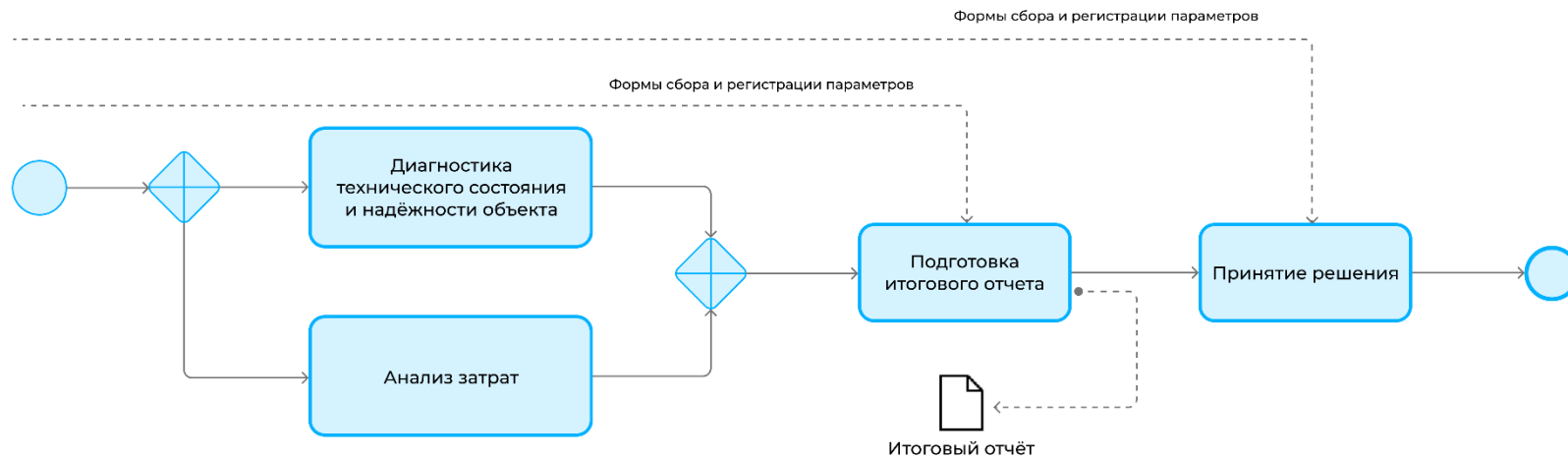


Рисунок А6 – Детализированная модель этапа «Принятие решений» процесса исследовательских испытаний ЭРД

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Элементы модели процесса исследовательских испытаний ЭРД, этап «Планирование»

Этапы процесса исследовательских испытаний ЭРД	Планирование		Регламентирующие нормативные документы
	Элементы модели процесса исследовательских испытаний ЭРД		
Группа подпроцессов	Подпроцессы	Основные задачи подпроцессов	
Функциональные	Планирование эксперимента и разработка критериев эффективности процессов	– установление подлежащих измерению физических величин или параметров объекта	№ 102-ФЗ от 26.06.2008; ГОСТ Р ИСО 5725-2002 (Ч. 1-6); ГОСТ 8.417-2002; ГОСТ Р 8.820-2013; ГОСТ Р 59159-2020; ГОСТ Р 59160-2020
		– установление требований к точности результата испытаний	№ 102-ФЗ от 26.06.2008; ГОСТ Р ИСО 5725-2002 (Ч. 1-6); ГОСТ 16504-81; ГОСТ Р 8.820-2013; ГОСТ Р 59159-2020; ГОСТ Р 59160-2020; РМГ 29-2013
		– установление объема испытаний (числа измерений)	№ 102-ФЗ от 26.06.2008; ГОСТ Р ИСО 5725-2002 (Ч. 1-6); ГОСТ 16504-81; ГОСТ Р 8.820-2013; ГОСТ Р 59159-2020; ГОСТ Р 59160-2020
		– установление требований к скорости получения измерительной информации, ее дискретности	ГОСТ 16504-81; ГОСТ Р 59159-2020; ГОСТ 34.201-2020; ГОСТ 34.602-2020
		– установление требований к уровню автоматизации испытаний	ГОСТ Р 59159-2020; ГОСТ 34.201-2020; ГОСТ 34.602-2020
	Разработка моделей объекта и испытательного стенда	– установление метода измерений, позволяющего решить конкретную задачу испытаний	№ 102-ФЗ от 26.06.2008; ГОСТ Р 8.820-2013; ГОСТ Р 59159-2020; ГОСТ Р 59160-2020

		– выбор (разработка новых) средств измерений, оптимальных с точки зрения метрологических характеристик, экономических и др. показателей	№ 102-ФЗ от 26.06.2008; ГОСТ Р 59159-2020; ГОСТ Р 59160-2020; РМГ 29-2013
		– разработка автоматизированной системы управления (АСУ) испытаниями	ГОСТ Р 59159-2020; ГОСТ 34.201-2020; ГОСТ 34.602-2020
		– разработка автоматизированной информационно-измерительной системы (АИИС) сбора, обработки и анализа экспериментальных данных	№ 102-ФЗ от 26.06.2008; ГОСТ Р ИСО 5725-2002 (Ч. 1-6); ГОСТ Р 8.820-2013; ГОСТ Р 59159-2020; ГОСТ 59160-2020; РМГ 29- 2013
		– разработка проектной документации на объект и испытательный стенд	ГОСТ Р 56098-2017; ГОСТ Р 8.1024-2023; РМГ 63-2003
	Разработка программы и методики испытаний	– унификация требований к модели, средствам измерений, условиям проведения, обработке экспериментальных данных, квалификации операторов, обработке и оформлению результатов измерений	№ 102-ФЗ от 26.06.2008; ГОСТ Р ИСО 5725-2002 (Ч. 1-6); ГОСТ Р 56098-2017; ГОСТ Р 8.1024-2023; ГОСТ Р 8.820-2013; ГОСТ Р 59159-2020; ГОСТ 59160-2020; РМГ 29-2013; РМГ 63-2003
Организационно-управленческие	Разработка графика испытаний	– планирование сроков проведения испытаний	-
	Разработка форм документации	– разработка форм сбора и регистрации параметров	-
		– разработка форм отчетной документации	-
Финансово-экономические	Планирование финансов и материально-технического обеспечения испытаний	– планирование материально-технического обеспечения испытаний	-
		– планирование затрат	-
		– планирование рисков	-

**Элементы модели процесса исследовательских испытаний ЭРД,
подэтап «Пуско-наладочные работы»**

Этапы процесса исследовательских испытаний ЭРД	Пуско-наладочные работы		Регламентирующие нормативные документы
	Элементы модели процесса исследовательских испытаний ЭРД		
Группа подпроцессов	Подпроцессы	Основные задачи подпроцессов	
Функциональные	Проверка компетентности персонала и анализ комплектности и соответствия документации на систему и объект испытаний	– определение соответствия привлекаемого персонала установленным требованиям	ГОСТ ISO/IEC 17025-2019
		– определение комплектности и соответствия установленным требованиям проектно-конструкторской, эксплуатационной документации, документации системы охраны труда, документации на проведение испытаний	ГОСТ ISO/IEC 17025-2019
	Монтаж, подготовка и проверка работоспособности системы и объекта испытаний	– подготовка и сборка испытательного стенда в соответствии с утвержденной проектно-конструкторской документацией	-
		– установление факта работоспособности системы и объекта испытаний	-
	Наладочные работы: индивидуальные испытания	– проведение пуско-наладочных работ: индивидуальные испытания составных частей испытательного стенда на заданных режимах	-
	Наладочные работы: комплексные испытания	– проведение пуско-наладочных работ: комплексные испытания на заданных режимах	-
Организационно-управленческие	Утверждение комиссии	– утверждение состава комиссии	-
	Принятие решения о начале испытаний	– принятие решения о начале испытаний	-
Финансово-экономические	-	-	-

Элементы модели процесса исследовательских испытаний ЭРД, подэтап «Испытания»

Этапы процесса исследовательских испытаний ЭРД	Испытания		Регламентирующие нормативные документы
	Элементы модели процесса исследовательских испытаний ЭРД		
Группа подпроцессов	Подпроцессы	Основные задачи подпроцессов	
Функциональные	Выполнение испытаний согласно программе и методике	– проведение испытаний согласно программе и методике	№ 102-ФЗ от 26.06.2008; Приказ Минпромторга России от 15.12.2015 №4091; Приказ Минпромторга России от 31.07.2020 №2510; ГОСТ ISO/IEC 17025-2019; ГОСТ Р 8.568-2017; РМГ 29-2013
	Мониторинг и управление испытаниями	– контроль соответствия условий окружающей среды	№ 102-ФЗ от 26.06.2008; Приказ Минпромторга России от 15.12.2015 №4091; Приказ Минпромторга России от 31.07.2020 №2510; ГОСТ ISO/IEC 17025-2019; ГОСТ Р 8.568-2017; РМГ 29-2013
		– мониторинг выполнения эксперимента согласно программе и методике	№ 102-ФЗ от 26.06.2008; Приказ Минпромторга России от 15.12.2015 №4091; ГОСТ ISO/IEC 17025-2019; РМГ 29-2013
		– управление режимами испытаний согласно программе и методике	№ 102-ФЗ от 26.06.2008; Приказ Минпромторга России от 15.12.2015 №4091; ГОСТ ISO/IEC 17025-2019; РМГ 29-2013
	Выполнение мероприятий по устранению дефектов	– выполнение разработанных мероприятий по устранению причин нештатной ситуации	-
Организационно-управленческие	Разработка мероприятий по продлению испытаний	– выяснение причин нештатной ситуации на основе анализа выявленных дефектов	-
		– разработка мероприятий по устранению причин нештатной ситуации	-
Финансово-экономические	-	-	-

**Элементы модели процесса исследовательских испытаний ЭРД,
этап «Обработка и анализ результатов»**

Этапы процесса исследовательских испытаний ЭРД	Обработка и анализ результатов испытаний		Регламентирующие нормативные документы
	Элементы модели процесса исследовательских испытаний ЭРД		
	Подпроцессы	Основные задачи подпроцессов	
Функциональные	Анализ и первичная обработка экспериментальной информации	– получение исправленного ряда измерений	№ 102-ФЗ от 26.06.2008; ГОСТ Р ИСО 5725-2002 (Ч. 1-6); РМГ 29-2013
	Вторичная обработка экспериментальной информации	– определение обобщенных характеристик функционирования эффективности и надежности объекта в соответствии с программой и методикой испытаний	№ 102-ФЗ от 26.06.2008; ГОСТ Р ИСО 5725-2002 (Ч. 1-6); РМГ 29-2013
Организационно-управленческие	Подготовка итогового отчета	– подготовка итогового отчета	-
	Принятие решения о необходимости выполнения доводочных работ	– принятие решения о необходимости выполнения доводочных работ	-
Финансово-экономические	-	-	-

Таблица А5. Элементы модели процесса исследовательских испытаний ЭРД, этап «Принятие решений»

Этапы процесса исследовательских испытаний ЭРД	Принятие решений		Регламентирующие нормативные документы
	Элементы модели процесса исследовательских испытаний ЭРД		
Группа подпроцессов	Подпроцессы	Основные задачи подпроцессов	
Функциональные	Диагностика технического состояния и надежности объекта	– сравнение полученных данных с проектными данными	-
		– оценка технического состояния и надежности объекта	ГОСТ Р 27.102-2021 и т.д.
Организационно-управленческие	Подготовка итогового отчета	– подготовка итогового отчета	-
	Принятие решения	– принятие решения о техническом состоянии и надежности объекта	-
Финансово-экономические	Анализ затрат	– сравнение фактических расходов с плановыми показателями	-

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Система показателей качества процесса исследовательских испытаний ЭРД

Уровни показателей качества исследовательских испытаний ЭРД			
0-ой уровень	1-ый уровень	2-ой уровень	3-ий уровень
<i>P</i> - качество процесса исследовательских испытаний ЭРД	<i>P</i> ₁ - качество объекта	<i>P</i> _{1.1} - качество разработки модели объекта	.....
		<i>P</i> _{1.2} - качество изготовления объекта	.....
	<i>P</i> ₂ - качество испытательного стенда	<i>P</i> _{2.1} - качество разработки модели испытательного стенда	.....
		<i>P</i> _{2.2} - качество изготовления испытательного стенда	.....
		<i>P</i> _{2.3} - качество эксплуатации испытательного стенда	<i>P</i> _{2.3.1} - пуско-наладочные работы
			<i>P</i> _{2.3.2} - текущее состояние стендовых систем
			<i>P</i> _{2.3.3} - техническое обслуживание
	<i>P</i> ₃ - качество автоматизации процесса испытаний	<i>P</i> _{3.1} - качество автоматизации управления процессом	<i>P</i> _{3.1.1} - качество разработки автоматизированной системы управления процессом
			<i>P</i> _{3.1.2} - качество автоматизированной системы управления процессом
			<i>P</i> _{3.1.3} - качество автоматизации управления процессом
			<i>P</i> _{3.1.4} - качество эксплуатации автоматизированной системы управления процессом
		<i>P</i> _{3.2} - качество автоматизации регистрации первичных данных	<i>P</i> _{3.2.1} - качество разработки автоматизированной системы регистрации первичных данных
			<i>P</i> _{3.2.2} - качество автоматизированной системы регистрации первичных данных
			<i>P</i> _{3.2.3} - качество автоматизации регистрации первичных данных
			<i>P</i> _{3.2.4} - качество эксплуатации автоматизированной системы регистрации первичных данных
		<i>P</i> _{3.3} - качество автоматизации обработки результатов измерений	<i>P</i> _{3.3.1} - качество разработки автоматизированной системы обработки результатов измерений
			<i>P</i> _{3.3.2} - качество автоматизированной системы обработки результатов измерений
			<i>P</i> _{3.3.3} - качество автоматизации обработки результатов измерений
			<i>P</i> _{3.3.4} - качество эксплуатации автоматизированной системы обработки результатов измерений
	<i>P</i> ₄ - качество проведения испытаний	<i>P</i> _{4.1} - качество воспроизведения условий проведения эксперимента	.....
		<i>P</i> _{4.2} - качество используемого рабочего	.....

		тела (чистота состава рабочего тела)	
		$P_{4.3}$ - качество программы и методики испытаний (ПМИ)	$P_{4.3.1}$ - качество, получаемой измерительной информации
			$P_{4.3.2}$ - точность результатов измерений (правильность, прецизионность, повторяемость, воспроизводимость)
			$P_{4.3.3}$ - диапазон измерений
		$P_{4.4}$ - качество измерительной процедуры	$P_{4.4.1}$ - операционная сложность измеряемой процедуры
			$P_{4.4.2}$ - удобство считывания измерительной информации
			$P_{4.4.3}$ - удобство настройки средства измерений
		$P_{4.5}$ - стандартизованность методик измерений	$P_{4.5.1}$ - стандартизованность методики измерений
			$P_{4.5.2}$ - стандартизованность средства измерения
	P_5 - качество кадрового обеспечения	.....	.....
	P_6 - безопасность процесса испытаний	$P_{6.1}$ - безопасность объекта	.....
		$P_{6.2}$ - безопасность испытательного стенда	.....
		$P_{6.3}$ - безопасность средств измерения	.....
		$P_{6.4}$ - безопасность процесса испытаний (в части влияния на оператора и окружающую среду)	.....
	P_7 - экономичность процесса испытаний	$P_{7.1}$ - трудоемкость	$P_{7.1.1}$ - разработки модели объекта
			$P_{7.1.2}$ - изготовления объекта
			$P_{7.1.3}$ - разработки модели испытательного стенда
			$P_{7.1.4}$ - изготовления испытательного стенда
			$P_{7.1.5}$ - разработки ПМИ
			$P_{7.1.6}$ - разработки методики измерений
			$P_{7.1.7}$ - разработки автоматизированной системы управления процессом
			$P_{7.1.8}$ - разработки автоматизированной системы регистрации первичных данных
			$P_{7.1.9}$ - разработки автоматизированной системы обработки результатов измерений
		$P_{7.2}$ - время проведения исследовательских испытаний	.....
		$P_{7.3}$ - стоимость	$P_{7.3.1}$ - разработки модели объекта
			$P_{7.3.2}$ - изготовления объекта
			$P_{7.3.3}$ - разработки модели испытательного стенда
			$P_{7.3.4}$ - изготовления испытательного стенда
			$P_{7.3.5}$ - разработки ПМИ
			$P_{7.3.6}$ - разработки методики измерений

			$P_{7.3.7}$ - расходуемых в процессе испытаний материалов
			$P_{7.3.8}$ - разработки автоматизированной системы управления процессом
			$P_{7.3.9}$ - разработки автоматизированной системы регистрации первичных данных
			$P_{7.3.10}$ - разработки автоматизированной системы обработки результатов измерений
		$P_{7.4}$ - необходимая квалификация персонала	
	P_8 - экологичность процесса испытаний		

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Качество процесса исследовательских испытаний ЭРД

Наименование комплексного показателя	Обозначение комплексного показателя, P_j	Значение комплексного весового коэффициента a_j	Наименование группового показателя	Обозначение группового показателя P_{jk}	Значение группового весового коэффициента a_{jk}	Наименование единичного показателя	Обозначение единичного показателя P_{jk}	Значение единичного весового коэффициента a_{jk}
Качество объекта	P_1	0.15	Качество разработки модели объекта	$P_{1.1}$	0.50	-	-	-
			Качество изготовления объекта	$P_{1.2}$	0.50	-	-	-
Качество испытательного стенда	P_2	0.15	Качество разработки модели испытательного стенда	$P_{2.1}$	0.33	-	-	-
			Качество изготовления испытательного стенда	$P_{2.2}$	0.33	-	-	-
			Качество эксплуатации испытательного стенда	$P_{2.3}$	0.34	Пуско-наладочные работы	$P_{2.3.1}$	0.20
						Текущее состояние стендовых систем	$P_{2.3.2}$	0.40
						Техническое обслуживание	$P_{2.3.3}$	0.40
			Качество автоматизации процесса испытаний	P_3	0.1	Качество автоматизации управления процессом	$P_{3.1}$	0.33
Качество автоматизированной системы управления процессом	$P_{3.1.2}$	0.30						
Качество автоматизации управления процессом	$P_{3.1.3}$	0.20						

						Качество эксплуатации автоматизированной системы управления процессом	$P_{3.1.4}$	0.20
			Качество автоматизации регистрации первичных данных	$P_{3.2}$	0.33	Качество разработки автоматизированной системы регистрации первичных данных	$P_{3.2.1}$	0.30
						Качество автоматизированной системы регистрации первичных данных	$P_{3.2.2}$	0.30
						Качество автоматизации регистрации первичных данных	$P_{3.2.3}$	0.20
						Качество эксплуатации автоматизированной системы регистрации первичных данных	$P_{3.2.4}$	0.20
			Качество автоматизации обработки результатов измерений	$P_{3.3}$	0.34	Качество разработки автоматизированной системы обработки результатов измерений	$P_{3.3.1}$	0.30
						Качество автоматизированной системы обработки результатов измерений	$P_{3.3.2}$	0.30
						Качество автоматизации обработки результатов измерений	$P_{3.3.3}$	0.20
						Качество эксплуатации автоматизированной системы обработки результатов измерений	$P_{3.3.4}$	0.20

Качество проведения испытаний	P_4	0.15	Качество воспроизведения условий проведения эксперимента	$P_{4.1}$	0.35	-	-	-
			Качество используемого рабочего тела (чистота состава рабочего тела)	$P_{4.2}$	0.35	-	-	-
			Качество ПМИ	$P_{4.3}$	0.15	Качество получаемой измерительной информации	$P_{4.3.1}$	0.45
						Точность результатов измерений (правильность, прецизионность, повторяемость, воспроизводимость)	$P_{4.3.2}$	0.40
						Диапазон измерений	$P_{4.3.3}$	0.15
			Качество измерительной процедуры	$P_{4.4}$	0.10	Операционная сложность измеряемой процедуры	$P_{4.4.1}$	0.20
						Удобство считывания измерительной информации	$P_{4.4.2}$	0.40
						Удобство настройки средства измерений	$P_{4.4.3}$	0.40
			Стандартизованность МВИ	$P_{4.5}$	0.10	Стандартизованность методики измерений	$P_{4.5.1}$	0.4
						Стандартизованность средства измерения	$P_{4.5.2}$	0.6
Качество кадрового обеспечения	P_5	0.15	-	-	-	-	-	-
Безопасность процесса испытаний	P_6	0.15	Безопасность объекта	$P_{6.1}$	0.25	-	-	-
			Безопасность испытательного стенда	$P_{6.2}$	0.25	-	-	-

			Безопасность средств измерения	$P_{6.3}$	0.25	-	-	-
			Безопасность процесса испытаний (в части влияния на оператора и окружающую среду)	$P_{6.4}$	0.25	-	-	-
Экономичность процесса испытаний	P_7	0.05	Трудоемкость	$P_{7.1}$	0.3	Разработки модели объекта	$P_{7.1.1}$	0.1
						Изготовления объекта	$P_{7.1.2}$	0.1
						Разработки модели испытательного стенда	$P_{7.1.3}$	0.1
						Изготовления испытательного стенда	$P_{7.1.4}$	0.1
						Разработки ПМИ	$P_{7.1.5}$	0.15
						Разработки МВИ	$P_{7.1.6}$	0.15
						Разработки автоматизированной системы управления процессом	$P_{7.1.7}$	0.10
						Разработки автоматизированной системы регистрации первичных данных	$P_{7.1.8}$	0.10
						Разработки автоматизированной системы обработки результатов измерений	$P_{7.1.9}$	0.10
			Время проведения исследовательских испытаний	$P_{7.2}$	0.3	-	-	-
			Стоимость	$P_{7.3}$	0.1	Разработки модели объекта	$P_{7.3.1}$	0.10
						Изготовления объекта	$P_{7.3.2}$	0.10

						Разработки модели испытательного стенда	$P_{7.3.3}$	0.10
						Изготовления испытательного стенда	$P_{7.3.4}$	0.10
						Разработки ПМИ	$P_{7.3.5}$	0.10
						Разработки МВИ	$P_{7.3.6}$	0.10
						Расходуемых в процессе испытаний материалов	$P_{7.3.7}$	0.10
						Разработки автоматизированной системы управления процессом	$P_{7.3.8}$	0.10
						Разработки автоматизированной системы регистрации первичных данных	$P_{7.3.9}$	0.10
						Разработки автоматизированной системы обработки результатов измерений	$P_{7.3.10}$	0.10
			Необходимая квалификация персонала	$P_{7.4}$	0.3	-	-	-
Экологичность процесса испытаний	P_8	0.1	-	-	-	-	-	-

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Шкала оценки качества процесса исследовательских испытаний ЭРД

Наименование комплексного показателя	Наименование группового показателя	Критерии оценки группового показателя	Наименование единичного показателя	Критерии оценки единичного показателя
Качество объекта	Качество разработки модели объекта	0 – полное несоответствие техническому заданию и базовым требованиям; ошибки в расчетах параметров (удельный импульс, тяга, КПД); неработоспособность ключевых систем (ионный источник, ускоритель, нейтрализатор); отсутствие экспериментальных данных или их недостоверность; невозможность применения даже в тестовом режиме 1 – частичное соответствие ТЗ с существенными отклонениями; низкие показатели эффективности (КПД <50%, малый ресурс); проблемы с устойчивостью разряда или эрозией электродов; ограниченные испытания без подтверждения заявленных характеристик; необходимость кардинального изменения конструкции 2 – соответствие основным требованиям, но с замечаниями; стабильная работа только в узком диапазоне режимов; средние показатели (удельный импульс 2000–3000 с, КПД 50–60%); наличие проблем с деградацией материалов или колебаниями тяги; требует доработок для практического использования	-	-

		3 - полное соответствие заявленным характеристикам; устойчивая работа в расчетных режимах (удельный импульс 3000–4000 с, КПД 60–70%); проведен полный цикл испытаний с положительными результатами; отсутствие критических недостатков, но есть потенциал для оптимизации; 4 - превышение базовых требований по ключевым параметрам; высокая эффективность (удельный импульс > 4000 с, КПД > 70%); долгий ресурс работы (более 10 000 часов); успешные испытания в условиях, близких к эксплуатационным; применение перспективных технологий (магнитоплазменное ускорение, новые материалы); готовность к использованию в реальных миссиях 5 – рекордные показатели (удельный импульс > 5000 с, КПД > 80%); исключительная надежность и ресурс (> 20 000 часов); подтверждение характеристик в натурных космических испытаниях; использование инновационных решений (безэлектродные схемы, альтернативные рабочие тела); соответствие требованиям будущих межпланетных миссий; потенциал для коммерциализации и массового применения		
	Качество изготовления объекта	0 - критические дефекты сборки, делающие двигатель неработоспособным; значительные отклонения от КД; нарушение герметичности камеры, и утечка рабочего тела; несоответствие материалов техническим требованиям; полная непригодность к эксплуатации;	-	-

		1 - многочисленные дефекты изготовления, влияющие на работоспособность; существенные отклонения геометрических параметров; проблемы с вакуумной плотностью соединений; видимые дефекты поверхности электродов и других критических элементов; требует значительных доработок перед испытаниями; 2 - соответствие основным требованиям с допустимыми отклонениями; наличие незначительных дефектов, не влияющих на основные характеристики; небольшие отклонения в геометрии элементов (в пределах допусков); требует отдельных корректировок перед эксплуатацией; пригоден для испытаний в ограниченном режим; 3 - полное соответствие технической документации; минимальные отклонения от проектных параметров; качественная сборка всех узлов и систем; отсутствие видимых дефектов критических элементов; готов к испытаниям; 4 - прецизионное соответствие всем проектным требованиям; идеальная подгонка всех компонентов; использование материалов высшего качества; отсутствие даже минимальных дефектов; полная готовность к эксплуатации в штатном режиме; 5 - превышение всех требований к точности изготовления; применение передовых технологий производства; идеальные характеристики всех компонентов; дополнительные усовершенствования по сравнению с проектом; готовность к длительной		
--	--	---	--	--

		эксплуатации в экстремальных условиях		
Качество испытательного стенда	Качество разработки модели испытательного стенда	0 - полное несоответствие требованиям к моделированию рабочих процессов; критические ошибки в математическом описании физических процессов; отсутствие ключевых модулей (вакуумная система, диагностика, управление); невозможность адекватного прогнозирования поведения реального стенда; 1 - упрощенное описание основных систем с грубыми допущениями; учет только базовых параметров без детализации процессов; серьезные расхождения с реальными физическими процессами; пригодна только для концептуальных оценок первого приближения; 2 - учет основных систем стенда с приемлемой точностью; наличие модулей вакуумной системы и базовой диагностики; ограниченные возможности прогнозирования нештатных ситуаций; требует существенной доработки для практического применения; 3 - полноценное описание всех основных систем стенда; адекватное моделирование рабочих процессов ЭРД; возможность прогнозирования стандартных; режимов работы пригодна для предварительной отработки испытательных процедур; 4 - детализированное описание всех подсистем с учетом взаимовлияний; модули диагностики высокой точности;	-	-

		возможность моделирования нештатных ситуаций; валидация на реальных экспериментальных данных; пригодна для оптимизации параметров стенда; 5 - полное физически обоснованное описание всех процессов; интеграция с CAD-моделями оборудования; возможность цифрового двойника стенда; высокая точность прогнозирования (погрешность <1%); использование для виртуальных испытаний новых ЭРД		
	Качество изготовления испытательного стенда	0 - грубые нарушения технологических процессов сборки; несоответствие конструкции проектным чертежам более чем на 15%; наличие критических дефектов сварных швов и вакуумных соединений; негерметичность основных систем более допустимых норм в 10 раз; 1 - многочисленные отклонения от проектной документации (5-15%); видимые дефекты механической обработки деталей; нестабильная работа вакуумных насосов; проблемы с калибровкой измерительных систем; 2 - допустимые отклонения в пределах 3-5% от проекта; незначительные дефекты неответственных элементов; стабильная работа в номинальных режимах; периодические сбои в работе диагностического оборудования; требует дополнительной настройки перед испытаниями; 3 - полное соответствие проектной документации; качественная сборка всех узлов и систем; стабильная работа вакуумной	-	-

		системы (остаточное давление $<10^{-5}$ Па); точная калибровка измерительных приборов; готовность к проведению большинства испытаний 4 - прецизионное соответствие проекту (отклонения $<1\%$); использование высококачественных материалов и комплектующих; идеальная герметичность всех систем; автоматизированная система контроля параметров; возможность работы в экстремальных режимах; 5 - превышение проектных характеристик; применение передовых технологий изготовления; наличие дополнительных усовершенствований		
	Качество эксплуатации испытательного стенда	0 - регулярные критические отказы оборудования; превышение допустимых параметров работы; полное отсутствие системы технического обслуживания; частые повреждения испытываемых ЭРД; эксплуатация запрещена надзорными органами; 1 - частые простои из-за технических неисправностей; нарушения регламентов технического обслуживания; работа на предельных режимах без мониторинга; отсутствие системы предупреждения аварий; повышенный износ критического оборудования; требуется капитальный ремонт; 2 - периодические технические проблемы; базовое соблюдение регламентов ТО; работа преимущественно в штатных режимах; элементарная система	Пуско-наладочные работы	0 - критические нарушения технологического процесса; не выполнены основные проверки и тесты; отсутствие документации по наладке; выявлены грубые ошибки монтажа; требуется полный пересмотр работ; 1 - выполнены только базовые операции; частичное соответствие техническим требованиям; отсутствие системы контроля качества; многочисленные замечания по наладке; необходимы существенные доработки; 2 - соблюдены основные технологические нормы; проведены ключевые испытания; имеются незначительные отклонения; требуется дополнительная регулировка; локальные недочеты в документации; 3 - полное соответствие техническому заданию; качественное выполнение всех этапов; минимальное количество замечаний; полный комплект исполнительной документации; готовность к эксплуатационным испытаниям; 4 - превышение требований технической документации; использование передовых методик наладки; автоматизированный

		мониторинга параметров; средний уровень износа оборудования; требуются улучшения в системе управления; 3 - стабильная работа в штатных режимах; регулярное техническое обслуживание; наличие системы мониторинга основных параметров; минимальное количество нештатных ситуаций; умеренный износ оборудования; соответствие отраслевым стандартам; 4 - бесперебойная работа всех систем; оптимальные режимы эксплуатации; автоматизированная система диагностики; прогнозирующее техническое обслуживание; минимальный износ компонентов; регулярные модернизации и улучшения; 5 баллов - прецизионное управление всеми параметрами; интеллектуальная система прогноза отказов; нулевой неплановый простой; соответствие международным стандартам передового опыта		контроль параметров; идеальное состояние документации; полная готовность к штатной эксплуатации; 5 - совершенство всех технологических процессов; применение инновационных решений; полная цифровизация процессов контроля; документация соответствует международным стандартам; возможность использования как образца для других проектов
			Текущее состояние стендовых систем	0 - критический износ основных компонентов; многочисленные неисправности оборудования; превышение допустимых параметров работы; 1 - высокая степень износа оборудования; частые отказы и сбои в работе; ограниченная функциональность; 2 - средний уровень износа компонентов; периодические технические проблемы; работа в ограниченных режимах; 3 - незначительный износ оборудования; стабильная работа в штатных режимах; 4 - минимальный износ компонентов; бесперебойная работа всех систем; 5 - полная исправность всех систем; автоматизированный контроль параметров;
			Техническое обслуживание	0 - отсутствие технического обслуживания; необходимость полной замены систем; 1 - отсутствие плановых ремонтов; требуется капитальный ремонт; 2 - проведение текущих ремонтов; необходимость модернизации; 3 - полное соответствие техническим требованиям; регулярное техническое обслуживание; 4 - наличие систем мониторинга состояния; профилактическое обслуживание; 5 - предиктивная система обслуживания
Качество проведения испытаний	Качество воспроизведения условий проведения эксперимента	0 - критические отклонения от требуемых параметров (>50%); невозможность поддержания стабильного вакуума; систематические искажения измеряемых параметров; отсутствие	-	-

		контроля; ключевых характеристик эксперимента; 1 - грубые отклонения основных параметров (20-50%); нестабильность рабочих режимов; ограниченный контроль измеряемых величин; значительные погрешности диагностики; данные требуют серьезной корректировки; 2 - допустимые отклонения параметров (10-20%); возможность поддержания базовых условий; наличие основных систем измерения; периодические сбои в работе систем; данные пригодны для ориентировочных оценок; 3 - незначительные отклонения (<10%); стабильное поддержание рабочих условий; полный набор измерительных систем; минимальные искажения измеряемых параметров; данные пригодны для технических отчетов; 4 - точное воспроизведение условий (<5%); прецизионные системы контроля; автоматическая стабилизация параметров; 5 - эталонное воспроизведение условий (<1%); системы активной коррекции в реальном времени; верифицированная методика измерений		
	Качество используемого рабочего тела (чистота состава рабочего тела)	0 - концентрация примесей >10%; наличие недопустимых химических соединений; загрязнение механическими частицами; вызывает эрозию электродов; полностью нарушает рабочий процесс ЭРД; 1 - примеси 5-10% от общего состава; наличие нежелательных химических элементов; видимые признаки загрязнения; существенно снижает ресурс двигателя;	-	-

		2 - примеси 1-5%; допустимые, но неоптимальные примеси; минимальные механические загрязнения; допустимо для кратковременных испытаний; умеренное влияние на ресурс; 3 - примеси 0.1-1%; соответствует базовым техническим требованиям; нет критических загрязнений; подходит для большинства эксплуатационных режимов; незначительное влияние на долговечность; 4 - примеси 0.01-0.1%; специальная очистка и подготовка оптимальный состав для конкретного типа ЭРД; минимальное влияние на характеристики двигателя; соответствует требованиям длительных миссий; 5 - примеси <0.01%; специальные условия хранения и подачи; максимальный ресурс и эффективность двигателя		
	Качество ПМИ	0 - отсутствие системного подхода к измерениям; критические ошибки в выборе измеряемых параметров; несоответствие средств измерения техническим требованиям; 1 - учет только базовых параметров (тяга, потребляемый ток); использование неупомянутого оборудования; отсутствие методик оценки погрешностей; нет плана калибровок и поверок; 2 - измерение основных рабочих характеристик ЭРД; наличие поверенного оборудования; частичный учет погрешностей измерений; элементарная система документирования данных;	Качество получаемой измерительной информации	0 - отсутствие методик обработки и верификации данных; полученные результаты не представляют научно-технической ценности; 1 - данные требуют существенной перепроверки; 2 - результаты требуют существенной доработки для точных исследований; 3 - данные пригодны для технических отчетов; 4 - данные полные, подходят для научного анализа и сравнения испытаний; 5 - измерения максимально точные, откалиброванные, синхронизированы; позволяют проводить глубокий анализ, моделирование и оптимизацию параметров ЭРД

		3 - полный набор измеряемых параметров согласно ТЗ; использование сертифицированного оборудования; применение стандартных методик оценки погрешностей; регулярные калибровки измерительных каналов; 4 - комплексный контроль всех значимых параметров; использование прецизионного измерительного комплекса; автоматизированный сбор и первичная обработка данных; применение современных методов верификации; 5 - полноценный мониторинг всех параметров в реальном времени; использование эталонных измерительных систем; интегрированная система оценки достоверности данных; автоматическая коррекция методик по результатам измерений; соответствие международным стандартам космических испытаний	Точность результатов измерений (правильность, прецизионность, повторяемость, воспроизводимость)	0 - результаты сильно отклоняются от истинного значения, значения нестабильны, нет воспроизводимости и повторяемости, полное несоответствие стандартам; 1 - правильность измерений нарушена, данные случайны, разброс значений велик, повторные измерения часто дают разные результаты, воспроизводимость практически отсутствует; 2 - повторяемость слабая, воспроизводимость неудовлетворительная; правильность нестабильна; 3 - допустимый уровень отклонений; правильность приемлема, прецизионность умеренная; повторяемость достигается при стабильных условиях; воспроизводимость ограниченная; 4 - результаты близки к истинным значениям, измерения стабильны, хорошо воспроизводимы; прецизионность высокая, отклонения минимальны; 5 - максимально возможная правильность и прецизионность; повторяемость и воспроизводимость полностью соответствуют требованиям стандартов и методик; результаты надёжны и воспроизводимы в любых условиях
			Диапазон измерений	0 - диапазон измерений не охватывает ключевые параметры работы ЭРД; данные некорректны или отсутствуют; 1 - диапазон сильно ограничен; основные характеристики двигателя не могут быть оценены; наблюдаются значительные погрешности; 2 - частично охвачены основные параметры; остаются существенные пробелы в измерениях; точность данных на грани допустимой; 3 - охвачены большинство рабочих режимов; погрешности в допустимых пределах; данных достаточно для общего анализа; 4 - широкий и детализированный диапазон измерений; высокая точность; зафиксированы все ключевые режимы;

				5 - полный охват всех возможных режимов работы; эталонная точность; данные позволяют проводить углублённый анализ
	Качество измерительной процедуры	0 - полное отсутствие стандартизированного подхода к измерениям; критические методические ошибки в последовательности и технике измерений; использование непригодного оборудования (неповеренного, несоответствующего ТЗ); отсутствие контроля условий измерений (температура, вибрации, эм-помехи); данные не подлежат обработке и не могут быть использованы для анализа; 1 - минимальный набор измерений (только основные параметры: ток, напряжение); ручные измерения без автоматизации; отсутствие плана калибровки и поверки оборудования; нет учета внешних факторов, влияющих на точность; данные требуют полной; перепроверки из-за высокой погрешности; 2 - измерение ключевых параметров (тяга, удельный импульс кпд); частичная автоматизация сбора данных; периодическая калибровка оборудования; учет основных погрешностей (но без детального анализа); данные пригодны для предварительных выводов, но с ограничениями; 3 - полный набор измерений, согласно ТЗ, автоматизированный сбор данных с фиксацией временных меток регулярные калибровки и поверки оборудования контроль внешних условий (температура,	Операционная сложность измеряемой процедуры	0 - полное отсутствие методики измерений; необходимое оборудование недоступно; технические требования невыполнимы в имеющихся условиях; 1 - требуется разработка уникальной измерительной системы; необходимо специальное обучение персонала; каждое измерение требует ручной настройки; 2 - используется нестандартное измерительное оборудование; требуется значительная подготовка перед каждым измерением; процедура содержит множество ручных операций; 3 - применяется стандартное, но специализированное оборудование; требуется предварительная настройка системы; 4 - используются серийные измерительные комплексы; минимальная ручная настройка; 5 - полностью автоматизированная измерительная система; стандартные процедуры измерений; минимальное участие оператора; возможность дистанционного управления; готовая методика с подробными инструкциями
			Удобство считывания измерительной информации	0 - отсутствие визуализации данных; показания невозможно считать; нет доступа к измерительным каналам; 1 - требуется ручная расшифровка; отсутствие единого интерфейса; частые ошибки отображения; 2 - данные разрознены; ограниченная визуализация; неудобный формат представления; требуется дополнительная обработка; 3 - основные параметры видны; есть базовая визуализация; данные доступны в одном интерфейсе; требуется минимальная интерпретация;

		влажность, вибрации) данные достоверны и могут использоваться для отчетов и сертификации; 4 - высокоточные измерения всех параметров, включая второстепенные автоматическая коррекция погрешностей в реальном времени; резервирование измерительных каналов для повышения надежности; использование эталонных датчиков для верификации; 5 - прецизионные измерения с погрешностью менее 0,1%; полная автоматизация и цифровизация процесса измерений; интеграция с системой управления испытаниями (обратная связь); метрологическое сопровождение на всех этапах; данные признаются эталонными и используются для калибровки других стендов		4 - четкая организация данных; хорошая визуализация; автоматическое обновление; удобная навигация по параметрам; 5 - интуитивно понятный интерфейс; адаптивное отображение; многоканальная визуализация; возможность настройки представления;
			Удобство настройки средства измерений	0 - отсутствуют регулировочные элементы; нет доступа к параметрам конфигурации; требуется заводское вмешательство; 1 - необходим специальный инструмент; требуется физическое вмешательство в конструкцию; отсутствует документация; высокий риск повреждения оборудования; 2 - многоступенчатый сложный процесс; ручной ввод множества параметров; отсутствие автоматизированных процедур; необходим высококвалифицированный персонал; 3 - наличие базовых инструкций; стандартный набор регулировок; частичная автоматизация процесса; требуется средняя квалификация оператора; 4 - интуитивно понятный интерфейс; наличие шаблонов настроек; минимальное количество ручных операций; быстрая калибровка; 5 - полностью автоматизированный процесс; самонастраивающаяся система; интеллектуальные помощники; мгновенное применение изменений; возможность дистанционной конфигурации
	Стандартизованность МВИ	0 - испытания проводятся по произвольным, недокументированным процедурам; нет ссылок на нормативные документы или стандарты; каждый эксперимент проводится по уникальной схеме; результаты невозможно сравнить между собой;	Стандартизованность методики измерений	0 - методика измерений отсутствует или носит исключительно экспериментальный характер; отсутствуют документированные процедуры; повторяемость измерений не обеспечивается; 1 - методика существует, но слабо формализована; не закреплена в официальных документах; результаты слабо воспроизводимы между различными лабораториями или операторами;

		1 - имеется базовое описание процедуры испытаний; частичное соответствие некоторым отраслевым рекомендациям; отсутствие строгих требований к условиям проведения; нет системы контроля соблюдения методики; требуется существенная доработка для воспроизводимости; 2 - соответствие отдельным национальным стандартам; определены ключевые параметры контроля; имеются шаблоны протоколов испытаний; недостаточно детализированы критические процедуры; 3 - четкие требования ко всем этапам испытаний; использование поверенного оборудования; наличие системы контроля качества измерений; возможность воспроизведения результатов на аналогичных стендах; 4 - включение передовых методов контроля и измерений; автоматизированная система документирования; регулярные аудиты соответствия методики; возможность кросс-валидации с другими лабораториями; 5 - полное соответствие требованиям космических агентств; интеграция с системами менеджмента качества; постоянный мониторинг и улучшение процедур; используется для сертификации других испытательных центров	Стандартизованность средства измерения	2 - методика частично формализована, но используются разные подходы в разных организациях; частично описаны условия и процедуры измерений; результаты ограниченно сравнимы; 3 - методика формализована в рамках одной или нескольких организаций; имеются внутренние стандарты; обеспечена приемлемая воспроизводимость; возможна адаптация под международные требования; 4 - методика документирована в виде национального стандарта (например, ГОСТ, ТУ); выполнение измерений возможно в различных лабораториях с высокой степенью согласованности; поддерживается прослеживаемость; 5 - полная стандартизация; методика признана на международном уровне (например, ISO); поддерживается калибровка, верификация и валидация; обеспечена высокая точность и воспроизводимость в любых условиях 0 - измерительное средство отсутствует или представляет собой лабораторную сборку без стабильных характеристик; нет данных о точности и поверке; 1 - используется уникальное или самодельное устройство без верифицированной конструкции; отсутствуют документы на допуски и погрешности; результаты нестабильны; 2 - средство измерений создано по типовой схеме, но без сертификации; частично известны характеристики; возможно повторение измерений в тех же условиях; 3 - средство разработано по внутренним стандартам организации; имеется техническая документация; параметры стабильны; возможна поверка внутри организации; 4 - средство имеет национальную сертификацию (например, внесено в реестр средств измерений); известны метрологические характеристики; возможно
--	--	--	---	---

				использование в аккредитованных лабораториях; 5 - средство измерений сертифицировано по международным стандартам (например, ISO); прошла государственную поверку; применимо для точных измерений с международной прослеживаемостью
Качество автоматизации процесса испытаний	Качество автоматизации управления процессом	0 - не удовлетворяет установленным требованиям пользователей; 1 - частичная автоматизация системы управления процессом (от 1 до 25 % параметров); 2 - частичная автоматизация системы управления процессом (от 25 % до 50 % параметров); 3 - частичная автоматизация системы управления процессом (от 50 % до 75 % параметров); 4 - полностью удовлетворяет установленным требованиям пользователей (от 75 % до 100 % параметров); 5 - "восхищенные требования" (интеграция систем управления процессом и регистрации данных и/или обработки результатов измерений)	Качество разработки автоматизированной системы управления процессом	0 - не удовлетворяет установленным требованиям пользователей; 1 - частичная автоматизация системы управления процессом (от 1 до 25 % параметров); 2 - частичная автоматизация системы управления процессом (от 25 % до 50 % параметров); 3 - частичная автоматизация системы управления процессом (от 50 % до 75 % параметров); 4 - полностью удовлетворяет установленным требованиям пользователей (от 75 % до 100 % параметров); 5 - "восхищенные требования" (интеграция автоматизированных систем управления процессом и регистрации данных и/или обработки результатов измерений)
			Качество автоматизированной системы управления процессом	0 - не автоматизировано; 1 - присутствуют грубые ошибки в статическом/ динамическом/переходном режимах системы управления процессом (от 66% до 100%); 2 - присутствуют ошибки в статическом/ динамическом/переходном режимах системы управления процессом (от 33% до 66%); 3 - присутствуют частичные ошибки в статическом/ динамическом/переходном режимах системы управления процессом (от 1% до 33%); 4 - ошибки в статическом/динамическом/переходном режимах системы управления процессом отсутствуют; 5 - "восхищенные требования"

			Качество автоматизации управления процессом	0 - не удовлетворяет установленным требованиям пользователей; 1 - частичная автоматизация системы управления процессом (от 1 до 25 % параметров); 2 - частичная автоматизация системы управления процессом (от 25 % до 50 % параметров); 3 - частичная автоматизация системы управления процессом (от 50 % до 75 % параметров); 4 - полностью удовлетворяет установленным требованиям пользователей (от 75 % до 100 % параметров); 5 - "восхищенные требования" (интеграция систем управления процессом и регистрации данных и/или обработки результатов измерений)
			Качество эксплуатации автоматизированной системы управления процессом	0 - не эксплуатируется; 1 - эксплуатируется частично (от 1 до 25 % параметров); 2 - эксплуатируется частично (от 25 % до 50 % параметров); 3 - эксплуатируется частично (от 50 % до 75 % параметров); 4 - эксплуатируется полностью (от 75 % до 100 % параметров); 5 - "восхищенные требования" (эксплуатируется методом интеграции автоматизированных систем управления процессом и регистрации данных и/или обработки результатов измерений)

	Качество автоматизации регистрации первичных данных	0 - не удовлетворяет установленным требованиям пользователей; 1 - частичная автоматизация регистрации первичных данных (от 1 до 25 % параметров); 2 - частичная автоматизация регистрации первичных данных (от 25 % до 50 % параметров); 3 - частичная автоматизация регистрации первичных данных (от 50 % до 75 % параметров); 4 - полностью удовлетворяет установленным требованиям пользователей (от 75 % до 100 % параметров); 5 - "восхищенные требования" (интеграция систем управления процессом и регистрации данных и/или обработки результатов измерений)	Качество разработки автоматизированной системы регистрации первичных данных	0 - не удовлетворяет установленным требованиям пользователей; 1 - частичная автоматизация системы регистрации первичных данных (от 1 до 25 % параметров); 2 - частичная автоматизация системы регистрации первичных данных (от 25 % до 50 % параметров); 3 - частичная автоматизация системы регистрации первичных данных (от 50 % до 75 % параметров); 4 - полностью удовлетворяет установленным требованиям пользователей (от 75 % до 100 % параметров); 5 - "восхищенные требования" (интеграция автоматизированных систем регистрации данных и обработки результатов измерений)
			Качество автоматизированной системы регистрации первичных данных	0 - не удовлетворяет установленным требованиям пользователей; 1 - частичная автоматизация системы регистрации первичных данных (от 1 до 25 % параметров); 2 - частичная автоматизация системы регистрации первичных данных (от 25 % до 50 % параметров); 3 - частичная автоматизация системы регистрации первичных данных (от 50 % до 75 % параметров); 4 - полностью удовлетворяет установленным требованиям пользователей (от 75 % до 100 % параметров); 5 - "восхищенные требования" (интеграция системы управления процессом с системой регистрации данных и/или обработки результатов измерений)
			Качество автоматизации регистрации первичных данных	0 - не удовлетворяет установленным требованиям пользователей; 1 - частичная автоматизация регистрации первичных данных (от 1 до 25 % параметров); 2 - частичная автоматизация регистрации первичных данных (от 25 % до 50 % параметров);

				3 - частичная автоматизация регистрации первичных данных (от 50 % до 75 % параметров); 4 - полностью удовлетворяет установленным требованиям пользователей (от 75 % до 100 % параметров); 5 - "восхищенные требования" (интеграция систем управления процессом и регистрации данных и/или обработки результатов измерений)
			Качество эксплуатации автоматизированной системы регистрации первичных данных	0 - не эксплуатируется; 1 - эксплуатируется частично (от 1 до 25 % параметров); 2 - эксплуатируется частично (от 25 % до 50 % параметров); 3 - эксплуатируется частично (от 50 % до 75 % параметров); 4 - эксплуатируется полностью (от 75 % до 100 % параметров); 5 - "восхищенные требования" (эксплуатируется методом интеграции автоматизированных систем регистрации данных и обработки результатов измерений)
	Качество автоматизации обработки результатов измерений	0 - не удовлетворяет установленным требованиям пользователей; 1 - частичная автоматизация обработки результатов измерений (от 1 до 25 % параметров); 2 - частичная автоматизация обработки результатов измерений (от 25 % до 50 % параметров); 3 - частичная автоматизация обработки результатов измерений (от 50 % до 75 % параметров); 4 - полностью удовлетворяет установленным требованиям пользователей (от 75 % до 100 % параметров); 5 - "восхищенные требования" (интеграция систем регистрации	Качество разработки автоматизированной системы обработки результатов измерений	0 - не удовлетворяет установленным требованиям пользователей; 1 - частичная автоматизация системы обработки результатов измерений (от 1 до 25 % параметров); 2 - частичная автоматизация системы обработки результатов измерений (от 25 % до 50 % параметров); 3 - частичная автоматизация системы обработки результатов измерений (от 50 % до 75 % параметров); 4 - полностью удовлетворяет установленным требованиям пользователей (от 75 % до 100 % параметров); 5 - "восхищенные требования" (обработка результатов измерений по нескольким методам: линеаризации, приведения, бутстрап)

		данных и обработки результатов измерений)	Качество автоматизированной системы обработки результатов измерений	0 - не удовлетворяет установленным требованиям пользователей; 1 - частичная автоматизация системы обработки результатов измерений (от 1 до 25 % параметров); 2 - частичная автоматизация системы обработки результатов измерений (от 25 % до 50 % параметров); 3 - частичная автоматизация системы обработки результатов измерений (от 50 % до 75 % параметров); 4 - полностью удовлетворяет установленным требованиям пользователей (от 75 % до 100 % параметров); 5 - "восхищенные требования" (интеграция системы регистрации данных с автоматизированной системой обработки результатов измерений)
			Качество автоматизации обработки результатов измерений	0 - не удовлетворяет установленным требованиям пользователей; 1 - частичная автоматизация обработки результатов измерений (от 1 до 25 % параметров); 2 - частичная автоматизация обработки результатов измерений (от 25 % до 50 % параметров); 3 - частичная автоматизация обработки результатов измерений (от 50 % до 75 % параметров); 4 - полностью удовлетворяет установленным требованиям пользователей (от 75 % до 100 % параметров); 5 - "восхищенные требования" (интеграция систем регистрации данных и обработки результатов измерений)
			Качество эксплуатации автоматизированной системы обработки результатов измерений	0 - не эксплуатируется; 1 - эксплуатируется частично (от 1 до 25 % параметров); 2 - эксплуатируется частично (от 25 % до 50 % параметров); 3 - эксплуатируется частично (от 50 % до 75 % параметров); 4 - эксплуатируется полностью (от 75 % до 100 % параметров)

				% параметров); 5 - "восхищенные требования" (графическое представление (сравнение) трех методов обработки результатов измерений: линеаризации, приведения, бутстрап)
Качество кадрового обеспечения	-	0 - полное отсутствие квалифицированного персонала; нет разделения обязанностей между операторами; отсутствие программ подготовки и аттестации; частые аварии из-за человеческого фактора; невозможность проведения полноценных испытаний 1 - наличие 1-2 специалистов с базовой подготовкой; нет четкого распределения зон ответственности; случайное обучение без системы; высокая зависимость от отдельных сотрудников; частые ошибки при проведении сложных испытаний 2 - укомплектованный штат с основными специалистами; есть разделение по основным направлениям работ; периодическое обучение без системы сертификации; средний уровень профессиональных ошибок; способность проводить только стандартные испытания 3 - полный штат квалифицированных специалистов; четкое распределение функциональных обязанностей; регулярное обучение и внутренняя аттестация; наличие методических документов и инструкций; возможность проведения большинства типов испытаний 4 - штат высококвалифицированных специалистов; глубокая специализация по направлениям	-	-

		работ; система непрерывного профессионального развития; возможность проведения сложных и ответственных испытаний; наличие кадрового резерва 5 - команда экспертов международного уровня; перекрестная специализация сотрудников; собственная система подготовки и сертификации; участие в международных образовательных программах; возможность разработки новых методик испытаний; постоянное совершенствование профессиональных стандартов		
Безопасность процесса испытаний	Безопасность объекта	0 - отсутствие систем аварийной защиты ЭРД; регулярные критические 1 - примитивные аварийной средства защиты ЭРД; 2 - базовые защитные системы с ограниченной эффективностью; 3 - полный набор стандартных защитных систем ЭРД; 4 - продвинутые системы защиты и аварийного отключения ЭРД; 5 - многоуровневая система защиты с резервированием; предиктивная аналитика для предупреждения аварий	-	-
	Безопасность испытательного стенда	0 - полное отсутствие систем безопасности; частые аварии с повреждением оборудования; открытые высоковольтные цепи; неконтролируемые выбросы плазмы; отсутствие аварийных протоколов; 1 - минимальные меры безопасности; устаревшие системы защиты; периодические утечки рабочего тела; отсутствие автоматического отключения;	-	-

		2 - условно безопасный стенд - базовые системы защиты; ручное аварийное отключение; 3 - полный комплект защитных систем; автоматическое отключение при авариях; 4 - дублированные системы защиты; непрерывный мониторинг параметров; автоматизированные протоколы безопасности; 5 - "умные" системы предиктивной безопасности; полная автоматизация защитных процессов; нулевая аварийность		
	Безопасность средств измерения	0 - отсутствие защиты от высокого напряжения; измерительные цепи не изолированы; нет защиты от электромагнитных помех; 1 - минимальная изоляция токоведущих частей; отсутствие защиты от перегрузок; эпизодические сбои в работе; использование устаревшего оборудования; требуется постоянный контроль оператора. 2 - базовая изоляция и защита; наличие простейших предохранителей; периодические проверки оборудования; соответствие минимальным требованиям; 3 - полная гальваническая развязка; автоматическая защита от перегрузок; 4 - двойная изоляция и защита; встроенные системы диагностики; автоматический контроль параметров; 5 - полная защита всех цепей; "умные" системы самодиагностики; резервирование измерительных каналов	-	-
	Безопасность процесса испытаний (в части	0 - постоянное превышение ПДК вредных веществ; отсутствие средств индивидуальной защиты;	-	-

	влияния на оператора и окружающую среду)	неизолированные высоковольтные элементы в зоне доступа; неконтролируемые выбросы токсичных продуктов реакции; регулярные аварии с угрозой жизни персонала; 1 - периодическое превышение ПДК в 5-10 раз; минимальные СИЗ (респираторы, перчатки); ограниченный мониторинг параметров среды; эпизодические утечки рабочего тела; риск профессиональных заболеваний; 2 - превышение ПДК в 2-5 раз; базовый комплект СИЗ; локальная вентиляция; плановые замеры среды; возможны незначительные инциденты; 3 - соответствие ПДК; полный комплект СИЗ; принудительная вентиляция; непрерывный мониторинг; 4 - показатели ниже ПДК; индивидуальные датчики состояния; автоматизированная система защиты; регулярные медосмотры; 5 - полная изоляция опасных процессов; "умные" системы защиты оператора; замкнутый цикл работы		
Экономичность процесса испытаний	Трудоемкость	0 - полностью ручной процесс; подготовка занимает 2+ недели; особо сложные настройки; обработка данных вручную; требуется 13+ специалистов; необходимы работы в несколько смен; 1 - преимущественно ручные операции; длительная подготовка (неделя); сложная калибровка оборудования; трудоемкая обработка результатов; задействовано 9-12 человек	Разработки модели объекта	0 - моделирование не проводится; 0 ч; 1 - используется готовая упрощённая модель или шаблон; минимальные доработки; до 10 ч; 2 - создаётся простая аналитическая или эмпирическая модель; ограниченное число параметров; 10–50 ч; 3 - разрабатывается полуэмпирическая или физическая модель с верификацией; требует расчетов и начальной автоматизации; 50–200 ч; 4 - строится комплексная модель с учётом нескольких физических процессов (электрических, тепловых); используются

		2 - комбинированные процессы (авто+ручные); многоэтапная подготовка (2-3 дня); комплексная настройка параметров; ручная обработка части данных; требуется команда 6-8 специалистов; 3 - частичная автоматизация; несколько ручных операций; подготовка занимает 1 рабочий день; полуавтоматическая обработка данных; задействовано 4-5 человек; 4 - автоматизированные основные процессы; минимальное ручное вмешательство; быстрая подготовка (до 4 часов); автоматическая обработка результатов; требуется 2-3 специалиста; 5 - полностью автоматизированный процесс; отсутствие ручных операций; самонастраивающиеся системы; мгновенная обработка данных; требуется 1 оператор для контроля		специализированные программные среды; 200–600 ч; 5 - многокомпонентная и многопараметрическая модель с высокой степенью детализации (например, МКЭ + управление + термомеханика); требует междисциплинарного подхода и моделирования на уровне системы; от 600 ч и выше, вплоть до 1500+ ч.
			Изготовления объекта	0 - изготовление не требуется; 0 ч; 1 - сборка из готовых или стандартных компонентов; до 20 ч; 2 - простая сборка с частичной механической обработкой; 20–80 ч; 3 - точная сборка, изготовление некоторых уникальных деталей; 80–250 ч; 4 - сложные компоненты, нестандартные детали, требуются специализированные технологии; 250–800 ч; 5 - многоступенчатая сборка, высокая точность, прецизионная обработка, работа в специализированных условиях; от 800 ч и выше, до 2000+ ч.
			Разработки модели испытательного стенда	0 - модель стенда не разрабатывается; используется типовый стенд без адаптации или моделирования; 0 ч; 1 - используется готовая или сильно упрощённая схема, не учитывающая реальные процессы; до 20 ч; 2 - создаётся простая модель с базовыми компонентами (вакуум, питание, крепёж); ориентирована на концептуальную проверку; 20–80 ч; 3 - разрабатывается функциональная модель стенда с учётом размещения ЭРД, потоков, систем измерения; возможно 3D-моделирование и первичная проверка на симуляторах; 80–250 ч; 4 - комплексная модель с интеграцией всех подсистем (вакуум, электропитание, датчики, системы управления); имитация рабочих режимов; используется САПР/CAE-среда; 250–700 ч;

				5 - высокоточная цифровая модель с полной интеграцией физики процессов (газодинамика, электрика, теплопередача, механика); предназначена для проверки поведения реального ЭРД в условиях испытаний; от 700 ч и выше, до 1500+ ч.
			Изготовления испытательного стенда	0 - испытательный стенд не изготавливается; 0 ч; 1 - сборка из готовых модулей и стандартных компонентов, простая конструкция; до 30 ч; 2 - изготовление и сборка стенда с использованием некоторых нестандартных деталей, базовые системы управления и измерений; 30–100 ч; 3 - изготовление стенда с уникальными узлами, интеграция нескольких подсистем (вакуум, питание, датчики), тестирование; 100–300 ч; 4 - сложный стенд с высокой точностью компонентов, специализированным оборудованием, сложной электрикой и автоматикой; 300–800 ч; 5 - крупномасштабный высокотехнологичный стенд, требующий прецизионного изготовления, монтажа, калибровки, работы в чистых помещениях, междисциплинарной команды; от 800 ч и выше, до 2000+ ч.
			Разработки ПМИ	0 - программа методики не разрабатывается; отсутствует формальная документация; 0 ч; 1 - составлен минимальный черновой вариант документа с основными пунктами; не более нескольких страниц; до 10 ч; 2 - разработан базовый документ с описанием основных процедур и требований; минимальная структура и оформление; 10–40 ч; 3 - создана подробная методика с разделами по подготовке, проведению и обработке результатов измерений; оформлены схемы и таблицы; 40–120 ч; 4 - программа методики включает детальные инструкции, требования к оборудованию,

				меры контроля качества, примеры расчётов; согласование с экспертами; 120–300 ч; 5 - разработан комплексный стандартный документ, включающий подробную регламентацию, нормативные ссылки, процедуры валидации, регламентированное оформление, многократные рецензии и согласования; от 300 ч и выше, до 700+ ч.
			Разработки МВИ	0 - методика не разрабатывается; испытания выполняются без регламентированных процедур; 0 ч; 1 - составлен упрощённый черновик методики с базовыми шагами; минимальное оформление; до 15 ч; 2 - разработан базовый документ с основными этапами испытаний, требованиями к оборудованию и безопасности; простая структура; 15–50 ч; 3 - создана подробная методика с описанием процедур, параметров измерений, критериев оценки результатов и оформления протоколов; оформлены схемы и таблицы; 50–150 ч; 4 - методика включает детальные инструкции по подготовке, проведению и анализу испытаний, требования к калибровке и контролю качества, рекомендации по устранению неисправностей; согласование с экспертами; 150–350 ч; 5 - комплексный стандартный документ с нормативными ссылками, многоступенчатыми процедурами, регламентом по безопасности и контролю, требованиями к персоналу и оборудованию, многоуровневой валидацией; от 350 ч и выше, до 800+ ч.
			Разработки автоматизированной системы управления процессом	0 - система не разрабатывается; управление испытаниями осуществляется вручную; 0 ч; 1 - разработка простого скрипта или программы для частичной автоматизации одного этапа испытаний; минимальный функционал; до 40 ч; 2 - создание базового программного обеспечения с простым пользовательским интерфейсом, автоматическим сбором данных

				с ограниченным набором функций управления; 40–150 ч; 3 - разработка системы с расширенным функционалом: управление несколькими устройствами, мониторинг параметров в реальном времени, базовые алгоритмы контроля и безопасности; интеграция с оборудованием; 150–400 ч; 4 - создание комплексной автоматизированной системы с пользовательским интерфейсом, гибкими настройками, обработкой данных, логированием и средствами диагностики; обеспечение отказоустойчивости; 400–1000 ч; 5 - разработка масштабируемой, модульной системы управления с интеграцией ИИ-алгоритмов, комплексным контролем всех параметров, системой безопасности, поддержкой удалённого доступа и полной валидацией; от 1000 ч и выше, до 2500+ ч.
			Разработки автоматизированной системы регистрации первичных данных	0 - система регистрации данных не разрабатывается; данные фиксируются вручную; 0 ч; 1 - простая программа или скрипт для сбора данных с одного датчика или прибора; базовая запись в файл; до 30 ч; 2 - разработка системы сбора данных с нескольких приборов, простая обработка и сохранение в стандартном формате (например, CSV); минимальный интерфейс; 30–100 ч; 3 - создание более функциональной системы с автоматической синхронизацией данных, проверкой целостности, базовыми средствами визуализации и экспортом данных; интеграция с оборудованием; 100–300 ч; 4 - комплексная система регистрации с расширенными возможностями: многоканальный сбор, фильтрация, предварительная обработка, управление базой данных, создание отчетов; высокая надежность и безопасность данных; 300–800 ч; 5 - масштабируемая модульная система с возможностью интеграции в общую автоматизированную систему управления,

				продвинутыми алгоритмами обработки и анализа данных, веб-интерфейсом и поддержкой удалённого доступа; полная валидация и сопровождение; от 800 ч и выше, до 2000+ ч.
			Разработки автоматизированной системы обработки результатов измерений	0 - обработка результатов проводится вручную, без автоматизации; 0 ч; 1 - простая программа для базовой обработки данных (например, усреднение, фильтрация); ограниченный функционал; до 40 ч; 2 - разработка системы с набором стандартных функций обработки (статистический анализ, базовая визуализация), автоматическим формированием простых отчетов; 40–120 ч; 3 - создание программного обеспечения с расширенными функциями: комплексный статистический анализ, многоформатный экспорт, графическая визуализация, поддержка различных форматов входных данных; 120–350 ч; 4 - комплексная система обработки с возможностью настройки алгоритмов, автоматическим выявлением аномалий, интеграцией с базами данных и системой отчетности; использование методов обработки косвенных измерений; высокая надежность и масштабируемость; 350–900 ч; 5 - модульная, масштабируемая система обработки с применением машинного обучения и интеллектуальных алгоритмов анализа, поддержкой многопользовательского режима, веб-интерфейсом, полной валидацией и сопровождением; использование методов обработки косвенных измерений; от 900 ч и выше, до 2000+ ч.
	Время проведения исследовательских испытаний	0 - использование существующего лабораторного оборудования; кратковременные тесты (до 1 часа); стандартные рабочие тела; минимальное потребление энергии; не требуется дополнительный персонал;	-	-

		1 - применение доступных компонентов; испытания продолжительностью 1-4 часа; 2 - использование специализированного оборудования; тесты длительностью 4-12 часов; 3 - задействование уникальных стендов; многосуточные испытания; комплексная диагностика; использование дорогостоящих материалов; 4 - эксклюзивное испытательное оборудование; ресурсные тесты (недели работы); 5 - проектирование специального стенда; месяцы непрерывных испытаний; уникальные измерительные системы		
Стоимость		0 - испытания не проводятся; 0 у.е.; 1 - базовые испытания на минимальном оборудовании с ограниченным набором измерений; до 10 000 у.е.; 2 - испытания с использованием стандартного стенда, базовое оборудование, ограниченный цикл тестов; 10 000–50 000 у.е.; 3 - комплексные испытания с несколькими режимами работы, использование специализированных приборов и стендов; 50 000–150 000 у.е.; 4 - многоэтапные испытания с применением уникального оборудования, дополнительными измерениями и анализом, привлечением сторонних экспертов; 150 000–500 000 у.е.; 5 - масштабные испытания с использованием передового оборудования, созданием опытных	Разработки модели объекта	0 - модель не разрабатывается; 0 у.е.; 1 - создание простой упрощённой модели на основе готовых шаблонов или данных; минимальные затраты; до 5 000 у.е.; 2 - разработка базовой аналитической или эмпирической модели с ограниченным числом параметров; использование стандартных программных средств; 5 000–20 000 у.е.; 3 - создание полуэмпирической или физической модели с необходимостью проведения расчетов и начальной валидации; использование специализированных программных комплексов; 20 000–60 000 у.е.; 4 - разработка комплексной модели с учётом множества физических процессов, интеграция с внешними системами, подробная валидация и оптимизация; 60 000–150 000 у.е.; 5 - создание многопараметрической, детализированной модели с использованием МКЭ, управления, термомеханики и других сложных методов; привлечение междисциплинарных команд и длительная валидация; от 150 000 у.е. и выше

		образцов, проведением длительных циклов, привлечением большой команды и высокотехнологичных ресурсов; от 500 000 у.е. и выше	Изготовления объекта	0 - изготовление не производится; 0 у.е.; 1 - изготовление прототипа из стандартных и недорогих компонентов; минимальные затраты; до 10 000 у.е.; 2 - изготовление простого ЭРД с использованием некоторых нестандартных деталей, базовые материалы; 10 000–50 000 у.е.; 3 - изготовление ЭРД со сложными узлами, применением специализированных материалов и технологий; 50 000–150 000 у.е.; 4 - производство высокоточного ЭРД с применением дорогих материалов, прецизионной обработки, частичной автоматизацией; 150 000–400 000 у.е.; 5 - изготовление опытного или опытно-промышленного образца с использованием новейших материалов и технологий, сложной электроники и механообработки; от 400 000 у.е. и выше
			Разработки модели испытательного стенда	0 - модель не разрабатывается; 0 у.е.; 1 - создание простой упрощённой модели стенда, базовые расчёты и эскизы; до 5 000 у.е.; 2 - разработка базовой 3D-модели с основными элементами, базовые инженерные расчёты; 5 000–20 000 у.е.; 3 - создание детальной модели с учётом функциональных подсистем, проведение инженерного анализа (технические, тепловые, механические); 20 000–60 000 у.е.; 4 - разработка комплексной модели с точной геометрией, интеграцией всех систем, численным моделированием процессов (например, CFD, МКЭ); 60 000–150 000 у.е.; 5 - создание многопараметрической модели с учётом взаимодействия физических процессов, оптимизацией, валидацией и подготовкой для цифрового двойника; от 150 000 у.е. и выше
			Изготовления испытательного стенда	0 - испытательный стенд не изготавливается; 0 у.е.;

				1 - простой стенд из стандартных компонентов, базовые функциональные возможности; до 20 000 у.е.; 2 - стенд с некоторыми нестандартными элементами, ограниченный набор функций и оборудования; 20 000–70 000 у.е.; 3 - полноценный стенд с интеграцией нескольких систем (вакуум, электропитание, измерения), использование специализированных компонентов; 70 000–200 000 у.е.; 4 - сложный стенд с прецизионным оборудованием, автоматикой и системой управления, высокая надежность и безопасность; 200 000–500 000 у.е.; 5 - крупномасштабный, высокотехнологичный стенд с уникальными характеристиками, полным комплексом измерений, автоматизацией и контролем в реальном времени; от 500 000 у.е. и выше
			Разработки ПМИ	0 - программа методики не разрабатывается; 0 у.е.; 1 - подготовка упрощенного черновика с основными пунктами; минимальное оформление; до 1 000 у.е.; 2 - создание базового документа с описанием основных процедур и требований; простая структура и оформление; 1 000–5 000 у.е.; 3 - разработка подробной методики с разделами по подготовке, проведению и обработке результатов измерений; оформление схем и таблиц; 5 000–15 000 у.е.; 4 - программа методики с детальными инструкциями, требованиями к оборудованию, контролем качества, согласованием с экспертами; 15 000–40 000 у.е.; 5 - комплексный документ с нормативными ссылками, процедурами валидации, регламентированным оформлением, множественными рецензиями и согласованиями; от 40 000 у.е. и выше

			Разработки МВИ	0 - программа методики не разрабатывается; 0 у.е.; 1 - подготовка упрощённого черновика с базовыми шагами и минимальным оформлением; до 1 500 у.е.; 2 - создание базового документа с основными этапами испытаний, требованиями к оборудованию и безопасности; простая структура; 1 500–6 000 у.е.; 3 - разработка подробной методики с описанием процедур, параметров измерений, критериев оценки результатов и оформления протоколов; оформление схем и таблиц; 6 000–18 000 у.е.; 4 - программа методики включает детальные инструкции по подготовке, проведению и анализу испытаний, требования к калибровке и контролю качества, рекомендации по устранению неисправностей; согласование с экспертами; 18 000–45 000 у.е.; 5 - комплексный стандартный документ с нормативными ссылками, многоступенчатыми процедурами, регламентом по безопасности и контролю, требованиями к персоналу и оборудованию, многоуровневой валидацией; от 45 000 у.е. и выше
			Расходуемых в процессе испытаний материалов	0 - материалы не расходуются, испытания не требуют затрат на материалы; 0 у.е.; 1 - используются минимальные объёмы или дешёвые материалы, очень низкая стоимость, от 1 до 10 у.е.; 2 - материалы небольшого количества или средней цены, низкая стоимость, от 11 до 50 у.е.; 3 - расходуются материалы средней стоимости или в умеренных количествах, средняя стоимость, от 51 до 100 у.е.; 4 - используются дорогие материалы или большие объёмы, высокая стоимость, от 101 до 200 у.е.; 5 - значительные затраты на редкие или специализированные материалы, очень высокая стоимость, свыше 200 у.е.

			Разработки автоматизированной системы управления процессом	0 - разработка не требуется, затраты отсутствуют, 0 у.е.; 1 - минимальная разработка с базовым функционалом, очень низкая стоимость, от 1 до 50 у.е.; 2 - ограниченный функционал, небольшое количество модулей, низкая стоимость, от 51 до 200 у.е.; 3 - разработка со средним функционалом и интеграцией, средняя стоимость, от 201 до 500 у.е.; 4 - расширенный функционал, высокая степень автоматизации и надежности, высокая стоимость, от 501 до 1000 у.е.; 5 - комплексная система с полной автоматизацией, адаптивностью и поддержкой, очень высокая стоимость, свыше 1000 у.е.
			Разработки автоматизированной системы регистрации первичных данных	0 - разработка не требуется, затраты отсутствуют, 0 у.е.; 1 - минимальная разработка с простым интерфейсом и базовым функционалом, очень низкая стоимость, от 1 до 30 у.е.; 2 - ограниченный функционал с базовой обработкой данных, низкая стоимость, от 31 до 100 у.е.; 3 - система со средней сложностью, включая автоматический сбор и хранение данных, средняя стоимость, от 101 до 300 у.е.; 4 - расширенный функционал с возможностью интеграции с другими системами и аналитикой, высокая стоимость, от 301 до 700 у.е.; 5 - комплексная система с полной автоматизацией, масштабируемостью и поддержкой в реальном времени, очень высокая стоимость, свыше 700 у.е.
			Разработки автоматизированной системы обработки результатов измерений	0 - разработка не требуется, затраты отсутствуют, 0 у.е.; 1 - минимальная разработка с базовой обработкой данных и простым интерфейсом, очень низкая стоимость, от 1 до 40 у.е.;

				2 - ограниченный функционал с базовыми алгоритмами анализа, низкая стоимость, от 41 до 150 у.е.; 3 - система средней сложности с расширенными методами обработки и визуализацией данных, средняя стоимость, от 151 до 400 у.е.; 4 - расширенный функционал с интеграцией в другие системы и поддержкой сложных моделей, высокая стоимость, от 401 до 900 у.е.; 5 - комплексная система с полной автоматизацией, адаптивными алгоритмами и поддержкой в реальном времени, очень высокая стоимость, свыше 900 у.е.
Экологичность процесса испытаний	Экологичность процесса испытаний	0 - полное отсутствие экологических мер; выброс токсичных веществ без очистки; опасные отходы не утилизируются; грубые нарушения всех норм; прямая угроза здоровью; 1 - минимальное соблюдение требований; примитивные методы очистки (<50% эффективности); нерегулярный вывоз отходов; нет мониторинга загрязнений; превышения ПДК; 2 - частичное соответствие стандартам; базовые системы очистки (50-70% эффективности); периодический контроль выбросов; утилизация с нарушениями; превышения ПДК в 2-5 раз; 3 - полное соответствие национальным нормам; стандартные очистные системы (70-85% эффективности); регулярный экологический мониторинг; организованная утилизация; незначительные превышения ПДК; 4 - соответствие международным стандартам; продвинутые системы очистки (85-95% эффективности); непрерывный мониторинг; современная переработка отходов;	-	-

		отсутствие превышений ПДК; использование экологичных рабочих тел; 5 - превышение строгих международных норм; замкнутые циклы (>95% эффективности); полная переработка отходов; "зеленые" технологии; постоянное улучшение экопоказателей		
--	--	--	--	--

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Форма анкеты по оценке качества процесса исследовательских испытаний ЭРД

Обозначение и наименование комплексных показателей качества	Обозначение и наименование показателей качества нижнего уровня, оцениваемых экспертами	Эксп. 1	Эксп. 2	Эксп. 3	Эксп. 4	Эксп. 5
		Оценка в баллах				
P1 - Качество объекта	P1.1 - Качество разработки модели объекта					
	P1.2 - Качество изготовления объекта					
P2 - Качество испытательного стенда	P2.1 - Качество разработки модели испытательного стенда					
	P2.2 - Качество изготовления испытательного стенда					
	P2.3 - Качество эксплуатации испытательного стенда					
	P2.3.1 - Пуско-наладочные работы					
	P2.3.2 - Текущее состояние стендовых систем					
	P2.3.3 - Техническое обслуживание					
P3 - Качество автоматизации процесса испытаний	P3.1 - Качество автоматизации управления процессом					
	P3.1.1 - Качество разработки автоматизированной системы управления процессом					
	P3.1.2 - Качество автоматизированной системы управления процессом					
	P3.1.3 - Качество автоматизации управления процессом					
	P3.1.4 - Качество эксплуатации автоматизированной системы управления процессом					
	P3.2 - Качество автоматизации регистрации первичных данных					

	Р3.2.1 - Качество разработки автоматизированной системы регистрации первичных данных					
	Р3.2.2 - Качество автоматизированной системы регистрации первичных данных					
	Р3.2.3 - Качество автоматизации регистрации первичных данных					
	Р3.2.4 - Качество эксплуатации автоматизированной системы регистрации первичных данных					
	Р3.3 - Качество автоматизации обработки результатов измерений					
	Р3.3.1 - Качество разработки автоматизированной системы обработки результатов измерений					
	Р3.3.2 - Качество автоматизированной системы обработки результатов измерений					
	Р3.3.3 - Качество автоматизации обработки результатов измерений					
	Р3.3.4 - Качество эксплуатации автоматизированной системы обработки результатов измерений					
Р4 - Качество проведения испытаний	Р4.1 - Качество воспроизведения условий проведения эксперимента					
	Р4.2 - Качество используемого рабочего тела (чистота состава рабочего тела)					
	Р4.3 - Качество ПМИ					
	Р4.3.1 - Качество получаемой измерительной информации					
	Р4.3.2 - Точность результатов измерений (правильность, прецизионность, повторяемость, воспроизводимость)					
	Р4.3.3 - Диапазон измерений					
	Р4.4 - Качество измерительной процедуры					
	Р4.4.1 - Операционная сложность измеряемой процедуры					

	R4.4.2 - Удобство считывания измерительной информации					
	R4.4.3 - Удобство настройки средства измерений					
	R4.5 - Стандартизованность МВИ					
	R4.5.1 - Стандартизованность методики измерений					
	R4.5.2 - Стандартизованность средства измерения					
P5 - Качество кадрового обеспечения	-					
P6 - Безопасность процесса испытаний	R6.1 - Безопасность объекта					
	R6.2 - Безопасность испытательного стенда					
	R6.3 - Безопасность средств измерения					
	R6.4 - Безопасность процесса испытаний (в части влияния на оператора и окружающую среду)					
P7 - Экономичность процесса испытаний	R7.1 - Трудоемкость					
	R7.1.1 - Разработки модели объекта					
	R7.1.2 - Изготовления объекта					
	R7.1.3 - Разработки модели испытательного стенда					
	R7.1.4 - Изготовления испытательного стенда					
	R7.1.5 - Разработки ПМИ					
	R7.1.6 - Разработки МВИ					
	R7.1.7 - Разработки автоматизированной системы управления процессом					
	R7.1.8 - Разработки автоматизированной системы регистрации первичных данных					
	R7.1.9 - Разработки автоматизированной системы обработки результатов измерений					
	R7.2 - Время проведения исследовательских испытаний					
	R7.3 - Стоимость					

	P7.3.1 - Разработки модели объекта					
	P7.3.2 - Изготовления объекта					
	P7.3.3 - Разработки модели испытательного стенда					
	P7.3.4 - Изготовления испытательного стенда					
	P7.3.5 - Разработки ПМИ					
	P7.3.6 - Разработки МВИ					
	P7.3.7 - Расходуемых в процессе испытаний материалов					
	P7.3.8 - Разработки автоматизированной системы управления процессом					
	P7.3.9 - Разработки автоматизированной системы регистрации первичных данных					
	P7.3.10 - Разработки автоматизированной системы обработки результатов измерений					
	P7.4 - Необходимая квалификация персонала					
P8 - Экологичность процесса испытаний	-					

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Форма протокола несоответствия

Наименование проверяемого процесса	Акт №*	Дата

Описание несоответствия:

Главный проверяющий

_____ / _____ /

Проверяющий

_____ / _____ /

Планируемые коррекционные действия**

Срок выполнения:

Представитель проверяемого процесса

_____ / _____ /

Оценка комиссией эффективности корректирующих действий***

Главный проверяющий

_____ / _____ /

Дата _____

* на каждое несоответствие заполняется отдельный протокол

** (заполняется представителем проверяемого процесса)

*** (заполняется после указанного срока планируемых коррекционных действий)

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Акт о внедрении результатов диссертационной работы (ФГБОУ ВО «МАИ (НИУ)»)

«Утверждаю»
Проректор по учебной работе
ФГБОУ ВО Московского авиационного института
(национального исследовательского университета)

Д.А. Козорез
«16» 05 2025 г.



АКТ

О внедрении результатов диссертации Ермаковой Марии Олеговны в
учебный процесс Московского авиационного института
(национального исследовательского университета)

Комиссия в составе:

председатель: Начальник учебного управления, к.э.н., А.А. Ермаков

члены комиссии: профессор кафедры 207, д.т.н. В.А. Афанасьев,
профессор кафедры 207, д.т.н. П.А. Карепин,

составила настоящий акт о том, что полученные в диссертации Ермаковой Марии Олеговны научные результаты, касающиеся обеспечения качества процесса исследовательских испытаний электроракетных двигателей, используются в учебном процессе кафедры 207 МАИ при преподавании дисциплин «Метрология и стандартизация», «Планирование и организация эксперимента» и «Основы статистических методов контроля и управления качеством», а также рекомендуются студентам при выполнении ими курсовых и выпускных квалификационных работ бакалавров и магистров по направлениям подготовки 27.03.01 и 27.04.01 «Стандартизация и метрология».

Практические рекомендации, разработанные Ермаковой Марией Олеговной при выполнении диссертационной работы, позволяют студентам более полно осваивать вопросы качества процессов при проведении исследовательских испытаний электроракетных двигателей.

Председатель комиссии

А.А. Ермаков

Члены комиссии

В.А. Афанасьев

П.А. Карепин

«16» 05 2025 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Акт о внедрении результатов диссертационной работы (ФГБОУ ВО «МАИ (НИУ)»)

«Утверждаю»
Проректор по учебной работе
ФГБОУ ВО Московского авиационного института
(национального исследовательского университета)
Д.А. Козорез
«16.05» 2025 г.

АКТ

О внедрении результатов диссертации Ермаковой Марии Олеговны в
учебный процесс Московского авиационного института
(национального исследовательского университета)

Комиссия в составе:
председатель: заведующий кафедрой 208, д.т.н., А.Б. Надирадзе
члены комиссии: профессор кафедры 208, д.т.н. И.П. Назаренко,
профессор кафедры 208, д.т.н. С.А. Хартов,

составила настоящий акт о том, что полученные в диссертации Ермаковой Марии Олеговны научные результаты, касающиеся обеспечения качества процесса исследовательских испытаний электроракетных двигателей, используются в учебном процессе кафедры 208 МАИ при преподавании дисциплин «Испытания электроракетных двигателей», «Теория и расчет электроракетных двигателей» и «Основы автоматизации систем управления», а также рекомендуются студентам при выполнении ими курсовых и выпускных квалификационных работ бакалавров по направлению подготовки 24.03.05 «Двигатели летательных аппаратов», инженеров по направлению базового высшего образования 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» и инженеров-исследователей по направлению специализированного высшего образования 24.04.05 «Двигатели летательных аппаратов».

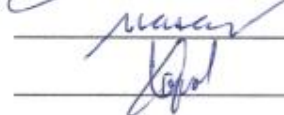
Практические рекомендации, разработанные Ермаковой Марией Олеговной при выполнении диссертационной работы, позволяют студентам более полно осваивать вопросы, связанные с проведением исследовательских испытаний электроракетных двигателей, а также с автоматизацией управления, регистрацией первичных данных и обработкой полученных результатов измерений при проведении исследовательских испытаниях электроракетных двигателей.

Председатель комиссии

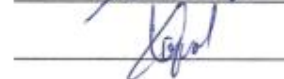


А.Б. Надирадзе

Члены комиссии



И.П. Назаренко



С.А. Хартов

«16» 05 2025 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Акт о внедрении результатов диссертационной работы (АО ОКБ «Факел»)



УТВЕРЖДАЮ
И.о. главного конструктора
АО ОКБ «Факел»
к.т.н., Приданников С.Ю.

“ 7 ” июля 2025 г.

АКТ

**о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы
Ермаковой Марии Олеговны на тему
"Совершенствование качества процесса исследовательских испытаний
электроракетных двигателей"**

Регистрационный номер № 301/02-270 от 7.07.2025 г.

Комиссия АО «ОКБ «Факел» в составе: начальника отдела 300 ЭРД Коляскина Владимира Александровича, заместителя начальника отделения испытаний ЭРД Волкова Вадима Александровича, начальника отдела 303 качества и надёжности Шевцова Александра Викторовича, составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Ермаковой Марии Олеговны "Совершенствование качества процесса исследовательских испытаний электроракетных двигателей", представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, внедрены в деятельность предприятия и используются при проведении испытаний электроракетных двигателей.

Члены комиссии:

Начальник отдела 300 ЭРД

Заместитель начальника отделения испытаний

Начальник отдела 303 качества и надёжности

 / Коляскин В.А./
 / Волков В.А./
 / Шевцов А.В./

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Акт о внедрении результатов диссертационной работы (ООО «ОРБИТЕК»)

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор

ООО «ОРБИТЕК»

Д.Е. Алфимов

Акт

об использовании результатов исследований

Комиссия в составе Шилов Е.А., Ольшанского А.С., Вилкова С.В. настоящим актом подтверждает использование в ООО «ОРБИТЕК» при проведении поисковых работ результатов исследований Ермаковой М.О. старшего преподавателя кафедры 207 «Метрология, стандартизация и сертификация» ФГБОУ ВО «Московского авиационного института (национального исследовательского университета)». Исследования проводились в ходе наземной отработки изделия.

Результаты, полученные Ермаковой М.О. использованы при проведении исследовательских испытаний плазменного двигателя НТ-1000.

Предложенная Ермаковой М.О. методика оценки качества процесса исследовательских испытаний электроракетных двигателей может быть рекомендована к использованию инженерами-конструкторами для проведения исследований, направленных на получение достоверных результатов испытаний электроракетных двигателей в ходе проведения НИОКР.

Генеральный Конструктор

Шилов Е.А.

Директор по развитию бизнеса

Ольшанский А.С.

Директор по качеству

Вилков С.В.

