

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

На правах рукописи

Хохлов Алексей Николаевич



**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ УТОЧНЯЮЩИХ
ИСПЫТАНИЙ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МАЛЫХ ТЯГ**

Специальность 05.07.05

Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных
аппаратов

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Коломенцев Александр Иванович

Москва - 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Введение	4
1 Состояние вопроса по методологии испытаний ракетных двигателей малых тяг	11
1.1 Основные проблемы качественного проведения испытаний	11
1.2 Анализ применения методов планирования испытаний и регрессионного анализа	31
1.3 Постановка цели и задач исследования	52
2 Методика проведения исследований	54
2.1 Модернизация пневмогидравлической схемы, системы управления и измерений экспериментального стенда	54
2.2 Разработка методики проведения и анализа испытаний ракетных двигателей малых тяг	65
2.3 Методика обработки результатов испытаний	73
2.4 Результаты разработки программного обеспечения для планирования экспериментов и статистической обработки результатов испытаний	77
3 Результаты исследований разработанной методики анализа испытаний	81
3.1 Результаты испытаний двигателей на компонентах водорода пероксид высококонцентрированный+керосин и газообразный кислород+метан	81
3.2 Формирование и анализ полученных регрессионных моделей по результатам испытаний	83
3.3 Оценка соответствия параметров двигателя заданным требованиям	89

4	Исследование применимости разработанной методики для испытаний двигателей на КТ газообразный кислород+газообразный водород и АТ+ММГ	93
	4.1 Результаты испытаний двигателей РДМТ100, S10, S400	93
	4.2 Подтверждение применимости разработанной методики	104
5	Разработка технологии уточняющих испытаний РДМТ	112
	Заключение	117
	Список сокращений и условных обозначений	119
	Список использованных источников	125
	Приложение А. Результаты работы программного обеспечения	134

ВВЕДЕНИЕ

Работа посвящена решению проблемы проведения стендовых испытаний ракетных двигателей малых тяг (РДМТ). Рассмотрены РДМТ, работающие на жидких и газообразных компонентах топлива (КТ), которые входят в состав двигательных установок (ДУ) космических аппаратов (КА) и могут выполнять все функции исполнительных органов в системах коррекции и стабилизации орбиты, ориентации КА. Проблема заключается в необходимости сокращения стоимости и времени наземной экспериментальной отработки (ЭО) – самого дорогого этапа жизненного цикла изделия. Для решения этого вопроса на токсичных компонентах топлива разработчики отказались от уточняющих испытаний (УИ) (одного из этапов ЭО), т.к. суммарная стендовая наработка, статистика по испытаниям прошлых лет, масштабирование РДМТ позволяет это сделать.

На сегодняшний момент появилась необходимость в разработке РДМТ на экологически безопасных КТ. Это обусловлено тем, что почти все новые проекты перспективных средств выведения и разгонных блоков планируются на высокоэнергетических экологически чистых и безопасных КТ, таких как кислород+водород, кислород+метан, кислород+керосин, а следовательно, и реактивные системы управления должны быть на основных бортовых КТ.

РДМТ на таких КТ не имеют достаточного объема статистических данных по отработке конструкций, поэтому для подтверждения работоспособности необходимо проведение уточняющих испытаний. А т.к. стоимость испытаний достаточно высока, есть необходимость в сокращении времени проведения и затрат на испытания за счет совершенствования технологии проведения уточняющих испытаний.

Актуальность темы настоящей работы состоит в совершенствовании технологии уточняющих испытаний РДМТ, работающих на экологически безопасных жидких и газообразных компонентах топлива, таких как кислород+метан, кислород+водород, водорода пероксид

высококонтрированный (ВПВ)+керосин в части повышения информативности и качества экспериментальной отработки.

Совершенствование технологии испытаний основано на применении теории математического планирования и регрессионного анализа. Данной темой занимались такие ученые как Трофимов Р.С., Кесаев Х.В., Жуковский А.Е. и др. Но их методики планирования и анализа результатов испытаний относятся, в основном, к ЖРД большой мощности и ими не проведен подробный анализ построенных регрессионных моделей и планов экспериментов для конкретных двигателей.

Усовершенствованная технология позволяет оперативно оценить работоспособность конструкции РДМТ с помощью регрессионных моделей основных параметров двигателей, что позволяет сократить объем испытаний.

Целью настоящей научной работы является совершенствование технологии уточняющих испытаний для сокращения объема экспериментальной отработки РДМТ, работающих на жидких и газообразных КТ.

Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие **задачи**:

- провести анализ существующих методов математического планирования испытаний, регрессионного анализа и экспериментальных исследований для определения рационального объема параметров и определяющих факторов, на основе которых может быть установлена работоспособность РДМТ;

- определить вид функциональных зависимостей и коэффициенты регрессии выбранных параметров, позволяющих установить работоспособность двигателей, испытанных в лаборатории Московского авиационного института (национального исследовательского университета) (МАИ (НИУ));

- обобщить результаты исследований, с использованием собственных и результатов других авторов, для подтверждения возможности использования разработанной технологии стендовых испытаний РДМТ;

- разработать технологию уточняющих испытаний для повышения качества экспериментальной отработки РДМТ.

Методы исследования, которые будут использованы при решении указанных задач:

- анализ и обобщение опыта проведения стендовых испытаний с использованием научных положений экспериментальной отработки РДМТ ракетно-космических систем;

- математического планирования экспериментов, регрессионного и статистического анализа результатов испытаний;

- формирования статистическо-математических программ для планирования экспериментов и регрессионного анализа результатов испытаний;

Решение указанных задач осуществлялось при исследованиях, проведенных в МАИ с привлечением экспериментальных данных, полученных в ГНЦ РФ – ФГУП «Исследовательский центр имени М.В.Келдыша» и EADS Astrium.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Предложена технология уточняющих испытаний РДМТ на жидких и газообразных КТ с использованием рационального планирования экспериментов и построения адекватных регрессионных моделей с оценкой работоспособности двигателей по полученным значениям удельного импульса тяги и температуры конструкции.

2. Разработан комплекс программ для построения планов экспериментов при испытаниях РДМТ и статистической обработки результатов испытаний с построением регрессионных моделей.

3. Обоснован способ подтверждения адекватности регрессионных моделей по результатам испытаний РДМТ с использованием F-критерия.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы.

Усовершенствованная технология уточняющих испытаний позволяет уменьшить объем испытаний и формировать регрессионные модели для оценки технических характеристик и оперативной оценки работоспособности РДМТ, что повышает информативность и качество экспериментальной отработки двигателей. Результаты исследований и разработок нашли применение в МАИ и ФКП «НИЦ РКП» при проведении испытаний и могут быть использованы в КБхиммаш им. А.М. Исаева, ФГУП «НИИМАШ» и др.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту.

Автор защищает следующие основные положения работы:

- экспериментальную установку для проведения огневых испытаний РДМТ;
- методику проведения испытаний РДМТ для различных компонентов топлива и тяг двигателей;
- алгоритм и программное обеспечение для построения планов экспериментов и статистической обработки результатов испытаний;
- регрессионные модели основных параметров РДМТ;
- анализ разработанных регрессионных моделей;
- оценку соответствия выходных параметров двигателей требованиям ТЗ с помощью полученных моделей;
- проверку эффективности разработанной технологии испытаний на предприятиях ракетно-космической отрасли.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечена:

- использованием современных физико-технических методов для решения инженерных задач по определению характеристик РДМТ;
- получением и обоснованием данных по результатам испытаний РДМТ на натурном стенде с сертифицированными средствами измерений;

- согласованием результатов теоретических и экспериментальных исследований с точностью, необходимой для определения характеристик РДМТ конкретной конструкции.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих зарубежных, международных и всероссийских конференциях:

1. 2,3,4,6-ой Общероссийских молодежных науч.-техн. конф. «Молодежь. Техника. Космос.» Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2010, 2011, 2012, 2014;
2. Всероссийской научно-технической конференции «Ракетно-космические двигательные установки». МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2010;
3. Международной науч.-техн. конф. «Проблемы и перспективы развития двигателестроения», СГАУ (НИУ), Самара, 2011;
4. 10-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика-2011», МАИ (НИУ), Москва, 2011;
5. 19-ой научно-технической конференции молодых ученых и специалистов. РКК «Энергия», Королев, 2011;
6. Московской молодежной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике», МАИ (НИУ), Москва, 2012;
7. Международном конгрессе двигателестроителей, п. Рыбачье, Украина, 2012;
8. Международной молодежной научной конференции «XX Туполевские чтения», КАИ (НИУ), Казань, 2012;
9. Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Космос-2012», СГАУ (НИУ), Самара, 2012;
10. 64th International Astronautical Congress 2013, Space Propulsion Symposium (C4) Special session: Thematic Workshop with Professionals and Students (5). Пекин, 2013;
11. Международной молодежной научной конференции «XII Королёвские чтения», СГАУ (НИУ), Самара, 2013;

12. II-м Всероссийском форуме школьников, студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «Космическое приборостроение», НИТУПУ, Томск, 2014;

13. Международной неделе авиакосмических технологий «Aerospace Science Week» 13-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика», МАИ (НИУ) Москва, 2014;

14. Научно-технической конференции молодых ученых и специалистов ФГУП ЦНИИмаш, ФГУП ЦНИИмаш, Королев, 2015;

15. Всероссийской научно-технической конференции «Ракетные двигатели и энергетические установки», КАИ (НИУ), 2015.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 26 работ, из них 6 опубликовано в рецензируемых журналах и изданиях, рекомендованных ВАК и 1 статья в зарубежном научно-техническом журнале, 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, 17 материалов докладов были представлены в трудах зарубежных, международных и всероссийских конференций.

Структура и содержание работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка использованных источников из 82 наименований, приложения на 38 страницах, изложена на 172 страницах машинописного текста, включающего 79 иллюстраций и 14 таблиц.

В 1 главе рассмотрено состояние вопроса по методологии испытаний РДМТ. Выделены основные проблемы получения информации, рассмотрены существующие методы планирования и обработки результатов испытаний. Определены выходные параметры (удельный импульс тяги и температура конструкции) и входные факторы (массовые расходы окислителя и горючего) для построения планов экспериментов при испытаниях РДМТ. Сформулированы цели и задачи исследования,

Во 2 главе разработана методика проведения исследования. Описана модернизация пневмогидравлической схемы, системы управления и измерений экспериментальной установки МАИ (НИУ), которая осуществлялась при непосредственном участии автора. Разработана методика проведения испытаний и обработки результатов испытаний ракетных двигателей малых тяг.

В 3 главе описаны результаты исследований разработанной методики анализа испытаний двигателей на экологически безопасных компонентах топлива: водорода пероксид высококонцентрированный+керосин и газообразный кислород+метан. Сформированы регрессионные модели по результатам испытаний и проведен их анализ. Проведена оценка соответствия параметров (удельного импульса тяги и температуры стенки) двигателя заданным требованиям с помощью разработанной методики испытаний.

В 4 главе приведены результаты исследований применимости разработанной методики для проведения испытаний РДМТ на КТ газообразный кислород+газообразный водород и АТ+ММГ. На основе анализа полученных данных подтверждена применимость разработанной методики для оценки результатов испытаний на экологических безопасных и токсичных КТ. Проведено обобщение полученных результатов.

В 5 главе представлена технология уточняющих испытаний для вновь разрабатываемых РДМТ на жидких и газообразных экологически безопасных КТ для сокращения объема испытаний и построения регрессионных моделей основных параметров двигателей. Выделены основные преимущества усовершенствованной технологии.

По результатам диссертационного исследования сделаны основные выводы и заключение по применимости усовершенствованной технологии уточняющих испытаний РДМТ и ее преимуществам.

1. Состояние вопроса по методологии испытаний ракетных двигателей малых тяг

1.1 Основные проблемы качественного проведения испытаний

Двигательную установку (ДУ) на базе ракетных двигателей малых тяг (РДМТ) имеют сегодня большинство космических аппаратов (КА) [28,50,60]. В данной работе рассматриваются ракетные двигатели малых тяг (РДМТ), работающие на жидких и газообразных КТ, используемые в качестве исполнительных органов в системах коррекции и стабилизации орбиты и ориентации КА. Они обладают рядом преимуществ над другими РДМТ. Например, управляющие РДТТ имеют:

- малое время работы (до 50 с) (малый импульс тяги);
- проблему реализации многократного запуска [36].

Управляющие РДТТ в КА используются только в САС и системе мягкой посадки (СМП).

Электроракетный двигатель (ЭРД):

- имеет малый уровень тяг [23,36] (самый мощный лабораторный образец СПД NASA-457М имеет мощность 50 кВт при тяге в 2,3 Н [71]);
- Холловские ЭРД (СПД), применяемые в РФ, имеют долгое время включения (~2-3 мин), зависящее от времени нагрева эмиттерного катода (КЭ-5 [8]);
- требуют очень мощные источники питания на борту КА (вплоть до ЯЭУ).

Для определения и подтверждения характеристик двигателя, заявленных в техническом задании (ТЗ), проводят испытания двигателей.

Объём, порядок, цели и задачи экспериментальной отработки, виды испытаний, а также перечень программ и методик испытаний, пределы изменений условий и режимов работы РДМТ определяет КПЭО [56]. Под отработкой понимается комплекс организационно-технических мероприятий по обеспечению

экспериментального определения качества РДМТ и соответствия ее характеристик ТЗ во всем диапазоне эксплуатационных условий.

КПЭО – организационно-технических документ, определяющий номенклатуру и состав объектов испытаний, их цели и задачи, порядок проведения, а также сведения о порядке оценки показателей надежности по результатам экспериментальной отработки, о подтверждении требований по безопасности, о порядке отработки конструкторской и эксплуатационной документации, о контроле выполнения КПЭО.

Целями экспериментальной отработки РДМТ являются:

- выбор окончательных технических решений по конструкции, техническим характеристикам, функционированию РДМТ и её составных частей (на этапе ДИ);
- подтверждение соответствия технических характеристик требованиям ТЗ на РДМТ (на этапе ЗДИ);
- отработка конструкторской, технологической и эксплуатационной документации.

Критериями завершённости экспериментальной отработки РДМТ являются:

- подтверждение выполнения всех требований ТЗ на РДМТ, в том числе:
 - 1) реализации заданных значений параметров и характеристик РДМТ;
 - 2) способности выполнения РДМТ и её составными частями всех предусмотренных функциональных задач;
 - 3) соответствия требованиям по обеспечению стойкости РДМТ и её составных частей к эксплуатационным нагрузкам и внешним воздействующим факторам;
 - 4) способности парирования агрегатами РДМТ последствий расчётных нештатных ситуаций;
- отсутствие конструктивных отказов, обнаруженных при испытаниях, а также экспериментальное подтверждение эффективности и достаточности мероприятий по предотвращению повторного проявления отказов.

Вся ЭО РДМТ по характеру и значимости проводимых работ условно разделена на ряд этапов. Каждый этап в свою очередь разделен на определенные

типы испытаний, содержащие ряд конкретных видов испытаний определённого направления, характерного для данного типа.

Экспериментальная отработка РДМТ включает в себя следующие этапы:

- автономная отработка РДМТ: вибродинамические, проливочные («холодные»), электрические и огневые испытания РДМТ;
- комплексная отработка РДМТ в составе КА: макетно–конструкторские, вибропрочностные, тепловакуумные, электрические и огневые испытания;
- летные испытания в объёме, необходимом для проведения работ по передаче РДМТ Заказчику [52,59].

Этап автономных стендовых испытаний проводится для решений вопроса о соответствии предложенного варианта РДМТ или его составных частей (СЧ) заданным требованиям и доводки его конструкции до полного соответствия этим требованиям.

Автономные испытания также проводятся в несколько этапов.

Первый этап – проведение сравнительных или уточняющих испытаний.

Сравнительные испытания (СИ) – испытания аналогичных по характеристикам или одинаковых РДМТ, которые осуществляются в идентичных условиях с целью сравнения их характеристик [6].

Уточняющие испытания (УИ) – испытания, проводимые с целью определения области значений параметров, в которой двигатель находится в работоспособном состоянии (по ГОСТ 17655-89).

При УИ определяются:

- правильность конструктивных решений, выбора материалов и технологических процессов;
- соответствие выходных параметров РДМТ, испытываемого в заданных режимах нагружений, параметрам, заданным технической документацией;
- правильность выбранной методики испытаний.

В процессе УИ проводятся мероприятия по доведению РДМТ до работоспособного состояния, могут осуществляться его схемные и конструктивные изменения. Положительные результаты предварительных

испытаний дают право на проведение следующего этапа испытаний РДМТ – доводочных испытаний (ДИ).

В целом УИ состоят из вибродинамических, гидравлических, электрических и огневых испытаний.

В работе выбраны огневые испытания РДМТ, т.к. они являются самым информационно емким, трудным и дорогим видом испытаний.

Следует отметить, что на огневые испытания поставляются двигатели, которые уже прошли вибродинамические, проливочные и электрические испытания.

Доводочные испытания призваны обеспечить подтверждение работоспособности образца во всем диапазоне заданных условий и режимов нагружений. Выходные параметры РДМТ должны соответствовать технической документации.

В процессе ДИ допускается усовершенствование выбранной конструкции и уточнение технологических процессов изготовления образцов, а также отрабатывается конструкторская, технологическая и эксплуатационная документация. Положительные результаты этих испытаний дают право на проведение «чистовых» испытаний, а также на установку и эксплуатацию РДМТ. На этом этапе подтверждается способность РДМТ безотказно функционировать в заданных условиях и при заданных режимах нагружений в течение установленного технической документацией времени.

Финальный этап автономных испытаний РДМТ называется завершающими доводочными испытаниями (ЗДИ) – испытания окончательного варианта конструкции с целью подтверждения соответствия его характеристик требованиям ТЗ и возможности представления РДМТ на приемочные испытания. Обычно на ЗДИ проводят ресурсные испытания.

Положительные результаты приемочных испытаний дают право допуска РДМТ к установке на штатные изделия.

Этап комплексной отработки систем в составе стендовых изделий проводится для:

- подтверждения соответствия характеристик КА в целом технической документации;
- совместной отработки систем в условиях, близких к реальным, с одновременным воспроизведением различных воздействующих факторов;
- уточнения режимов и условий работы систем и агрегатов при совместном функционировании, оценки их взаимного влияния;
- проверки работоспособности систем КА при имитации аварийных и других нештатных ситуаций;
- предварительной оценки показателей надежности по результатам стендовых испытаний;
- проверки отработанности технологии изготовления и определения достаточности и правильности выбора контрольно-измерительных средств и испытательного оборудования;
- выявления отказов и причин, вызывающих их, проведения мероприятий по их устранению;
- определения готовности к летным испытаниям.

В общем виде ЭО РДМТ может быть представлена в виде схемы на рисунке 1.1.

В широком смысле отработка любого сложного технического объекта – один из важнейших компонентов обеспечения и контроля заданных уровней его качества.

Качество – совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенным потребностям в соответствии с ее назначением.

Для успешного функционирования РДМТ, он должен обладать определенным уровнем качества [9]. За базовые показатели качества принимают значения основных параметров и характеристик, сформулированные в техническом задании (ТЗ) на создание РДМТ, уровень качества лучших современных образцов РДМТ, перспективные технические показатели РДМТ.

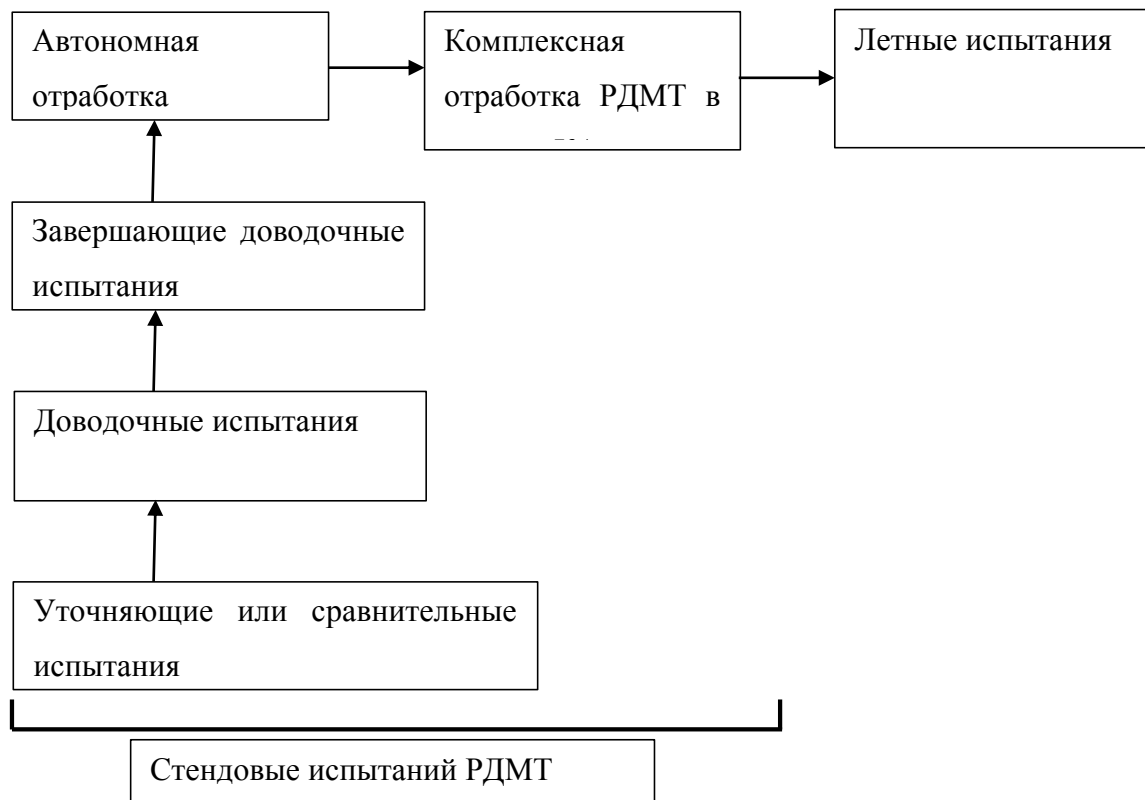


Рисунок 1.1 – Этапы ЭО РДМТ

В ТЗ разработчиком КА на РДМТ задаются следующие характеристики:

- тяга;
- ресурс;
- удельный импульс тяги;
- тепловая стойкость конструкции;
- расход компонентов топлива (КТ);
- суммарный импульс тяги;
- энергопотребление;
- надежность.

Уровень качества характеризуется следующими показателями:

- 1) соответствие назначению;
- 2) надежность;
- 3) безопасность;
- 4) технологичность;

- 5) транспортабельность;
- 6) экономичность;
- 7) эстетичность;
- 8) эргономичность;
- 9) уровень стандартизации и унификации;
- 10) патентная чистота.

Этапы автономной и комплексной отработки РДМТ включают в себя проведение стендовых испытаний двигателей. Структурная схема технологического процесса подготовки и проведения стендовых испытаний РДМТ может быть представлена в виде схемы на рисунке 1.2.

Стоимость разработки и последующего производства РДМТ (один из показателей уровня качества) во всем мире достаточно высока (цена РДМТ тягой 150 Н составляет около 1 млн. рублей). Самая дорогостоящая часть жизненного цикла – ЭО.

Высокая стоимость испытаний связана с большими расходами КТ (до 0,6 кг/с) и уникальностью испытательного оборудования. В связи с этим возникают требования высокой информативности испытаний и рационального их планирования, позволяющие получить возможно более полные данные о двигателе в кратчайшее время (это связано с особенностью огневых испытаний РДМТ: кратковременность, повышенная опасность, высокая стоимость).

Отсюда, остро стоит вопрос о сокращении времени и стоимости испытаний.

Исходя из структурной схемы подготовки и проведения испытаний РДМТ (рисунок 1.2), повышение качества двигателей, за счет сокращения времени ЭО, возможно за счет применения оптимального планирования экспериментов при определении режимов и количества экспериментов, а также формировании циклограммы и алгоритмов управления испытаниями. Это объясняется двумя логически связанными критериями:

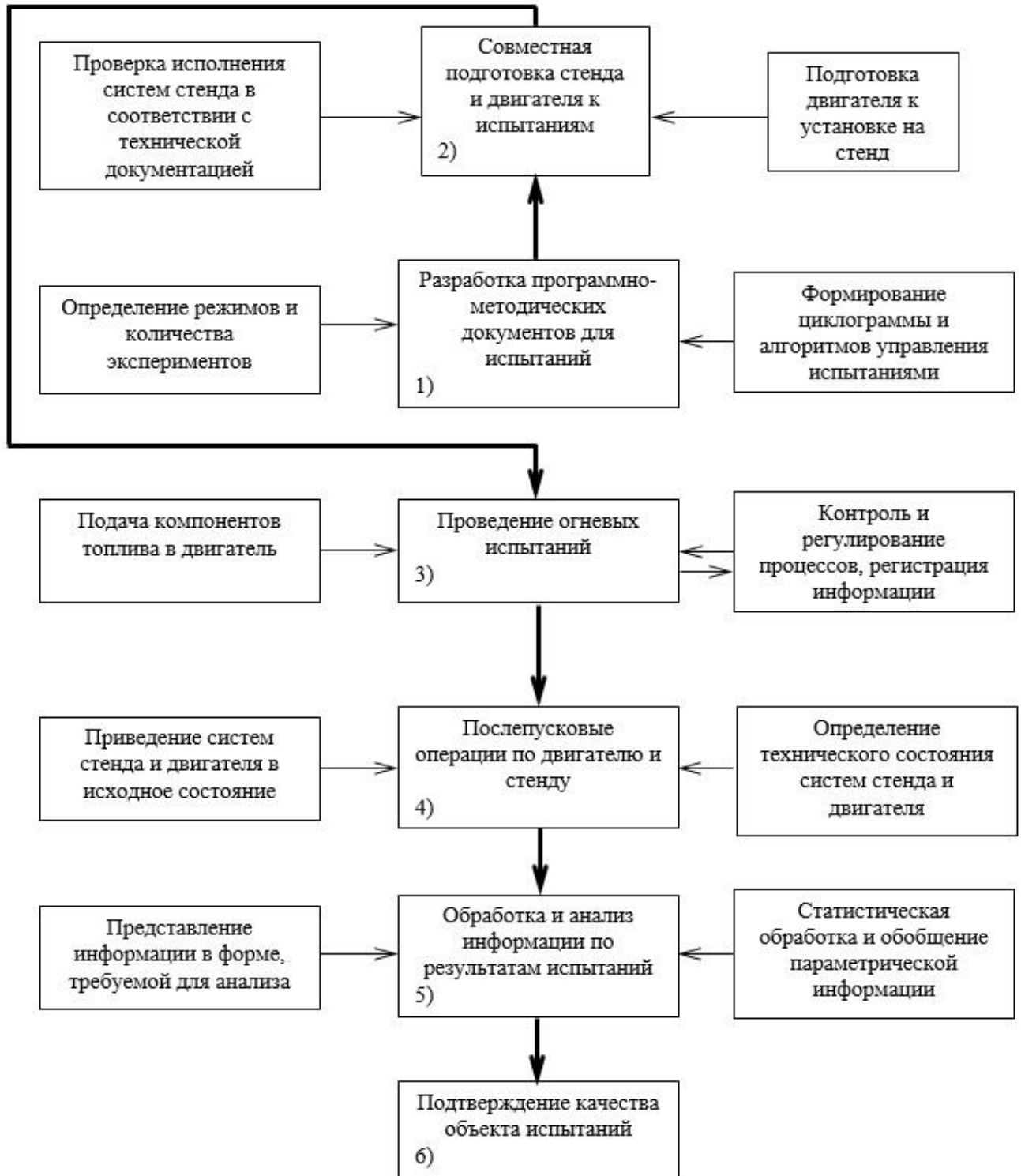


Рисунок 1.2 – Структурная схема подготовки и проведения испытаний РДМТ.

- стоимость лабораторных испытаний РДМТ тягой 200 Н, состоящих из 8 пусков, составляет 5 млн. рублей, а стоимость отработки маршевого двигателя 14Д30 для разгонного блока Бриз-М составляет 71 млн. рублей, которая включает

в себя 4 запуска по 500 и 1000с с суммарным временем наработки в 3000 с;

- невозможно получить такое сокращение (как за счет сокращения количества экспериментов) в стоимости за счет других операций, исходя из структурной схемы подготовки и проведения испытаний РДМТ.

На сегодняшний момент на предприятиях РКП испытания РДМТ проводятся по следующим документам [24,56]:

1. комплексная программа экспериментальной отработки (КПЭО);
2. программы и методики испытаний (ПМ).

Эти документы устанавливаются в соответствии со стандартами.

Для определения количества экспериментов при стендовых испытаниях РДМТ, помимо КПЭО и ПМ, разрабатывается технология испытаний, которая включает различные планы испытаний.

Программа испытаний – организационно-методический документ, обязательный к выполнению, устанавливающий объект и цели испытаний, виды, последовательность и объем проводимых экспериментов, порядок, условия, место и сроки проведения испытаний, обеспечение и отчетность по ним, а также ответственность за обеспечение и проведение испытаний [24].

Методика испытаний – подробное описание практических действий, используемых при проведении испытаний по определенному методу.

Метод испытаний – правила применения определенных принципов и средств испытаний.

Под технологией испытаний понимается документ, устанавливающий виды последовательность и объем проводимых экспериментов.

Различные планы экспериментов и технологии испытаний разработчиков двигателей имеют как свои преимущества, так и недостатки. Например, в технологии «Конструкторского бюро химического машиностроения имени А.М. Исаева» филиала ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева» для испытаний по полному «квадрату» проводится 27 запусков для полного факторного эксперимента (9 точек на плане и 3 повторения в каждой точке). Для построения адекватной модели

второго порядка данное количество избыточно – возможно использование и меньшего количества экспериментов: 9 точек и 2 повторения в каждой (двух повторений в каждой точке плана достаточно для расчета дисперсии воспроизводимости [46]). В технологии ФКП «НИЦ РКП» [57] используется всего 13 запусков для построения адекватной регрессионной модели при испытании по полному «квадрату» (8 точек плана и 5 повторений в номинальном режиме). Эта технология имеет несомненное преимущество по количеству запусков, но из-за сложности работы РДМТ необходимо повторять запуски в каждой точке плана для подтверждения работоспособности в них, иначе при расчете дисперсии воспроизводимости испытаний при проверке на адекватность регрессионной модели есть вероятность ошибочного определения минимальной и максимальной дисперсии, что в итоге приведет к неадекватности самой модели.

Для сокращения числа опытов и построения регрессионных моделей основных параметров РДМТ, а соответственно, и более качественного проведения испытаний, автором разработана технология проведения экспериментов РДМТ, в которой используются рациональные планы.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод о том, что для ДИ и ЗДИ определены параметры и факторы двигателя, а изменения конструкции на ДИ уже не критичны и находятся на уровне доработок конструкции. А на этапе УИ, особенно это актуально для новых двигателей на экологически безопасных КТ, основные параметры, факторы и конструкция еще не определены, что расширяет диапазон исследования двигателя. Это, в свою очередь, приводит к удорожанию отработки на этапе УИ. На этом этапе также необходимо оперативно принимать решения об оценке параметров двигателей и изменении конструкции. Для этого в работе будут выбраны основные параметры РДМТ и разработана технология повышения информативности отработки на этапе УИ.

Применение экологически безопасных КТ

В ЖРД применяются различные виды топлив (таблица 1.1) [25,26,32,52].

На сегодняшний момент актуальным стоит вопрос разработки РДМТ на экологически безопасных КТ.

Вопросы экологической безопасности и перспективы применения двигателей на экологически безопасных КТ все чаще и чаще заостряются при разработке новых КА [58].

Под экологически безопасными КТ для РДМТ следует понимать малотоксичные и экологически безопасные жидкие компоненты топлива, а также газообразное топливо (ионизированный газ).

К экологически безопасным жидким компонентами топлива относятся:

- 1) КТ, которые не оказывают вредного воздействия на организм человека при работе с ними;
- 2) КТ, продукты горения которых не содержат вредных примесей;
- 3) КТ, которые относятся к 3-4 классу опасности по ГОСТ 12.1.007-76.

Керосин

В нашей стране имеется положительный опыт создания и эксплуатации объединенной двигательной установки (ОДУ) многоразового транспортного космического корабля (МТКК) «Буран».

В состав ОДУ входят восемь двигателей 17Д16, разработки ФГУП «НИИ Машиностроения», предназначенных для точной ориентации МТКК в пространстве.

КТ, заправляемые в баки ОДУ – керосин (горючее) и кислород жидкий (окислитель).

Подача керосина в двигатели производится из баков Г ОДУ, газифицированного кислорода, получаемого в газификаторе при сжигании в кислороде небольшой доли горючего, из ресивера (баллона со сжатым газом).

КТ воспламеняются с помощью электрической системы зажигания индуктивного типа.

Керосин является малоопасным КТ в соответствии с ГОСТ 12.1.007-76 и относится к 4-му классу опасности (вещества малоопасные).

Следует также отметить положительный опыт ФГУП «НИИ Машиностроения» по созданию экспериментального двигателя РДМТ 2600 на экологически безопасных КТ: спирт и газообразный кислород.

Двигатель планировалось использовать для аэрокосмического самолета (воздушно-космического самолета) на высотах, в условиях когда воздушные рули неэффективны.

В настоящее время работы прекращены из-за отсутствия финансирования.

Применение экологически чистых КТ актуально на РБ «ДМ» для ДУ стабилизации, ориентации и обеспечения запуска (ДУ СООЗ) маршевого двигателя, работающего на основных КТ: жидкий кислород+керосин. Включение в состав РБ системы газификации жидкого кислорода позволяет упростить конструкцию ДУ СООЗ, уменьшить ее массу и получить более высокие энергетические характеристики (удельный импульс тяги) по сравнению с используемой в настоящее время ДУ СООЗ на высококипящих КТ.

Метан

Еще одним перспективным КТ является метан. Относясь к криогенным горючим, он рассматривается в паре с жидким кислородом. Теоретический удельный импульс топлива «жидкий кислород+жидкий метан» на 3.4% выше, чем топлива «жидкий кислород+керосин» [12].

В России и в мире кислородно-метановое ракетное топливо впервые было апробировано на двигателе КВД-1 в 1997г. («Конструкторского бюро химического машиностроения имени А.М. Исаева» филиала ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», тяга – 75 кН, $I_y = 370$ с (3626 м/с), восстановительный газогенератор, замкнутая схема ДУ).

Обширные разработки кислородно-метановых двигателей выполнило ОАО НПО «Энергомаш». При этом пустотная тяга двигателей варьировалась от 10 до 2080 кН, давление в камере сгорания от 75 до 250×10^5 Па.

Таблица 1.1 – Свойства топлив ЖРД

Окислитель	Горючее	Массовое соотношение компонентов топлива (рабочее)	Плотность топлива, кг/м ³	Температура сгорания, К	Расходный комплекс, м/с	Удельный импульс тяги в пустоте, м/с,
Жидкий кислород	95%-ный этиловый спирт	1,781	988	3504	1731	3346
	Керосин (РГ-1)	2,726	1036	3799	1797	3475
	НДМГ	1,923	988	3799	1840	3586
	Аммиак	1,409	892	3483	1785	3344
	Водород	5,335	345	3483	2348	4378
27%-ный раствор тетраоксида азота в азотной кислоте	Керосин (РГ-1)	5,335	1394	3224	1575	3041
20%-ный раствор тетраоксида азота в азотной кислоте	НДМГ	3,200	1273	3219	1649	3120
Тetraоксид азота	НДМГ	2,919	1189	3516	1711	3291
	Аэрозин-50	2,127	1200	3441	1742	3305
	Пентаборан	3,059	1086	3981	1787	3496
30%-ный тетраоксид азота+ 70%-ный тетранитрометана	НДМГ	3,682	1302	3525	1676	3238
98-ный пероксид водорода	Керосин (РГ-1)	7,393	1317	2981	1655	3161
	80%керосина+20 % пентаборана	2,169	1261	2908	1735	3227
Хлорная кислота	НДМГ	3,187	1358	3596	1691	3272
Пентафторид хлора	Гидразин	2,717	1532	4254	1931	3490

Разработки по переводу кислородно-керосиновых и кислородно-водородных двигателей на кислородно-метановое топливо выполнены в КБ «Химавтоматика». Использование этих двигателей предполагается на перспективных многоразовых РН. На базе серийного двигателя РД0110 разработан и испытан демонстрационный кислородно-метановый двигатель РД0110МД с тягой на земле 250 кН и удельным импульсом тяги 345 с (3381 м/с) ($p_k=55 \times 10^5$ Па). Прошел также огневые испытания ЖРД-0162 с тягой 2 МН и удельным импульсом 350 с (3430 м/с).

НИИ «Машиностроения» (г. Нижняя Салда) разработал РДМТ тягой 400 кН, работающий на жидких и газообразных кислородно-метановых компонентах топлива, предназначенный для перспективных космических разгонных блоков.

В августе 2005 г. XCOR успешно завершила испытания двигателя 3М9 тягой 223 Н с компонентами метан и жидкий кислород. Испытания включили в себя 22 запуска, общей продолжительности 65 с. Максимальное время работы составило 7 с.

Приведенные примеры уже испытанных кислородно-метановых двигателей свидетельствуют о большой заинтересованности ракетно-космической индустрии во внедрении кислородно-метанового топлива для решения различных задач (транспортных и управленческих).

Водорода пероксид высококонцентрированный

Использование ВПВ началось с ракеты V-2, где ВПВ использовалась в газогенераторе с катализатором: 80% $H_2O_2 + NaMnO_4 \cdot H_2O$ (33%), что позволяло добиться температуры разложения компонента до 685 °К.

Для газогенератора РД-107, РД-108 используется 82% H_2O_2 + твердый катализатор.

Британская ракета «Black Arrow» использовала ВПВ как основной окислитель: $RP-1 + H_2O_2$ (85 или 90%). В 1971 программа была завершена из-за падения интереса и проблем с финансированием.

В 1950-х LR-40 был разработан для самолета, разгоняемого ракетным ускорителем фирмой RMI (Rocket Motor Inc.):

- тяга: от 16 до 46 кН;

- удельный импульс тяги: от 220 до 257 с (от 2156 м/с до 2519 м/с);
- давление в КС: $36,5 \times 10^5$ Па;
- масса: 100 кг;
- компоненты: керосин+90% H_2O_2 ;
- одиночного зажигания с продолжительностью: 5400 с.

Однако программа была завершена из-за проблем финансирования.

Rocketdyne / AR2-3

В тех же 50-х годах компания Rocketdyne разработала AR2-3 для самолетного ускорителя:

- использовался для FJ-4, F-86, NF-104
- тяга: 30 кН
- удельный импульс тяги: 246 с (2411 м/с)
- давление в КС: $38,6 \times 10^5$ Па
- масса: 100 кг
- компоненты: керосин+90% H_2O_2 .

NASA/Boing разработала демонстратор “X-34 Advanced Technology Demonstrator” тестирования новых технологий с одиночным двигателем AR 2-3. AR2-3 для X-34, который был испытан в NASA E-3 Cell 2 Test Facility.

В России в 1993 году разработан РД-161П с двумя уровнями тяги, в котором в качестве окислителя используется ВПВ. Этот двигатель является модификацией двигателя РД-161, использующего керосин и жидкий кислород. Хотя до сих пор РД-161П не использовался для лётных задач, он доказал возможность модифицировать керосиново-кислородный двигатель на двигатель, использующий керосин и ВПВ.

На кафедре «Ракетные Двигатели» МАИ (НИУ) научно-исследовательская группа РДМТ также занимается исследованием РДМТ с ВПВ от 200 до 500 Н. В смесительной головке используются одно- или двухкомпонентные центробежные форсунки а в качестве зажигательного устройства применяются катализатор, искровая или калильная свечи.

В Америке в компании «General Kinetics» активно развиваются перекисный газогенератор, однокомпонентный двигатель тягой до 150 фунтов (667 Н) и двухкомпонентный двигатель (ВПВ+керосин) тягой до 10000 фунтов (45 кН), а в Purdue University исследуют гибридный ракетный двигатель тягой до 900 фунтов (1,8 кН) на ВПВ в качестве жидкостного окислителя. «NASA» совместно с «Boeing» модифицировали двигатель «AR2-3». Успешно проведены огневые испытания.

В Японии в «Kyushu University» исследуют перекисный микродвигатель с помощью технологии создания приборов на основе микроэлектромеханических систем с шириной и глубиной его критического сечения – 300 мкм × 20 мкм. Чтобы повысить эффективность и работоспособность, камера сгорания сразу производится в виде пористой структуры, и её покрывают платиновым катализатором.

В Республике Корея в «CNU (Chungnam National University)» и «KAIST (Korea Advanced Institute of Science & Technology)» исследуют керосиново-перекисный двигатель тягой 200 ÷ 1500 Н.

Водород

Применение топливной пары кислород+водород в РДМТ является также актуальным. Это подтверждается разработками МАИ (НИУ), ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша» [49].

В МАИ (НИУ) разработан экспериментальный двигатель ДМТ100 с газодинамическим зажиганием [59].

Общий вид двигателя ДМТ100 изображен на рисунке 1.3.



Рисунок 1.3 – Двигатель ДМТ100

Технические характеристики двигателя ДМТ100 приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Технические характеристики двигателя ДМТ100

Параметр	ДМТ100
Компоненты топлива	$H_{2\text{газ}}+O_{2\text{газ}}$
Тяга, Н	100
Давление в камере сгорания, МПа	0,65
Коэффициент соотношения компонентов топлива	4
Геометрическая степень расширения сопла	700
Форсунки	Струйные
Теоретический удельный импульс тяги, м/с	4445
Достигнутый удельный импульс тяги, м/с	3969
Зажигание	Газодинамическое

В ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша» разработаны двигатели РДМТ20А и РДМТ100, работающие на КТ кислород+водород.

Общий вид двигателя РДМТ20А изображен на рисунке 1.4.



Рисунок 1.4 – Двигатель РДМТ20А

Технические характеристики двигателя РДМТ20А приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Технические характеристики двигателя РДМТ20А

Параметр	РДМТ20А
Компоненты топлива	$H_{2\text{газ}}+O_{2\text{газ}}$
Тяга, Н	20
Давление в камере сгорания, МПа	0,5...1,0
Коэффициент соотношения компонентов топлива	3,0...5,0
Расход топлива, г/с	5,0
Геометрическая степень расширения сопла	10
Форсунки	Струйные (O_2) Центробежные (H_2)
Теоретический удельный импульс тяги, м/с	4000
Температура стенки камеры сгорания, °С	880
Зажигание	Электрокалильное или электроискровое

На основании изложенного выше РДМТ типа ДМТ100, РДМТ20А, РДМТ100 целесообразно использовать в составе ДУ стабилизации и ориентации блоков ступеней РН и ДУ СОЗ РБ типа «КВТК» на основных КТ (жидкий водород+жидкий кислород) с включением в состав РБ систем газификации жидкого кислорода и жидкого водорода [59].

Таким образом, разработка РДМТ на экологически безопасных КТ является актуальным и перспективным направлением современного двигателестроения. На рисунке 1.5 представлена схема по использованию экологически безопасных КТ в ракетно-космической отрасли.

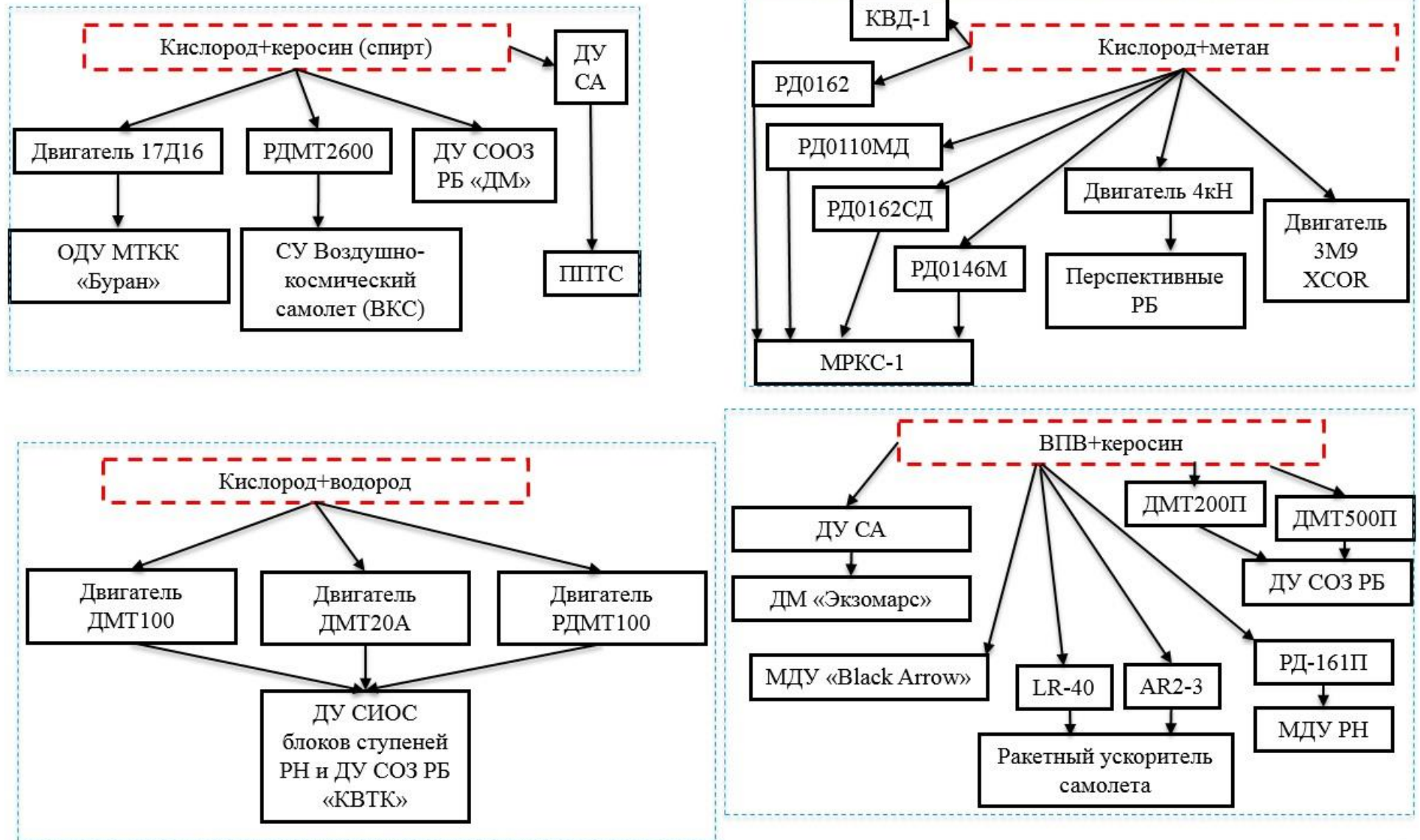


Рисунок 1.5 – Подтверждение актуальности применения экологически безопасных КТ.

1.2 Анализ применения методов планирования экспериментов и регрессионного анализа

В СУ, САЗ, АВД регрессионные или корреляционные модели имеют преимущества перед математическими моделями (простота моделей по сравнению с математическими моделями, малое количество опытов для их построения, высокий уровень адекватности). Особенно это важно при повышении информативности испытаний за счет оперативной оценки параметров двигателя. Также регрессионные модели позволяют оперативно оценить и спрогнозировать основные параметры вновь разрабатываемых двигателей.

В настоящее время в области планирования эксперимента и построения регрессионных моделей посвящено огромное количество работ в различных направлениях народного хозяйства и техники.

Регрессионные модели широко применяются в химии и химической технологии [65], металлургии [2,3,4,37,41,46] и в других областях [53-55,64-66,68,77,79]. Также регрессионные модели нашли широкое применение также в двигателестроении [5,51,67,69,70,72,74,75,81].

В работе [51] проведен многофакторный эксперимент на основе расчетных по математическим моделям опытов. В итоге, полученные регрессионные модели внедрены в СУ двигателем. Достоинством этих моделей является их более простой вид в сравнении с системой математических уравнений. Недостатком является то, что модель получена не на основе реальных экспериментов, но после внедрения моделей в алгоритмы управления двигателем и набора статистических данных, возможна корректировка модели на их основе.

В работе [30] по результатам различных спланированных экспериментов построены регрессионные модели и выбран оптимальный план для проведения эксперимента. Достоинство этих моделей в том, что они получены из минимального количества опытов и имеют максимальный уровень адекватности (по критерию Фишера). Недостатком моделей, также является то, что они получены из расчетных экспериментов.

В работах [67,72,74,75] построены корреляционные модели различных параметров ГРД. Преимущество их заключается в простоте, и они получены при минимальном количестве опытов, а недостаток – в сложности применения этих моделей, т.к. они описывают помимо зависимости параметра от факторов, еще и взаимосвязь факторов, что неудобно при использовании в более сложных математических моделях.

Особенности планирования экспериментов при испытаниях РДМТ

Планирование экспериментов при стендовых испытаниях РДМТ – это процедура выбора числа и условий проведения опытов, необходимых для получения достаточного объема достоверной информации при подтверждении характеристик, заданных в ТЗ [4,35]. При этом существенно следующее:

- 1) стремление к минимизации общего числа опытов;
- 2) одновременное варьирование всеми переменными, определяющими процесс, по специальным правилам – алгоритмам;
- 3) использование математического аппарата, формализующего многие действия экспериментатора;
- 4) выбор четкой стратегии, позволяющей принимать обоснованные решения после каждой серии экспериментов.

При планировании эксперимента очень важно определить параметр, который нужно оптимизировать [54].

Планирование начинается с выбора области испытаний (эксперимента). В первом приближении область определения факторов (т.е. совокупность всех значений, которые может принимать данный фактор) может быть задана с учетом допусков на входные факторы, указанных в техническом задании (ТЗ) на проектирование изделия. Однако, часто диапазон допусков невелик и требуется большое число (более 40, что для ЖРД является существенным) экспериментов для достижения приемлемой статистической точности. Поэтому область определения факторов желательно расширить за пределы допусков, но с учетом ограничений,

связанных, прежде всего, с работоспособностью изделия, а также имея ввиду то, что с увеличением интервалов может потребоваться усложнение вида модели.

Параметр оптимизации – это признак, по которому оптимизируется процесс.

Фактором называется измеряемая переменная величина, принимающая в некоторый момент времени определенное значение. Факторы соответствуют способам воздействия на объект исследования [42,46,61].

Точность замера факторов должна быть возможно более высокой. Степень точности определяется диапазоном изменения факторов (желательно, чтобы ошибка измерений составляла не более 2-х %).

Факторы должны быть однозначны.

При планировании эксперимента обычно одновременно изменяется несколько факторов. Поэтому очень важно сформулировать требования, которые предъявляются к совокупности факторов.

Факторы должны быть некоррелированы. Но требование некоррелированности не означает, что между значениями факторов нет никакой связи. Достаточно, чтобы связь не была линейной.

Область эксперимента задается уровнями и интервалами варьирования факторов [19,39].

Основной уровень – центральная точка области эксперимента, чаще всего это номинальные значения факторов $(x_i)_{ном}$, приводящие к номинальному значению выходного параметра.

Интервал варьирования Δx_i – это расстояние на оси x_i между основным и верхним $(x_i)_{max}$ уровнями факторов.

Для упрощения записи условий эксперимента и обработки экспериментальных данных значения факторов приводят к безразмерному виду:

$$\bar{x}_i = \frac{x_i - (x_i)_{ном}}{\Delta x_i}.$$

Тогда верхний уровень равен (+1), нижний – (-1), а основной – нулю.

Пусть имеется k -мерное пространство и n измерений выходного параметра в некоторых точках этого пространства. Каждая точка представляет собой вектор $\{x_j\} = \{x_{j1}x_{j2}\dots x_{jk}\}$, где $j = 1, 2, \dots, n$.

Набор этих точек по всем n опытам и называется планом эксперимента.

План должен отвечать следующим основным требованиям:

- 1) минимум числа опытов;
- 2) композиционность;
- 3) ортогональность;
- 4) ротатабельность.

Выбор модели – выбор вида функции (запись уравнения регрессии).

На основании физического анализа рабочих процессов, протекающих в изделии, и с учетом ранее накопленного опыта выдвигается гипотеза о форме связи между выходным параметром Y и входными факторами $x_i (i = 1, \dots, k)$, т.е. о структуре регрессионной модели. Основные требования к модели – это адекватность и простота.

В фиксированной точке факторного пространства, т.е. при конкретных значениях факторов, значение выходного параметра равно его математическому ожиданию [39].

Очень часто математическое ожидание выходного параметра представляют в виде полинома:

$$E(Y) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i < j}}^k \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i,j=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \dots,$$

где β - коэффициенты регрессии. Коэффициент β_0 равен значению выходного параметра на номинальном режиме работы изделия, β_i - тангенсу угла наклона касательной к поверхности функции отклика по отношению к оси i -го фактора.

Полиномом можно описать, с наперед заданной точностью, любую функцию, непрерывную в какой-либо ограниченной области факторного пространства. Степень полинома должна выбираться возможно меньшей, так как чем она ниже, тем меньше в уравнении коэффициентов, а следовательно, требуется меньше

опытов для их определения; также для упрощения систем обработки уравнений, например, в системах управления.

Простейшим видом модели такого типа является линейная регрессионная модель

$$E(Y) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k.$$

Линейная модель будет адекватной при правильном выборе подобласти в факторном пространстве.

Используются также и другие виды регрессионной модели:

- степенная

$$E(Y) = \beta_0 x_1^{\beta_1} x_2^{\beta_2} \dots x_k^{\beta_k};$$

- экспоненциальная

$$E(Y) = \beta_0 \beta_1^{x_1} \beta_2^{x_2} \dots \beta_k^{x_k};$$

- комбинированные модели.

Существует огромное количество различных планов экспериментов. В ЖРД принято использовать полный факторный (ПФЭ), дробный факторный (ДФЭ), центральный композиционный («звездный») планы и малый центральный композиционный план (план Хартли) [7,54,63,64].

ПФЭ [54,63] называется эксперимент, в котором реализуются все возможные сочетания входных факторов. Если p – число уровней варьирования факторов, а k – количество факторов, то число их возможных сочетаний (опытов)

$$\sum_{m=0}^k C_k^m = \sum_{m=0}^k \frac{k!}{m!(k-m)!}, \text{ а число опытов } n = p^k.$$

План ПФЭ отвечает всем требованиям, предъявляем к оптимальным планам.

По результатам ПФЭ можно построить регрессионную модель вида неполного квадратного уравнения:

$$E(Y) \equiv y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i < j}}^k b_{ij} x_i x_j + \dots,$$

где b – оценки коэффициентов регрессии β .

План дробного факторного эксперимента [63] используется для построения линейной регрессионной модели вида:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i,$$

при этом достаточно $n = k + 1$ опытов. Следовательно, ПФЭ при линейных задачах является избыточным, причем степень избыточности (число степеней свободы f) определяется разностью между числом опытов и количеством коэффициентов регрессии:

$$f = n - (k + 1).$$

ДФЭ позволяет существенно сократить объем эксперимента, используя лишь часть (реплику) матрицы планирования ПФЭ.

Число опытов для ДФЭ равно $n = 2^{k-l}$,

где l – реплика.

Композиционный план используют для построения регрессионных моделей второго порядка:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_k x_k + b_{k+1} x_1^2 + \dots + b_{2k} x_k^2 + b_{2k+1} x_1 x_2 + \dots + b_{\frac{(k+1)(k+2)}{2}-1} x_{k-1} x_k.$$

Такой план может быть получен путем добавления специальных («звездных») точек к ядру плана, образованному планом для линейной модели.

Для ортогонального композиционного плана координаты «звездных» точек рассчитываются:

$$\alpha = \pm \sqrt{2^{\frac{k-m}{2}-1} (\sqrt{n} - 2^{\frac{k-m}{2}})};$$

для ротатабельного:

$$\alpha = \pm 2^{\frac{k-m}{4}}.$$

Общее число опытов при реализации композиционного плана в случае использования плана ПФЭ в качестве ядра плана

$$n = 2^k + 2k + n_0,$$

где n_0 - число контрольных опытов в центре плана.

Если в качестве ядра используется план ДФЭ, что возможно при $k \geq 5$, то $n = 2^{k-m} + 2k + n_0$.

Выбор основных параметров и входных факторов

Для РДМТ основными выходными параметрами являются: тяга

$$P = \dot{m}W_a + F_a(p_a - p_H), \text{ удельный импульс тяги } I_y = \frac{P}{\dot{m}} = W_a + \frac{F_a}{\dot{m}}(p_a - p_H) = W_{эф},$$

импульс тяги $I_\Sigma = \int_0^{\tau_{раб}} P(\tau) d\tau$, тепловое состояние (температура конструкции

двигателя) и ресурс двигателя [15].

В данной работе в качестве выходных параметров выбраны удельный импульс тяги, т.к. он показывает энергетическую эффективность работы двигателя и температура внешней стенки камеры двигателя, показывающая тепловое состояние двигателя. Ресурс работы двигателя во время оперативной оценки параметров для возможности продолжения испытаний или их остановки не так важен, как на последующих этапах, поэтому этот параметр оставлен за рамками исследования работы.

Для удельного импульса управляемыми факторами являются:

- 1) \dot{m}_o – массовый расход окислителя [кг/с];
- 2) \dot{m}_z – массовый расход горючего [кг/с];
- 3) T_o – температура окислителя на входе в двигатель [К];
- 4) T_z – температура горючего на входе в двигатель [К];
- 5) p_k – давление в камере сгорания [Па];
- 6) K_m – соотношение компонентов топлива;
- 7) p_H – внешнее давление среды [Па].

Для температуры стенки управляемыми факторами являются:

- 1) \dot{m}_o [кг/с];
- 2) \dot{m}_z [кг/с];

- 3) T_o [К];
- 4) T_z [К];
- 5) p_k [Па];
- 6) K_m ;
- 7) x – расстояние по оси камеры, на котором измеряется температура [м];
- 8) t – время работы двигателя [с].

Из приведенных входных факторов существенными и независимыми факторами для удельного импульса тяги являются: \dot{m}_o , \dot{m}_z , T_o , T_z , p_H т.к.

$K_m = \frac{\dot{m}_o}{\dot{m}_z}$, а p_k прямо пропорционально зависит от суммарного расхода

$\dot{m}_\Sigma = \dot{m}_o + \dot{m}_z$, следовательно, p_k и K_m – зависимые факторы.

p_H – внешнее давление постоянно и равно атмосферному, либо вакууму 1,333 Па (10^{-2} мм рт. ст.) Часть двигателей испытывается на подрезанных соплах в атмосферных условиях, а часть в вакуумной камере.

T_o и T_z – температуры компонентов при стендовых испытаниях, как правило, не меняются.

Из вышеизложенного следует, что $I_y = f(\dot{m}_o, \dot{m}_z)$.

Существенными и независимыми факторами для температуры стенки являются: $\dot{m}_o, \dot{m}_z, T_o, T_z, x, t$. Замер производится на установившемся тепловом режиме, следовательно, время эксперимента не влияет на температуру стенки (изменение температуры на установившемся тепловом режиме – минимально). Измеряется максимальная температура на сужающейся части камеры сгорания, т.е. в одной точке камеры двигателя, где максимальный тепловой поток. Температура компонентов также не меняется. Из вышеизложенного следует, что $T_{cm} = f(\dot{m}_o, \dot{m}_z)$.

Выбор вида регрессионных моделей

Для проведения исследований необходимо использовать:

- модели простые и требующие меньшего количества опытов для построения адекватных зависимостей.

- полиномы наиболее простые и описывающие максимально точно процесс в заданных диапазонах.

Данным условиям удовлетворяют полиномы не выше второго порядка, т.к. для их построения требуется большое количество опытов, например, для полного факторного эксперимента для модели третьего порядка при трех факторах состоит из 64 опытов ($N = 4^3$), а с учетом повтора опытов их количество будет 128.

Соответственно, при проведении испытаний целесообразно использовать полиномиальные модели первого и второго порядка, а также квазинелинейные. В работе для двух уровней варьирования использована квазинелинейная модель, т.к. она учитывает эффекты взаимодействия факторов, а для трех уровней варьирования факторов – модель 2 порядка.

Общий вид моделей для удельного импульса тяги и температуры стенки выглядят следующим образом:

$$I_y = b_0 + b_1 \overline{\dot{m}_o} + b_2 \overline{\dot{m}_z} + b_{12} \overline{\dot{m}_o \dot{m}_z} + b_{11} \overline{\dot{m}_o^2} + b_{22} \overline{\dot{m}_z^2},$$

$$T_{cm} = b_0 + b_1 \overline{\dot{m}_o} + b_2 \overline{\dot{m}_z} + b_{12} \overline{\dot{m}_o \dot{m}_z}.$$

Особенности применения регрессионного анализа при обработке результатов испытаний

Результатом испытаний являются отчеты по проведенным испытаниям. Они содержат большое число замеренных и расчетных параметров. Для обработки экспериментальных данных (ЭД) используют, в основном, корреляционный или регрессионный анализы.

Объекты исследования характеризуются множеством параметров, и по результатам наблюдения за функционированием объектов формируются многомерные совокупности (матрицы) экспериментальных данных [13,21,29,38,47,48]:

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{pmatrix}. \quad (1.1)$$

Каждая строка такой матрицы соответствует результатам регистрации всех наблюдаемых параметров объекта в одном опыте, а столбцы содержат результаты наблюдений за одним параметром (фактором, вариантой) во всем эксперименте. Обозначим количество параметров через m , а количество наблюдений – через n .

В матрице элемент x_{ij} соответствует значению j -й варианты в i -м наблюдении.

Объектом исследования в многомерном анализе является случайная величина, представленная выборкой конечного объема.

Параметры, характеризующие объект исследования, обычно, имеют разный физический смысл. Матрицу данных, до проведения анализа, целесообразно привести к стандартному (безразмерному) виду, когда измерение всех вариантов происходит в одном диапазоне, т.к. упрощаются последующие вычисления. Стандартная матрица имеет вид:

$$U = \begin{pmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1m} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{n1} & u_{n2} & \cdots & u_{nm} \end{pmatrix}. \quad (1.2)$$

Переход от исходной к стандартной матрице осуществляется путем вычисления:

- оценки математического ожидания $M(x_j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}$ каждой варианты ($j = \overline{1, m}$);

- дисперсии $D(x_j) = \sigma^2(x_j) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - M(x_j))^2$ каждой варианты;

- элементов стандартной матрицы – квантилей $u_{ij} = \frac{(x_{ij} - M(x_j))}{\sigma(x_j)}$.

Элементы матрицы U являются безразмерными величинами. Матрица U будет являться объектом последующей статистической обработки результатов испытаний.

Корреляционный анализ экспериментальных данных

Величины, характеризующие различные свойства объектов, могут быть независимыми или взаимосвязанными. Различают два вида зависимостей между величинами (факторами): функциональную и статистическую [13,21,47,48].

При функциональной зависимости двух величин значению одной из них обязательно соответствует одно или несколько точно определенных значений другой величины. Такая связь двух факторов возможна лишь при условии, что вторая величина зависит только от первой и не зависит ни от каких других величин. Функциональная связь одной величины с множеством других возможна, если эта величина зависит только от этого множества факторов. В реальных ситуациях существует бесконечно большое количество свойств самого объекта и внешней среды, влияющих друг на друга, поэтому такого рода связи не существуют, иначе говоря, такие связи являются математическими абстракциями. Их применение допустимо тогда, когда величина, в основном, зависит от соответствующих ей факторов.

Воздействие общих факторов, наличие объективных закономерностей в поведении объектов приводят лишь к проявлению статистической зависимости. Статистической называют зависимость, при которой изменение одной из величин влечет изменение распределения других, и эти величины принимают некоторые значения с определенными вероятностями.

Частным случаем статистической зависимости является корреляционная зависимость, характеризующая взаимосвязь значений одних случайных величин со средними значениями других, хотя в каждом отдельном случае любая взаимосвязанная величина может принимать различные значения.

Если же у взаимосвязанных величин вариацию имеет только одна переменная, а другая является детерминированной, то такую связь называют не корреляционной, а регрессионной.

При исследовании зависимости между одной величиной и такими характеристиками другой, как, например, моменты старших порядков (а не среднее значение), то эта связь будет называться статистической, а не корреляционной.

Корреляционная зависимость обычно определяется корреляционным моментом и коэффициентом корреляции.

Оценка корреляционного момента (коэффициента ковариации) двух вариант x_j и x_k вычисляется по исходной матрице X (1.1):

$$\xi_{jk} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - M(x_j))(x_{ik} - M(x_k)). \quad (1.3)$$

Этот показатель неудобен для практического применения, так как имеет размерность, равную произведению размерностей вариант, и по его величине трудно судить о зависимости факторов друг от друга.

Коэффициент ковариации нормированных случайных величин называют коэффициентом корреляции r_{jk} , его оценка:

$$r_{jk} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_{ij} u_{ik}. \quad (1.4)$$

Значение коэффициента корреляции лежит в пределах от -1 до $+1$. Коэффициент r_{jk} характеризует значимость линейной связи между факторами:

- при $r_{jk} = 1$ значения u_{ij} и u_{ik} имеют функциональную зависимость: зная значение одного параметра, можно однозначно указать значение другого;

- при $r_{jk} = -1$ величины u_{ij} и u_{ik} принимают противоположные значения. И в этом случае имеет место функциональная зависимость;

- при $r_{jk} = 0$ величины u_{ij} и u_{ik} практически не связаны друг с другом линейным соотношением. Это не означает отсутствия каких-то других (например, нелинейных) связей между параметрами;

- при $0 < |r_{jk}| < 1$ однозначной линейной связи величин u_{ij} и u_{ik} нет. И чем меньше абсолютная величина коэффициента корреляции, тем в меньшей степени по значениям одного параметра можно предсказать значение другого.

Используя понятие коэффициента корреляции, матрице ЭД можно поставить в соответствие квадратную матрицу (где $n = m$) оценок коэффициентов корреляции (корреляционную матрицу):

$$r = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{pmatrix}. \quad (1.5)$$

К числу характерных свойств корреляционной матрицы относят: симметричность относительно главной диагонали $r_{jk} = r_{kj}$, $j, k = \overline{1, m}$; единичные значения элементов главной диагонали $r_{kk} = 1$.

Оценка коэффициента корреляции, вычисленная по ограниченной выборке, практически всегда отличается от нуля. Но из этого еще не следует, что коэффициент корреляции генеральной совокупности также отличен от нуля. Требуется оценить значимость выборочной величины коэффициента или, в соответствии с постановкой задач проверки статистических гипотез, проверить гипотезу о равенстве нулю коэффициента корреляции. Проверка гипотезы о значимости оценки коэффициента корреляции требует знания распределения этой случайной величины. Распределение величины r_{jk} изучено только для частного случая, когда случайные величины U_j и U_k распределены по нормальному закону.

В качестве критерия [21] проверки нулевой гипотезы H_0 применяют случайную величину $t = \frac{|r_{jk}| \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_{jk}^2}}$. Если модуль коэффициента корреляции не равен единицы, то величина t_{Cm} , при справедливости нулевой гипотезы распределена по закону Стьюдента с $(n-2)$ степенями свободы. Конкурирующая

гипотеза H_1 соответствует утверждению, что значение r_{jk} не равно нулю. Из этого утверждения следует, что критическая область двухсторонняя.

Проверка гипотезы H_0 о равенстве нулю генерального коэффициента парной корреляции двумерной нормально распределенной случайной величины осуществляется в следующей последовательности [13,21,48]:

- вычисляется значение статистики t ;
- при уровне значимости α для двухсторонней области определяется критическая точка распределения Стьюдента $t_{kp}(\alpha; n-2)$;
- сравнивается значение статистики t_{Cm} с критическим $t_{kp}(\alpha; n-2)$; Если $t_{Cm} < t_{kp}(\alpha; n-2)$ то нет оснований отвергнуть нулевую гипотезу, иначе гипотеза H_0 отвергается (коэффициент корреляции значим).

Постановка задачи линейного корреляционного анализа формулируется в следующем виде:

- имеется матрица наблюдений вида (1.1);
- определяются оценки коэффициентов корреляции для всех или только для заданных пар параметров и оценивается их значимость (незначимые оценки приравниваются к нулю).

Необходимо определить допущения, которые используются в [13,21,48]:

- 1) выборка имеет достаточный объем (количество экспериментов должно быть больше или равно количеству неизвестных коэффициентов);
- 2) выборки по каждому фактору являются однородными;
- 3) матрица наблюдений не содержит пропусков.

Если необходима проверка значимости оценки коэффициента корреляции, то требуется соблюдение дополнительного условия – распределение вариант должно подчиняться нормальному закону [13,21].

Задача анализа решается в несколько этапов:

- проводится стандартизация исходной матрицы;
- вычисляются парные оценки коэффициентов корреляции;

- проверяется значимость оценок коэффициентов корреляции, незначимые оценки приравниваются к нулю. По результатам проверки делается вывод о наличии связей между факторами.

Регрессионный анализ экспериментальных данных

Постановка задачи регрессионного анализа.

Одной из типовых задач обработки многомерных ЭД является определение количественной зависимости показателей качества объекта от значений его параметров и характеристик внешней среды.

Постановка задачи регрессионного анализа формулируется следующим образом [13, 21, 27, 29, 48].

Имеется совокупность результатов наблюдений вида (1.1). В этой совокупности один столбец соответствует параметру, для которого необходимо установить функциональную зависимость с данными объекта и среды, представленными остальными столбцами. Будем обозначать выходной параметр через y^* и считать, что ему соответствует первый столбец матрицы наблюдений. Остальные $m - 1$ столбцов соответствуют факторам x_2, x_3, \dots, x_m , а $x_1 = y^*$.

Требуется установить количественную взаимосвязь между параметром и факторами. В таком случае задача регрессионного анализа понимается как задача выявления такой зависимости $y^* = f(x_2, x_3, \dots, x_m)$, которая наилучшим образом описывает имеющиеся экспериментальные данные.

Необходимо выделить допущения, которые установлены авторами в работах [13,21,48]:

- количество наблюдений достаточно для проявления статистических закономерностей относительно факторов и их взаимосвязей;
- обрабатываемые ЭД содержат некоторые ошибки, обусловленные погрешностями измерений, воздействием неучтенных случайных факторов;
- матрица результатов наблюдений является единственной информацией об изучаемом объекте, имеющейся в распоряжении перед началом исследования.

Функция $f(x_2, x_3, \dots, x_m)$, описывающая зависимость параметра от факторов, называется уравнением (функцией) регрессии.

Решение задачи регрессионного анализа целесообразно разбить на несколько этапов [13,48]:

- предварительная обработка ЭД;
- выбор вида уравнения регрессии;
- вычисление коэффициентов регрессии и проверка их на значимость;
- проверка адекватности построенной функции по результатам наблюдений.

Предварительная обработка включает стандартизацию матрицы ЭД, расчет коэффициентов корреляции факторов между собой, проверку их значимости и исключение из рассмотрения незначимых факторов (эти преобразования были рассмотрены в рамках корреляционного анализа). В результате преобразований будут получены стандартизованная матрица наблюдений U (через y будем обозначать стандартизованную величину y^*) и корреляционная матрица r .

В корреляционной матрице особую роль играют элементы левого столбца – они характеризуют наличие или отсутствие линейной зависимости между соответствующим фактором $u_i (i = 2, 3, \dots, m)$ и параметром объекта y . Проверка значимости позволяет выявить такие факторы, которые следует исключить из рассмотрения при формировании линейной функциональной зависимости, и тем самым упростить последующую обработку.

Выбор вида уравнения регрессии

Задача определения зависимости, наилучшим образом описывающей ЭД, связана с преодолением ряда принципиальных трудностей. В общем случае для стандартизованных данных зависимость параметра от факторов можно представить в виде [13,48]:

$$y^* = f(u_1, u_2, \dots, u_p) + \xi, \quad (1.6)$$

где f – заранее неизвестная функция, подлежащая определению; ξ – ошибка аппроксимации ЭД.

Указанное уравнение принято называть выборочным уравнением регрессии y на x . Это уравнение характеризует зависимость между вариацией параметра и факторов.

Еще одна особенность касается оценки степени влияния каждого фактора на параметр. Регрессионное уравнение не обеспечивает оценку отдельного влияния каждого фактора на параметр, такая оценка возможна лишь в случае, когда все другие факторы не связаны с изучаемым фактором. Если изучаемый фактор связан с другими, влияющими на параметр, то будет получена смешанная характеристика влияния фактора. Эта характеристика содержит как непосредственное влияние фактора, так и опосредованное влияние, оказанное через связь с другими факторами и их влиянием на параметр.

В регрессионное уравнение не рекомендуется включать факторы, слабо связанные с параметром, но тесно связанные с другими факторами. Не включают в уравнение и факторы, функционально взаимодействующие друг с другом (для них коэффициент корреляции близок к единице). Включение таких факторов приводит к вырождению системы уравнений для оценок коэффициентов регрессии и к неопределенности решения.

Функция f должна подбираться так, чтобы ошибка ξ была минимальна.

В целях выбора функциональной связи заранее выдвигают гипотезу о том, к какому классу может принадлежать функция f , а затем подбирают «лучшую» функцию в этом классе. Выбранный класс функций должен обладать некоторой «гладкостью», т.е. «небольшие» изменения значений факторов должны вызывать «небольшие» изменения значений параметра.

Простым, удобным для практического применения и отвечающим указанному условию является класс полиномиальных функций

$$y = b_0 + \sum_{j=1}^m b_j u_j + \sum_{\substack{j=1 \\ k=j+1}}^m b_{jk} u_j u_k + \sum_{j=1}^m b_{jj} u_j^2 + \dots + \xi. \quad (1.7)$$

Для такого класса задача выбора функции сводится к задаче определения значений коэффициентов $b_0, b_j, b_{jk}, \dots, b_{jj}, \dots$. Однако универсальность

полиномиального представления обеспечивается только при возможности неограниченного увеличения степени полинома, что не всегда допустимо на практике, поэтому приходится применять и другие виды функций [39,46].

Частным случаем, широко применяемым на практике, является полином первой степени или уравнение линейной регрессии:

$$y = b_0 + \sum_{j=1}^m b_j u_j + \xi. \quad (1.8)$$

Обычно стремятся обеспечить такое количество наблюдений, которое превышало бы количество оцениваемых коэффициентов модели. Для линейной регрессии при $n > m$ (n – количество наблюдений, m – количество параметров) количество уравнений превышает количество подлежащих определению коэффициентов полинома. Но и в этом случае нельзя подобрать коэффициенты таким образом, чтобы ошибка в каждом уравнении обращалась в ноль, так как к неизвестным относятся b_j и ξ_i , их суммарное количество $m + n$ всегда больше количества уравнений n . Аналогичные рассуждения справедливы и для полиномов степени выше первой.

Для выбора вида функциональной зависимости можно рекомендовать следующий подход [13, 21, 29, 38 48]:

- в пространстве факторов графически отображают точки со значениями параметра. При большом количестве факторов можно ставить точки применительно к каждому из них, получая двухмерные распределения значений;
- по расположению точек и на основе анализа сущности взаимосвязи параметра и факторов объекта делают заключение о примерном виде регрессии или ее возможных вариантах;
- после расчета коэффициентов регрессии оценивают качество аппроксимации, т.е. оценивают степень близости расчетных и фактических значений;
- если расчетные и фактические значения близки во всей области задания, то задачу регрессионного анализа можно считать решенной. В противном случае выбирают другой вид полинома или функции.

Вычисление коэффициентов уравнения регрессии [13,27,48].

Систему уравнений на основе имеющихся ЭД можно решить, если количество неизвестных равно или меньше количества уравнений. Могут применяться различные меры для оценки ошибок аппроксимации. В качестве такой меры нашла широкое применение среднеквадратическая ошибка. На ее основе разработан специальный метод оценки коэффициентов уравнений регрессии – метод наименьших квадратов (МНК). Этот метод позволяет получить оценки максимального правдоподобия неизвестных коэффициентов уравнения регрессии при нормальном законе распределении значений факторов.

В основе МНК лежат следующие положения [21,48]:

- значения величин факторов некоррелированы;
- математическое ожидание ошибки ξ должно быть равно нулю (постоянная составляющая входит в коэффициент b_0);
- выборочная оценка дисперсии ошибки должна быть минимальна.

Рассмотрим МНК применительно к линейной регрессии стандартизованных величин. Для центрированных величин u_j коэффициент b_0 равен нулю, тогда уравнение линейной регрессии принимает вид:

$$\hat{y}_i = \sum_{j=2}^m b_j u_{i,j} + \xi, \quad (1.9)$$

где \hat{y}_i – рассчитанное по уравнению регрессии значение i -го выходного параметра; $i = 1, 2..n$.

По МНК определяются такие значения коэффициентов уравнения регрессии, которые обеспечивают безусловный минимум выражению:

$$\omega = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \sum_{j=2}^m b_j u_{i,j})^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \xi_i^2, \quad (1.10)$$

здесь $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \xi_i^2$ - оценка дисперсии ошибки.

Минимум находится приравниванием нулю всех частных производных выражения (1.10), взятых по неизвестным коэффициентам, и решением системы уравнений:

$$\frac{d\omega}{db_j} = -\frac{2}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \sum_{j,k=2}^m b_j u_{i,j}) u_{i,k} = 0. \quad (1.11)$$

Последовательно проведя преобразования и используя введенные ранее оценки коэффициентов корреляции, получим:

$$\begin{aligned} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i u_{i,k} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j,k=2}^m b_j u_{i,j} u_{i,k} &= 0; \\ r_{y,k} - \sum_{j,k=2}^m b_j r_{j,k} &= 0. \end{aligned} \quad (1.12)$$

Итак, получено $m-1$ линейных уравнений, что позволяет однозначно вычислить значения b_2, b_3, \dots, b_m .

Если линейная модель неточна или параметры измеряются неточно, то и в этом случае МНК позволяет найти такие значения коэффициентов, при которых линейная модель наилучшим образом описывает реальный объект.

Когда имеется только один фактор, уравнение линейной регрессии примет вид $\hat{y} = b_2 u_2$. Коэффициент b_2 находится из уравнения $r_{y,2} - b_2 r_{2,2} = 0$. Тогда, учитывая, что $r_{2,2} = 1$, искомый коэффициент равен

$$b_2 = r_{y,2}. \quad (1.13)$$

Соотношение (1.13) подтверждает ранее высказанное утверждение, что коэффициент корреляции является мерой линейной связи двух стандартизованных факторов.

Подставив найденное значение коэффициента b_2 в выражение для ω (1.10), с учетом свойств центрированных и нормированных величин, получим минимальное значение этой функции, равное $1 - r_{y,2}^2$. Величину $1 - r_{y,2}^2$ называют остаточной дисперсией случайной величины y относительно случайной величины u_2 . Она характеризует ошибку, которая получается при замене параметра функцией от параметра $\hat{y} = b_2 u_2$. Только при $|r_{y,2}^2| = 1$ остаточная дисперсия равна нулю, и, следовательно, не возникает ошибки при аппроксимации показателя линейной функции.

Переходя от центрированных к нормированным значениям параметра и фактора:

$$\frac{x_1 - M_1(x_1)}{\sigma(x_1)} = r_{y,2} \frac{x_2 - M_2(x_2)}{\sigma(x_2)},$$

можно получить значения исходных величин:

$$x_1 = M_1(x_1) - r_{y,2} M_2(x_2) \frac{\sigma(x_1)}{\sigma(x_2)} + r_{y,2} \frac{\sigma(x_1)}{\sigma(x_2)} x_2. \quad (1.14)$$

Это уравнение также линейно относительно коэффициента корреляции. Нетрудно заметить, что центрирование и нормирование для линейной регрессии позволяет понизить на единицу размерность системы уравнений, т.е. упростить решение задачи определения коэффициентов.

Применение МНК для нелинейных функций практически ничем не отличается от рассмотренной схемы (только коэффициент b_0 в исходном уравнении не равен нулю).

С ростом степени уравнения регрессии возрастает и степень моментов распределения параметров, используемых для определения коэффициентов регрессии.

Качество полученного уравнения регрессии оценивают по степени близости между результатами наблюдений за параметром и предсказанными по уравнению регрессии значениями в заданных точках факторного пространства. Если результаты близки, то задачу регрессионного анализа можно считать решенной. В противном случае следует выбрать другую степень полинома и повторить расчеты по оценке факторов.

Анализируя сущность уравнения регрессии, следует отметить следующие положения. Рассмотренный подход не обеспечивает независимой оценки коэффициентов. Уравнение регрессии не является математическим законом, описывающим взаимосвязи факторов и параметра. Это уравнение применяют для расчета значений параметра в заданном диапазоне изменения факторов. Оно ограничено пригодно для расчета вне этого диапазона, т.е. его можно применять для решения задач интерполяции и в ограниченной степени для экстраполяции.

Главной причиной неточности прогноза является не столько неопределенность экстраполяции уравнения регрессии, сколько значительная

вариация параметра за счет неучтенных в модели факторов. Ограничением возможности прогнозирования служит условие стабильности неучтенных в модели параметров и характера влияния учтенных факторов модели. Если резко меняется внешняя среда, то составленное уравнение регрессии потеряет свой смысл. Нельзя подставлять в уравнение регрессии такие значения факторов, которые значительно отличаются от представленных в ЭД. Рекомендуется не выходить за пределы одной трети размаха вариации фактора [78].

Для количественной оценки параметров модели при проведении самостоятельных исследований выбран метод регрессионного анализа, т.к. он наиболее распространен и более удобен при анализе ЭД с использованием методов планирования экспериментов [39].

1.3 Постановка цели и задач исследований

Анализ современного состояния вопроса по методикам проведения, технологиям стендовых испытаний и регрессионным моделям РДМТ позволяет сделать следующие выводы:

- существующие методики и технологии проведения испытаний РДМТ, как экспериментальных изделий, так и штатных образцов РДМТ, разрабатываются конструктором для каждого двигателя отдельно и не имеют конкретного алгоритма построения планов экспериментов, известные методы планирования и статистической обработки экспериментов в этих методиках не адаптированы и не оптимизированы для испытаний РДМТ, что не позволяет сократить количество запусков при испытаниях и обуславливает повышение стоимости отработки двигателей. Особенно эта проблема актуальна для РДМТ на экологически безопасных КТ, т.к. существующие штатные образцы работают на высококипящих, токсичных КТ (АТ+НДМГ, АТ+ММГ), а отработка новых штатных изделий на экологически безопасных КТ очень дорогая;

- в научно-технической литературе отсутствуют разработанные регрессионные модели для РДМТ, которые можно использовать для последующего прогнозирования основных параметров вновь разрабатываемых двигателей, а

также для составления общей математической модели в бортовых или стендовых системах управления, что не позволяет оперативно оценивать основные параметры РДМТ, что особенно актуально для новых двигателей на экологически безопасных КТ.

В результате проведенного анализа была сформулирована следующая цель и задачи исследований.

Целью настоящей научной работы является совершенствование технологии уточняющих испытаний для сокращения объема экспериментальной отработки РДМТ, работающих на жидких и газообразных КТ.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- провести анализ существующих математических методов планирования испытаний, регрессионного анализа и экспериментальные исследования для определения рационального объема параметров и определяющих факторов, на основе которых может быть установлена работоспособность РДМТ, работающих на жидких и газообразных КТ.

- провести анализ способов планирования экспериментов и регрессионного анализа, для совершенствования технологии уточняющих испытаний РДМТ;

- определить вид функциональных зависимостей и коэффициентов регрессии выбранных параметров, позволяющих установить работоспособность двигателей, испытанных в лаборатории Московского авиационного института (национального исследовательского университета) (МАИ (НИУ)), с использованием математических методов планирования экспериментов и регрессионного анализа;

- обобщить результаты исследований, с использованием собственных и результатов других авторов, для подтверждения возможности использования разработанной методики стендовых испытаний РДМТ на жидких и газообразных КТ;

- разработать технологию уточняющих испытаний для повышения качества экспериментальной отработки РДМТ.

2. Методика проведения исследования

2.1 Модернизация пневмогидравлической схемы, системы управления и измерений экспериментального стенда

На кафедре «Ракетные двигатели» МАИ (НИУ) при участии автора был модернизирован стенд для огневых испытаний ракетных двигателей малых тяг [10,11,17,20,31,40,62].

Модернизация испытательной базы заключалась в следующем:

- изменены ПГС, АСУ, АСИ и система безопасности стенда;
- смонтированы дополнительные топливные системы для перспективных КТ (керосина, метана, кислорода, ВПВ).

В качестве компонентов топлива используются:

окислители:

- водорода пероксид высококонцентрированный (ВПВ, 96%) с расходом до 170 г/с;
- кислород (газообразный) с расходом до 45 г/с;

горючие:

- керосин с расходом до 20 г/с;
- метан (газообразный) с расходом до 15 г/с.

Особое внимание уделено токсичности и взрывобезопасности компонентов. Запрещено проводить испытания в густонаселенных городах на высокотоксичных компонентах. Это условие и стало одной из причин выбора данных КТ. Каждый из компонентов имеет свои особые условия хранения и применения. Например, ВПВ и кислород нельзя подавать в неочищенные специальным образом трубопроводы. Однако, ВПВ не токсичен, стабилен (скорость разложения 1% в год), продукты при полной реакции разложения – газообразный кислород и вода.

Огневой стенд имеет вытеснительную систему питания (рисунок 2.1), оснащен приточно-вытяжной вентиляционной системой с возможностью ежеминутной замены объема газа в огневом боксе.

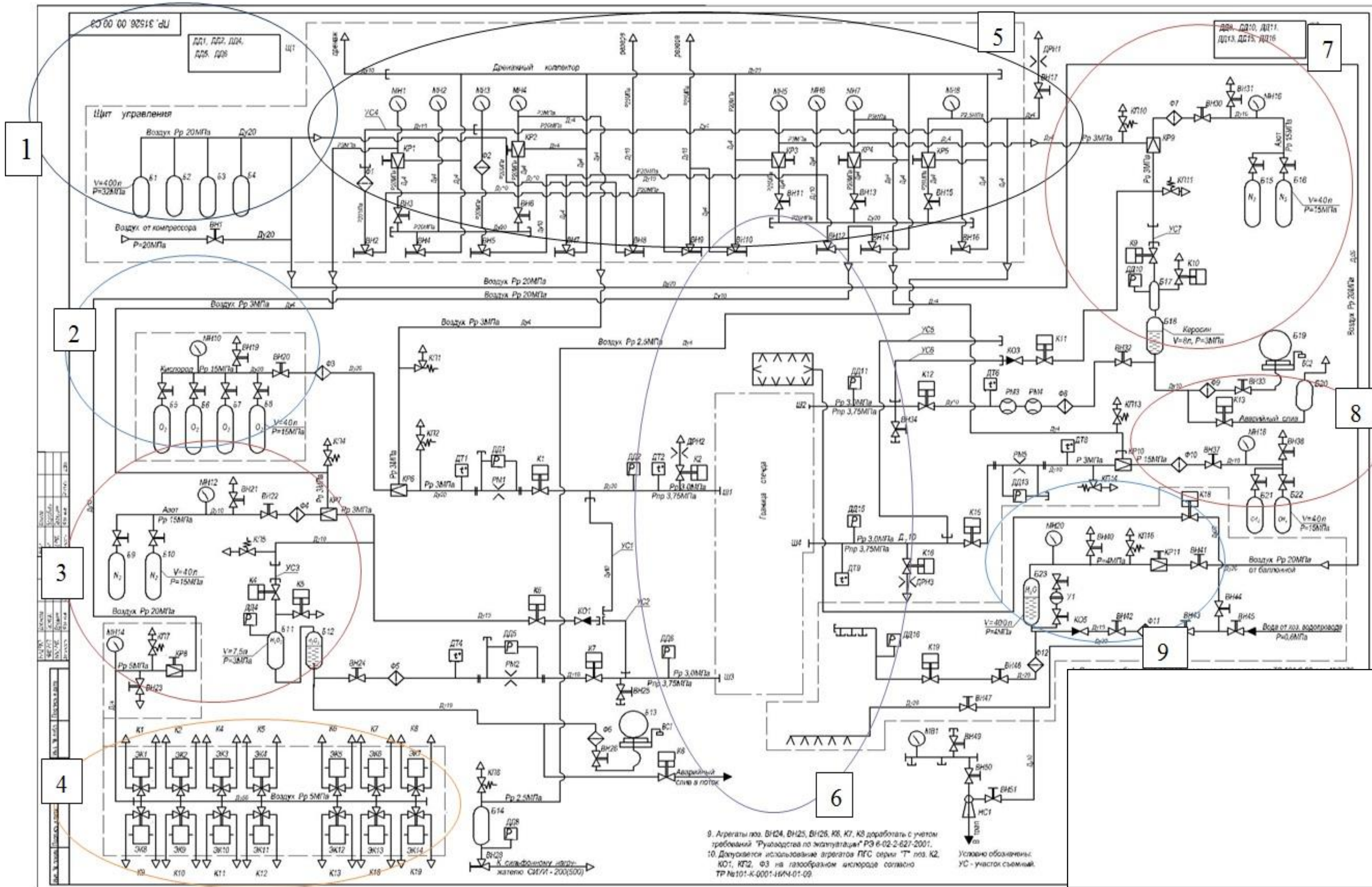


Рисунок 2.1 — Пневмогидравлическая схема испытательного стенда

На схеме (рисунок 2.1) представлены основные системы стенда:

- 1) система подачи воздуха высокого давления (ВВД);
- 2) система подачи газообразного кислорода;
- 3) система подачи перекиси водорода;
- 4) электропневмоклапаны;
- 5) пульт управления;
- 6) рабочий участок;
- 7) система подачи керосина;
- 8) система подачи метана;
- 9) система подачи воды высокого давления и модернизированная система пожаротушения.

На схеме (рисунок 2.2) представлена планировка стенда:

- 1) пультовая;
- 2) отдельный бокс подачи ВПВ;
- 3) баллонная станция газообразного кислорода;
- 4) баллонная станция газообразного метана;
- 5) отдельные боксы для хранения горючего и окислителя;
- 6) баллонная станция ВВД;
- 7) баллонная станция газообразного азота;
- 8) шахта шумоглушения;
- 9) огневой бокс.

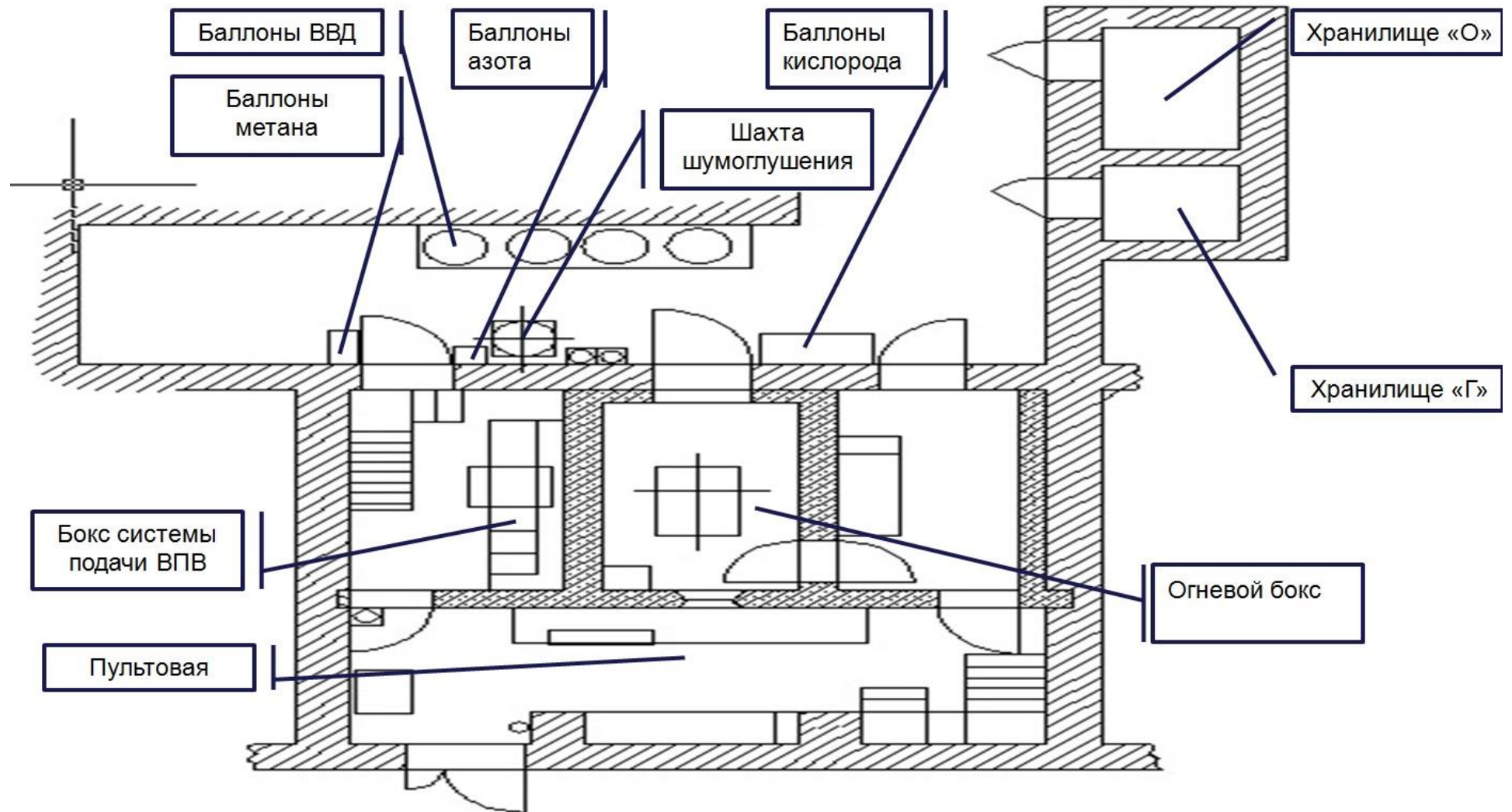


Рисунок 2.2 – Планировка испытательного стенда

Особенности испытательного стенда

Основными особенностями стенда являются:

1. Работа с применением силоизмерительного устройства (СИУИ), измеряющего тягу двигателя с высокой точностью. СИУИ предназначено для закрепления на нем испытуемой камеры двигателя с трубопроводами подачи КТ; уравнивания вектора тяги, создаваемого камерой при огневых стендовых испытаниях (ОСИ); передачи осевой составляющей вектора тяги на динамометры, входящие в схему уравнивания тяги по главной оси СИУИ; прямого измерения текущих значений импульсной силы тяги при импульсных циклических испытаниях камеры. Условием установки СИУИ на стенд является соосность оси двигателя и оси устройства. СИУИ в совокупности с измерительно-вычислительным комплексом обеспечивает прямое определение измеряемой тяги камеры с коррекцией значений измеренных усилий, действующих на СИУИ1500 в ходе ОСИ камеры.

2. Использование автоматизированной измерительно-информационной системы управления стендом, сбора и обработки данных.

Информационно-измерительная система (ИИС)

Стендовая ИИС представляет собой совокупность средств измерений, объединенных общим алгоритмом функционирования и предназначенных для автоматического получения информации от двигателя и стендовых систем, ее преобразования для непосредственного восприятия оператором, использования для управления режимами работы двигателя, а также для передачи, обработки и представления измерительной информации в цифровой или аналоговой форме.

ИИС должна обеспечивать высокую точность и повышенную надежность средств измерений, дистанционность и заданный алгоритм измерений, автоматизацию управления аппаратурой, возможность визуального контроля параметров двигателя и стендовых систем по выбору оператора-испытателя, возможность выборочной обработки информации в темпе испытаний, работу средств измерений и обработку полученной информации в режиме реального времени, защиту двигателя при достижении критических значений параметров,

высокую помехозащищенность средств измерений и каналов сбора и передачи информации. Структурная схема ИИС, внедренной на кафедре «Ракетные двигатели» МАИ совместно с отделом автоматизации экспериментов МАИ, огневого стенда для испытаний РДМТ представлена на рисунке 2.3.



Рисунок 2.3 – Структурная схема ИИС

Условно реализованный комплекс можно разделить на следующие подсистемы:

- 1) измерительная, принимающая показания датчиков температуры поверхности стенки РДМТ, давлений в трубопроводах и КС двигателя, токов и напряжений клапанов, тяги, расходов компонентов;
- 2) сбора данных, позволяющая собирать результаты измерений как аналоговых, так и дискретных величин, поступающих с датчиков;
- 3) управления, осуществляющая испытания в ручном и автоматическом режимах по заданной циклограмме;

4) контроля испытаний в реальном времени, отслеживающая все измеряемые параметры, отображающая их в удобном для экспериментатора виде (таблиц, графиков);

5) формирования отчетов о проведенных испытаниях, печати и архивирования протоколов экспериментов;

б) трансляции испытаний в режиме реального времени.

В аппаратно-программном комплексе применяется следующее программное обеспечение (ПО) (рисунок 2.4):

- ExperimentAllyser отвечает за связь с контроллером ИИС, является общим сервером данных и осуществляет передачу управляющих сигналов с ПО на контроллер;

- OscilAllyser используется для проверки преобразованных аналоговых сигналов и настройки датчиков;

- Wonderware SCADA-Intouch осуществляет контроль и частичное управление испытаниями в удобном графическом интерфейсе;

- ExperimentManager служит для задания программы испытаний и циклограмм и отвечает за общее проведение испытаний.

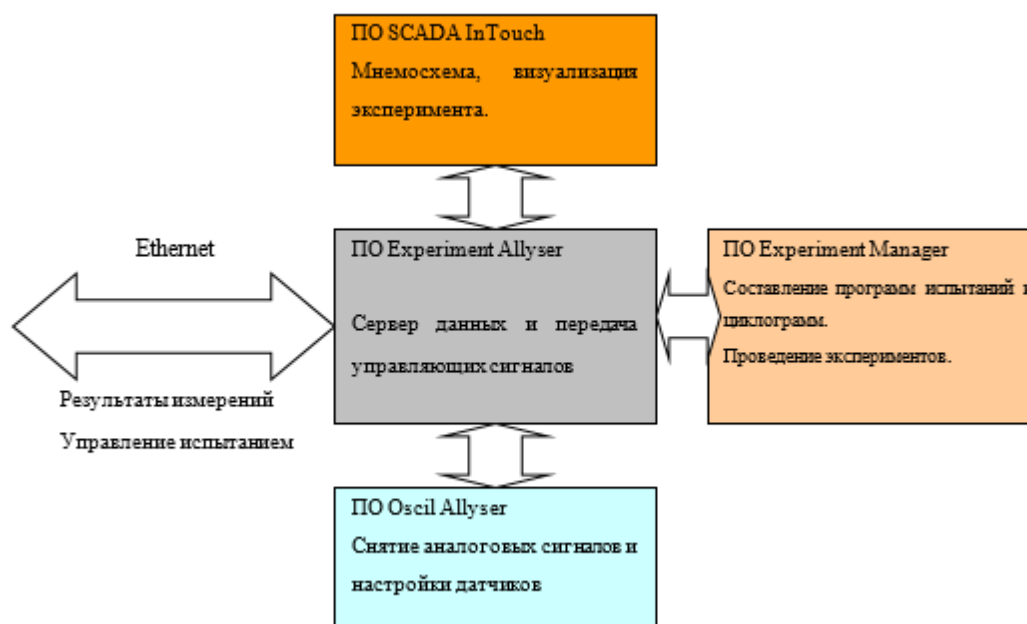


Рисунок 2.4 – Структурная схема программного комплекса

Управление стандом осуществляется в автоматическом режиме через систему фирмы Wonderware SCADA InTouch. SCADA (аббр. от англ. Supervisory Control And Data Acquisition – диспетчерское управление и сбор данных) – система контроля и управления процессом с применением ЭВМ. SCADA InTouch – программное обеспечение для разработки интерфейса человек-машина (HMI). HMI позволяет контролировать и управлять всеми объектами и системами, используя графические объекты, и включает:

- отображение параметров для управления сигналами;
- отображение текущих и предыдущих трендов;
- отображение и регистрацию аварийных сигналов.

Исполнительная система InTouch поддерживает базу данных текущих значений процесса. Эти значения могут отражать заданные точки контроля устройств, представляющие параметры физического объекта, или точки, представляющие расчетные значения. Значения параметров собираются и обрабатываются на одном или нескольких компьютерах, использующих распределенную структуру программного обеспечения. Автоматически выполняются преобразования технических единиц собранных данных и их обратные преобразования для задания управляющих установок. InTouch предоставляет набор инструментов для графического отображения состояния процесса. Графические объекты могут быть анимированы с использованием таких динамических атрибутов, как цвет, положение, движение, мигание, вращение, заполнение, указатели или процедуры для активации программ пользователя. SCADA-система InTouch позволяет организовать взаимодействие с другими приложениями.

Разработанный HMI-интерфейс для огневого станда РДМТ представлен на рисунке 2.5. В интерфейсе представлена пневмогидравлическая схема с основными измеряемыми параметрами:

- давление в баках компонентов;
- статическое и динамическое давления в магистралях;
- массовые расходы компонентов;

- температуры компонентов в магистралях;
- токи клапанов двигателя;
- тяга двигателя;
- температуры конструкции двигателя.

Программный комплекс обеспечивает мониторинг основных измеряемых величин во время и после проведения эксперимента с заданным интервалом опроса (рисунок 2.6). Интерфейс позволяет запускать нужные циклограммы в ходе одного эксперимента. По окончании испытания формируется отчет в сжатой и полной формах с задаваемым шагом по времени (рисунок 2.7).

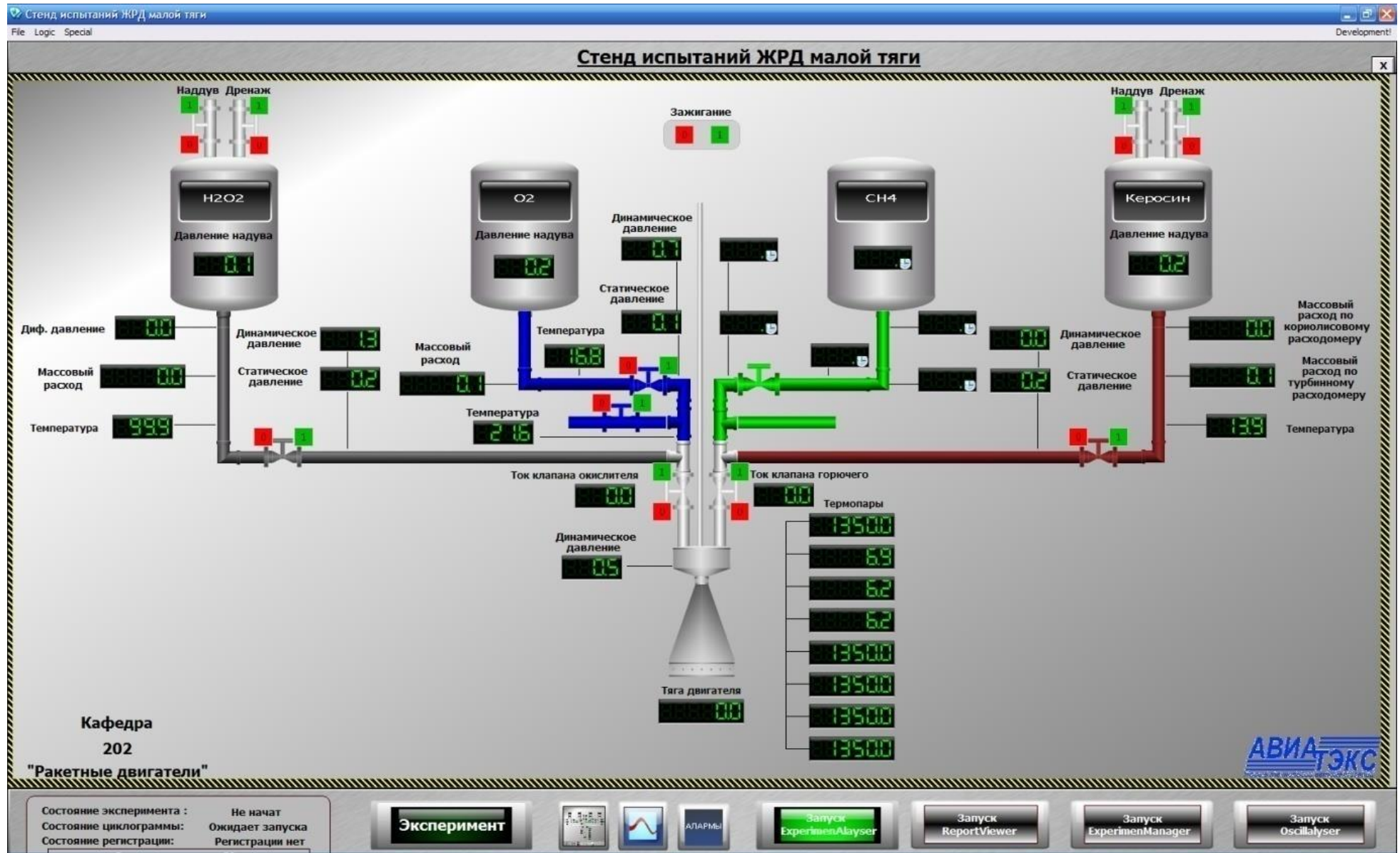


Рисунок 2.5 – Интерфейс программы SCADA-Intouch

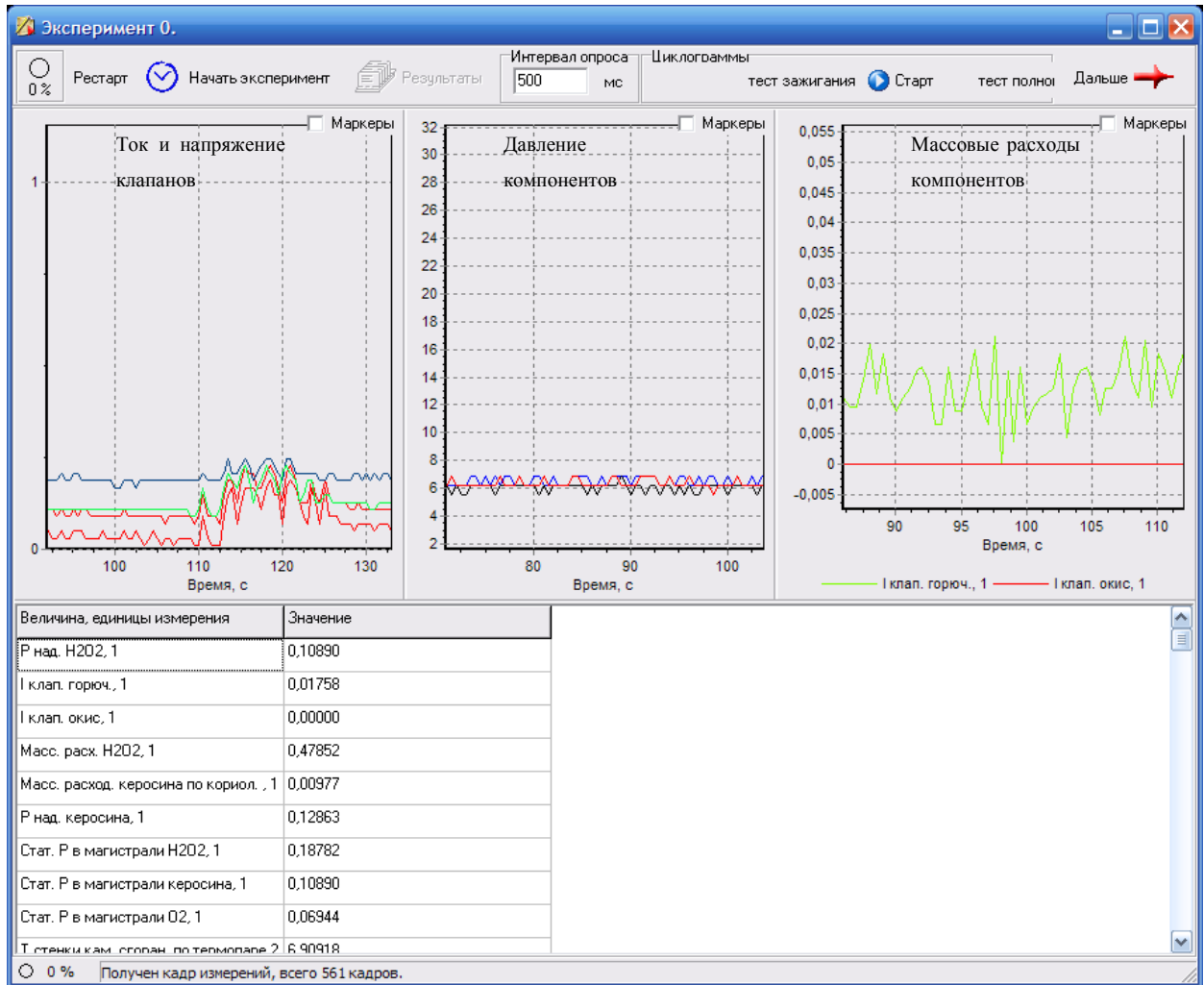


Рисунок 2.6 – Отображение величин в зависимости от времени

Дата создания отчёта: 02.09.2010

Эксперимент 0

Датчик	Р над О	Ток Г	Ток О	Расх Г	Расх О	Р над Г	Давл Г	Давл О	Давл О	T1	T2	T3
Время, с												
0.000	0,13	0,02	0,00	0,34	0,02	0,15	0,19	0,11	0,09	6,91	6,20	6,91
0.031	0,03	0,02	0,00	0,38	0,02	0,09	0,17	0,11	0,00	6,91	6,20	6,91
0.081	0,11	0,02	0,00	0,55	0,02	0,13	0,19	0,13	0,03	7,62	6,20	6,91
0.091	0,03	0,02	0,00	0,24	0,01	0,09	0,19	0,11	0,00	6,91	6,91	6,91
0.122	0,09	0,01	0,00	0,38	0,04	0,13	0,19	0,13	0,03	7,62	6,20	6,20
0.151	0,03	0,01	0,00	0,27	0,01	0,09	0,19	0,09	0,00	7,62	6,20	6,20
0.181	0,07	0,02	0,00	0,41	0,04	0,19	0,23	0,17	0,13	6,91	6,20	6,20
0.211	0,01	0,01	0,00	0,24	0,01	0,09	0,19	0,09	0,00	6,91	6,20	6,91

Рисунок 2.7 – Пример отчета по эксперименту

2.2 Разработка методики проведения и анализа испытаний ракетных двигателей малых тяг

При разработке методики испытаний были выбраны РДМТ, работающие на компонентах газообразный кислород+газообразный метан и ВПВ+керосин, тягой 500 Н и 200 Н соответственно. Первый имеет маркировку ДМТ-МАИ-200М, второй – ДМТ-МАИ-500П.

Цели испытаний

1) Экспериментальное определение работоспособности двигателей малых тяг Московского авиационного института тягой 200Н (ДМТ-МАИ-200М) метановый, и тягой 500 Н (ДМТ-МАИ-500П) перекисный, при огневых испытаниях.

2) Определение основных параметров (удельного импульса тяги и теплового состояния) двигателей ДМТ-МАИ-200М и ДМТ-МАИ-500П на испытательной базе МАИ.

Задачи испытаний

Для достижения целей испытаний должны быть решены следующие задачи:

- 1) обеспечение и проверка готовности объектов к проведению испытаний;
- 2) выполнение автономных и комплексных проверок готовности стенда к проведению испытаний;
- 3) выполнение объема и последовательности испытаний, предусмотренных программой испытаний;
- 4) выполнение комплекса послепусковых операций по завершении отдельных этапов испытаний и программы в целом;
- 5) соблюдение требований безопасности, правил эксплуатации и охраны окружающей среды;
- 6) выпуск отчетных документов по проведенным испытаниям.

Объекты испытаний

На испытательной базе МАИ были испытаны два типа двигателя:

- двигатель ДМТ-МАИ-200М с металлической камерой сгорания и штиффорсуночной смесительной головкой;

- двигатель ДМТ-МАИ-500П с металлической камерой сгорания и однофорсуночной смесительной головкой.

Камеры сгорания двигателей ДМТ-МАИ-200М и ДМТ-МАИ-500П были испытаны с укороченными соплами.

На двигатели устанавливаются штуцеры с внутренним диаметром 2,1 мм для измерения давления в камере сгорания и хромель-алюмелевыми термопарами в количестве 8 шт. Шесть термопар расположены по длине камеры двигателя и две расположены на смесительной головке.

Двигатель ДМТ-МАИ-200М имеет следующие технические характеристики:

тяга двигателя в атмосферных условиях на номинальном режиме работы, Н

100;

компоненты топлива:

окислитель – газообразный кислород;

горючее – газообразный метан;

допускается содержание воды в любом компоненте топлива до 1,5% по массе;

расходы компонентов топлива на номинальном режиме работы двигателей, кг·с⁻¹:

окислителя

0,060;

горючего

0,0035;

давления компонентов топлива на входе в двигатель при номинальном режиме работы, МПа:

окислителя

1,7

горючего

1,4

диапазон изменения расходов компонентов топлива при работе двигателя:

окислителя

0,047...0,074;

горючего

0,0025...0,0045;

диапазон изменения давления компонентов топлива на входе в двигатель, МПа:

окислителя	1,3...2,3;
горючего	1,1...1,8;
внутренний диаметр камеры сгорания, мм	42;
диаметр минимального сечения сопла, мм	12;
диаметр выходного сечения сопла, мм	18;
температура окислителя на входе в двигатель, К	293
температура горючего на входе в двигатель, К	293

Двигатель ДМТ-МАИ-500П имеет следующие технические характеристики:

тяга двигателя в атмосферных условиях на номинальном режиме работы, Н	273,8;
компоненты топлива:	
окислитель – от 92 до 96% раствор пероксида водорода;	
горючее – керосин;	
расходы компонентов топлива на номинальном режиме работы двигателей, кг·с ⁻¹ :	
окислителя	0,170;
горючего	0,025;
давления компонентов топлива на входе в двигатель при номинальном режиме работы, МПа:	
окислителя	1,7
горючего	1,4
диапазон изменения расходов компонентов топлива при работе двигателя, кг·с ⁻¹	
окислителя	0,162...0,179;
горючего	0,021...0,029;
диапазон изменения давления компонентов топлива на входе в двигатель, МПа:	
окислителя	1,3...2,3;

горючего	1,1...1,8;
внутренний диаметр камеры сгорания, мм	68;
диаметр минимального сечения сопла, мм	18;
диаметр выходного сечения сопла, мм	25;
температуры окислителя и горючего на входе в двигатель, К	293

При испытаниях двигателей ДМТ-МАИ-200М и ДМТ-МАИ-500П следует принять во внимание возможность достижения температуры внешней поверхности металлических камер двигателя до 1273 К. Это значение температуры надо рассматривать как нештатную ситуацию. Для выключения двигателя сигналы термопар, установленных на корпусе двигателя вблизи плоскости минимального сечения сопла, регистрируются системой управления и используются в качестве «отбойных» параметров.

Объем и последовательность выполнения испытаний

Испытания проводятся в атмосферных условиях на экспериментальной установке с вертикальным расположением оси двигателя. Двигатель устанавливается на опорную раму соплом вниз.

Испытания каждого двигателя проводятся в три этапа:

- первый этап – настроечные испытания;
- второй этап – испытания по разработанной матрице планирования;
- третий этап – испытания по определению теплового состояния конструкции.

На этапе настроечных испытаний определяются гидравлические характеристики топливоподающих трактов и проверяется работоспособность двигателей при различных значениях начальных давлений горючего и окислителя на входе в двигатель. Настроечные испытания включают в себя холодные проливки на компонентах топлива и огневые работы с целью определения параметров настройки стенда на заданные режимы работы объектов испытаний.

Огневые работы при настроечных испытаниях выполняются при подаче компонентов топлива объектов испытаний, соответствующих номинальным значениям. Время работы двигателя – 3 с, количество запусков – 3, пауза между

запусками – не менее 300 с для восстановления теплового состояния двигателя в начальное состояние.

На этапе испытаний по определению теплового состояния конструкции двигателя исследуются поля температур камеры двигателя во время его работы, стабильность расходных и энергетических характеристик при увеличении времени работы двигателей. На этом этапе испытаний постоянными являются массовые расходы компонентов топлива \dot{m}_o и \dot{m}_2 . Время паузы между очередными включениями объекта испытаний должно быть не менее 300 с, время работы двигателя – 50 с.

Проверка готовности материальной части к проведению испытаний

Агрегаты и системы стенда проходят автономные и комплексные проверки согласно порядку, установленному в технологической документации. Проверка готовности стенда к испытаниям оформляется актом готовности стенда к проведению испытаний.

При поступлении двигателей на испытания проводятся их контрольные проверки (входной контроль).

Результаты входного контроля оформляются актом, который утверждается руководителем испытаний. Акт прикладывается к протоколу испытаний.

Метрологическое обеспечение испытаний

Система измерения и регистрации параметров должна обеспечивать:

- измерение и регистрацию параметров при испытаниях двигателя ДМТ-МАИ-200М и ДМТ-МАИ-500П согласно таблице 2.2;
 - визуальный контроль параметров при настройке стенда;
 - измерение температур, давлений и расходов согласно отраслевым методикам измерений, изложенными в ОСТ92-4233-80, ОСТ92-4424-79, ОСТ92-1225-79, ОСТ92-1624-75;
 - регистрацию результатов измерений на аппаратные средства стенда МАИ.
- Все измеряемые параметры относятся к категории 2 по ОСТ92-4251-89.

Таблица. 2.2 – Система измерения и регистрации параметров

№№ п/п	Наименование параметра, условное обозначение, единица измерения	Номинальное значение	Диапазон измерения	Погрешность измерения	Частота регистраций, Гц	Тип датчика (рекомендуемый)	Примечания
1	Тяга P_3 , Н	137	0...600	±0,5%	5000	СИУ1500	
2	Давление в камере сгорания, p_K , МПа	1	0...1,5	±0,5%	1000	ММД	
3	Давление окислителя перед расходной шайбой, $P_{шО1}$, МПа	3,5	0...5	±0,25%	10	ПДВИ50	Стационарный режим
4	Давление окислителя за расходной шайбой, $p_{шО2}$, МПа	1,8	0...5	±0,25%	10	ПДВИ50	Стационарный режим
5	Давление наддува расходного бака горючего, $p_{бГ}$, МПа	1,4	0...2	±1,5%	10	МД40Т	Стационарный режим
6	Давление окислителя на входе в двигатель, $p_{вх.О.1}$, МПа	1,4	0...5	±0,25%	10	ПДВИ50	Стационарный режим
7	Давление горючего на входе в двигатель, $p_{вх.Г.1}$, МПа	1,2	0...2	±0,25%	10	ПДВИ50	Стационарный режим
8	Давление в ресивере нагрудателя СИУ, $p_и$, МПа	1,0	1...2	±0,25%	10	ПВДИ50	
9	Давление окружающей среды, $p_{ос}$, Торр	743	700...800	±1%	—	Барометр	
10	Расход горючего, $\dot{m}_{Г.1}$, Г·с ⁻¹	26	0...40	±0,5%	500	Кориолисовый	Расходомеры $\dot{m}_{Г.1}$ и $\dot{m}_{Г.2}$ дублируют друг друга
11	Расход горючего, $\dot{m}_{Г.2}$, Г·с ⁻¹	26	0...40	±0,5%	500	Кориолисовый	
12	Температура окислителя перед шайбой, $T_{ш.О}$, К	293	270...310	±1%	10	ТМ119	
13	Температура окислителя на входе в двигатель, $T_{вх.О}$, К	273	270...310	±1%	10	ТМ119	
14	Температура горючего на входе в двигатель, $T_{вх.Г}$, К	293	270...310	±1%	10	ТМ119	
15	Температура конструкции, $T_{к.1}$, К	1000	270...1373	±10 К	10	ХА	
16	Температура конструкции, $T_{к.2}$, К	1000	270...1373	±10 К	10	ХА	
17	Температура конструкции, $T_{к.3}$, К	1000	270...1373	±10 К	10	ХА	
18	Температура конструкции, $T_{к.4}$, К	1000	270...1373	±10 К	10	ХА	
19	Температура конструкции, $T_{к.5}$, К	1000	270...1373	±10 К	10	ХА	
20	Температура конструкции, $T_{к.6}$, К	1000	270...1373	±10 К	10	ХА	
21	Температура конструкции, $T_{к.7}$, К	1000	270...1373	±10 К	10	ХА	
22	Температура конструкции, $T_{к.8}$, К	1000	270...1373	±10 К	10	ХА	
23	Напряжение питания клапана О, $U_{кл.О}$, В	27	0...30	±1%	100		
24	Напряжение питания клапана Г, $U_{кл.Г}$, В	27	0...30	±1%	100		
25	Напряжение питания системы зажигания, U_3 , В	27	0...30	±1%	100		
26	Ток клапана О, $I_{кл.О}$, А	0,4	0...0,5	±0,03 А	1000		
27	Ток клапана Г, $I_{кл.Г}$, А	0,4	0...0,5	±0,03 А	1000		
28	Ток в системе зажигания, I_3 , А	2,5	0...3	±0,05 А	1000		

Общие методические указания

В основу плана проведения экспериментальных исследований положены ПФЭ и центральный композиционный план.

Объект испытаний устанавливается на стенд. Выполняется монтаж коммуникаций и осуществляются проверки в соответствии с требованиями технологической документации на испытания.

В процессе подготовки и проведения испытаний для оценки готовности стендовых систем допускаются технологические огневые работы. Длительность технологической работы - не более 3 с.

В протокол испытаний должно входить фактическое время проведения огневых испытаний объекта, включая время технологических работ на каждом этапе.

Температуры ($T_{к,1} \div T_{к,8}$) элементов внешней поверхности камеры объекта испытаний должны регистрироваться в течение 60 с после выключения двигателя с частотой опроса датчиков не менее 10 Гц.

Методика испытаний двигателя ДМТ-МАИ-500П

Испытания для построения линейной регрессионной модели температуры стенки проводятся по плану, приведенному в таблице 2.3 [44] (n – номер опыта с учетом рандомизации, i – номер строки матрицы планирования (опыта), N – номер неповторного опыта, \dot{m}_o – массовый расход окислителя, \dot{m}_z – массовый расход горючего).

Таблица 2.3

N	n	\dot{m}_o		\dot{m}_z	
		код	г/с	код	г/с
1	3	+	179	+	29
	4				
2	6	-	162	+	29
	2				
3	5	-	162	-	21
	1				
4	7	+	179	-	21
	8				

Испытания для построения регрессионной модели 2-го порядка перепада давления на форсунке проводятся по разработанной матрице планирования (таблица 2.4) [43] (\dot{m}_2 – массовый расход горючего, С – концентрация добавки ПИБ).

Таблица 2.4

N	n	\dot{m}_2		С	
		код	г/с	код	%
1	1	+	30	+	0,1
	6				
2	8	-	16	+	0,1
	15				
3	3	-	16	-	0
	9				
4	4	+	30	-	0
	13				
5	2	+	30	0	0,05
	12				
6	10	0	23	+	0,1
	16				
7	5	-	16	0	0,05
	7				
8	11	0	23	-	0
	17				
9	14	0	23	0	0,05
	18				

Методика испытаний двигателя ДМТ-МАИ-200М

Испытания для построения регрессионной модели 2-го порядка удельного импульса тяги проводятся по разработанной матрице планирования (таблица 2.5).

Таблица 2.5

N	n	\dot{m}_o		\dot{m}_2	
		код	г/с	код	г/с
1	1	+	73	+	4,5
	6				
2	8	-	47	+	4,5
	15				
3	3	-	47	-	2,5
	9				
4	4	+	73	-	2,5
	13				

Продолжение таблицы 2.5.

5	2	+	73	0	3,5
	12				
6	10	0	60	+	4,5
	16				
7	5	-	47	0	3,5
	7				
8	11	0	60	-	2,5
	17				
9	14	0	60	0	3,5
	18				

Испытания для построения линейной регрессионной модели температуры стенки проводятся по плану (таблица 2.6).

Таблица 2.6

N	n	\dot{m}_o		\dot{m}_2	
		код	г/с	код	г/с
1	3	+	73	4,5	+
	4				
2	6	-	47	4,5	+
	2				
3	5	-	47	2,5	-
	1				
4	7	+	73	2,5	-
	8				

2.3 Методика обработки результатов испытаний

Оценка параметров регрессионной модели производится по результатам испытаний, проведенных в соответствии с построенной матрицей планирования факторного эксперимента, в следующей последовательности:

- 1) оценка воспроизводимости (ошибки опыта) и стационарности;
- 2) расчет коэффициентов регрессионной модели и проверка их на значимость;
- 3) проверка регрессионной модели на адекватность;
- 4) оценка соответствия выходного параметра требованиям ТЗ.

Проверка воспроизводимости и стационарности опытов

Оценка воспроизводимости и стационарности может быть произведена только в том случае, когда имеются повторные (параллельные) опыты хотя бы в двух строках матрицы планирования.

Воспроизводимость – независимость выходного параметра от времени изготовления изделия и календарного времени проведения испытаний.

Стационарность – неизменность закона распределения выходного параметра.

Оценка воспроизводимости производится из условия однородности дисперсий выходного параметра, определенного в разных строках матрицы планирования:

$$D(y_i) = \frac{1}{m_i - 1} \sum_{j=1}^{m_i} [(y_i)_{cp} - (y_i)_j]^2, \quad (2.1)$$

где m_i – число параллельных опытов в i -ой строке матрицы планирования;

$(y_i)_{cp} = \frac{1}{m_i} \sum_{j=1}^{m_i} y_{i,j}$ – средняя величина выходного параметра для совокупности проведенных опытов при данном сочетании факторов; $y_{i,j}$ – результат j -го опыта в i -ой строке матрицы.

Проверка однородности дисперсий производится с помощью F-критерия. В соответствии с F-критерием дисперсии двух результатов считаются отличающимися статистически незначимо, если выполнено условие:

$$F_{эксн} = \frac{D(y)_{\max}}{D(y)_{\min}} < F_{табл}(\alpha, f_{\max}, f_{\min}), \quad (2.2)$$

где $F_{табл}$ – табличное значение F-критерия, т.е. предельное отношение дисперсий; α – уровень значимости, т.е. вероятность ошибочного вывода, которая в технических задачах принимается равной 0,05; $f_i = m_i - 1$ – степень свободы; $D(y)_{\max}$ и $D(y)_{\min}$ – максимальное и минимальное значения дисперсий, определенных по соотношению (2.1).

Оценка стационарности также производится с использованием F-критерия:

$$F_{эксн} = \frac{D(y_{cp})}{D_{воспр}} < F_{табл}(\alpha, f_{y_{cp}}, f_{воспр}), \quad (2.3)$$

где $y_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i)_{cp}$ – среднее значение выходного параметра во всех проведенных опытах; $D(y_{cp}) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [y_{cp} - (y_i)_{cp}]^2$;

$$D_{\text{воспр}} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i D(y_i)}{\sum_{i=1}^n f_i} - \text{дисперсия воспроизводимости.}$$

Расчет коэффициентов регрессии и проверка их на значимость

Расчет коэффициентов регрессии производится по методу наименьших квадратов:

$$\{B\} = (\{X\}^T \{X\})^{-1} \{X\}^T \{Y\}.$$

Для линейных моделей с числом входных факторов k и количеством опытов n :

$$\{B\} = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_k \end{bmatrix}; \{X\} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \cdots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & \cdots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \cdots & x_{nk} \end{bmatrix}; \{Y\} = \begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}.$$

Матрица $\{X\}^T$ – транспонированная матрица по отношению к матрице $\{X\}$.

Проверка коэффициентов регрессионной модели на значимость проводится по критерию Стьюдента t при заданном уровне значимости α .

Находятся дисперсии коэффициентов регрессии: для ротатабельных планов дисперсии всех коэффициентов равны $D(b_i) = \frac{D_{\text{воспр}}}{n}$.

Проверка по t -критерию заключается в сравнении абсолютного значения b_i с его стандартом (среднеквадратическим отклонением) $S(b_i) = \sqrt{D(b_i)}$;

$$t_{\text{эсп}} = \frac{|b_i|}{S(b_i)} > t_{\text{табл}}(\alpha, f_{\text{воспр}}).$$

Произведение $t_{\text{табл}} S(b_i)$ представляет собой доверительный интервал Δb оценки коэффициентов регрессии. Значимые коэффициенты должны быть больше Δb .

Для ортогональных планов незначимые коэффициенты исключаются из регрессионной модели, что не влияет на численные значения оставшихся коэффициентов.

Если коэффициенты взаимно коррелированы, то после исключения незначимых, остальные коэффициенты регрессии пересчитываются.

Проверка адекватности регрессионной модели

Под проверкой адекватности понимают проверку соответствия модели экспериментальным данным. Считается, что регрессионная модель адекватна исследуемому процессу, если квадраты отклонений экспериментальных точек от рассчитанных по уравнению регрессии лежат в пределах ошибки воспроизводимости.

Проверка адекватности возможна, если количество опытов, хотя бы, на единицу больше числа опытов, по которым строилась регрессионная модель, т.е. число степеней свободы $f_{ад} = n + n_k - N_b$,

где n – число опытов в матрице планирования, n_k – число контрольных опытов, N_b – число значимых коэффициентов регрессии.

Оценка квадрата отклонения экспериментальных точек от модели называется дисперсией адекватности:

$$D_{ад} = \frac{1}{f_{ад}} \sum_{i=1}^{f_{ад}} [(y_i)_{эксн} - (y_i)_{теор}]^2,$$

где $(y_i)_{эксн}$ и $(y_i)_{теор}$ – экспериментальное и расчетное значения выходного параметра.

Дисперсию адекватности сравнивают с дисперсией воспроизводимости с использованием F-критерия:

$$F_{эксн} = \frac{D_{ад}}{D_{воспр}} < F_{табл}(\alpha, f_{ад}, f_{воспр}). \quad (2.4)$$

При неадекватности модели возможны следующие варианты решения:

- 1) уменьшение интервалов варьирования факторов;
- 2) перенос центра планирования эксперимента;
- 3) использование моделей более высокого порядка.

В ряде случаев при большом количестве факторов вместо повышения порядка полинома целесообразнее использовать неадекватную модель второго порядка. В

этом случае ошибки целевого параметра определяются не дисперсией воспроизводимости, а неадекватностью уравнения (остаточной дисперсией), и, если величина ошибки допустима при решении данной задачи, целесообразнее не повышать порядок полинома.

2.4 Результаты разработки программного обеспечения для планирования экспериментов и статистической обработки результатов испытаний

Для планирования и обработки эксперимента создано программное обеспечение (ПО) [45].

На сегодняшний момент существуют аналоги для планирования и обработки экспериментов (STATISTICA, Matlab и др.). Но данные программы перенасыщены информацией: слишком много видов планов, которые не предназначены для испытаний РДМТ, много лишней информации по обработке эксперимента, а также имеют очень высокую стоимость. Разработанное программное обеспечение адаптировано для испытаний РДМТ.

Программа предназначена для построения планов полного факторного эксперимента, дробного факторного эксперимента, плана Хартли, плана Бокса-Вилсона для испытаний ракетных двигателей малых тяг и построения регрессионных моделей: линейной, квазинелинейной, 2-го порядка.

Входными данными являются: количество входных факторов, число повторных опытов, вид уравнения регрессии, число опытов в центре плана, матрица значений выходного параметра, число контрольных опытов, доверительная вероятность, кодовые значения входных факторов в контрольных опытах, расчетное значение выходного параметра в контрольных опытах.

Программное обеспечение позволяет проводить статистическую обработку результатов испытаний, т.е. строить матрицу планирования в кодовом виде, и реальных физических величинах, проводить рандомизацию с учетом числа повторных опытов, определять число коэффициентов регрессии, проводить проверку на воспроизводимость и стационарность опытов, определять вектор

коэффициентов регрессии, доверительный интервал для коэффициентов регрессии, адекватность регрессионной модели.

Программа написана в математической среде Mathcad 15.0 (M020 [МС15 M020 20121127]).

Программа разделена на два основных связанных модуля и два вспомогательных.

Алгоритм первого модуля (планирование эксперимента), в общем виде, выглядит следующим образом:

- выбор выходного параметра;
- выбор количества входных факторов;
- назначение интервалов варьирования;
- выбор вида уравнения регрессии (линейное, квазинелинейное, 2-го порядка);
- выбор типа плана (ПФЭ,ДФЭ, план Хартли, план Бокса-Вилсона);
- расчет количества коэффициентов регрессии и количества опытов;
- рандомизация опытов;
- построение матрицы планирования в кодовом и размерном виде.

Второй модуль программы (статистическая обработка результатов испытаний):

- ввод численного значения выходного параметра;
- проверка на воспроизводимость и стационарность (по F-критерию);
- расчет коэффициентов регрессии (методом наименьших квадратов, либо построение ANOVA-матрицы);
- проверка коэффициентов регрессии на значимость (по t-критерию);
- проверка регрессионной модели на адекватность (по F-критерию).

Помимо двух основных модулей, для подтверждения параметров двигателя требованиям ТЗ и построения графических зависимостей было разработано два дополнительных модуля: «Модуль проверки соответствия параметров требованиям» и «Модуль построения графических зависимостей».

Алгоритм дополнительного модуля проверки соответствия параметров требованиям выглядит следующим образом:

- определение верхней и нижних толерантных границ;
- сравнение доверительной зоны требований и параметров двигателя.

Алгоритм модуля построения графических зависимостей:

- построение графиков поверхности выходного параметра полученной регрессионной модели;
- построение плоских графиков при фиксировании некоторых факторов.

На рисунке 2.8 синим пунктиром выделены основные модули, желтым пунктиром – вспомогательные, синими стрелками обозначен переход от одного модуля к другому, зеленые и черные стрелки означают прямую связь, красные – обратную.

Программа имеет открытый код и может меняться в зависимости от требований, например, адаптация под другие виды двигателей или добавление других видов планов эксперимента.

Работоспособность программы проверена при испытаниях РДМТ.

Общий алгоритм ПО представлен на рисунке 2.8.

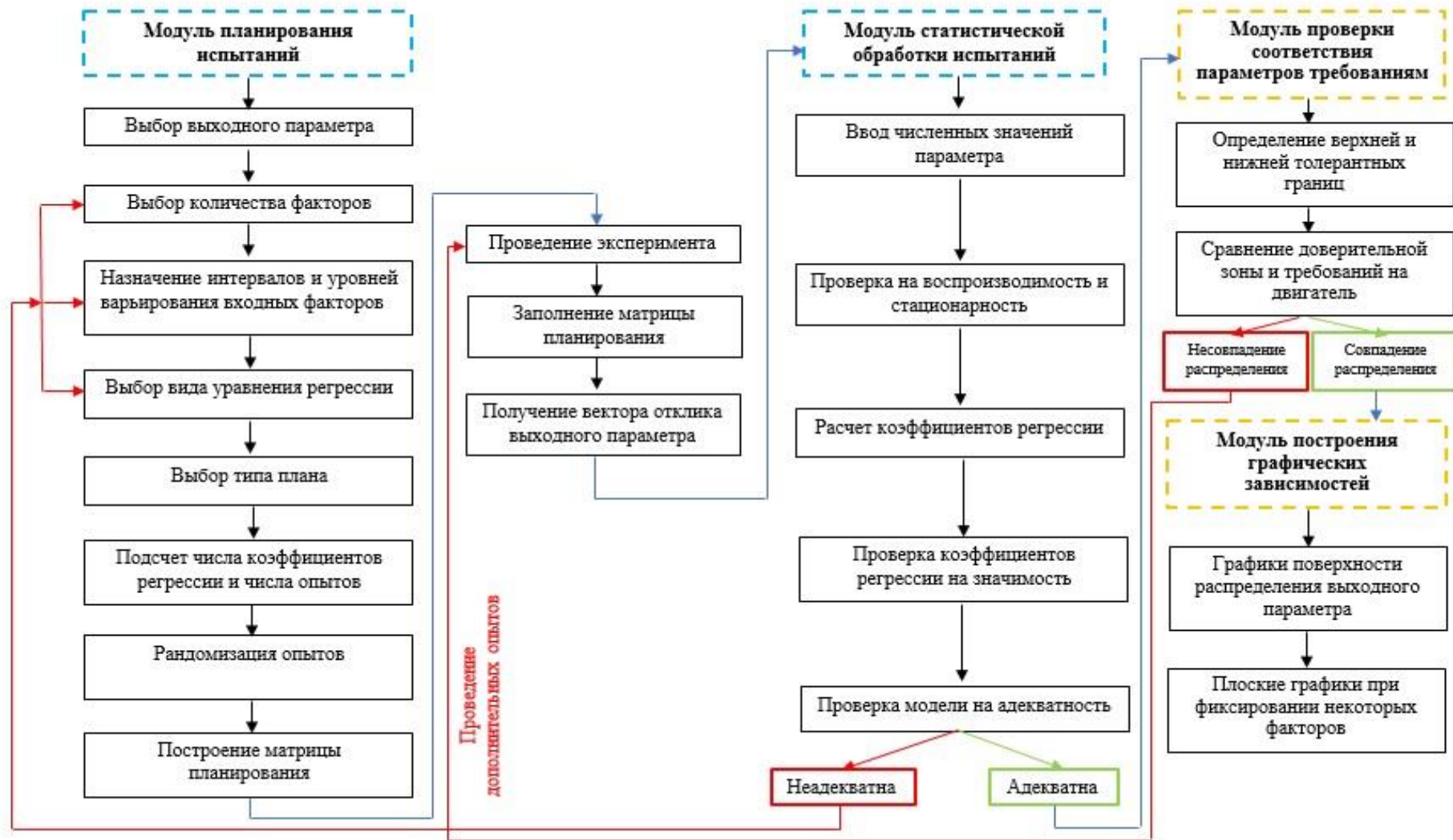


Рисунок 2.8 – Алгоритм программного обеспечения

3. Результаты исследований разработанной методики анализа испытаний

3.1 Результаты испытаний двигателей на компонентах «водорода пероксид высококонцентрированный+керосин» и «газообразный кислород+метан»

Результаты испытаний двигателей ДМТ-МАИ-500П и ДМТ-МАИ-200М представлены в виде заполненных матриц (таблицы 3.1-3.4).

Матрицы планирования и регрессионные модели получены с помощью специально разработанного программного обеспечения для планирования и обработки результатов испытаний РДМТ [45]. В [Приложении А] приведены результаты работы программного обеспечения для основных параметров двигателей (удельного импульса тяги и температуры стенки).

Таблица 3.1

N	n	\dot{m}_o		\dot{m}_2		$T_{cm_i},$ К	$(T_{cm_i})_{cp},$ К
		код	г/с	код	г/с		
1	3	+	179	+	29	371	367
	4					363	
2	6	-	162	+	29	386	382
	2					378	
3	5	-	162	-	21	408	404
	1					400	
4	7	+	179	-	21	470	465
	8					460	

В таблице 3.2 приведена матрица планирования для перепада давления на форсунке горючего двигателя ДМТ-МАИ-500П.

Таблица 3.2

N	n	\dot{m}_2		C		$\Delta p_i,$ x10 ⁵ Па	$(\Delta p_i)_{cp},$ x10 ⁵ Па
		код	г/с	код	%		
1	1	+	30	+	0,1	10,65	10,6
	6					10,54	
2	8	-	16	+	0,1	2,30	2,28
	15					2,26	
3	3	-	16	-	0	3,79	3,77
	9					3,75	

Продолжение таблицы 3.2

4	4	+	30	-	0	12,38	12,30
	13					12,2	
5	2	+	30	0	0,05	11,50	11,45
	12					11,39	
6	10	0	23	+	0,1	6,50	6,46
	16					6,41	
7	5	-	16	0	0,05	3,07	3,05
	7					3,03	
8	11	0	23	-	0	7,07	7,03
	17					6,98	
9	14	0	23	0	0,05	6,63	6,6
	18					6,56	

Здесь \dot{m}_2 – массовый расход горючего, C – концентрация добавки ПИБ, Δp_i – перепад давления на форсунке горючего в i -ом опыте.

В таблице 3.3 приведена матрица планирования для построения регрессионной модели удельного импульса тяги двигателя ДМТ-МАИ-200М.

Таблица 3.3

N	n	\dot{m}_o		\dot{m}_2		$I_{y_i},$ с	$(I_{y_i})_{cp},$ с
		код	г/с	код	г/с		
1	1	+	73	+	4,5	131	129
	6					127	
2	8	+	73	-	2,5	108	106,5
	15					105	
3	3	-	47	+	4,5	137	136
	9					135	
4	4	-	47	-	2,5	121	119,5
	13					118	
5	2	0	60	+	4,5	136	134,5
	12					133	
6	10	+	73	0	3,5	118	117
	16					116	
7	5	-	47	0	3,5	133	132
	7					131	
8	11	0	60	-	2,5	118	116
	17					114	
9	14	0	60	0	3,5	120	118,5
	18					117	

Для температуры стенки двигателя ДМТ-МАИ-200М заполнена матрица планирования в таблице 3.4.

Таблица 3.4

N	n	\dot{m}_o		\dot{m}_z		T_{cm_i} , К	$(T_{cm_i})_{cp}$, К
		код	г/с	код	г/с		
1	3	+	73	+	4,5	778	775
	4					773	
2	6	-	47	+	4,5	797	795
	2					793	
3	5	-	47	-	2,5	639	736
	1					633	
4	7	+	73	-	2,5	554	552
	8					550	

3.2 Формирование и анализ полученных регрессионных моделей по результатам испытаний

ДМТ-МАИ-500П

После статистической обработки (таблица 3.1), последовательность которой приведена в разделе 1.2, получаем регрессионную модель вида:

$$T_{cm} = 404,5 + 11,5\overline{\dot{m}_o} - 30\overline{\dot{m}_z} - 19\overline{\dot{m}_o\dot{m}_z}, \quad (3.1)$$

где $\overline{\dot{m}_o}$ и $\overline{\dot{m}_z}$ – массовые расходы окислителя и горючего в кодовом (безразмерном) виде, T_{cm} – температура стенки двигателя (см. раздел 1.2).

Относительная ошибка модели определяется по формуле $\delta = \frac{\sigma_{\max}}{T_{cm_{cp}}}$, где δ – относительная ошибка модели, σ_{\max} – максимальное среднеквадратичное отклонение, которое равно $\sigma_{\max} = \sqrt{D_{\max}}$, где D_{\max} – максимальная дисперсия воспроизводимости опытов, $T_{cm_{cp}}$ – среднее значение температуры стенки. В

соответствии с [Приложением А] $\delta = \frac{\sigma_{\max}}{T_{cm_{cp}}} = \frac{\sqrt{50}}{404,5} = 0,017 = 1,7\%$.

На рисунках 3.1, 3.2 графически представлены результаты испытаний двигателя ДМТ-МАИ-500П.

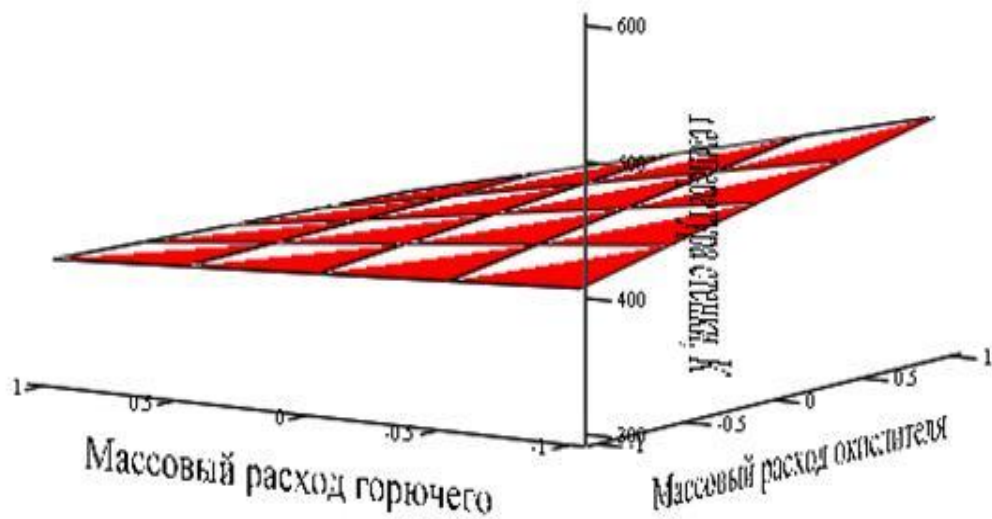


Рисунок 3.1 – График поверхности отклика температуры стенки двигателя ДМТ-МАИ-500П

В качестве существенного фактора выбран расход окислителя, т.к. модель более чувствительна к нему (рисунок 3.1).

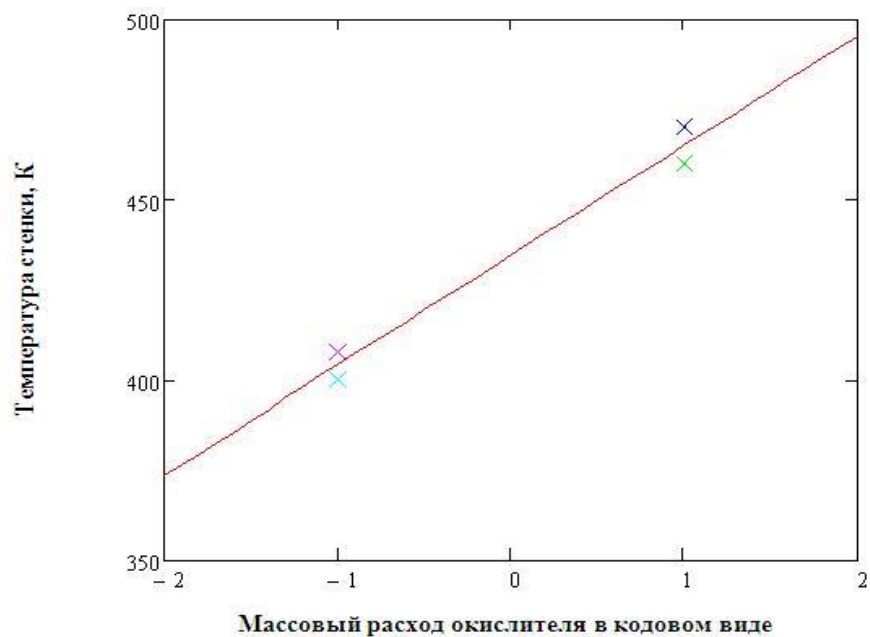


Рисунок 3.2 – Температура стенки двигателя ДМТ-МАИ-500П в зависимости от расхода окислителя при постоянном расходе горючего – 21 г/с: – – расчетная модель, x – экспериментальные точки

После статистической обработки (таблица 3.2) получаем регрессионную модель вида:

$$\Delta p = 6,666 + 4,205\overline{\dot{m}_c} + 0,547\overline{\dot{m}_c}^2 - 0,626\overline{C} - 0,051\overline{\dot{m}_c}\overline{C}, \quad (3.2)$$

где $\overline{\dot{m}_c}$ – массовый расход горючего, \overline{C} – концентрация добавки ПИБ в кодовом виде.

Относительная ошибка модели определяется по формуле $\delta = \frac{\sigma_{\max}}{\Delta p_{cp}}$, где Δp – среднее значение перепада давления на форсунке. В соответствии с [Приложением

$$A] \delta = \frac{\sigma_{\max}}{\Delta p_{cp}} = \frac{\sqrt{0,016}}{7,056} = 0,018 = 1,8\%.$$

На рисунках 3.3, 3.4 графически представлены результаты испытаний двигателя ДМТ-МАИ-500П.

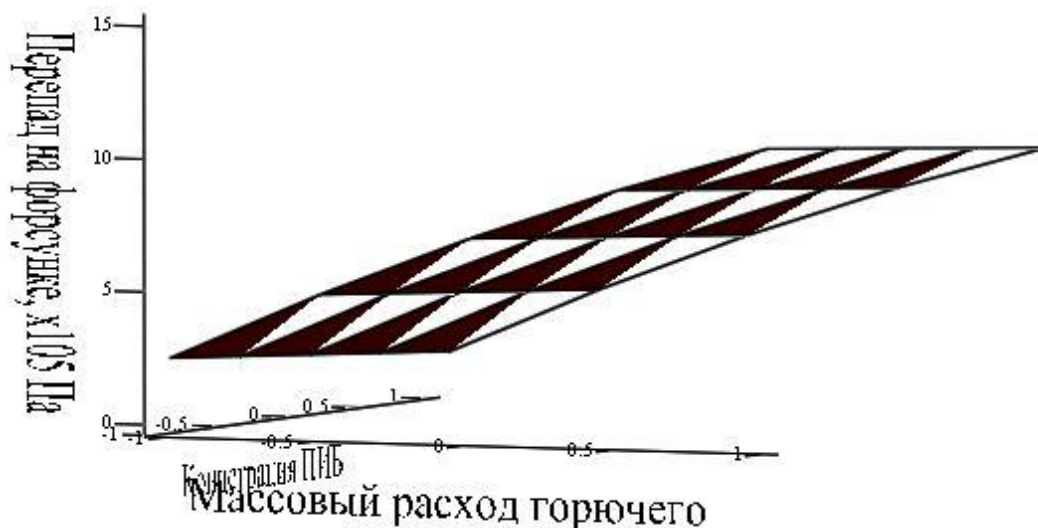


Рисунок 3.3 – График поверхности отклика перепада давления на форсунке двигателя ДМТ-МАИ-500П

В качестве существенного фактора выбрана концентрация добавки ПИБ, т.к. больший интерес вызывает исследование зависимости перепада давления на форсунке от концентрации добавки.

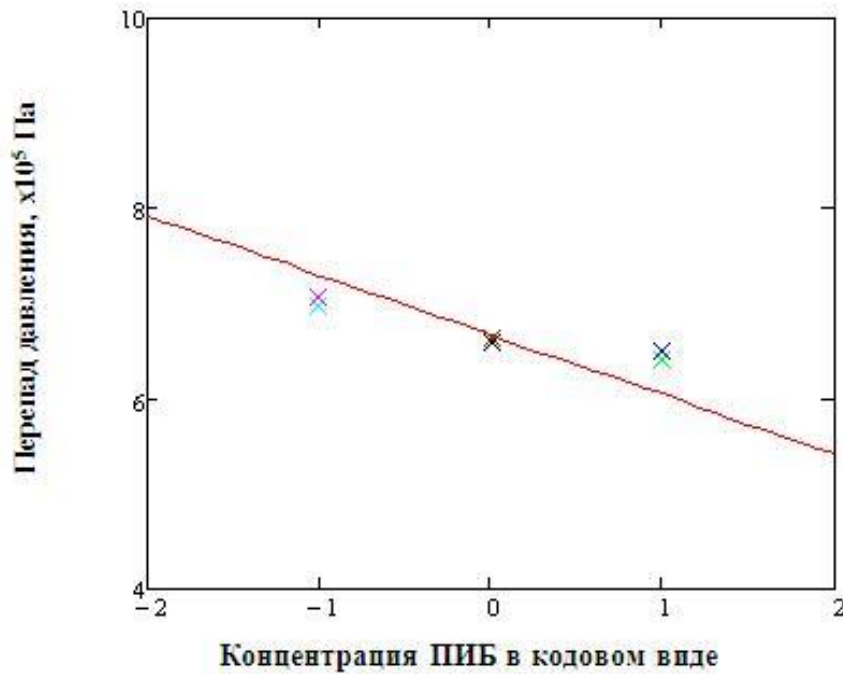


Рисунок 3.4 – Перепад давления на форсунке двигателя ДМТ-МАИ-500П в зависимости от концентрации ПИБ при постоянном расходе горючего 23г/с:

– – расчетная модель, x – экспериментальные точки

ДМТ-МАИ-200М

После статистической обработки (таблица 3.3) получаем регрессионную модель вида:

$$I_y = 122,278 - 5,83\overline{\dot{m}_o} + 9,583\overline{\dot{m}_z} + 1,5\overline{\dot{m}_o\dot{m}_z}. \quad (3.3)$$

Относительная ошибка модели определяется по формуле $\delta = \frac{\sigma_{\max}}{I_{y_{cp}}}$, где $I_{y_{cp}}$ – среднее значение удельного импульса тяги. В соответствии с [Приложением А]

$$\delta = \frac{\sigma_{\max}}{I_{y_{cp}}} = \frac{\sqrt{8}}{123,222} = 0,023 = 2,3\% .$$

На рисунках 3.5, 3.6 графически представлены результаты испытаний двигателя ДМТ-МАИ-200М для удельного импульса тяги.

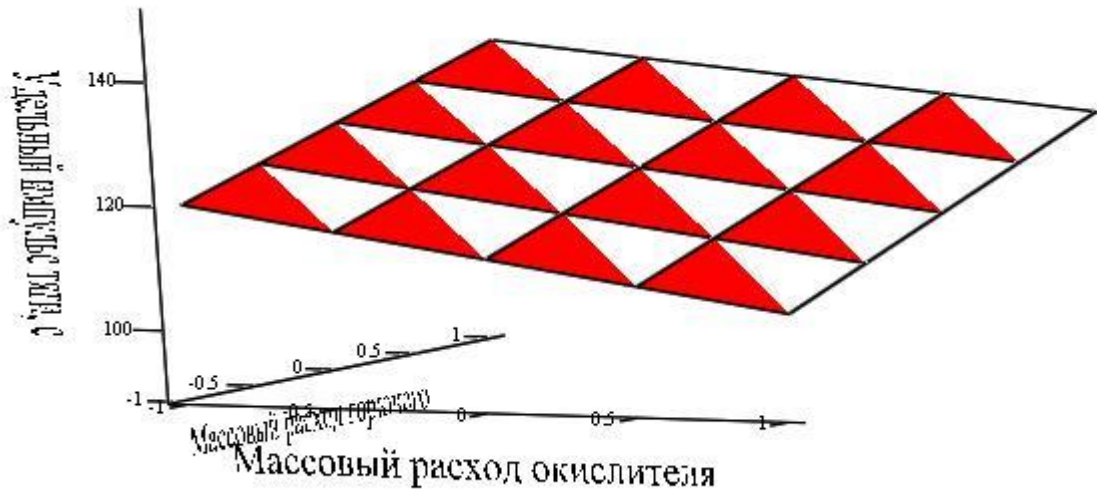


Рисунок 3.5 – График поверхности отклика удельного импульса тяги двигателя ДМТ-МАИ-200М

В качестве значимого фактора выбран расход горючего, т.к. модель более чувствительна к нему (рисунок 3.6).

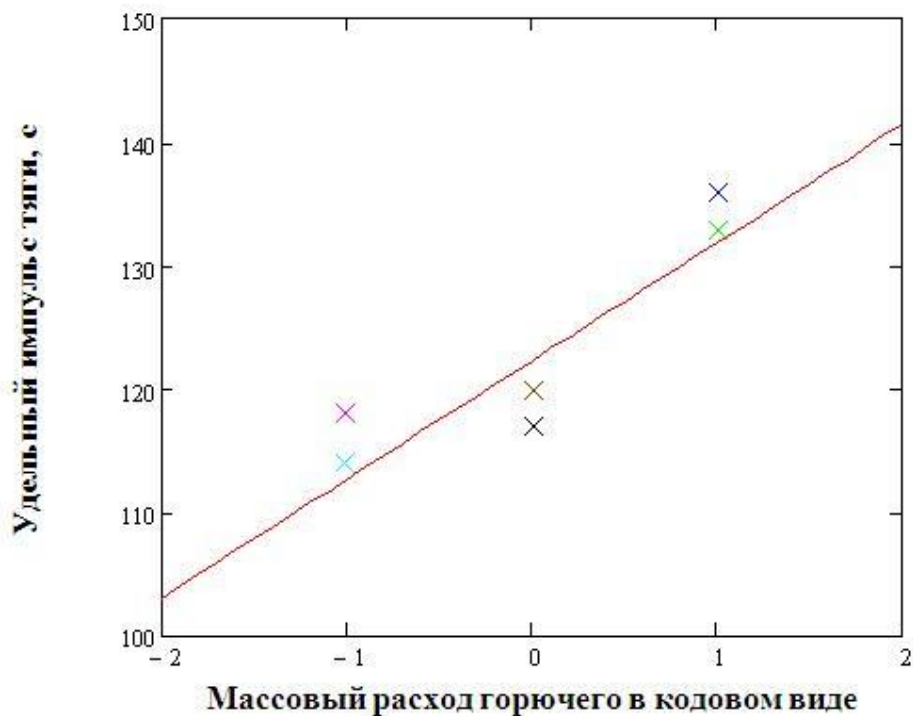


Рисунок 3.6 – Удельный импульс тяги двигателя ДМТ-МАИ-200М в зависимости от расхода горючего при постоянном расходе окислителя 60 г/с:

— – расчетная модель, x – экспериментальные точки

После статистической обработки (таблица 3.4) получаем регрессионную модель вида:

$$T_{cm} = 689 - 25\overline{m_o} + 95\overline{m_z} + 16\overline{m_o m_z}. \quad (3.4)$$

Относительная ошибка модели определяется по формуле $\delta = \frac{\sigma_{\max}}{T_{cm_{cp}}}$, В соответствии с [Приложением А] $\delta = \frac{\sigma_{\max}}{T_{cm_{cp}}} = \frac{\sqrt{112,5}}{690,875} = 0,015 = 1,5\%$.

На рисунке 3.7 представлена поверхность отклика регрессионной модели двигателя ДМТ-МАИ-200М для температуры стенки.

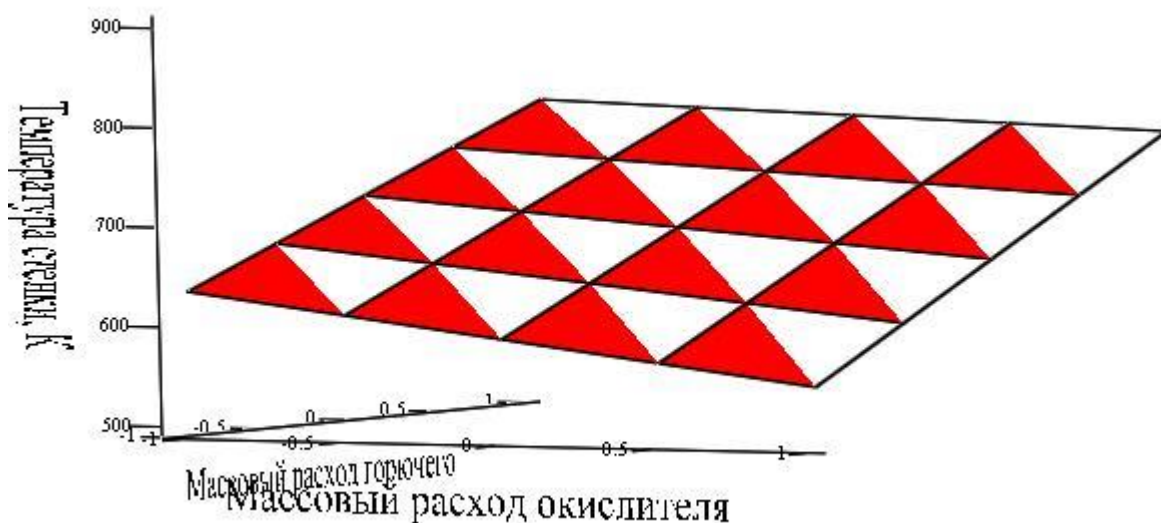


Рисунок 3.7 – График поверхности отклика температуры стенки двигателя ДМТ-МАИ-200М

Существенным фактором для температуры стенки двигателя ДМТ-МАИ-200М является расход горючего, т.к. модель более чувствительна к нему (рисунок 3.7).

На рисунке 3.8 показан график зависимости температуры стенки двигателя ДМТ-МАИ-200М от расхода горючего.

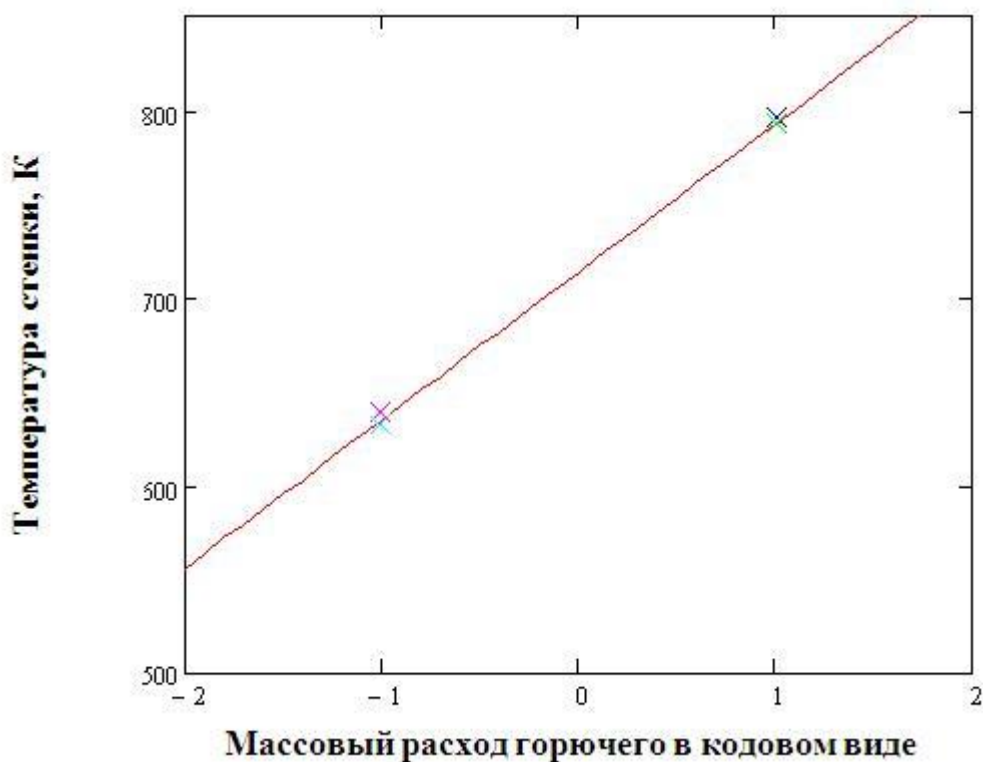


Рисунок 3.8 – Температура стенки двигателя ДМТ-МАИ-200М в зависимости от расхода горючего при постоянном расходе окислителя 47 г/с:
 – – расчетная модель, x – экспериментальные точки

3.3 Оценка соответствия параметров двигателя заданным требованиям

Оценка соответствия параметров двигателя ДМТ-МАИ-200М проводилась по критерию на соответствие требованиям, заданных в ТЗ, удельного и импульса тяги и полученного при испытаниях.

Зная уравнение регрессии исследуемого параметра РДМТ и его закон распределения, можно оценить соответствие этого параметра требованиям ТЗ.

Значения параметра, вычисляемые по полученному полиному, сравниваются с предельными по ТЗ значениями y при условии, что факторы x_1, \dots, x_k также изменяются в пределах, оговоренных в ТЗ.

Если при $x_{\min} \leq x_i \leq x_{\max}$ линия регрессии пересечет предельно допустимые значения параметра y , то требование ТЗ по данному параметру не выполняются. Если же подобное пересечение отсутствует, то может быть сделан вывод лишь о выполнении требований ТЗ в среднем. Для подтверждения выполнения ТЗ с

заданной вероятностью p необходимо построить доверительную зону регрессии. Эту задачу можно решить, зная закон распределения y , который определяется, например, методом бутстрэп. Полученные экспериментальные данные копируются и из полученного множества данных случайным образом выбираются $N \approx 5000$ выборок бутстрэп. По каждой из них вычисляются полиномы, аналогичные по порядку, но отличающиеся коэффициентами регрессии (из-за несовпадения данных в выборках). Полученное множество полиномов позволяет построить пучок линий регрессии, который рассекается несколькими сечениями в зависимости от количества перегибов пучка. В каждом сечении строится гистограмма и определяется интервал, в который попадает 68% всех значений параметра y (так как половина ширины этого интервала интерпретируется как оценка значений среднеквадратического отклонения $\sigma(y)$). Полученный закон распределения сравнивается с ожидаемой по методу регулирующего алгоритма формой закона. При качественном совпадении форм законов распределения определяются верхняя $y_в$ и нижняя $y_н$ толерантные границы, левее (или правее) которых лежит заданная доля значений параметра из всей генеральной совокупности:

$$\left. \begin{aligned} y_н &= y_{cp} - k_T S(y) \\ y_в &= y_{cp} + k_T S(y) \end{aligned} \right\},$$

где $k_T = f(N, \gamma, p)$ - толерантный множитель (табличная величина, определяемая с доверительной вероятностью γ при заданной вероятности p).

Если доверительная зона $(y_в, \dots, y_н)$ при всех значениях укладывается в пределах, то требования ТЗ по данному параметру выполняются с вероятностью p , которая должна быть $p \geq p^{ТЗ}$.

В противном случае требования ТЗ не выполняются, и следует изменить вид регрессионной модели. Если и при этом не выполняется условие соответствия, то конструкция РДМТ нуждается в доработке.

При несовпадении ожидаемой и полученной форм законов распределения параметра y (линий пучка) необходимо провести дополнительные эксперименты с целью увеличения объема статистических данных.

В нашем случае оценку требований ТЗ будем проводить по формуле:

$$\frac{I_{\max(\min)}^{TЗ} \mp I_{cp}^p}{\sigma_i} \geq k(p, \gamma, N),$$

где $I_{\max(\min)}^{TЗ}$ – максимальное (минимальное) значение удельного импульса тяги, заданное в ТЗ; I_{cp}^p – расчетное значение удельного импульса тяги по регрессионной модели; σ_i – среднеквадратическое отклонение удельного импульса тяги в данной точке; p – параметрическая вероятность; N – число опытов, γ – доверительная вероятность.

Гарантированные границы работоспособности двигателя, регрессионная модель и значения удельного импульса, заданного по ТЗ показаны на рисунке 3.9. Уравнение регрессии для двигателя ДМТ-МАИ-200М для удельного импульса тяги при постоянном расходе окислителя (60 г/с) выглядит следующим образом:

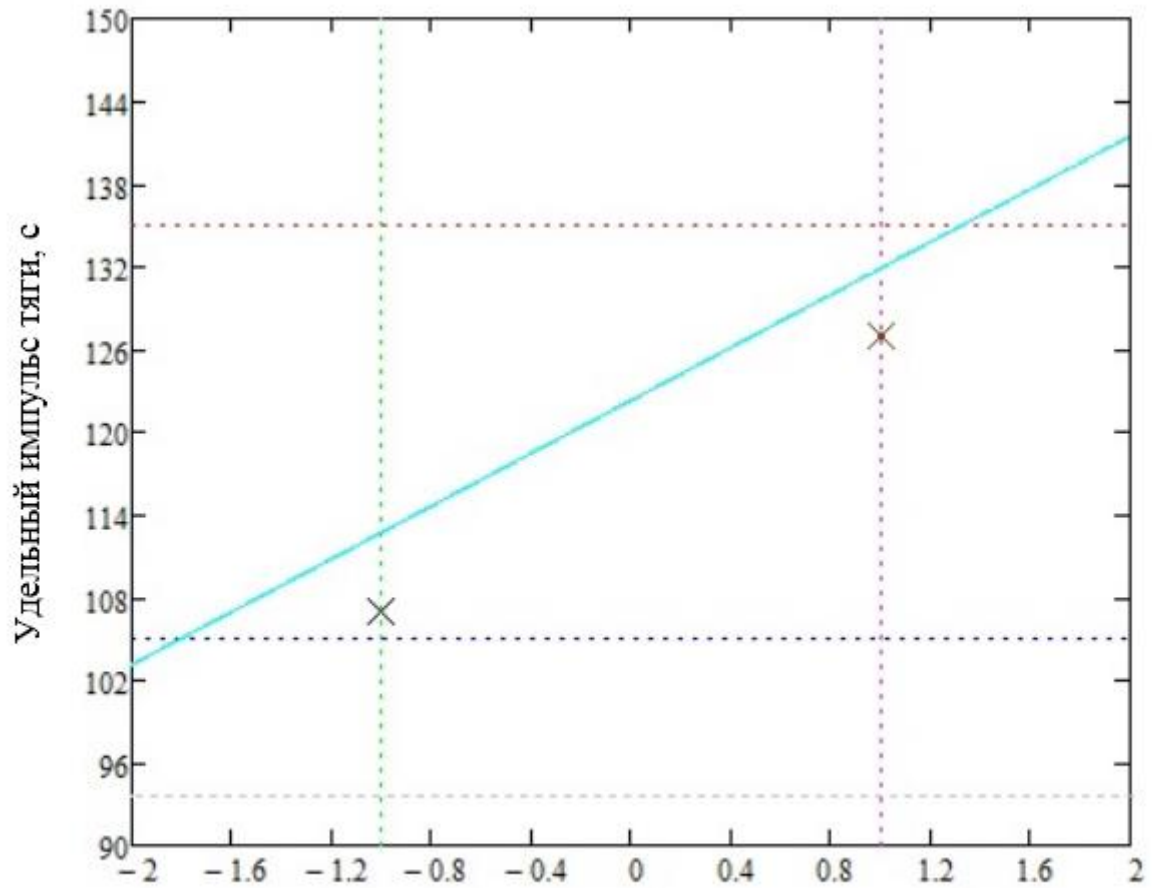
$$I_y = 122,278 + 9,583\overline{m}_c$$

Для максимального значения удельного импульса тяги по ТЗ $I_{\max}^{TЗ} = 127$ с, $I_{cp}^p = 132,9$ с, $\sigma_i = \sqrt{4,5}$ [Приложение А].

$$\frac{I_{\max}^{TЗ} - I_{cp}^p}{\sigma} = \frac{I_{\max}^{TЗ} - I_{cp}^p}{\sigma_i} = \frac{127 - 132,9}{\sqrt{4,5}} = -2,781$$

При доверительной вероятности для удельного импульса тяги $\gamma = 0.95$, $k = -3$ параметрическая вероятность удельного импульса тяги равна $P_{I_y} = 1 - 0,00256 = 0,99744$, что соответствует требованиям ТЗ.

Т.к. $\frac{I_{\max}^{TЗ} - I_{cp}^p}{\sigma} \geq k$, то удельный импульс тяги соответствует требованиям ТЗ.



Массовый расход горючего в кодированном виде

Рисунок 3.9 – График для исследования соответствия параметров требованиям ТЗ. -- – гарантированные границы работоспособности двигателя, - – уравнение регрессии при постоянном расходе окислителя 60 г/с, x – максимальное и минимальное значения удельного импульса тяги, указанные в ТЗ

4 Исследование применимости разработанной методики для испытаний двигателей на КТ газообразный кислород+газообразный водород и АТ+ММГ

4.1 Результаты испытаний двигателей на РДМТ100, S10 и S400

Для подтверждения применимости разработанной методики помимо своих собственных результатов, были получены результаты испытаний других авторов: ГНЦ РФ – ФГУП «Исследовательский центр имени М.В.Келдыша» и EADS Astrium.

ГНЦ РФ – ФГУП «Исследовательский центр имени М.В.Келдыша»

ГНЦ РФ – ФГУП «Исследовательский центр имени М.В.Келдыша» был разработан и изготовлен экспериментальный образец РДМТ100 с номинальной тягой 100Н на газообразных компонентах топлива «кислород+водород» (рисунок 4.1) [49].

С помощью разработанной методики был построен план для испытаний двигателя РДМТ100 для формирования регрессионной модели 2-го порядка удельного импульса тяги (таблица 4.1).

Таблица 4.1

N	n	\dot{m}_o		\dot{m}_2	
		код	г/с	код	г/с
1	1	+	17,1	+	4
	6				
2	8	-	7,8	+	4
	15				
3	3	-	7,8	-	1,4
	9				
4	4	+	17,1	-	1,4
	13				
5	2	0	12,45	0	2,7
	12				
6	10	-	7,8	0	2,7
	16				
7	5	+	17,1	0	2,7
	7				

Продолжение таблицы 4.1

8	11	0	12,45	+	4
	17				
9	14	0	12,45	-	1,4
	18				

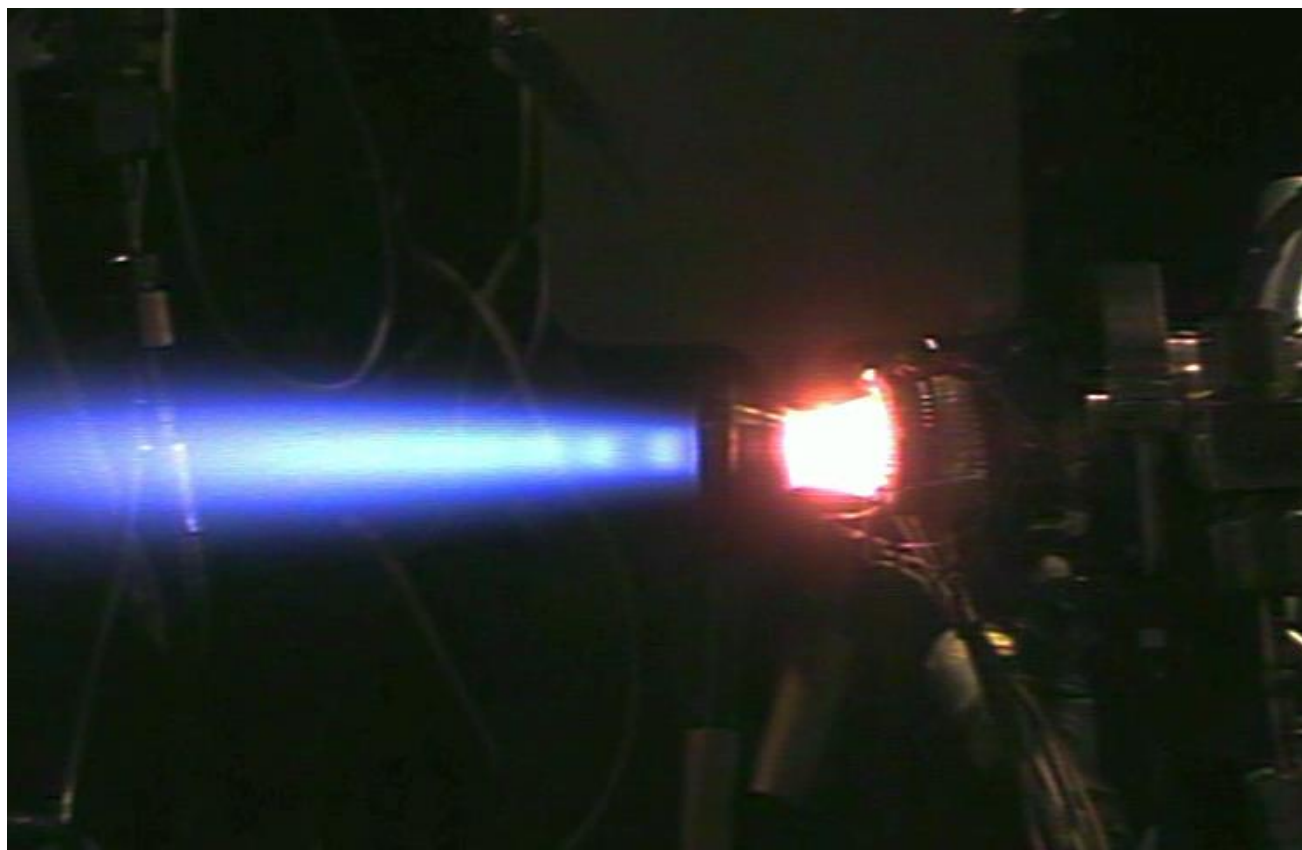


Рисунок 4.1 – Огневые испытания двигателя РДМТ100.

Для двигателя РДМТ100 заполнена матрица планирования для построения регрессионной модели удельного импульса тяги I_y (таблица 4.2).

Таблица 4.2

N	n	\dot{m}_o		\dot{m}_2		I_{y_i} , с	$(I_{y_i})_{cp}$, с
		код	г/с	код	г/с		
1	1	+	17,1	+	4	396	397
	6					398	
2	8	-	7,8	+	4	428	427
	15					426	
3	3	-	7,8	-	1,4	397	396
	9					395	

Продолжение таблицы 4.2.

4	4	+	17,1	-	1,4	390	387
	13					385	
5	2	0	12,45	0	2,7	389	387,5
	12					386	
6	10	-	7,8	0	2,7	438	437
	16					436	
7	5	+	17,1	0	2,7	423	421,5
	7					420	
8	11	0	12,45	+	4	381	382,5
	17					383	
9	14	0	12,45	-	1,4	417	418
	18					419	

После статистической обработки получаем регрессионную модель вида:

$$I_y = 405,222 - 9\overline{m}_o - 5,375\overline{m}_o\overline{m}_z + 15,167\overline{m}_o^2 - 14,083\overline{m}_z^2. \quad (4.1)$$

Относительная ошибка модели определяется по формуле $\delta = \frac{\sigma_{\max}}{I_{y_{cp}}}$. В

соответствии с [Приложением А] $\delta = \frac{\sigma_{\max}}{I_{y_{cp}}} = \frac{\sqrt{12,5}}{405,944} = 0,009 = 0,9\%$.

На рисунке 4.2 представлен график поверхности отклика удельного импульса тяги двигателя РДМТ100.

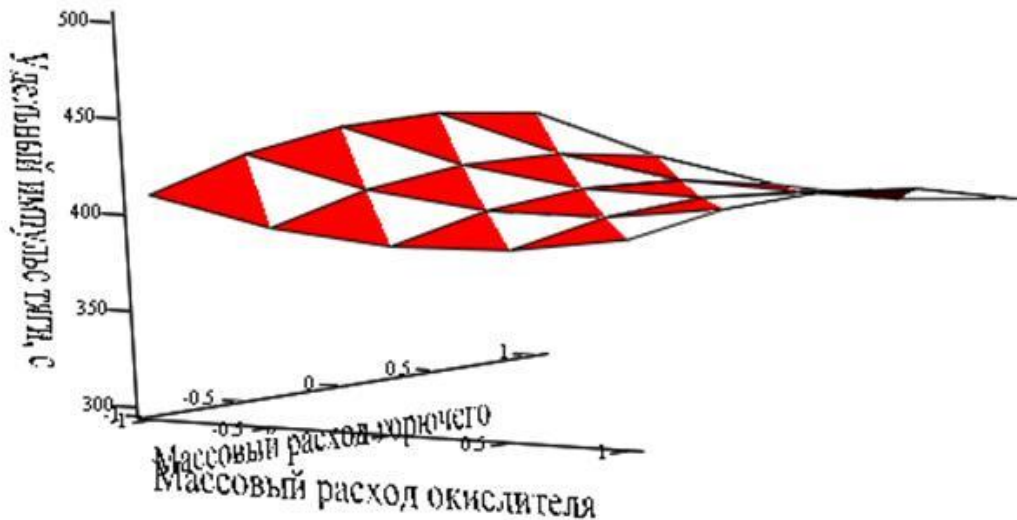


Рисунок 4.2 – График поверхности отклика удельного импульса тяги двигателя РДМТ100

На рисунке 4.3 представлен график зависимости удельного импульса тяги от массового расхода окислителя.

В качестве фактора, который использован для графического представления, выбран расход окислителя, т.к. модель одинаково чувствительна к расходу окислителя и горючего, и выбор фактора не имеет значения (рисунок 4.3).

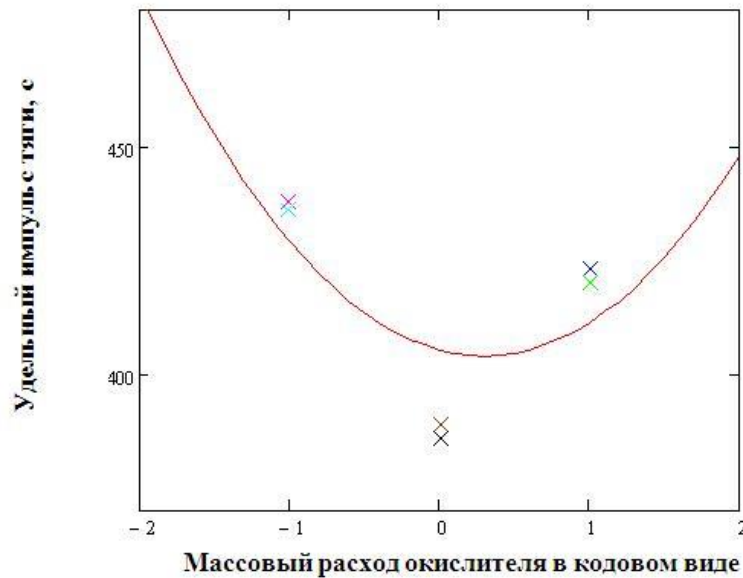


Рисунок 4.3 – Удельный импульс тяги двигателя РДМТ100 в зависимости от расхода окислителя при постоянном расходе горючего – 2,7г/с: – – расчетная модель, x – экспериментальные точки

Оценка соответствия качества двигателя РДМТ100 проводилась по критерию на соответствие заданному в ТЗ значению удельного импульса тяги и полученного при испытаниях.

Для двигателя РДМТ100 также проведена оценка соответствия качества по критерию на соответствие заданное в ТЗ удельного и импульса тяги и полученного при испытаниях.

Гарантированные границы работоспособности двигателя, регрессионная модель и значения удельного импульса, заданные по ТЗ показаны на рисунке 4.4. Уравнение регрессии для двигателя РДМТ100 удельного импульса тяги при постоянном расходе горючего (2,7 г/с) выглядит следующим образом:

$$I_y = 405,222 - 9\overline{\dot{m}_o} + 15,167\overline{\dot{m}_o}^2$$

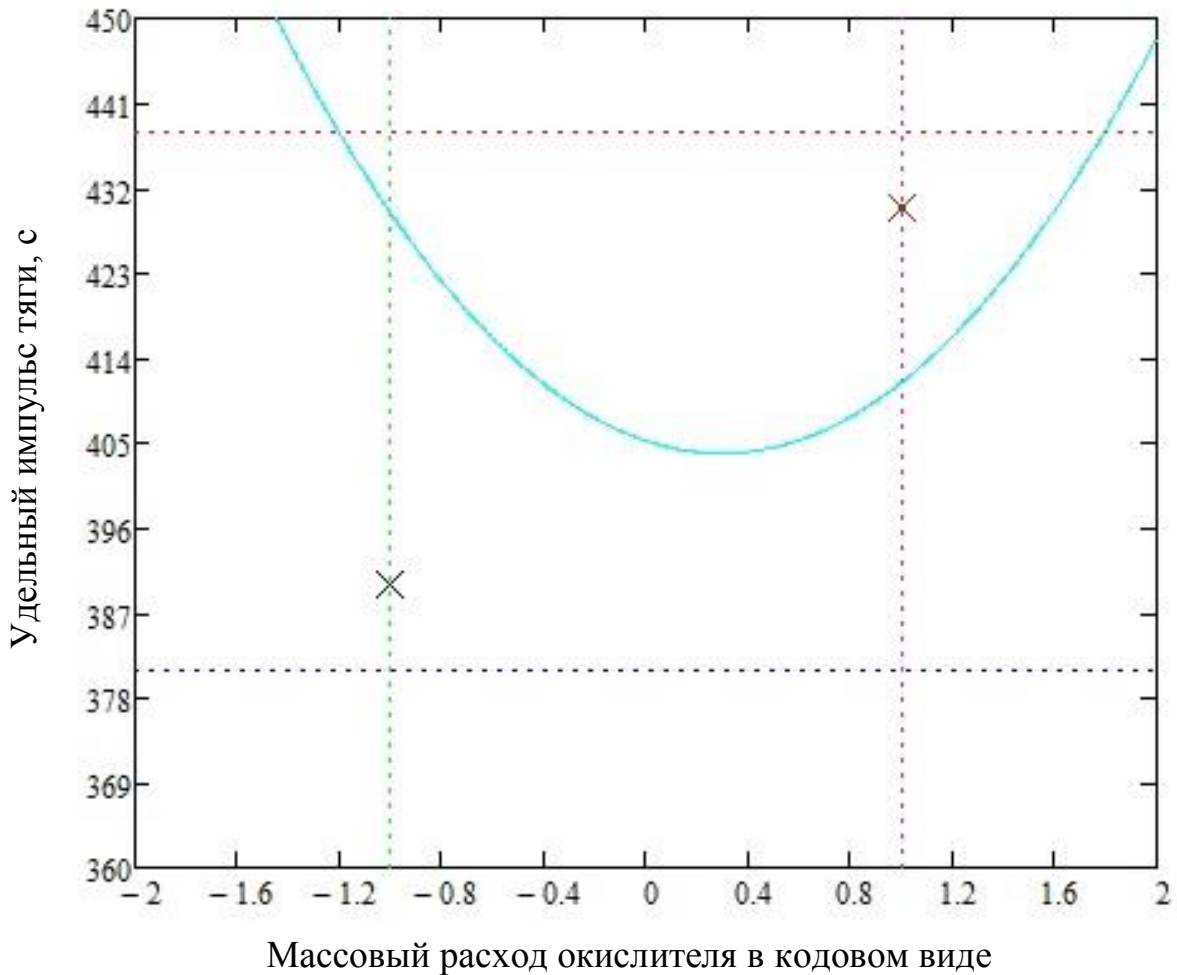


Рисунок 4.4 – График для исследования соответствия параметров требованиям ТЗ. -- – гарантированные границы работоспособности двигателя, - - уравнение регрессии при постоянном расходе горючего 2,7 г/с, x – максимальное и минимальное значения удельного импульса тяги, указанные в ТЗ

Для минимального значения удельного импульса тяги по ТЗ $I_{\min}^{T3} = 390$ с, $I_{cp}^p = 391,899$ с, $\sigma_i = \sqrt{2}$ [Приложение А].

$$\frac{I_{\max}^{T3} - I_{cp}^p}{\sigma} = \frac{390 - 391,899}{\sqrt{2}} = -1,366.$$

При доверительной вероятности для удельного импульса тяги $\gamma = 0,95$, $k = -3$ параметрическая вероятность удельного импульса тяги равна $P_{I_y} = 1 - 0,004115 = 0,99588$, что также соответствует требованиям ТЗ.

Т.к. $\frac{I_{\max}^{T3} - I_{cp}^p}{\sigma} \geq k$, то удельный импульс тяги соответствует требованиям ТЗ.

EADS Astrium

В EADS Astrium разработаны, экспериментально отработаны и поставлены для летных испытаний двухкомпонентные двигатели (ММГ+N₂O₄) тягой 10Н S10-18(S10-21) (рисунок 4.5), S10-26 для КА AFRISTAR(1998), Stallat (2002), EUROSTAR 2015 (2008), Astra 1N (2011) и др. [33], а также двигатель тягой 420Н S400-12(S400-15) (рисунок 4.6), для КА SYMPHONIE(1975), AMOS 1 (1996), ARTEMIS 2015 (2001), Venus Express(2005), W2A (2009), Yamal 402 (2013), W3D (2013) и др. [34].



Рисунок 4.5 – Общий вид двигателя S10-21

Двигатель S10 работает при номинальном суммарном массовом расходе $\dot{m}_\Sigma \approx 3,4 \frac{г}{с}$ и соотношении компонентов топлива $K_m \approx 1,68$.

С помощью разработанной методики был построен план для испытаний двигателя S10 с целью формирования регрессионной модели 2-го порядка удельного импульса тяги (таблица 4.3).

Таблица 4.3

N	n	\dot{m}_o		\dot{m}_Σ	
		код	г/с	код	г/с
1	1	+	2,41	+	1,42
	6				

Продолжение таблицы 4.3

2	8	+	2,41	-	1,09
	15				
3	3	-	1,86	+	1,42
	9				
4	4	-	1,86	-	1,09
	13				
5	2	0	2,135	+	1,42
	12				
6	10	+	2,41	0	1,255
	16				
7	5	-	1,86	0	1,255
	7				
8	11	0	2,135	-	1,09
	17				
9	14	0	2,135	0	1,255
	18				



Рисунок 4.6 – Общий вид двигателя S400-12

Двигатель работает S400 при номинальном суммарном массовом расходе $\dot{m}_\Sigma \approx 125 \frac{г}{с}$ и соотношении компонентов топлива $K_m \approx 1,61$.

Построен план испытаний для построения регрессионной модели 2-го порядка удельного импульса тяги для двигателя S400 (таблица 4.4).

Таблица 4.4

N	n	\dot{m}_o		\dot{m}_2	
		код	г/с	код	г/с
1	1	+	82,3	+	51,4
	6				
2	8	+	82,3	-	44,7
	15				
3	3	-	71,5	+	51,4
	9				
4	4	-	71,5	-	44,7
	13				
5	2	0	76,9	+	51,4
	12				
6	10	+	82,3	0	48,05
	16				
7	5	-	71,5	0	48,05
	7				
8	11	0	76,9	-	44,7
	17				
9	14	0	76,9	0	48,05
	18				

Для двигателя S10 заполнена матрица планирования для построения регрессионной модели удельного импульса тяги (таблица 4.5).

Таблица 4.5

N	n	\dot{m}_o		\dot{m}_2		I_{y_i} , с	$(I_{y_i})_{cp}$, с
		код	г/с	код	г/с		
1	1	+	2,41	+	1,42	290	292
	6					294	
2	8	+	2,41	-	1,09	274	275,5
	15					277	
3	3	-	1,86	+	1,42	280	282
	9					284	
4	4	-	1,86	-	1,09	291	293
	13					295	
5	2	0	2,135	+	1,42	298	300
	12					302	
6	10	+	2,41	0	1,255	294	295
	16					296	
7	5	-	1,86	0	1,255	280	279,5
	7					279	
8	11	0	2,135	-	1,09	285	286
	17					287	

Продолжение таблицы 4.5

9	14	0	2,135	0	1,255	289	288,5
	18					288	

После статистической обработки получаем регрессионную модель вида:

$$I_y = 291,222 + 3,25\overline{\dot{m}_2} + 6,875\overline{\dot{m}_o\dot{m}_2} - 5,333\overline{\dot{m}_o^2}. \quad (4.2)$$

Относительная ошибка модели определяется по формуле $\delta = \frac{\sigma_{\max}}{I_{y_{cp}}}$. В

соответствии с [Приложением А] $\delta = \frac{\sigma_{\max}}{I_{y_{cp}}} = \frac{\sqrt{8}}{287,944} = 0,0098 = 0,98\%$.

На рисунках 4.7, 4.8 графически представлены результаты испытаний двигателя S10 для удельного импульса тяги.

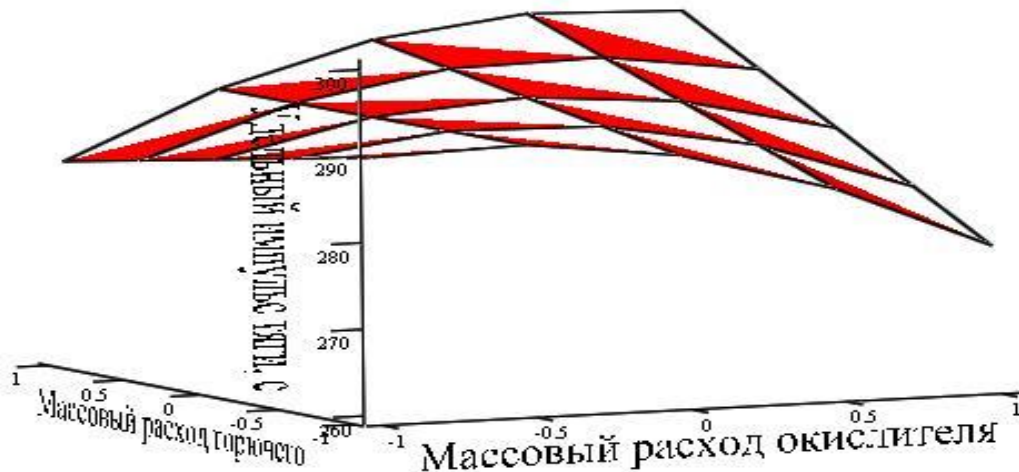


Рисунок 4.7 – График поверхности отклика удельного импульса тяги двигателя S10

В качестве фактора для построения зависимости удельного импульса выбран расход горючего, т.к. он оказывает линейное влияние на модель (рисунок 4.7), что упрощает ее графическое представление, а расход окислителя оказывает нелинейное влияние.

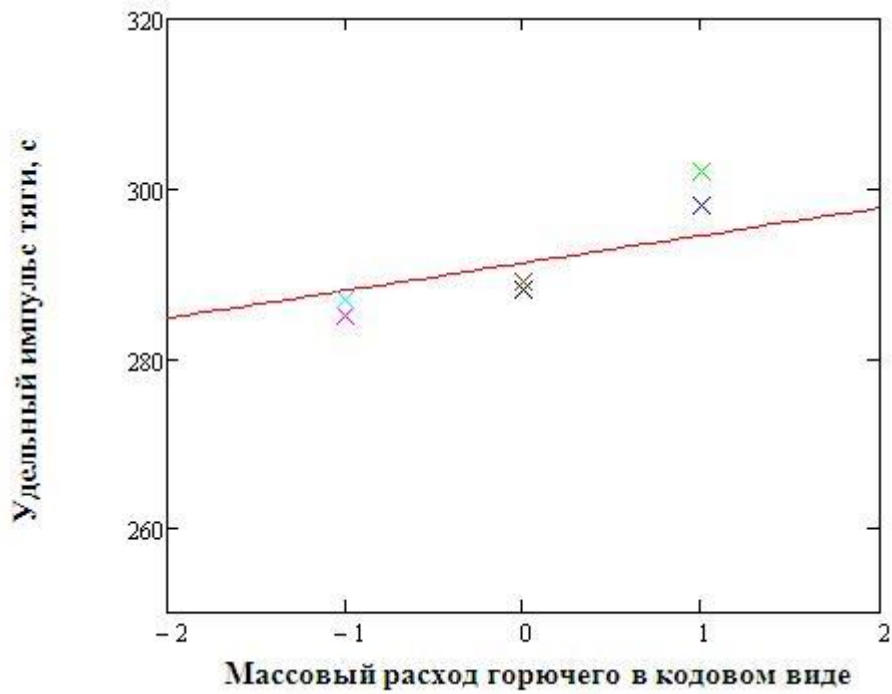


Рисунок 4.8 – Удельный импульс тяги двигателя S10 в зависимости от расхода горючего при постоянном расходе окислителя 2,135 г/с:

– – расчетная модель, x – экспериментальные точки

Для двигателя S400 представлена матрица планирования для построения регрессионной модели удельного импульса тяги (таблица 4.6).

Таблица 4.6

N	n	\dot{m}_o		\dot{m}_z		I_{y_i} , с	$(I_{y_i})_{cp}$, с
		код	г/с	код	г/с		
1	1	+	82,3	+	51,4	321	319
	6					317	
2	8	+	82,3	-	44,7	322	321,5
	15					321	
3	3	-	71,5	+	51,4	313	312
	9					311	
4	4	-	71,5	-	44,7	315	314
	13					313	
5	2	0	76,9	+	51,4	318	317
	12					316	
6	10	+	82,3	0	48,05	319	318,5
	16					318	
7	5	-	71,5	0	48,05	314	313,5
	7					313	
8	11	0	76,9	-	44,7	315	314,5
	17					314	
9	14	0	76,9	0	48,05	317	316,5
	18					316	

После статистической обработки получаем регрессионную модель вида:

$$I_y = 315,89 + 3,325\overline{m}_o. \quad (4.3)$$

Относительная ошибка модели определяется по формуле $\delta = \frac{\sigma_{\max}}{I_{y_{cp}}}$. В

соответствии с [Приложением А] $\delta = \frac{\sigma_{\max}}{I_{y_{cp}}} = \frac{\sqrt{8}}{316,278} = 0,0089 = 0,89\%$.

На рисунках 4.9, 4.10 графически представлены результаты испытаний двигателя S400 для удельного импульса тяги.

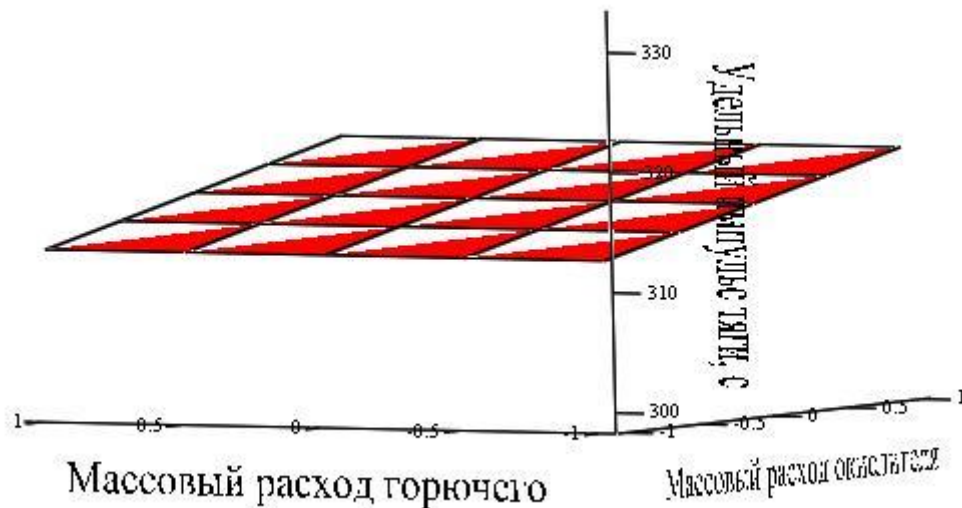


Рисунок 4.9 – График поверхности отклика удельного импульса тяги двигателя S400

Существенным фактором для удельного импульса тяги двигателя S400 является массовый расход окислителя, т.к. модель (4.3) зависит только от него (с увеличением тяги влияние факторов на регрессионную модель уменьшается).

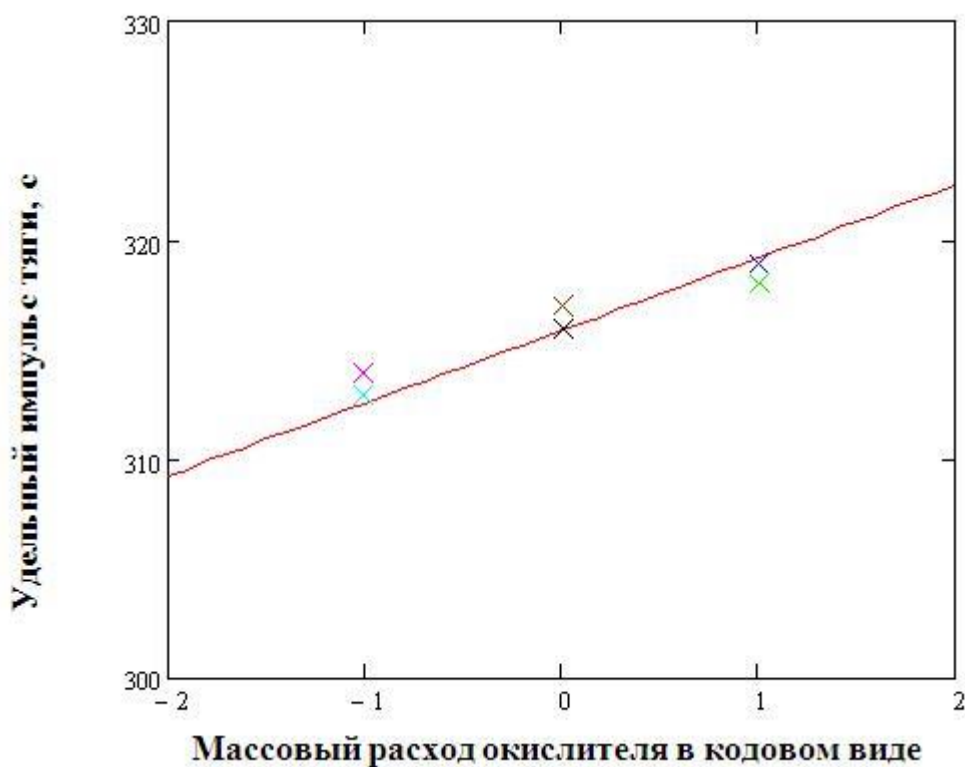


Рисунок 4.10 – Удельный импульс тяги двигателя S400 в зависимости от расхода окислителя при постоянном расходе горючего 48,05 г/с:

– – расчетная модель, x – экспериментальные точки

4.2 Подтверждение применимости разработанной методики

Подтверждение применимости разработанной методики для использования ее на предприятиях РКП при испытаниях двигателей различных тяг и на других КТ осуществлено на основе анализа полученных регрессионных моделей и обобщения их в единую таблицу.

Анализ полученных результатов

Двигатель ДМТ-МАИ-500П

В результате анализа графика поверхности отклика температуры стенки (рисунок 3.1), установлено, что регрессионная модель $T_{ст} = 404,5 + 11,5\overline{m_o} - 30\overline{m_e} - 19\overline{m_o m_e}$ более чувствительна к расходу окислителя, в совокупности с эффектом взаимодействия расходов, чем к расходу горючего, поэтому за более существенный фактор выбран расход окислителя. Построен график (рисунок 3.2) регрессионной модели при постоянном расходе горючего –

21 г/с. График показывает, что с увеличением расхода окислителя температура стенки растет. Это объясняется тем, что двигатель работает в области до стехиометрии, т.е. при $\alpha_o < 1$ и с увеличением окислителя режим работы смещается в сторону стехиометрии, следовательно, температура растет (рисунок 4.11).

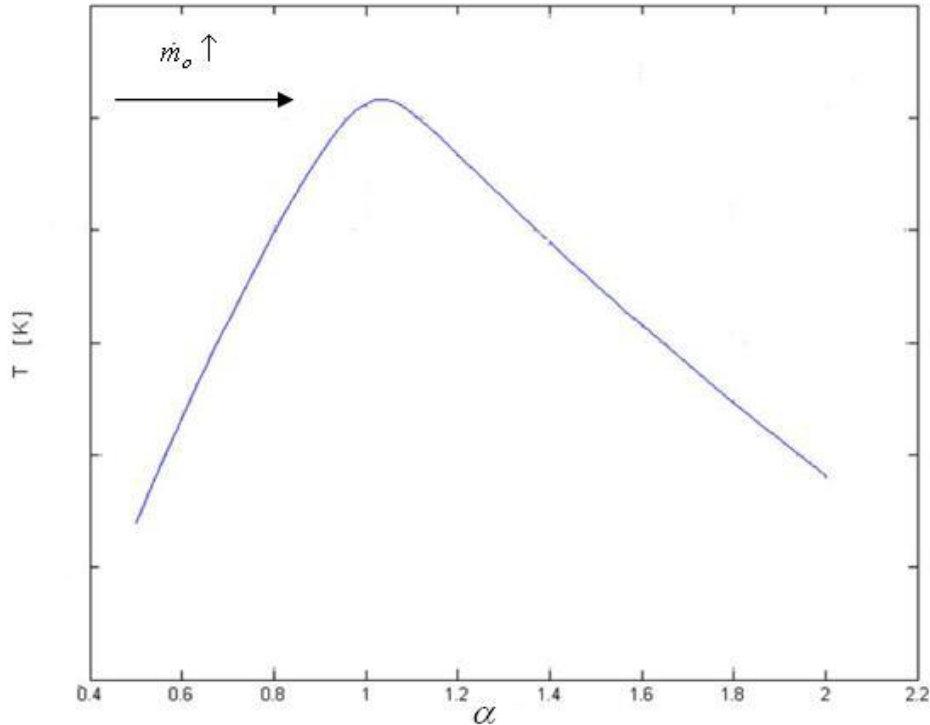


Рисунок 4.11 – Зависимость температуры стенки от коэффициента избытка окислителя

На рисунках 4.11-4.14 графиках представлены закон распределения температуры стенки двигателя и удельного импульса тяги в зависимости от коэффициента избытка окислителя без привязки к конкретному двигателю [25].

С другой стороны, при увеличении расхода окислителя и постоянном расходе горючего увеличивается суммарный расход \dot{m}_2 , что ведет к увеличению давления в камере и увеличению тепловых потоков, что также приводит к увеличению температуры стенки.

График поверхности отклика перепада давления на форсунке (рисунок 3.3) показывает, что регрессионная модель $\Delta p = 6,666 + 4,205\overline{\dot{m}_2} + 0,547\overline{\dot{m}_2}^2 - 0,626\overline{C} - 0,051\overline{\dot{m}_2}\overline{C}$ более чувствительна к расходу

горючего, чем к концентрации добавки ПИБ, но в задачу исследования входило изучение влияния концентрации ПИБ на перепад давления, а не зависимость от массового расхода горючего, поэтому концентрация добавки была взята как более существенный фактор. Построен график (рисунок 3.4) регрессионной модели при постоянном расходе горючего – 23г/с. График показывает, что с увеличением добавки ПИБ перепад на форсунке уменьшается. Это объясняется физикой влияния добавки ПИБ на работу двигателя: за счет эффекта Томса уменьшается пограничный слой турбулентного потока, что в свою очередь уменьшает гидравлическое сопротивление в канале (форсунке) [22,82].

Двигатель РДМТ100

Для двигателя РДМТ100 построен график поверхности отклика удельного импульса тяги (рисунок 4.2). Регрессионная модель $I_y = 405,222 - 9\bar{m}_o - 5,375\bar{m}_o\bar{m}_z + 15,167\bar{m}_o^2 - 14,083\bar{m}_z^2$ равноценно

чувствительна к расходу окислителя и горючего. Как основной фактор выбран расход окислителя. Построен график (рисунок 4.3) регрессионной модели при постоянном расходе горючего – 2,7г/с. Он показывает, что с увеличением расхода окислителя удельный импульс тяги изменяется нелинейно. Это объясняется двумя механизмами. Во-первых, с увеличением расхода окислителя увеличивается суммарный расход \dot{m}_z , что ведет к увеличению давления в камере и удельного импульса тяги. С другой стороны удельный импульс тяги прямопропорционально

$(I_y = \sqrt{\frac{2(n+1)}{n}} RT z(\lambda) [7])$ зависит от комплекса RT (где R – газовая постоянная,

T – температура в камере). С увеличением окислителя температура растет, по такому же принципу, как и на рисунке 4.11. Этот механизм работает при увеличении окислителя с номинального уровня до максимального. В интервале массового расхода окислителя от минимального до номинального удельный импульс тяги уменьшается. Это можно объяснить большим влиянием газовой постоянной на удельный импульс у водорода. Также данный факт можно

объяснить узким и относительно небольшим (например, при изменении на 50% от номинала расхода горючего изменяется всего на 1,3 г/с) диапазоном изменения факторов (ограничение работоспособности двигателя).

Двигатель ДМТ-МАИ-200М

График поверхности отклика удельного импульса тяги (рисунок 3.5) показывает, что регрессионная модель $I_y = 122,278 - 5,83\overline{m}_o + 9,583\overline{m}_z + 1,5\overline{m}_o\overline{m}_z$ более чувствительна к расходу горючего, чем к расходу окислителя, поэтому более существенным фактором выбран расход горючего. Построен график (рисунок 3.6) регрессионной модели при постоянном расходе окислителя 60 г/с. Как видно из графика, с увеличением расхода горючего удельный импульс тяги растет. Это объясняется тем, что двигатель работает на режиме $K_m \approx 10,5 \div 16,5$, т.е. при $\alpha_o \square 1$. Следовательно, при увеличении горючего, режим смещается ближе к стехиометрии (рисунок 4.12) и удельный импульс тяги растет.

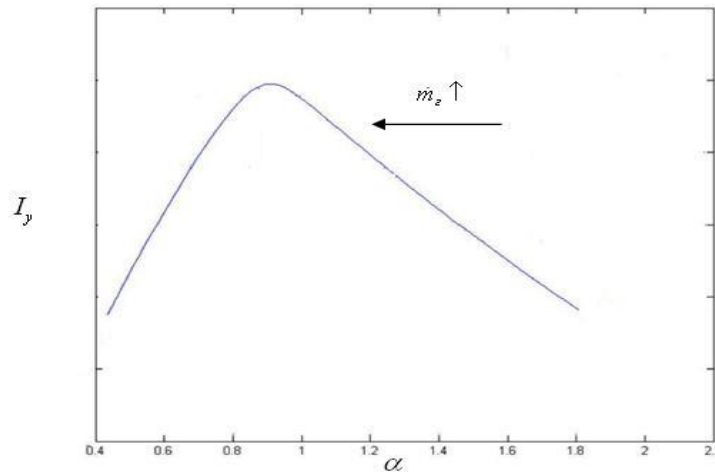


Рисунок 4.12 – Зависимость удельного импульса тяги от коэффициента избытка окислителя

График поверхности отклика температуры стенки (рисунок 3.7) показывает, что регрессионная модель $T_{cm} = 689 - 25\overline{m}_o + 95\overline{m}_z + 16\overline{m}_o\overline{m}_z$ более чувствительна к расходу горючего, поэтому он выбран в качестве существенного фактора. Построен график (рисунок 3.8) регрессионной модели при постоянном расходе окислителя – 47 г/с. Как видно из графика, с увеличением расхода горючего температура стенки растет. Это объясняется тем, что двигатель работает в области после стехиометрии,

т.е. при $\alpha_o > 1$ и с увеличением горючего режим работы смещается в сторону стехиометрии, следовательно, температура растет (рисунок 4.13).

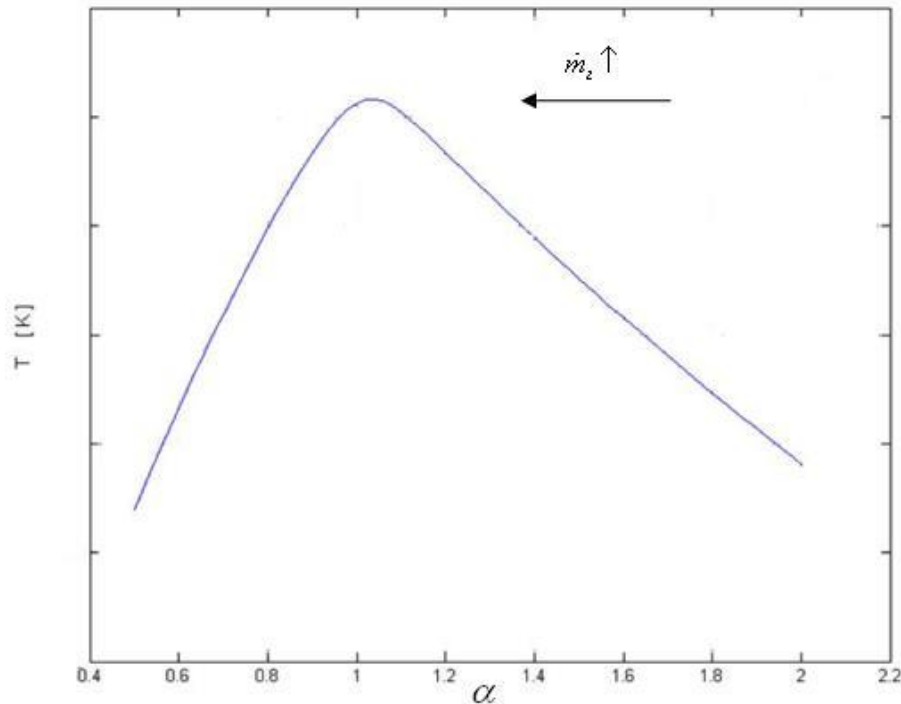


Рисунок 4.13 – Зависимость температуры стенки от коэффициента избытка окислителя

С другой стороны при увеличении расхода окислителя и постоянном расходе горючего увеличивается суммарный расход \dot{m}_2 , что ведет к увеличению давления в камере, увеличению тепловых потоков и температуры стенки.

Двигатель S10

Расход горючего оказывает на регрессионную модель $I_y = 291.222 + 3.25\overline{\dot{m}_2} + 6.875\overline{\dot{m}_o\dot{m}_2} - 5.333\overline{\dot{m}_o}^2$ линейный эффект (рисунок 4.7), поэтому он и взят как основной фактор при построении графика (рисунок 4.8) регрессионной модели при постоянном расходе окислителя – 2,135 г/с. Он показывает, что с увеличением расхода горючего удельный импульс тяги растет. Это объясняется тем, что при увеличении суммарного расхода \dot{m}_2 растет давление в камере, что, в свою очередь, ведет к увеличению удельного импульса тяги. В

данном случае влияние комплекса RT незначительно из-за малой вариации факторов.

Двигатель S400

На регрессионную модель $I_y = 315,89 + 3,325\overline{m}_o$ не оказывает влияния расход горючего из-за того, что относительный уровень влияния на модель падает. Построен график (рисунок 4.9) регрессионной модели при постоянном расходе горючего – 48,05 г/с. Как видно из него, с увеличением расхода окислителя удельный импульс тяги растет. Это объясняется тем, что двигатель работает в области до стехиометрии, т.е. при $\alpha_o < 1$ и с увеличением окислителя режим работы смещается в сторону стехиометрии, следовательно, удельный импульс тяги растет (рисунок 4.14).

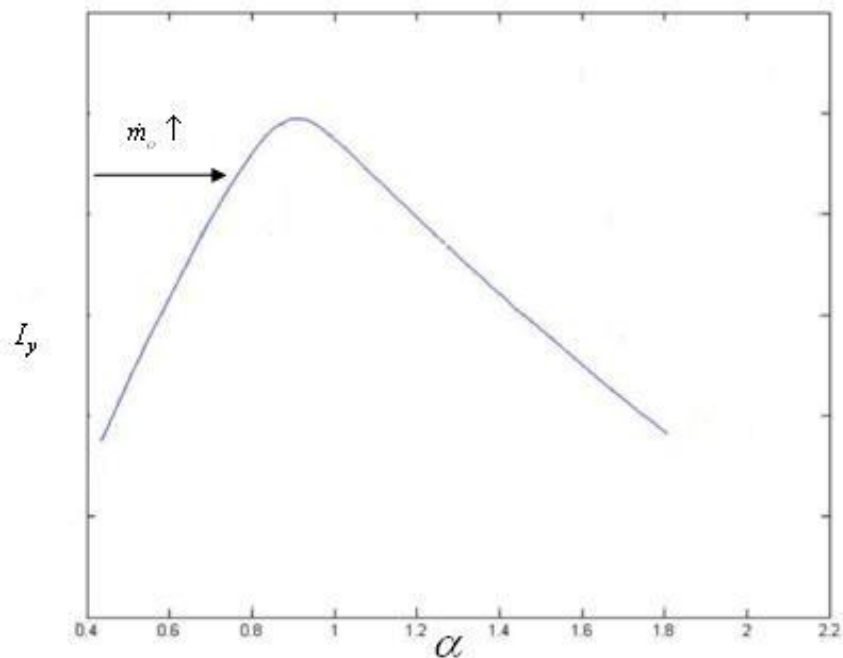


Рисунок 4.14 – Зависимость удельного импульса тяги от коэффициента избытка окислителя

Из вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. С увеличением тяги влияние горючего на регрессионную модель уменьшается.

2. Для температуры стенки достаточно квазинелинейная модель, описывающая процесс зависимости температуры от массовых расходов.

3. Кислород-водородный двигатель имеет более сложную модель удельного импульса тяги из-за особенности компонентов (комплекса RT).

4. Сложность составления регрессионных моделей состоит в том, что работоспособный диапазон двигателя очень узкий, а за счет этого изменение факторов модели небольшое по сравнению с главным эффектом. Из-за этого физический смысл модели может быть неверно интерпретирован при адекватной регрессионной модели.

5. Адекватные регрессионные модели удельного импульса тяги и температуры стенки двигателя можно создавать для газогенераторных режимов.

Обобщение результатов испытаний

Разработаны регрессионные модели основных параметров РДМТ.

На основе проведенных исследований общий вид моделей для удельного импульса тяги и температуры стенки можно представить следующим образом:

$$I_y = b_0 + b_1 \overline{\dot{m}_o} + b_2 \overline{\dot{m}_z} + b_{12} \overline{\dot{m}_o \dot{m}_z} + b_{11} \overline{\dot{m}_o^2} + b_{22} \overline{\dot{m}_z^2}, \quad (4.4)$$

$$T_{cm} = b_0 + b_1 \overline{\dot{m}_o} + b_2 \overline{\dot{m}_z} + b_{12} \overline{\dot{m}_o \dot{m}_z}. \quad (4.5)$$

В таблицах 4.7 и 4.8 представлены значения коэффициентов регрессии для разных двигателей для удельного импульса тяги и температуры стенки соответственно.

Таблица 4.7 – Значения коэффициентов регрессии для удельного импульса тяги

Двигатель \ b_i	b_0	b_1	b_2	b_{12}	b_{11}	b_{22}
ДМТ-МАИ-200М	122,278	-5,83	9,583	1,5	-	-
РДМТ100	405,222	-9	-	-5,375	15,167	-14,083
S10	291,222	-	3,25	6,875	-5,333	-
S400	315,89	3,325	-	-	-	-

Таблица 4.8 – Значения коэффициентов регрессии для температуры стенки

Двигатель \ b_i	b_0	b_1	b_2	b_{12}
ДМТ-МАИ-500П	404,5	11,5	-30	-19
ДМТ-МАИ-200М	689	-25	95	16

Проведенный анализ показывает, что разработанная методика планирования и построения регрессионных моделей применима для испытаний как собственных образцов РДМТ, так и образцов РДМТ, разработанных ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша» и EADS Astrium. Она позволяет:

- 1) проводить испытания для большого диапазона тяг: от 10 Н до 500 Н;
- 2) использовать ее при испытаниях как на штатных КТ (АТ+ММГ), так и на перспективных КТ (газообразный кислород+керосин, газообразный кислород+водород, водорода пероксид высококонцентрированный+керосин).

Можно сделать вывод, что для различных видов топлив, модели имеют одинаковый вид. Чем больше тяга, тем меньше влияющих факторов на параметры. С помощью регрессионных моделей проверены параметры удельного импульса тяги для двигателей РДМТ100 и ДМТ-МАИ-200М на соответствие требованиям ТЗ.

Полученные модели, построенные на основе разработанной методики, можно использовать для прогнозирования и оперативной оценки основных параметров вновь разрабатываемых РДМТ на перспективных компонентах топлив для оперативного решения о изменении конструкции или отключения двигателя, что в свою очередь сокращает объем ЭО двигателей.

5. Разработка технологии уточняющих испытаний РДМТ

Структурная схема разработанной технологии УИ РДМТ представлена на рисунке 5.1, которая может рассматриваться в качестве алгоритма действий при проведении испытаний.

Предложенная технология состоит из следующих основных структурных элементов:

- разработка плана испытаний;
- подготовка стенда и объекта испытаний;
- проведение испытаний по разработанному плану;
- завершающие работы после испытаний;
- анализ результатов испытаний;
- подтверждение требований на двигатель.

Красным штрихом выделены те элементы, в которых были произведены изменения по результатам исследований автора, в отличие от существующих технологий, анализ которых проведен в главе 2. Отличие заключается в составлении рациональных матриц планирования для проведения экспериментов и в анализе данных, полученных после испытаний.

Испытания начинаются с разработки плана испытаний для проведения эксперимента:

- в задаче исследования выбирается отклик, то есть главный параметр двигателя (удельный импульс тяги, температура стенки);
- выбираются факторы для проведения экспериментов (массовые расходы КТ);
- исходя из проведенного исследования, выбираются уровни и интервалы варьирования (обычно для РДМТ не более 15% от номинальных значений);
- выбирается вид модели (для удельного импульса тяги – модель второго порядка, для температуры стенки камеры – квазинелинейная модель);
- выбирается вид плана эксперимента (исходя из проведенного исследования, для удельного импульса тяги оптимальным планом будет ПФЭ, либо композиционный план, для температуры стенки камеры – в основном ПФЭ).

- с помощью ПО составляется матрица планирования эксперимента.

Существующие методы составления матриц планирования не оптимальны для РДМТ, что было доказано в главе 1. В некоторых случаях из-за большого количества параметров и факторов, а, следовательно, большого количества запусков, что ведет к увеличению стоимости его проведения и удорожанию жизненного цикла двигателя. В результате исследований автора предложено сокращать количество параметров и факторов до рационально возможного, а также подобраны оптимальные планы для эксперимента. Для ускорения процесса составления матриц планирования разработано ПО.

Исходя из составленной матрицы планирования эксперимента, составляется методика проведения испытаний, которая описана в главе 2, и составляется циклограмма управления стендом.

Далее проводится подготовка стенда и объекта испытаний, которая включает в себя следующие операции:

- проведение входного контроля РДМТ в виде внешнего осмотра и электрических проверок;
- проверка на герметичность стендовых систем;
- подготовка системы управления и системы измерений стенда, которая включает в себя проверку электро- и пневмосистем, а также настройку системы измерения и управления
- установка ОИ на стенд и подключение гидравлической арматуры (главные клапаны, система охлаждения, продувки) и датчиков температуры, давления, тепловизионное оборудование;
- проведение совместных проверок стендовых систем и ОИ;

Определяются расходы КТ в двигатель, то есть проводятся настроечные испытания:

- методом определения расходов является расчетный метод по известным гидравлическим сопротивлениям стендовых магистралей и ОИ;
- открывают клапан подачи окислителя в камеру сгорания двигателя на время 3 с;

- определяют расход окислителя по расходомеру;
- аналогичные операции проводятся для горючего.

Испытания проводят по циклограмме в соответствии с разработанной методикой.

Во время запуска происходит оперативное управление стендом:

- питание электросистем и СУ;
- подача КТ;
- реализация программы управления и регулирования СУ;
- имитация воздействия эксплуатационных условий.

Во время эксперимента проводится регистрация сигналов с датчиков стенда. Также для наглядности показания визуализируются и одновременно обрабатываются системой защиты и накопления информации.

После проведения эксперимента проводятся следующие операции:

- послепусковые продувки;
- отключение систем стенда;
- демонтаж и внешний осмотр ОИ.

Проводится анализ результатов проведенных испытаний:

- ЭД обрабатываются в удобном для анализа виде (самый удобный вид для обработки – матрица отклика и факторов [Приложение А]);
- с помощью ПО проводится оценка воспроизводимости и стационарности опытов;
- проводится расчет коэффициентов регрессии для модели и проверка их на значимость, незначимые коэффициенты убираются из модели;
- составляется модель по полученным результатам и коэффициентам регрессии в виде матрицы коэффициентов регрессии;
- проводится проверка адекватности модели (по F-критерию).

Технология УИ РДМТ

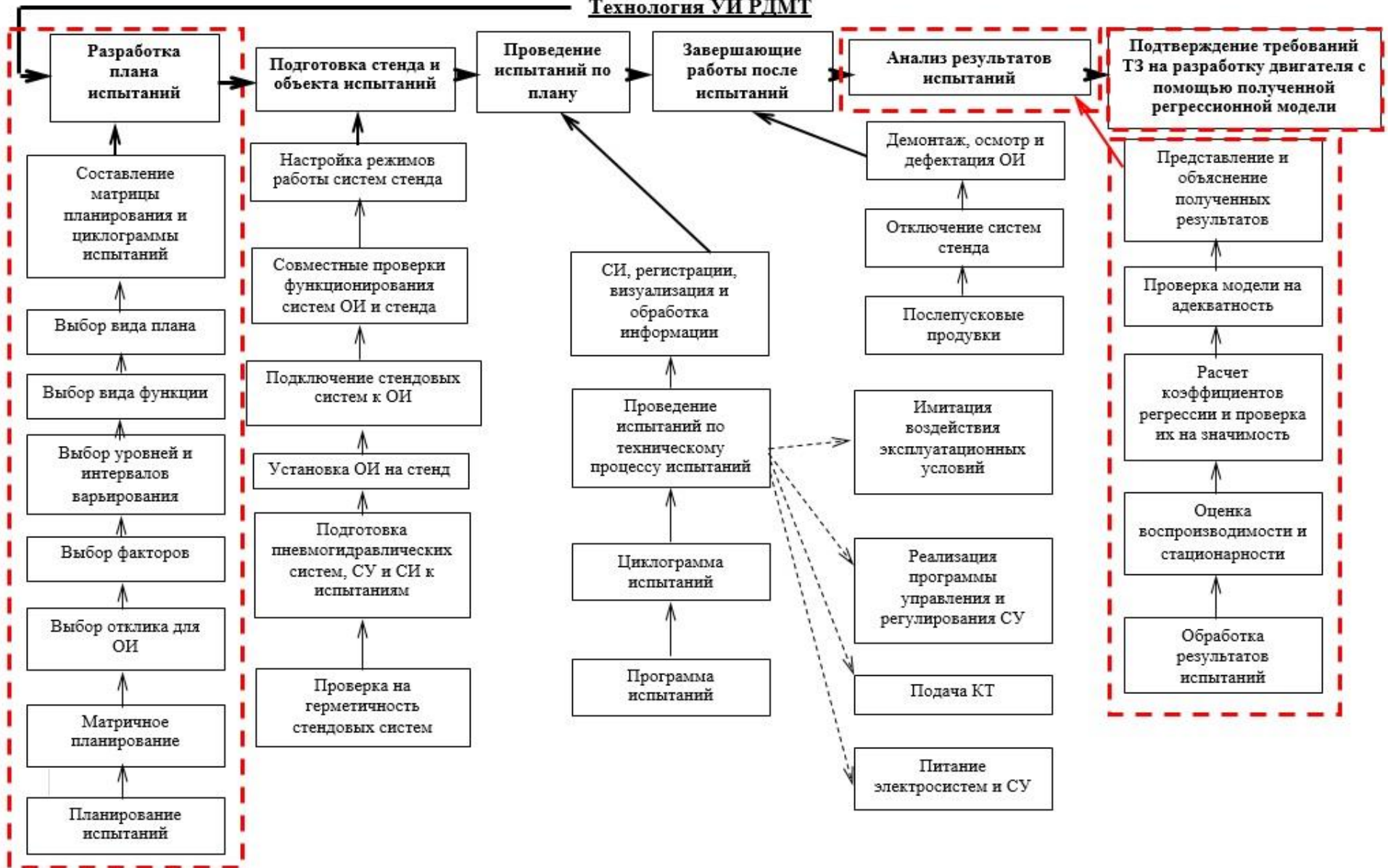


Рисунок 5.1 – Структура технологии УИ РДМТ

Если модель не адекватна, необходимы дополнительные запуски, или изменение интервалов варьирования экспериментов.

После того как модель получена, необходимо объяснить полученные результаты как это показано в главе 4. Для удобства анализа необходимо представить полученные результаты в графическом виде, также с помощью ПО.

Последним этапом проведения испытаний является подтверждение требований на двигатель, заданных в ТЗ, оно проводится с помощью ПО (глава 3) и полученных ранее регрессионных моделей двигателей.

Особенностью данной технологии испытаний является то, что полученные модели можно использовать уже на последующих испытаниях для оперативной оценки основных параметров. В данном случае, в качестве основных параметров рассматривались удельный импульс тяги и температура стенки РДМТ, зависящих от массовых расходов, но с помощью данной технологии возможна оценка любых параметров от необходимых факторов при соблюдении алгоритма.

Таким образом, разработана технология уточняющих испытаний РДМТ. Данную технологию можно использовать для испытаний различных РДМТ по компонентам и уровням тяг. В отличие от существующих технологий, в разработанной – ограничено количество параметров и факторов. Основными параметрами РДМТ являются удельный импульс тяги, который показывает энергетическую эффективность, и температура стенки, которая показывает тепловое состояние конструкции; а факторами являются массовые расходы КТ, которые управляются стендовыми системами. Также, в отличие от существующих технологий, сокращено количество запусков до оптимального уровня, для удельного импульса тяги количество запусков составляет 18, а для температуры стенки – 8 запусков. По результатам экспериментов составляются регрессионные модели, которые в дальнейшем используются для подтверждения требований на двигатель и оперативной оценки параметров РДМТ, что в свою очередь повышает информативность и качество испытаний.

Заключение

1. На основании проведенного исследования можно сделать вывод о том, что в работе предложена усовершенствованная технология уточняющих испытаний, позволяющая сократить объем экспериментальной отработки РДМТ.

2. На основе проведенного анализа существующих методов математического планирования испытаний и экспериментальных исследований разработана методика проведения испытаний для определения рационального объема параметров и определяющих факторов, на основе которых может быть установлена работоспособность РДМТ:

- для удельного импульса тяги выбрана модель второго порядка и ПФЭ с 18 запусками;

- для температуры стенки – квазинелинейная модель и ПФЭ с 8 запусками.

3. С помощью специально разработанного программного обеспечения определены виды функциональных зависимостей и коэффициенты регрессии выбранных параметров, характеризующих работоспособность двигателей, испытанных в лаборатории МАИ (НИУ), с использованием методов планирования экспериментов и регрессионного анализа.

4. Проведено обобщение результатов испытаний РДМТ, с использованием собственных и результатов других авторов, для подтверждения применимости усовершенствованной технологии стендовых испытаний РДМТ, работающих на экологически безопасных КТ.

Для сравнения взяты результаты ЭО двигателей ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша» и EADS Astrium.

Получены адекватные регрессионные модели и подтверждено соответствие параметров двигателя требованиям ТЗ.

Общий вид моделей для удельного импульса тяги и температуры стенки выглядят следующим образом:

$$I_y = b_0 + b_1 \overline{\dot{m}_o} + b_2 \overline{\dot{m}_z} + b_{12} \overline{\dot{m}_o \dot{m}_z} + b_{11} \overline{\dot{m}_o^2} + b_{22} \overline{\dot{m}_z^2},$$

$$T_{cm} = b_0 + b_1 \overline{\dot{m}_o} + b_2 \overline{\dot{m}_e} + b_{12} \overline{\dot{m}_o \dot{m}_e}.$$

5. Представлена усовершенствованная технология уточняющих испытаний для повышения качества ЭО РДМТ, которая позволяет:

- сократить объем ЭО;
- оперативно оценить параметры двигателей;
- проводить испытания двигателей в широком диапазоне тяг (от 10 до 500 Н) на различных КТ.

Технология может быть использована на предприятиях ракетно-космической отрасли при испытаниях РДМТ.

Список сокращений и условных обозначений

АВД	- аварийное выключение двигателя;
АСИ	- автоматизированная система измерений;
АСУ	- автоматизированная система управления;
АТ	- азотный тетраоксид;
АЦП	- аналоговоцифровой преобразователь;
ВВД	- воздух высокого давления;
ВПВ	- водорода пероксид высококонцентрированный;
Г	- горючее;
ГРД	- гибридный ракетный двигатель;
ДИ	- доводочные испытания;
ДЛА	- двигатель летательного аппарата;
ДУ	- двигательная установка;
ДФЭ	- дробный факторный эксперимент;
ЖРД	- жидкостный ракетный двигатель;
РДМТ	- ракетный двигатель малой тяги;
ЗДИ	- завершающие доводочные испытания;
ИИС	- информационно-измерительная система;
КА	- космический аппарат;
КПЭО	- комплексная программа экспериментальной отработки;
КС	- камера сгорания;
КТ	- компоненты топлива;
ЛА	- летательный аппарат;
ЛКИ	- летно-конструкторские испытания;
ММГ	- монометилгидразин;
МНК	- метод наименьших квадратов;
МТКК	- многоразовый транспортный космический корабль;
НДМГ	- несимметричный диметилгидразин;
НИР	- научно-исследовательская работа;

О	- окислитель;
ОДУ	- объединённая двигательная установка;
ОИ	- объект испытаний;
ПГС	- пневмогидросхема;
ПИБ	- полиизобутилен;
ПО	- программное обеспечение;
ПФЭ	- полный факторный эксперимент;
РБ	- разгонный блок;
РД	- ракетный двигатель;
РДМТ	- ракетный двигатель малой тяги;
РДТТ	- ракетный двигатель твердого топлива;
РН	- ракета-носитель;
САЗ	- система аварийной защиты;
САС	- система аварийного спасения;
СИ	- сравнительные испытания;
СИУИ	- силоизмерительное устройство импульсное;
СМП	- система мягкой посадки;
СПД	- стационарный плазменный двигатель;
СУ	- система управления;
СУР	- система управления работой;
СЧ	- составная часть;
ТЗ	- техническое задание;
ЦАП	- цифроаналоговый преобразователь;
УИ	- уточняющие испытания;
ХРД	- химический ракетный двигатель;
ЭД	- экспериментальные данные;
ЭРД	- электроракетный двигатель;
ЯЭУ	- ядерная энергетическая установка.
<i>b</i>	- оценка коэффициентов регрессии β ;

Δb	- доверительный интервал оценки коэффициентов регрессии;
C	- концентрация добавки полиизобутилена;
\bar{C}	- безразмерное значение добавки полиизобутилена;
$D_{воспр}$	- дисперсия воспроизводимости;
$D(x_j)$	- дисперсия в U матрице;
$E(Y)$	- математическое ожидание выходного параметра;
f	- число степеней свободы;
F_a	- площадь среза сопла, м ² ;
$F_{табл}$	- табличное значение критерия Фишера
$F_{эксп}$	- экспериментальное значение критерия Фишера;
H_0	- нулевая гипотеза;
H_1	- конкурирующая гипотеза;
I_y	- удельный импульс тяги м/с [с];
$I_{max}^{TЗ}$	- максимальное значение удельного импульса тяги, заданное в ТЗ, м/с [с];
I_{cp}^p	- расчетное значение удельного импульса тяги по регрессионной модели, м/с [с];
I_{Σ}	- суммарный импульс тяги, м/с [с];
k	- количество факторов;
k_T	- толерантный множитель;
K_m	- соотношение компонентов топлива;
m	- количество параметров в X матрице;
\dot{m}	- массовый расход в двигатель, кг/с;
\dot{m}_2	- массовый расход горючего, кг/с;
$\overline{\dot{m}_2}$	- безразмерное значение массового расхода горючего;
\dot{m}_o	- массовый расход окислителя, кг/с;

$\overline{\dot{m}_o}$	- безразмерное значение массового расхода окислителя;
\dot{m}_Σ	- суммарный массовый расход;
m_i	- число параллельных опытов в i -ой строке матрицы планирования;
$M(x_j)$	- оценка математического ожидания в U матрице;
n	- число опытов;
n_k	- число контрольных опытов;
n_0	- число контрольных опытов в центре плана;
N	- номер неповторного опыта;
N_b	- число значимых коэффициентов регрессии;
p	- число уровней варьирования факторов;
p_a	- давление на срезе сопла, Па;
p_H	- внешнее давление, Па;
p_k	- давление в камере сгорания, Па;
P	- параметрическая вероятность;
Δp_i	- перепад давления на форсунке двигателя в i -ом опыте;
P	- тяга двигателя, Н;
l	- реплика в ДФЭ;
r_{jk}	- коэффициент ковариации нормированных случайных величин;
$S(b_i)$	- стандартное значение b_i ;
t	- время работы двигателя, с;
$t_{кр}$	- критическая точка распределения Стьюдента;
$t_{Ст}$	- коэффициент Стьюдента;
T_Σ	- температура горючего на входе в двигатель, К;
T_{cm}	- температура стенки двигателя, К;
U	- стандартная X матрица;

- u_{ij} - квантиль U матрицы;
- W_a - скорость истечение продуктов сгорания на срезе сопла, м/с;
- x - длина камеры, на которой измеряется температура, м;
- $\{x_j\}$ - вектор значений фактора;
- Δx_i - интервал варьирования;
- \bar{x}_i - значение фактора в безразмерном виде;
- x_{ij} - единичный элемент X матрицы;
- $(x_i)_{\max}$ - максимальное значение фактора;
- $(x_i)_{ном}$ - номинальное значение фактора;
- X - матрица экспериментальных данных;
- $\{X\}^T$ - транспонированная матрица по отношению к матрице $\{X\}$;
- y - равно $E(Y)$;
- y^* - условное обозначение выходного параметра, где
 $y^* = f(x_2, x_3, \dots, x_m)$;
- \hat{y}_i - функция, где значения параметра, рассчитаны по уравнению регрессии;
- $y_{i,j}$ - результат j -го опыта в i -ой строке матрицы;
- $(y_i)_{cp}$ - средняя величина выходного параметра для совокупности проведенных опытов при данном сочетании факторов;
- Y - значение выходного параметра;
- α - «звездная» точка в композиционном плане;
- α_o - коэффициент избытка окислителя;
- β - коэффициент регрессии;
- β_0 - значение выходного параметра на номинальном режиме;
- β_i - тангенс угла наклона касательной к поверхности функции отклика по отношению к оси i -го фактора
- γ - доверительная вероятность;

- ξ_{jk} - оценка корреляционного момента X матрицы;
- ξ - ошибка аппроксимации экспериментальных данных;
- $\sigma(x_j)$ - среднеквадратичное отклонение в U матрице;
- τ - интегральное время работы двигателя.

Список использованных источников

1. Авдуевский, В.С. Надежность и эффективность в технике: Справочник в десяти томах. Экспериментальная отработка и испытания/ В.С. Авдуевский, В.И. Кузнецов, Н.Д. Кузнецов и др. – М.: «Машиностроение», 1989. –6 т.
2. Адлер Ю. П. Введение в планирование эксперимента, «Металлургия», 1969 – 155 с.
3. Адлер Ю. П., Грановский Ю.В. Обзор прикладных работ по планированию эксперимента, Препринт №1-3, Изд. МГУ, 1967-70 гг. – 99 с.
4. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий/ Изд. второе перераб. и доп. Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю. В. Грановский. Издательство «Наука». М., 1976. – 280 с.
5. Алабин М.А., Ройтман А.Б. Корреляционно-регрессионный анализ статистических данных в двигателестроении. М.: «Машиностроение», 1974. – 124 с.
6. Александровская Л.Н. Теоретические основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем/ Л.Н. Александровская, В.И. Круглов, А.Г. Кузнецов и др.: Учеб. пособие. – М.: Логос, 2003. – 736 с.
7. Алемасов В. Е., Дрегалин А. Ф., Тишин А. П. Теория ракетных двигателей. - М.: Машиностроение, 1980. – 464 с.
8. Архипов Б. А. Исследование и разработка катодов нового поколения для стационарных плазменных двигателей (СПД): диссертация на соискание ученой степени докт. техн. наук: 05.07.10/ Архипов Борис Алексеевич – Калининград, 1998. – 302 с.
9. Бершадский В.А., Коломенцев А.И. Основы технологии стендовых испытаний двигательных установок жидкостных ракет: Автономная отработка. – М.: Изд-во МАИ, 2014. – 216 с.

10. Богачева Д. Ю., Боровик И. Н., Воробьев А. Г., **Хохлов А.Н.** Разработка экспериментально-расчетной системы исследования эффективности завесного охлаждения жидкостного ракетного двигателя малой тяги. [Электронный ресурс]. Электронный журнал «Труды МАИ» №52, 2012. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=29479>.
11. Боровик И.Н., Воробьев А.Г., **Хохлов А. Н.** и др. Модернизация испытательного огневого стенда для исследования рабочих процессов в жидкостных ракетных двигателях малых тяг на экологически чистых компонентах топлива, Вестник МАИ, т. 17, №1, 2010, М., МАИ. – с 97-102.
12. Боровик И.Н. Жидкостной ракетный двигатель малой тяги на топливе газообразный кислород и газообразный метан - разработка, проектирование, испытания и анализ полученных результатов/ Боровик И.Н., Воробьев А.Г., **Хохлов А.Н.** и др. Вестник МАИ, т. 18, №3, 2011, Москва, МАИ.
13. Браверман Э.М., Мучник И.Б. Структурные методы обработки эмпирических данных. – М.: «Наука», 1983. – 464 с.
14. Васильев, А. П. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей/ А. П. Васильев, В.М. Кудрявцев, В.А. Кузнецов и др. - М.: «Высшая школа», 1975. – 703 с.
15. Васильев, А. П. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей. В 2 кн. Кн.1. Учеб. для авиац. спец. вузов/ А.П. Васильев, В.М. Кудрявцев, В.А. Кузнецов и др.; Под ред. В.М. Кудрявцева. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1993. – 368 с.
16. Володин В.А., Ткаченко Ю.Н. Конструкция и проектирование ракетных двигателей/ Под ред. В.П. Советского. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1984. – 269 с.
17. Волокитин Д.А., Корнеев А.К., **Хохлов А.Н.** Информационное обеспечение огневых испытаний на стенде жидкостных ракетных двигателей малых тяг/ Ракетно-космические двигательные установки: Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции. Москва, октябрь, 2010 - М.: ООО "Диона". – с 27-29.

18. Волков Е.Б., Головков Л.Г., Сырицын Т.А. Жидкостные ракетные двигатели. – М.: Воениздат, 1970. – 592 с.
19. Волков Е.Б., Судаков Р.С., Сырицын Т.А. Основы теории надежности ракетных двигателей. - М.: Машиностроение, 1974. – 400 с.
20. Воробьев А.Г. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012615618 «Программный комплекс для автоматизации испытаний жидкостных ракетных двигателей малых тяг, работающих на экологически чистых компонентах топлива высококонцентрированная перекись водорода-керосин»/ Воробьев А.Г., Боровик И.Н., Заранкевич И.А., Хохлов А.Н., 2012.
21. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: «Высшая школа», 1999. – 479 с.
22. Гапонов В.Д. Улучшение работы ЖРД при введении высокомолекулярных полимеров в компоненты топлива/ В.Д. Гапонов, Ю.И. Каналин, И.А. Клепиков, Л.Е. Стернин. Труды НПО Энергомаш. М., 2000 №18. – с. 27-37
23. Горшков О.А., Муравлев В.А., Шагайда А.А. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов. Под ред. академика РАН А.С. Коротеева. М.: Машиностроение, 2008. – 280 с.
24. ГОСТ 16504-81. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2011.
25. Добровольский М. В. Жидкостные ракетные двигатели. М.: «Машиностроение», 1968. – 398 с.
26. Добровольский М.В. Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования/ Под ред. Д.А. Ягодникова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 488 с.
27. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. - М.: «Статистика», 1973. – 366 с.

28. Дружин А.Н. Тепловая и энергетическая эффективность до и сверхзвуковых газовых завес в ракетных двигателях малой тяги: диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.07.05/ Дружин Алексей Николаевич – Самара, 2002. – 213 с.
29. Дубров А.М., Мхитарян В.С., Трошин Л.И. Многомерные статистические методы. – М.: Финансы и статистика, 1998. – 352 с.
30. Еремин В.В. Информационно-энергетический анализ эффективности испытаний космической техники на высоковакуумных и имитационных стендах. Изд. МАИ-ПРИНТ, 2015. – 125 с.
31. Заранкевич И.А, Прохоров А.В., Хохлов А.Н. Развитие измерительно-информационной системы стенда огневых испытаний РДМТ. Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докладов междунар. науч.-техн. конф. 28-30 июня 2011 г. - Самара: СГАУ, 2011. В 2 Ч. Ч.2. – с 38.
32. Зрелов В.И., Серегин Е.П. Жидкостные ракетные топлива. - М.: «Химия», 1975. – 320 с.
33. Информация по двигателю S10, разработки EADS Astrium [Электронный ресурс]. – Режим доступа: «<http://cs.astrium.eads.net/sp/brochures/thrusters/10N%20Thruster.pdf>».
34. Информация по двигателю S400, разработки EADS Astrium [Электронный ресурс]. – Режим доступа: «<http://cs.astrium.eads.net/sp/brochures/apogee-engines/400N%20Engine.pdf>».
35. Жуковский, А.Е. Испытания жидкостных ракетных двигателей. Учеб. пособие для авиац. специальностей вузов/ А.Е. Жуковский, В.С. Кондрусев, В.Я. Левин, В.В. Окорочков; под ред. В.Я. Левина – М.: Машиностроение, 1981. – 199 с.
36. Калинин, В.А. Технология производства ракетных двигателей твердого топлива: учеб. пособие/ Калинин В.А., Ягодников Д.А. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 688 с.
37. Карманов В.С. Планирование эксперимента в задачах анализа данных типа времени жизни: диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.13.17/ Карманов Виталий Сергеевич. – Новосибирск, 2010. – 136 с.

38. Кассандрова О. Н., Лебедев В.В. Обработка результатов наблюдений. - М.: «Наука», 1970. – 103 с.
39. Кесаев Х.В., Трофимов Р.С. Надежность двигателей летательных аппаратов/ Учебник для студентов втузов. –М.: «Машиностроение», 1982. – 136 с.
40. Козлов А.А., Лизуневич М.М., Хохлов А.Н. и др. Разработка и модернизация пневмогидросхемы, системы измерения и управления стендом для испытания РДМТ/ Труды 2-ой Общероссийской молодежной науч.-техн. конф. "Молодежь. Техника. Космос". Балт. гос. техн. ун-т. - СПб., 2010. – с 31-33.
41. Колеников С.О. Прикладной экономический анализ в статистическом пакете Stata. «Российская экономическая школа», 2000. – 111 с.
42. Коломенцев А.И. Обеспечение надежности двигательных установок: Тексты лекций. Коломенцев А.И., Осипов Г.Б. – М.: Изд-во МАИ, 1992. – 95 с
43. Коломенцев А.И. Определение перепада давления на форсунке керосина с различной концентрацией добавки полиизобутилена с использованием метода регрессионного анализа/ Коломенцев А.И., Ташев В.П., Хохлов А.Н. Журнал «Двигатель». №6 (84), 2012. – с. 28-29.
44. Коломенцев А.И. Регрессионная модель температуры стенки камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя малой тяги/ Коломенцев А.И., Хохлов А.Н. Труды 4-ой Общероссийской молодежной науч.-техн. конф. "Молодежь. Техника. Космос". Балт. гос. техн. ун-т. - СПб., 2012. – с 33.
45. Коломенцев А.И. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013615794 «Планирование и обработка результатов испытаний жидкостных ракетных двигателей малых тяг» / Коломенцев А.И., Хохлов А.Н., 2013.
46. Коломенцев А.И. Учебное пособие для курсовой работы по испытаниям и обеспечению надежности жидкостных ракетных двигателей/ Издательство «МАИ-ПРИНТ», 2008. – 56 с.

47. Конспект курса лекций «Статистическая обработка результатов испытаний. Корреляционный анализ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dvo.sut.ru/libr/opds/i130hod2/6.htm>.
48. Конспект курса лекций «Статистическая обработка результатов испытаний. Регрессионный анализ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dvo.sut.ru/libr/opds/i130hod2/7.htm>.
49. Кочанов А.В. Исследование проблем создания ракетных двигателей малой тяги на экологически чистых газообразных топливах/ Кочанов А.В., Клименко А.Г. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Машиностроение”. 2006. № 3. С 64-73.
50. Мелькумов, Т.М. Ракетные двигатели/Т.М. Мелькумов Н.И., Мелик-Пашаев, П.Г. Чистяков, А.С. Шнуков. - М.: Машиностроение, 1976. – 400 с.
51. Мельникова Н.С. Экспериментальное подтверждение достоверности регрессионной модели расчета температуры газа ГТД/ Н. С. Мельникова, А. А. Гуминский // Полет. - 2010. - N 6. - С. 48-51.
52. Моисеев В.А. Технология производства жидкостных ракетных двигателей: Учебник / В.А. Моисеев, В.А. Тарасов, В.А. Колмыков; А.С. Филимонов; под ред. В.А. Моисеева и В.А. Тарасова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 381 с.
53. Налимов В.В. Голикова Т.И. Логическое основание планирования эксперимента, 2-е издание, перераб и доп. М., «Металлургия», 1980. – 152 с.
54. Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. Издательство «Наука». М., 1965. – 340 с.
55. Налимов, В.В. Теория эксперимента/ Налимов В.В. Физико-математическая библиотека инженера. Изд. «Наука». Главная редакция физико-математической литературы, 1971. – 208 с.
56. Полухин Д.А. Отработка пневмогидросистем двигательных установок ракет-носителей и космических аппаратов с ЖРД/ Д.А. Полухин, В.М. Орещенко, В.А. Морозов – М.: Машиностроение, 1987. – 248 с.

57. Программа-методика исследовательских испытаний двигателей ДМТ-МАИ 200К и ДМТ-МАИ 500П/ В.Ю. Рябых, В.В. Борисов, С.Ю. Теплухин и др. – М.: 2009.

58. Разработка предложений и рекомендаций по внедрению двигательных установок на экологически чистых компонентах топлива. Отчет о НИР «Магистраль», этап 4 (Задел-Матрица) № 851-2124/11-4-2012-4112-4/12/ Гусев Ю.Г., Пильников А.В., Роднов С.А., и др. – Королев: ФГУП ЦНИИмаш, 2012. – 94 с.

59. Разработка предложений и рекомендаций по приоритетным направлениям развития ДУ КА с целью совершенствования их характеристик, включая ЖРД, ЭРД, РДТТ и др. Отчет о НИР «Магистраль», этап 5 (Задел-Матрица) №851-2124/11-5-2013-4112/ Гусев Ю.Г., Роднов С.А., Хохлов А.Н. и др. – Королев: ФГУП ЦНИИмаш, 2013. – 126 с.

60. Синярев Г. Б., Добровольский М. В. Жидкостные ракетные двигатели. М.:Оборонгиз, 1955. – 588 с.

61. Трофимов Р.С. Вероятностные методы планирования и отработки ДЛА. – М.: «Машиностроение», 1991. – 135 с.

62. Хохлов А.Н. Разработка мер экологической безопасности на испытательном стенде РДМТ/ Проблема и перспективы развития двигателестроения: материалы докладов междунар. науч.-техн. конф. 28-30 июня, 2011 г. – Самара: СГАУ, 2011. В 2 Ч. Ч. 2. – с 53.

63. Чуян, Р.К. Методы математического моделирования двигателей летательных аппаратов./ Чуян Р.К. Учеб. пособие для студентов авиадвигателестроительных специальностей вузов. – М.: «Машиностроение», 1988. – 288 с.

64. A review of statistical methods for quality improvement and control in nanotechnology. Jue-Chyi Lu, Shuen-Lin Seng, Eaibo Wang. Journal of quality technology, vol 41, №2, April, 2009. Pp. 148-164.

65. An optimized hybrid rocket motor for SARA Platform reentry system. Pedro Luiz Kaled Da Cas, Cristiano Queiroz Vivanova, Manuel Nascimento Dias Barcelos Jr,

Carlos Alberta Gugel Veras. *J Aerosp. Technol. Manag.*, Sao Jose dos Campos, Vol.4, No3, pp. 317-330, Jul.-Sep., 2012. Pp 317-330.

66. Design of experiments in chemical engineering, Zivorad R. Lazic. Wiley-Vchverlag Gmbh @ Co, KGaA, Weinheim, 2004. – 610 p.

67. Development of Scalable Space–Time Averaged Regression Rate Expressions for Hybrid Rockets. M. Arif Karabeyoglu and Brian J. Cantwell, *Journal of propulsion and power* Vol. 23, No. 4, July–August, 2007. Pp 1-21.

68. Dual response surface methodology: Applicable always? Rabindra Nath Das. *ProbStat Forum*, Volume 04, October 2011, ISSN 0974-3235. Pp 98-103.

69. Experimental Study of the Nozzle Surface Regression Rate to the Heat Transfer. Tae-Ho Lee. *Journal of propulsion and power* Vol. 22, No. 1, January–February, 2006. Pp 221-223.

70. Optimization for Aircraft Engines with Regression and Neural-Network Analysis Approximators. Surya N. Patnaik. *Journal of propulsion and power* Vol. 17, No. 1, January–February, 2001. . – 610 p.

71. Performance Test Results of the NASA-457M v2 Hall Thruster. George C. Soulas, Thomas W. Haag, Daniel A. Herman, Wensheng Huang, Hani Kamhawi, and RohitShastry. AIAA–2012–3940, NASA/TM—2012-217711, August, 2012. – 20 p.

72. Predicting Hybrid Propellant Regression Rate Using Response Surfaces. Robert A. Frederick Jr. *Journal of propulsion and power* Vol. 25, No. 3, May–June, 2009. Pp. 815-818.

73. Quality improvement with design of experiments: a response surface approach. I.N. Vuchkov, Lidia N, N.L. Boyadjieva. *Topics in safety, risk, reliability and quality*, Kluwer academic publishers, 2001. – 400 p.

74. Regression-Rate and Heat-Transfer Correlations for Hybrid Rocket Combustion. Martin J. Chiaverini, Kenneth K. Kuo, Arie Peretz, and George C. Harting *Journal of propulsion and power* Vol. 17, No. 1, January–February, 2001. Pp. 99-110.

75. Regression Rates Study of Mixed Hybrid Propellants. Robert A. Frederick Jr., J. Joshua Whitehead, L. Richard Knox, and Marlow D. Moser *Journal of propulsion and power* Vol. 23, No. 1, January–February, 2007. Pp. 175-180.

76. Response surface designs. Norman R. Draper, Dennis K. J. Lin. S. Gosh and C.R. Rao, eds., Handbook of Statistics, Vol.13. 1996 Elsevier Science B.V. Pp. 343-375.
77. Response surface methodology. Andre I. Khuri, Siuli Mukhopadhyay. John Wiley & Sons, Inc. Volume 2, March/April, 2010. Pp. 128-149.
78. Response surface methodology. Process and product optimization using designed experiments. Third edition. Raymond H. Myers, Douglas C. Montgomery, Christine M. Anderson-Cook. A John Wiley & Sons, inc., Publication. 2009. – 704 p
79. Using design of experiments and response surface methodology as an approach to understand and optimize operational air power. Marvin “Lenard” Simpson, Jr., Resit Unal. RSM to Optimize Air Power .The International C2 Journal. Vol 4, No 3.
80. Solid-Fuel Ramjet Fuel Regression Rate/Thrust Modulation. W. H. Campbell Jr., B. N. Ko,t S. R. Lowe, and D. W. Netzerj Journal of propulsion and power Vol. 8, No. 3, May-June, 1992. Pp. 624-629.
81. Solid-Fuel Regression Rate Behavior of Vortex Hybrid Rocket Engines. William H. Knuth, Martin J. Chiaverini, J. Arthur Sauer, and Daniel J. Gramer Journal of propulsion and power Vol. 18, No. 3, May–June, 2002. Pp. 600-609.
82. V.D. Gaponov, V.K. Chvanov, I.N. Borovik end others. The Investigation of Influence Polyisobutylene Additions to Kerosene at the Efficiency of Combustion. Heat Analysis and Thermodynamic Effects, Edited by Amimul Ahsan, Intech, 2011. – Pp. 295-312.

Приложение А. Результаты работы программного обеспечения

ДМТ-МАИ-500П

Выбирайте подсвеченные области

Введите отклик:

y :=
Темп стенки

Введите количество входных факторов

k := 2

Введите число повторных опытов

n := 2

Выберите вид уравнения регрессии

regr :=
 Линейное
 Квазилинейное
 Квадратичное

Рекомендация: для квадратичной модели ПФЭ подходит только, если k меньше 4

Назначьте интервалы варьирования входных факторов

x1	x2
max _{x1} := 179	max _{x2} := 29
min _{x1} := 162	min _{x2} := 21
nom _{x1} := 0	nom _{x2} := 0

Вы выбрали тип плана:

ПФЭ ДФЭ

plan = "ПФЭ"

Хатрли BoxWilson

Откройте правильную область соответственно цвету

Задайте число опытов в центре плана с учетом обязательного повтора опытов

n0 := 1

status = "продолжайте работу"

- сравнение количества экспериментов и коэффициентов регрессии

status₁ = "продолжайте работу"

- проверка по максимальному количеству экспериментов для квадратичной модели

Число точек плана (опытов)

$$N_{\text{pfe}} = 4$$

Число коэффициентов регрессии

$$Nb_{\text{pfe}} = 4$$

Матрица планирования

Матрица со значениями
входных факторов

$$M_{\text{pfe}} = \begin{pmatrix} 1 & 179 & 29 \\ 2 & 162 & 29 \\ 3 & 162 & 21 \\ 4 & 179 & 21 \end{pmatrix}$$

Столбец рандомизации с
учетом числа
повторных опытов n

$$md_{\text{pfe}} = \begin{pmatrix} 7 \\ 6 \\ 2 \\ 4 \\ 3 \\ 5 \\ 1 \\ 8 \end{pmatrix}$$

Матрица с кодовыми значениями
входных факторов

$$M_{\text{pfe.c}} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & 1 \\ 3 & -1 & -1 \\ 4 & 1 & -1 \end{pmatrix}$$

Введите начальные данные

Введите результат экспериментов в виде матрицы.

$$Y := \begin{pmatrix} 371 \\ 363 \\ 386 \\ 378 \\ 408 \\ 400 \\ 470 \\ 460 \end{pmatrix}$$

Введите число неповторных опытов
(строк матрицы планирования)

$$N_{\text{повт}} := 4$$

Введите матрицу планирования в кодовом виде

$$M := \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \\ -1 & -1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$$

Введите количество контрольных опытов

$$n_k := 2$$

Введите количество коэффициентов регрессии и порядок уравнения регрессионной зависимости

$$N_b := 4$$

$$nr := 2$$

Введите доверительную вероятность

$$\gamma := 0.95$$

Введите максимальную и минимальную степени свободы

$$f_{\max} := n - 1 = 1$$

$$f_{\min} := n - 1 = 1$$

vospr = "Опыты воспроизводимы"

stac = "Опыты стационарны"

Вектор коэффициентов регрессии

$$b_1 = \begin{pmatrix} 404.5 \\ 11.5 \\ -30 \\ -19 \end{pmatrix}$$

Доверительный интервал коэффициентов регрессии

$$\Delta b = 8.387$$

Вектор коэффициентов регрессии с учетом проверки их на значимость

$$bb = \begin{pmatrix} 404.5 \\ 11.5 \\ -30 \\ -19 \end{pmatrix}$$

Введите значения входных факторов для функции отклика x_1 , x_2 и т.д. в контрольных опытах в КОДОВОМ виде

$$x_1 := 1 \quad x_2 := 1$$

Рассчитайте Y_t с помощью уравнения регрессии, подставив нужное количество входных факторов

$$Y_t(x_1, x_2) := 1$$

$$Y_t(x_1, x_2) = (367)$$

Введите матрицу расчетных по уравнению регрессии значений выходного параметра в контрольных опытах

$$Y_{\text{calc}} := \begin{pmatrix} 367 \\ 367 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Введите матрицу экспериментальных значений выходного параметра в контрольных опытах

$$Y_e := \begin{pmatrix} 371 \\ 363 \\ 0 \end{pmatrix}$$

ad = "Модель адекватна"

Выбирайте подсвеченные области

Введите отклик:

$y :=$ Перепад давления на форсунке

Введите количество входных факторов

$k := 2$

Введите число повторных опытов для определения дисперсии

$n := 2$

Выберите вид уравнения регрессии

$regr :=$
 Линейное
 Квазинелинейное
 Квадратичное

Рекомендация: для квадратичной модели ПФЭ подходит только, если k меньше 4

Если Вы выбрали квадратичное уравнение - выберите план

$regr_1 :=$
 ПФЭ
 Хартли
 Box-Wilson

$regr$

Назначьте интервалы варьирования входных факторов

x_1	x_2
$max_{x_1} := 30$	$max_{x_2} := 0.1$
$min_{x_1} := 16$	$min_{x_2} := 0$
$nom_{x_1} := 23$	$nom_{x_2} := 0.05$

Вы выбрали тип плана:

$plan =$ "ПФЭ"

ПФЭ ДФЭ

Хартли BoxWilson

Откройте правильную область соответственно цвету

Задайте число опытов в центре плана

$n0 := 1$

$status =$ "продолжайте работу"

- сравнение количества экспериментов и коэффициентов регрессии

$status_1 =$ "продолжайте работу"

- проверка по максимальному количеству экспериментов для квадратичной модели

Число точек плана (опытов)

$$N_{pfe} = 9$$

Число коэффициентов регрессии

$$Nb_{pfe} = 6$$

Матрица планирования

Матрица со значениями входных факторов

$$M_{pfe} = \begin{pmatrix} 1 & 30 & 0.1 \\ 2 & 16 & 0.1 \\ 3 & 16 & 0 \\ 4 & 30 & 0 \\ 5 & 23 & 0.05 \\ 6 & 16 & 0.05 \\ 7 & 30 & 0.05 \\ 8 & 23 & 0.1 \\ 9 & 23 & 0 \end{pmatrix}$$

Столбец рандомизации с учетом числа повторных опытов n

	0
0	16
1	13
2	2
3	12
4	1
5	18
6	15
7	3
$md_{pfe} = 8$	8
9	10
10	5
11	9
12	11
13	6
14	7
15	17
16	4
17	14

Матрица с кодовыми значениями входных факторов

$$M_{pfe.c} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & 1 \\ 3 & -1 & -1 \\ 4 & 1 & -1 \\ 5 & 0 & 0 \\ 6 & -1 & 0 \\ 7 & 1 & 0 \\ 8 & 0 & 1 \\ 9 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Введите начальные данные

Введите результат экспериментов в виде матрицы.

Y :=

10.65
10.54
2.3
2.26
3.79
3.75
12.38
12.2
11.5
11.39
6.5
6.41
3.07
3.03
7.07
6.98
6.63
6.56

Введите число неповторных опытов
(строк матрицы планирования)

N := 9

Введите матрицу планирования в кодовом виде

$$M := \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \\ -1 & -1 \\ 1 & -1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Введите количество контрольных опытов

$$n_k := 3$$

Введите количество коэффициентов регрессии и порядок уравнения регрессионной зависимости

$$N_b := 6$$

$$nr := 2$$

Введите доверительную вероятность

$$\gamma := 0.95$$

Введите максимальную и минимальную степени свободы

$$f_{\max} := n - 1 = 1$$

$$f_{\min} := n - 1 = 1$$

vospr = "Опыты воспроизводимы"

stac = "Опыты стационарны"

$$R = \begin{pmatrix} \text{"Term"} & \text{"Coefficient"} & \text{"Std Error"} & \text{"95\% CI Low"} & \text{"95\% CI High"} & \text{"VIF"} & \text{"T"} & \text{"P"} \\ \text{"Intercept"} & 6.666 & 0.258 & 5.844 & 7.487 & \text{NaN} & 25.82 & 6.371 \times 10^{-5} \\ \text{"A"} & 4.205 & 0.141 & 3.755 & 4.655 & 1 & 29.739 & 4.175 \times 10^{-5} \\ \text{"B"} & -0.626 & 0.141 & -1.076 & -0.176 & 1 & -4.426 & 0.011 \\ \text{"AB"} & -0.051 & 0.173 & -0.602 & 0.5 & 1 & -0.296 & 0.393 \\ \text{"AA"} & 0.547 & 0.245 & -0.233 & 1.326 & 1 & 2.232 & 0.056 \\ \text{"BB"} & 0.039 & 0.245 & -0.74 & 0.819 & 1 & 0.16 & 0.442 \end{pmatrix}$$

"Term". Обозначения коэффициентов регрессии

"Coefficient" Значения коэффициентов регрессии

"Std Error" Стандартное отклонение для коэффициентов регрессии

"95% CI Low" ("95% CI High") Нижняя и верхняя граница доверительного интервала коэффициентов регрессии

"VIF" Коэффициент увеличения дисперсии - уровень увеличения дисперсии коэффициентов регрессии из-за коллинеарности

"T" Проверка коэффициентов регрессии на значимость по критерию Стьюдента

"P" P-значение - вероятность отвергнуть значимый коэффициент
Вектор коэффициентов регрессии

$$b = \begin{pmatrix} 6.666 \\ 4.205 \\ -0.626 \\ -0.051 \\ 0.547 \\ 0.039 \end{pmatrix}$$

Доверительный интервал коэффициентов регрессии

$$\Delta b = 0.051$$

Доверительный интервал коэффициентов регрессии

$$\Delta b = 0.051$$

Вектор коэффициентов регрессии с учетом проверки их на значимость

$$bb = \begin{pmatrix} 6.666 \\ 4.205 \\ -0.626 \\ -0.051 \\ 0.547 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Введите значения входных факторов для функции отклика x.1, x.2 и т.д. в контрольных опытах в КОДОВОМ виде

$$x_1 := 0 \quad x_2 := 0 \quad x_3 := 0 \quad x_4 := 0 \quad x_5 := 0 \quad x_6 := 0$$

Рассчитайте Yt с помощью уравнения регрессии, подставив нужное количество входных факторов

$$Y_t(x_1, x_2) := \text{interp}\left[r, M, I_{sr}, \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}\right] \quad Y_t(x_1, x_2) = 6.666$$

Введите матрицу расчетных по уравнению регрессии значений выходного параметра в контрольных опытах

$$Y_{\text{rw}} := \begin{pmatrix} 6.666 \\ 6.666 \\ 6.666 \end{pmatrix}$$

Введите матрицу экспериментальных значений выходного параметра в контрольных опытах

$$Y_e := \begin{pmatrix} 6.63 \\ 6.56 \\ 6.61 \end{pmatrix}$$

ad = "Модель адекватна"

РДМТ100

Выбирайте подсвеченные области

Введите отклик:

y :=
Удельный импульс

Введите количество входных факторов

k := 2

Введите число повторных опытов для определения дисперсии

n := 2

Выберите вид уравнения регрессии

regr :=
 Линейное
 Квазинелинейное
 Квадратичное

Рекомендация: для квадратичной модели ПФЭ подходит только, если k меньше 4

Если Вы выбрали квадратичное уравнение - выберите план

regr₁ :=
 ПФЭ
 Хартли
 Вок-Wilson
 regr

Назначьте интервалы варьирования входных факторов

x1	x2
max _{x1} := 17.1	max _{x2} := 4
min _{x1} := 7.8	min _{x2} := 1.4
nom _{x1} := 12.45	nom _{x2} := 2.7

Вы выбрали тип плана:

ПФЭ ДФЭ

plan = "ПФЭ"

Хартли ВокWilson

Откройте правильную область соответственно цвету

Задайте число опытов в центре плана

n0 := 1

status = "продолжайте работу"

- сравнение количества экспериментов и коэффициентов регрессии

status₁ = "продолжайте работу"

- проверка по максимальному количеству экспериментов для квадратичной модели

Число точек плана (опытов)

$$N_{pfe} = 9$$

Число коэффициентов регрессии

$$Nb_{pfe} = 6$$

Матрица планирования

Матрица со значениями
входных факторов

$$M_{pfe} = \begin{pmatrix} 1 & 17.1 & 4 \\ 2 & 7.8 & 4 \\ 3 & 7.8 & 1.4 \\ 4 & 17.1 & 1.4 \\ 5 & 12.45 & 2.7 \\ 6 & 7.8 & 2.7 \\ 7 & 17.1 & 2.7 \\ 8 & 12.45 & 4 \\ 9 & 12.45 & 1.4 \end{pmatrix}$$

Столбец рандомизации с
учетом числа
повторных опытов n

	0
0	16
1	13
2	2
3	12
4	1
5	18
6	15
7	3
$md_{pfe} = 8$	8
9	10
10	5
11	9
12	11
13	6
14	7
15	17
16	4
17	14

Матрица с кодовыми значениями
входных факторов

$$M_{pfe.c} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & 1 \\ 3 & -1 & -1 \\ 4 & 1 & -1 \\ 5 & 0 & 0 \\ 6 & -1 & 0 \\ 7 & 1 & 0 \\ 8 & 0 & 1 \\ 9 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Введите начальные данные

Введите результат экспериментов в виде матрицы.

$Y :=$

396
398
428
426
397
395
390
385
389
386
438
436
423
420
381
383
417
419

Введите число неповторных опытов
(строк матрицы планирования)

$$N := 9$$

Введите матрицу планирования в кодовом виде

$$M := \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \\ -1 & -1 \\ 1 & -1 \\ 0 & 0 \\ -1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Введите количество контрольных опытов

$$n_k := 3$$

Введите количество коэффициентов регрессии и порядок уравнения регрессионной зависимости

$$N_b := 6$$

$$nr := 2$$

Введите доверительную вероятность

$$\gamma := 0.95$$

Введите максимальную и минимальную степени свободы

$$f_{\max} := n - 1 = 1$$

$$f_{\min} := n - 1 = 1$$

vospr = "Опыты воспроизводимы"

stac = "Опыты стационарны"

$$R = \begin{pmatrix} \text{"Term"} & \text{"Coefficient"} & \text{"Std Error"} & \text{"95\% CI Low"} & \text{"95\% CI High"} & \text{"VIF"} & \text{"T"} & \text{"P"} \\ \text{"Intercept"} & 405.222 & 18.084 & 347.67 & 462.775 & \text{NaN} & 22.407 & 9.731 \times 10^{-5} \\ \text{"A"} & -9 & 9.905 & -40.523 & 22.523 & 1 & -0.909 & 0.215 \\ \text{"B"} & 0.75 & 9.905 & -30.773 & 32.273 & 1 & 0.076 & 0.472 \\ \text{"AB"} & -5.375 & 12.131 & -43.983 & 33.233 & 1 & -0.443 & 0.344 \\ \text{"AA"} & 15.167 & 17.156 & -39.433 & 69.766 & 1 & 0.884 & 0.221 \\ \text{"BB"} & -14.083 & 17.156 & -68.683 & 40.516 & 1 & -0.821 & 0.236 \end{pmatrix}$$

"Term". Обозначения коэффициентов регрессии

"Coefficient" Значения коэффициентов регрессии

"Std Error" Стандартное отклонение для коэффициентов регрессии

"95% CI Low" ("95% CI High") Нижняя и верхняя граница доверительного интервала коэффициентов регрессии

"VIF" Коэффициент увеличения дисперсии - уровень увеличения дисперсии коэффициентов регрессии из-за коллинеарности

"T" Проверка коэффициентов регрессии на значимость по критерию Стьюдента

"P" P-значение - вероятность отвергнуть значимый коэффициент
Вектор коэффициентов регрессии

$$b = \begin{pmatrix} 405.222 \\ -9 \\ 0.75 \\ -5.375 \\ 15.167 \\ -14.083 \end{pmatrix}$$

Доверительный интервал коэффициентов регрессии

$$\Delta b = 1.455$$

Вектор коэффициентов регрессии с учетом проверки их на значимость

$$bb = \begin{pmatrix} 405.222 \\ -9 \\ 0 \\ -5.375 \\ 15.167 \\ -14.083 \end{pmatrix}$$

Введите значения входных факторов для функции отклика x_1 , x_2 и т.д. в контрольных опытах в КОДОВОМ виде

$$x_1 := -1 \quad x_2 := 1 \quad x_3 := 0 \quad x_4 := 0 \quad x_5 := 0 \quad x_6 := 0$$

Рассчитайте Y_t с помощью уравнения регрессии, подставив нужное количество входных факторов

$$Y_t(x_1, x_2) := \text{interp} \left[r, M, I_{sr}, \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \right] \quad Y_t(x_1, x_2) = 421.431$$

Введите матрицу расчетных по уравнению регрессии значений выходного параметра в контрольных опытах

$$Y_{tw} := \begin{pmatrix} 421.431 \\ 421.431 \\ 421.431 \end{pmatrix}$$

Введите матрицу экспериментальных значений выходного параметра в контрольных опытах

$$Y_e := \begin{pmatrix} 428 \\ 426 \\ 425 \end{pmatrix}$$

ad = "Модель адекватна"

ДМТ-МАИ 200М

Выбирайте подсвеченные области

Введите отклик:

$y :=$ Удельный импульс

Введите количество входных факторов

$k := 2$

Введите число повторных опытов для определения дисперсии

$n := 2$

Выберите вид уравнения регрессии

regр :=
 Линейное
 Квазилинейное
 Квадратичное

Рекомендация: для квадратичной модели ПФЭ подходит только, если k меньше 4

Если Вы выбрали квадратичное уравнение - выберите план

regр₁ :=
 ПФЭ
 Хартли
 Box-Wilson
 regр

Назначьте интервалы варьирования входных факторов

x_1	x_2
$\max_{x_1} := 73$	$\max_{x_2} := 4.5$
$\min_{x_1} := 47$	$\min_{x_2} := 2.5$
$\text{nom}_{x_1} := 60$	$\text{nom}_{x_2} := 3.5$

Вы выбрали тип плана:

ПФЭ ДФЭ

plan = "ПФЭ"

Хартли BoxWilson

Откройте правильную область соответственно цвету

Задайте число опытов в центре плана

$n_0 := 1$

status = "продолжайте работу"

- сравнение количества экспериментов и коэффициентов регрессии

status₁ = "продолжайте работу"

- проверка по максимальному количеству экспериментов для квадратичной модели

Число точек плана (опытов)

$$N_{pfe} = 9$$

Число коэффициентов регрессии

$$Nb_{pfe} = 6$$

Матрица планирования

Матрица со значениями входных факторов

$$M_{pfe} = \begin{pmatrix} 1 & 73 & 4.5 \\ 2 & 47 & 4.5 \\ 3 & 47 & 2.5 \\ 4 & 73 & 2.5 \\ 5 & 60 & 3.5 \\ 6 & 47 & 3.5 \\ 7 & 73 & 3.5 \\ 8 & 60 & 4.5 \\ 9 & 60 & 2.5 \end{pmatrix}$$

Столбец рандомизации с учетом числа повторных опытов n

	0
0	16
1	13
2	2
3	12
4	1
5	18
6	15
7	3
8	8
9	10
10	5
11	9
12	11
13	6
14	7
15	17
16	4
17	14

$$md_{pfe} =$$

Матрица с кодовыми значениями входных факторов

$$M_{pfe.c} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & 1 \\ 3 & -1 & -1 \\ 4 & 1 & -1 \\ 5 & 0 & 0 \\ 6 & -1 & 0 \\ 7 & 1 & 0 \\ 8 & 0 & 1 \\ 9 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Введите начальные данные**Введите результат экспериментов в виде матрицы.**

$$Y := \begin{pmatrix} 131 \\ 127 \\ 108 \\ 105 \\ 137 \\ 135 \\ 121 \\ 118 \\ 136 \\ 133 \\ 118 \\ 116 \\ 133 \\ 131 \\ 118 \\ 114 \\ 120 \\ 117 \end{pmatrix}$$

**Введите число неповторных опытов
(строк матрицы планирования)**

$$N_{\text{max}} := 9$$

Введите матрицу планирования в кодовом виде

$$M := \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \\ -1 & 1 \\ -1 & -1 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ -1 & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Введите количество контрольных опытов

$$n_k := 3$$

Введите количество коэффициентов регрессии и порядок уравнения регрессионной зависимости

$$N_b := 6$$

$$nr := 2$$

Введите доверительную вероятность

$$\gamma := 0.95$$

Введите максимальную и минимальную степени свободы

$$f_{\max} := n - 1 = 1$$

$$f_{\min} := n - 1 = 1$$

vospr = "Опыты воспроизводимы"

stac = "Опыты стационарны"

$$R = \begin{pmatrix} \text{"Term"} & \text{"Coefficient"} & \text{"Std Error"} & \text{"95\% CI Low"} & \text{"95\% CI High"} & \text{"VIF"} & \text{"T"} & \text{"P"} \\ \text{"Intercept"} & 122.278 & 2.748 & 113.532 & 131.023 & \text{NaN} & 44.497 & 1.249 \times 10^{-5} \\ \text{"A"} & -5.833 & 1.505 & -10.623 & -1.043 & 1 & -3.876 & 0.015 \\ \text{"B"} & 9.583 & 1.505 & 4.793 & 14.373 & 1 & 6.367 & 3.92 \times 10^{-3} \\ \text{"AB"} & 1.5 & 1.843 & -4.367 & 7.367 & 1 & 0.814 & 0.238 \\ \text{"AA"} & 0.333 & 2.607 & -7.963 & 8.63 & 1 & 0.128 & 0.453 \\ \text{"BB"} & 1.083 & 2.607 & -7.213 & 9.38 & 1 & 0.416 & 0.353 \end{pmatrix}$$

"Term" . Обозначения коэффициентов регрессии

"Coefficient" Значения коэффициентов регрессии

"Std Error" Стандартное отклонение для коэффициентов регрессии

"95% CI Low" ("95% CI High") Нижняя и верхняя граница доверительного интервала коэффициентов регрессии

"VIF" Коэффициент увеличения дисперсии - уровень увеличения дисперсии коэффициентов регрессии из-за коллинеарности

"T" Проверка коэффициентов регрессии на значимость по критерию Стьюдента

"p" P-значение - вероятность отвергнуть значимый коэффициент
Вектор коэффициентов регрессии

$$b = \begin{pmatrix} 122.278 \\ -5.833 \\ 9.583 \\ 1.5 \\ 0.333 \\ 1.083 \end{pmatrix}$$

Доверительный интервал коэффициентов регрессии

$$\Delta b = 1.49$$

Вектор коэффициентов регрессии с учетом проверки их на значимость

$$bb = \begin{pmatrix} 122.278 \\ -5.833 \\ 9.583 \\ 1.5 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Введите значения входных факторов для функции отклика x_1 , x_2 и т.д. в контрольных опытах в КОДОВОМ виде

$$x_1 := 0 \quad x_2 := 0 \quad x_3 := 0 \quad x_4 := 0 \quad x_5 := 0 \quad x_6 := 0$$

Рассчитайте Y_t с помощью уравнения регрессии, подставив нужное количество входных факторов

$$Y_t(x_1, x_2) := \text{interp}\left[r, M, I_{sr}, \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}\right] \quad Y_t(x_1, x_2) = 122.278$$

Введите матрицу расчетных по уравнению регрессии значений выходного параметра в контрольных опытах

$$Y_{\text{calc}} := \begin{pmatrix} 122.278 \\ 122.278 \\ 122.278 \end{pmatrix}$$

Введите матрицу экспериментальных значений выходного параметра в контрольных опытах

$$Y_e := \begin{pmatrix} 120 \\ 117 \\ 121 \end{pmatrix}$$

ad = "Модель адекватна"

Выбирайте подсвеченные области

Введите отклик:

$y :=$
Темп стенки

Введите количество входных факторов

$k := 2$

Введите число повторных опытов

$n := 2$

Выберите вид уравнения регрессии

$reg :=$
 Линейное
 Квазинелинейное
 Квадратичное

Рекомендация: для квадратичной модели ПФЭ подходит только, если k меньше 4

Назначьте интервалы варьирования входных факторов

x_1	x_2
$\max_{x_1} := 73$	$\max_{x_2} := 4.5$
$\min_{x_1} := 47$	$\min_{x_2} := 2.5$
$\text{nom}_{x_1} := 0$	$\text{nom}_{x_2} := 0$

Вы выбрали тип плана:

ПФЭ ДФЭ

$\text{plan} = \text{"ПФЭ"}$

Хатрли BoxWilson

Откройте правильную область соответственно цвету

Задайте число опытов в центре плана с учетом обязательного повтора опытов

$n_0 := 1$

$\text{status} = \text{"продолжайте работу"}$

- сравнение количества экспериментов и коэффициентов регрессии

$\text{status}_1 = \text{"продолжайте работу"}$

- проверка по максимальному количеству экспериментов для квадратичной модели

Число точек плана (опытов)

$$N_{pfe} = 4$$

Число коэффициентов регрессии

$$Nb_{pfe} = 4$$

Матрица планирования

Матрица со значениями
входных факторов

$$M_{pfe} = \begin{pmatrix} 1 & 73 & 4.5 \\ 2 & 47 & 4.5 \\ 3 & 47 & 2.5 \\ 4 & 73 & 2.5 \end{pmatrix}$$

Столбец рандомизации с
учетом числа
повторных опытов n

$$md_{pfe} = \begin{pmatrix} 7 \\ 6 \\ 2 \\ 4 \\ 3 \\ 5 \\ 1 \\ 8 \end{pmatrix}$$

Матрица с кодовыми значениями
входных факторов

$$M_{pfe.c} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & 1 \\ 3 & -1 & -1 \\ 4 & 1 & -1 \end{pmatrix}$$

Введите начальные данные

Введите результат экспериментов в виде матрицы.

$$Y = \begin{pmatrix} 788 \\ 773 \\ 797 \\ 793 \\ 639 \\ 633 \\ 554 \\ 550 \end{pmatrix}$$

Введите число неповторных опытов
(строк матрицы планирования)

$$N_{\text{повт}} = 4$$

Введите матрицу планирования в кодовом виде

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \\ -1 & -1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$$

Введите количество контрольных опытов

$$n_k := 2$$

Введите количество коэффициентов регрессии и порядок уравнения регрессионной зависимости

$$N_b := 4$$

$$nr := 2$$

Введите доверительную вероятность

$$\gamma := 0.95$$

Введите максимальную и минимальную степени свободы

$$f_{\max} := n - 1 = 1$$

$$f_{\min} := n - 1 = 1$$

vospr = "Опыты воспроизводимы"

stac = "Опыты стационарны"

Вектор коэффициентов регрессии

$$b_1 = \begin{pmatrix} 690.875 \\ -24.625 \\ 96.875 \\ 17.375 \end{pmatrix}$$

Доверительный интервал коэффициентов регрессии

$$\Delta b = 8.401$$

Вектор коэффициентов регрессии с учетом проверки их на значимость

$$bb = \begin{pmatrix} 690.875 \\ -24.625 \\ 96.875 \\ 17.375 \end{pmatrix}$$

Введите значения входных факторов для функции отклика x_1 , x_2 и т.д. в контрольных опытах в КОДОВОМ виде

$$x_1 := 1 \quad x_2 := 1 \quad x_3 := 0 \quad x_4 := 0 \quad x_5 := 0 \quad x_6 := 0$$

Рассчитайте Y_t с помощью уравнения регрессии, подставив нужное количество входных факторов

$$Y_t(x_1, x_2) := t$$

$$Y_t(x_1, x_2) = (780.5)$$

Введите матрицу расчетных по уравнению регрессии значений выходного параметра в контрольных опытах

$$Y_{\text{calc}} := \begin{pmatrix} 780.5 \\ 780.5 \\ 780.5 \end{pmatrix}$$

Введите матрицу экспериментальных значений выходного параметра в контрольных опытах

$$Y_e := \begin{pmatrix} 778 \\ 773 \\ 775 \end{pmatrix}$$

ad = "Модель адекватна"

S10

Выбирайте подсвеченные области

Введите отклик:

y :=
Удельный импульс

Введите количество входных факторов

k := 2

Введите число повторных опытов для определения дисперсии

n := 2

Выберите вид уравнения регрессии

regr :=
Линейное
Квазинелинейное
Квадратичное

Рекомендация: для квадратичной модели ПФЭ подходит только, если k меньше 4

Если Вы выбрали квадратичное уравнение - выберите план

regr1 :=
ПФЭ
Хартли
Вок-Wilson

regr

Назначьте интервалы варьирования входных факторов

x_1 x_2
 $\max_{x_1} := 2.41$ $\max_{x_2} := 1.42$
 $\min_{x_1} := 1.86$ $\min_{x_2} := 1.09$
 $\text{nom}_{x_1} := 2.135$ $\text{nom}_{x_2} := 1.255$

Вы выбрали тип плана:

ПФЭ ДФЭ

plan = "ПФЭ"

Хатри BoxWilson

Откройте правильную область соответственно цвету

Задайте число опытов в центре плана

$n0 := 1$

status = "продолжайте работу"

- сравнение количества экспериментов и коэффициентов регрессии

status₁ = "продолжайте работу"

- проверка по максимальному количеству экспериментов для квадратичной модели

Число точек плана (опытов)

$$N_{pfe} = 9$$

Число коэффициентов регрессии

$$Nb_{pfe} = 6$$

Матрица планирования

Матрица со значениями входных факторов

$$M_{pfe} = \begin{pmatrix} 1 & 2.41 & 1.42 \\ 2 & 1.86 & 1.42 \\ 3 & 1.86 & 1.09 \\ 4 & 2.41 & 1.09 \\ 5 & 2.135 & 1.255 \\ 6 & 1.86 & 1.255 \\ 7 & 2.41 & 1.255 \\ 8 & 2.135 & 1.42 \\ 9 & 2.135 & 1.09 \end{pmatrix}$$

Столбец рандомизации с учетом числа повторных опытов n

	0
0	16
1	13
2	2
3	12
4	1
5	18
6	15
7	3
8	8
9	10
10	5
11	9
12	11
13	6
14	7
15	17
16	4
17	14

$md_{pfe} =$

Матрица с кодовыми значениями
входных факторов

$$M_{pfe.c} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & 1 \\ 3 & -1 & -1 \\ 4 & 1 & -1 \\ 5 & 0 & 0 \\ 6 & -1 & 0 \\ 7 & 1 & 0 \\ 8 & 0 & 1 \\ 9 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Введите начальные данные

Введите результат экспериментов в виде матрицы.

$$Y := \begin{pmatrix} 290 \\ 294 \\ 274 \\ 277 \\ 280 \\ 284 \\ 291 \\ 295 \\ 298 \\ 302 \\ 294 \\ 296 \\ 280 \\ 279 \\ 285 \\ 287 \\ 289 \\ 288 \end{pmatrix}$$

**Введите число неповторных опытов
(строк матрицы планирования)**

$$N_{xxx} = 9$$

Введите матрицу планирования в кодовом виде

$$M := \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \\ -1 & 1 \\ -1 & -1 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ -1 & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Введите количество контрольных опытов

$$n_k := 3$$

Введите количество коэффициентов регрессии и порядок уравнения регрессионной зависимости

$$N_b := 6$$

$$nr := 2$$

Введите доверительную вероятность

$$\gamma := 0.95$$

Введите максимальную и минимальную степени свободы

$$f_{\max} := n - 1 = 1$$

$$f_{\min} := n - 1 = 1$$

vospr = "Опыты воспроизводимы"

stac = "Опыты стационарны"

$$R = \begin{pmatrix} \text{"Term"} & \text{"Coefficient"} & \text{"Std Error"} & \text{"95\% CI Low"} & \text{"95\% CI High"} & \text{"VIF"} & \text{"T"} & \text{"P"} \\ \text{"Intercept"} & 291.222 & 5.812 & 272.727 & 309.717 & \text{NaN} & 50.111 & 8.75 \times 10^{-6} \\ \text{"A"} & 1.333 & 3.183 & -8.797 & 11.463 & 1 & 0.419 & 0.352 \\ \text{"B"} & 3.25 & 3.183 & -6.88 & 13.38 & 1 & 1.021 & 0.191 \\ \text{"AB"} & 6.875 & 3.899 & -5.532 & 19.282 & 1 & 1.763 & 0.088 \\ \text{"AA"} & -5.333 & 5.513 & -22.879 & 12.213 & 1 & -0.967 & 0.202 \\ \text{"BB"} & 0.417 & 5.513 & -17.129 & 17.963 & 1 & 0.076 & 0.472 \end{pmatrix}$$

"Term". Обозначения коэффициентов регрессии

"Coefficient" Значения коэффициентов регрессии

"Std Error" Стандартное отклонение для коэффициентов регрессии

"95% CI Low" ("95% CI High") Нижняя и верхняя граница доверительного интервала коэффициентов регрессии

"VIF" Коэффициент увеличения дисперсии - уровень увеличения дисперсии коэффициентов регрессии из-за коллинеарности

"T" Проверка коэффициентов регрессии на значимость по критерию Стьюдента

"p" P-значение - вероятность отвергнуть значимый коэффициент
Вектор коэффициентов регрессии

$$b = \begin{pmatrix} 291.222 \\ 1.333 \\ 3.25 \\ 6.875 \\ -5.333 \\ 0.417 \end{pmatrix}$$

Доверительный интервал коэффициентов регрессии

$$\Delta b = 1.619$$

Вектор коэффициентов регрессии с учетом проверки их на значимость

$$bb = \begin{pmatrix} 291.222 \\ 0 \\ 3.25 \\ 6.875 \\ -5.333 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Введите значения входных факторов для функции отклика x_1 , x_2 и т.д. в контрольных опытах в КОДОВОМ виде

$$x_1 := 0 \quad x_2 := 0 \quad x_3 := 0 \quad x_4 := 0 \quad x_5 := 0 \quad x_6 := 0$$

Рассчитайте Y_t с помощью уравнения регрессии, подставив нужное количество входных факторов

$$Y_t(x_1, x_2) := \text{interp}\left[r, M, I_{sr}, \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}\right] \quad Y_t(x_1, x_2) = 291.222$$

Введите матрицу расчетных по уравнению регрессии значений выходного параметра в контрольных опытах

$$Y_{\text{calc}} = \begin{pmatrix} 291.222 \\ 291.222 \\ 291.222 \end{pmatrix}$$

Введите матрицу экспериментальных значений выходного параметра в контрольных опытах

$$Y_e := \begin{pmatrix} 289 \\ 288 \\ 287 \end{pmatrix}$$

ad = "Модель адекватна"

S400**Выбирайте подсвеченные области**

Введите отклик:

y :=
Удельный импульс

Введите количество входных факторов

k := 2

Введите число повторных опытов для определения дисперсии

n := 2

Выберите вид уравнения регрессии

regr :=
Линейное
Квазилинейное
Квадратичное

Рекомендация: для квадратичной модели ПФЭ подходит только, если k меньше 4

Если Вы выбрали квадратичное уравнение - выберите план

regr1 :=
ПФЭ
Хартли
Box-Wilson

regr

Назначьте интервалы варьирования входных факторов

x1	x2
max _{x1} := 2.41	max _{x2} := 1.42
min _{x1} := 1.86	min _{x2} := 1.09
nom _{x1} := 2.135	nom _{x2} := 1.255

Вы выбрали тип плана:

ПФЭ ДФЭ

plan = "ПФЭ"

Хатрли BoxWilson

Откройте правильную область соответственно цвету

Задайте число опытов в центре плана

n0 := 1

status = "продолжайте работу"

- сравнение количества экспериментов и коэффициентов регрессии

status₁ = "продолжайте работу"

- проверка по максимальному количеству экспериментов для квадратичной модели

Число точек плана (опытов)

$$N_{pfe} = 9$$

Число коэффициентов регрессии

$$Nb_{pfe} = 6$$

Матрица планирования

Матрица со значениями входных факторов

$$M_{pfe} = \begin{pmatrix} 1 & 82.3 & 51.4 \\ 2 & 71.5 & 51.4 \\ 3 & 71.5 & 44.7 \\ 4 & 82.3 & 44.7 \\ 5 & 76.9 & 48.05 \\ 6 & 71.5 & 48.05 \\ 7 & 82.3 & 48.05 \\ 8 & 76.9 & 51.4 \\ 9 & 76.9 & 44.7 \end{pmatrix}$$

Столбец рандомизации с учетом числа повторных опытов n

	0
0	16
1	13
2	2
3	12
4	1
5	18
6	15
7	3
8	8
9	10
10	5
11	9
12	11
13	6
14	7
15	17
16	4
17	14

$$md_{pfe} =$$

Матрица с кодовыми значениями входных факторов

$$M_{pfe.c} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & 1 \\ 3 & -1 & -1 \\ 4 & 1 & -1 \\ 5 & 0 & 0 \\ 6 & -1 & 0 \\ 7 & 1 & 0 \\ 8 & 0 & 1 \\ 9 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Введите начальные данные

Введите результат экспериментов в виде матрицы.

Y :=

290
294
274
277
280
284
291
295
298
302
294
296
280
279
285
287
289
288

Введите число неповторных опытов
(строк матрицы планирования)

N_{max} := 9

Введите матрицу планирования в кодовом виде

$$M := \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \\ -1 & 1 \\ -1 & -1 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ -1 & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Введите количество контрольных опытов

$$n_k := 3$$

Введите количество коэффициентов регрессии и порядок уравнения регрессионной зависимости

$$N_b := 6$$

$$nr := 2$$

Введите доверительную вероятность

$$\gamma := 0.95$$

Введите максимальную и минимальную степени свободы

$$f_{\max} := n - 1 = 1$$

$$f_{\min} := n - 1 = 1$$

vospr = "Опыты воспроизводимы"

stac = "Опыты стационарны"

$$R = \begin{pmatrix} \text{"Term"} & \text{"Coefficient"} & \text{"Std Error"} & \text{"95\% CI Low"} & \text{"95\% CI High"} & \text{"VIF"} & \text{"T"} & \text{"P"} \\ \text{"Intercept"} & 315.889 & 1.364 & 311.548 & 320.23 & \text{NaN} & 231.568 & 8.879 \times 10^{-8} \\ \text{"A"} & 3.25 & 0.747 & 0.872 & 5.628 & 1 & 4.35 & 0.011 \\ \text{"B"} & -0.333 & 0.747 & -2.711 & 2.044 & 1 & -0.446 & 0.343 \\ \text{"AB"} & -0.125 & 0.915 & -3.037 & 2.787 & 1 & -0.137 & 0.45 \\ \text{"AA"} & 0.417 & 1.294 & -3.702 & 4.535 & 1 & 0.322 & 0.384 \\ \text{"BB"} & 0.167 & 1.294 & -3.952 & 4.285 & 1 & 0.129 & 0.453 \end{pmatrix}$$

"Term" . Обозначения коэффициентов регрессии

"Coefficient" Значения коэффициентов регрессии

"Std Error" Стандартное отклонение для коэффициентов регрессии

"95% CI Low" ("95% CI High") Нижняя и верхняя граница доверительного интервала коэффициентов регрессии

"VIF" Коэффициент увеличения дисперсии - уровень увеличения дисперсии коэффициентов регрессии из-за коллинейрности

"T" Проверка коэффициентов регрессии на значимость по критерию Стьюдента

"P" P-значение - вероятность отвергнуть значимый коэффициент
Вектор коэффициентов регрессии

$$b = \begin{pmatrix} 315.889 \\ 3.25 \\ -0.333 \\ -0.125 \\ 0.417 \\ 0.167 \end{pmatrix}$$

Доверительный интервал коэффициентов регрессии

$$\Delta b = 0.33$$

Вектор коэффициентов регрессии с учетом проверки их на значимость

$$bb = \begin{pmatrix} 315.889 \\ 3.25 \\ -0.333 \\ 0 \\ 0.417 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Введите значения входных факторов для функции отклика x_1 , x_2 и т.д. в контрольных опытах в КОДОВОМ виде

$$x_1 := 0 \quad x_2 := 0 \quad x_3 := 0 \quad x_4 := 0 \quad x_5 := 0 \quad x_6 := 0$$

Рассчитайте Y_t с помощью уравнения регрессии, подставив нужное количество входных факторов

$$Y_t(x_1, x_2) := \text{interp}\left[r, M, I_{sr}, \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}\right] \quad Y_t(x_1, x_2) = 315.889$$

Введите матрицу расчетных по уравнению регрессии значений выходного параметра в контрольных опытах

$$Y_{\text{calc}} := \begin{pmatrix} 315.889 \\ 315.889 \\ 315.889 \end{pmatrix}$$

Введите матрицу экспериментальных значений выходного параметра в контрольных опытах

$$Y_e := \begin{pmatrix} 316 \\ 317 \\ 318 \end{pmatrix}$$

ad = "Модель адекватна"