

Акционерное общество «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко»

На правах рукописи

Гемранова Екатерина Анатольевна

**МЕТОДИКА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ
ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
С АВТОМАТОМ РАЗГРУЗКИ И СТОЯНОЧНЫМ УПЛОТНЕНИЕМ
ТУРБОНАСОСНОГО АГРЕГАТА**

2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки
летательных аппаратов

Диссертация

на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Мартиросов Давид Суренович

Химки - 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ЖРД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ. ОБЗОР, АНАЛИЗ И ВЫБОР МЕТОДОВ ОБНАРУЖЕНИЯ ОТКАЗА.....	14
1.1 Постановка задачи функциональной диагностики ЖРД.....	14
1.2 Обзор литературы, анализ и выбор методов диагностирования.....	17
1.2.1 Обзор зарубежной литературы.....	17
1.2.2 Обзор патентных источников.....	19
1.2.3 Обзор методов функциональной диагностики.....	21
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1.....	28
ГЛАВА 2. КОНТУР АР И СУ КАК ОБЪЕКТ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ.....	30
2.1 Принцип действия автомата разгрузки насоса окислителя ЖРД.....	30
2.2 Принцип действия стояночного уплотнения.....	32
2.3 Особенности нарушения нормального функционирования контура автомата разгрузки и стояночного уплотнения ТНА.....	36
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2.....	37
ГЛАВА 3 ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЖРД С КОНТУРОМ АР и СУ ТНА.....	38
3.1. Штатная математическая модель ЖРД.....	38
3.2 Диагностическая модель контура АР и СУ.....	38
3.3 Математическая модель контура автомата разгрузки и стояночного уплотнения ТНА.....	39
3.3.1. Модификация локальной математической модели контура АР и СУ для интеграции в штатную модель ЖРД.....	39
3.3.2 Расчётные схемы контура АР и СУ и схема силовых нагрузок.....	43
3.3.3 Балансы расходов.....	43
3.3.4 Уравнения гидравлических магистралей.....	47
3.3.5 Балансы сил.....	51
3.4 Сопряжение математической модели контура автомата разгрузки и стояночного уплотнения со штатной математической моделью ЖРД.....	58
3.5 Система измерений ЖРД, включая контур автомата разгрузки и стояночного уплотнения.....	58
3.6 Коррекция математической модели.....	60

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3	63
ГЛАВА 4 МЕТОДИКА И ПРОГРАММНО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ	64
4.1 Методика диагностирования	64
4.1.1 Определение момента времени возникновения отказа	69
4.1.2 Контроль отклонений измеренных и расчётных значений параметров.....	70
4.1.3 Локализация отказа.....	70
4.1.4 Подтверждение локализации отказа.	71
4.2 Программно-математическое обеспечение диагностирования	72
4.2.1 Основные положения	72
4.2.2 Основные задачи, решаемые с помощью программного обеспечения	74
4.2.3 Основные функции программного обеспечения	74
4.2.4. Интерфейс программы	78
4.3. Описание блоков	81
4.4 Исходные данные	84
4.5. Выходные данные	87
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4	87
ГЛАВА 5. ДИАГНОСТИКА ЖРД ПРИ ОГНЕВЫХ ИСПЫТАНИЯХ	89
5.1 Коррекция математической модели в процессе ОИ	89
5.2 Расчёт допустимых значений диагностических признаков	92
5.3 Диагностика ОИ двигателей, закончившихся аварийным отключением 96	
5.3.1 Нарушение нормальной работы дросселя горючего.....	97
5.3.1.1 Определение момента времени возникновения отказа	97
5.3.1.2 Локализация отказа по отклонению характеристик агрегатов	100
5.3.1.3 Локализация отказа по функциональным связям параметров.....	100
5.3.2 Отказ в автомате разгрузки	102
5.3.2.1 Определение момента времени возникновения отказа	102
5.3.2.2 Локализация отказа по отклонению характеристик агрегатов	105
5.3.2.3 Локализация отказа по функциональным связям параметров.....	106
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5	107
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	109
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	111
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	113

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертации

Одним из направлений в обеспечении надёжности и безопасной работы ЖРД является создание эффективных систем контроля и диагностирования их технического состояния. Главная задача, решаемая такими системами – своевременное обнаружение отказа, возникающего в процессе работы двигателя (онлайн-диагностика) и выдача сигнала системе управления для его выключения или перевода на безопасный режим работы. Кроме того, полученная диагностическая информация (пост-диагностика) может быть использована экспертами для определения аномалий в работе двигателя, а также для прогнозирования состояния двигателя на последующих испытаниях.

В ряде зарубежных источников отмечается, что технология диагностики ЖРД продемонстрировала свою эффективность при выполнении таких миссий, как SpaceX Falcon (США) и Long March (КНР) [118,119].

Таким образом, онлайн обнаружение отказа становится незаменимой частью управления работой двигателя на стенде и в составе ракеты-носителя.

Одними из первых работ по диагностике сложных пневмогидравлических объектов с привлечением математического моделирования рабочих процессов и систем измерения явились работы А.С. Васина и Э.В. Венгерского. Результаты этих работ применительно к ЖРД развивались на научно-экспериментальной базе «НПО Энергомаш им. акад. В.П. Глушко» Д.С. Мартиросовым, которым были разработаны диагностические модели двигателей большой тяги, применяемые в настоящее время при штатной диагностике. Однако, на практике при доводке и товарных поставках двигателя возникла необходимость диагностики отказов в контуре АР и СУ ЖРД. Для этого потребовалось создание полноразмерной диагностической модели ЖРД, в которую включён данный контур. В работах А.И. Белоусова и А.И. Иванова [4] изложены методы моделирования узлов насосов и турбин, а Ю.И. Каналиным, В.И. Видишевым и Н.П. Полетаевым исследовались локальные гидравлические модели и модели нагружения контура АР и СУ ЖРД.

Основные идеи, изложенные в этих работах, использованы автором при модернизации существующих моделей контура АР и СУ ЖРД с целью интегрирования их в штатную модель двигателя. Штатная модель двигателя – это математическая модель ЖРД, описывающая рабочие процессы в основных агрегатах и магистралях двигателя.

В «НПО Энергомаш», начиная с 1985 г., стали успешно применяться методы контроля и диагностирования двигателей РД170 и РД120, основанные на математических моделях процессов и измеряемых при огневых испытаниях (ОИ) параметрах. Впоследствии, эти методы были усовершенствованы и использованы для двигателей РД180 и РД191. Изначально математические модели описывали процессы в основных агрегатах ЖРД: камерах, газогенераторах, турбонасосных агрегатах, регуляторах, дросселях, в гидро- и газовых магистралях. Дальнейшее развитие методов диагностики, численных методов, используемых для решения систем уравнений большой размерности, возросшее быстродействие ЭВМ, позволили существенно увеличить глубину диагностирования и, тем самым, расширить возможность обнаружения «слабых» мест конструкции, особенно на стадии опытно-конструкторской отработки двигателя. В частности, в контуре автомата разгрузки (АР) и стояночного уплотнения (СУ) основного турбонасосного агрегата (ТНА), как показала практика огневых испытаний, возникали и развивались во времени отказы, приводящие к разрушению элементов конструкции двигателя, таких как радиально-упорные подшипники, установленные на валу турбины, стояночные уплотнения, ступицы крыльчатки центробежного насоса. Если такие отказы были бы выявлены на ранних стадиях их развития, то разрушения материальной части двигателя и огневого стенда можно было бы избежать путём своевременного выключения двигателя [21].

В работе [106] отмечается, что задача создания адекватной математической модели узлов АР и СУ ТНА является достаточно сложной, с точки зрения корректности применения упрощённых частных математических моделей, в которых граничные условия, связывающие эту модель с моделью двигателя, назначаются с помощью эмпирических или аппроксимационных зависимостей [35,

87, 107]. Кроме того, отметим, что использование для решения этой задачи нейронной сети [114, 111], нецелесообразно, так как для её обучения требуется провести большое количество «обучающих» ОИ, на которых возникли бы соответствующие отказы¹.

Очевидно, что интеграция математической модели контура АР и СУ ТНА в состав математической модели рабочих процессов двигателя открывает возможность получить более полную диагностическую информацию о рассматриваемом контуре, так как в этом случае для замыкания системы уравнений контура используются граничные условия, генерируемые непосредственно внутривдвигательными связями [21].

Объект исследования – диагностика технического состояния ЖРД, реализующегося в процессе огневого испытания и определяемого на основе телеметрии, взаимосвязей параметров рабочих процессов, характеристик агрегатов и элементов конструкции, включая АР и СУ ТНА.

Предмет исследования – ЖРД с контуром автомата разгрузки и стояночного уплотнения ТНА на компонентах топлива кислород-керосин, выполненный по схеме с дожиганием окислительного генераторного газа в камере.

Цель работы

Обеспечение безопасности огневых испытаний ЖРД за счёт раннего обнаружения неисправности или отказа до наступления аварийного выключения двигателя с помощью многоуровневой диагностики состояния двигателя с контуром автомата разгрузки и стояночного уплотнения ТНА.

Под безопасностью понимается раннее обнаружение отказа для своевременного останова двигателя с целью сохранения материальной части двигателя и стенда.

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

1. Разработана объединённая математическая модель стационарных процессов

¹Гемранова Е.А., Диагностирование состояния контура автомата разгрузки и стояночного уплотнения турбонасосного агрегата жидкостного ракетного двигателя. Вестник МАИ, издательство ФГБОУВО МАИ (НИУ). – 2021. – Т. 28. – N 3. – Авиационная и ракетно-космическая техника. – с. 24-30

ЖРД, обеспечивающая интеграцию контура автомата разгрузки и стояночного уплотнения ТНА в состав штатной модели двигателя.

2. Разработана методика диагностирования, обеспечивающая многоуровневый контроль технического состояния ЖРД при огневых испытаниях на основе объединённой математической модели.

3. Разработано программно-математическое обеспечение методики расчётно-экспериментального анализа характеристик элементов конструкции, гидравлических процессов и силового нагружения в контуре автомата разгрузки и стояночного уплотнения ТНА.

4. Проведена верификация объединённой математической модели по результатам ОИ.

5. Представлены результаты диагностирования ЖРД при огневых испытаниях показавшие эффективность применения разработанной методики и программно-математического обеспечения.

Степень разработанности темы.

Разработка темы в рассматриваемой постановке задачи является оригинальной и в отрасли проведена впервые. Данные о зарубежных исследованиях по функциональной диагностике ЖРД, близких к теме, представляют справочную информацию и не позволяют достоверно оценить уровень разработки. В ряде источников отмечается, что технология диагностики ЖРД продемонстрировала свою эффективность при выполнении миссий SpaceX Falcon (США) и Long March (КНР).

Многие предприятия отрасли, такие как Государственный научный центр Российской Федерации «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша», Ракетно – космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королева, а так же Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Казанский национальный исследовательский технический университет в основном занимались исследованиями бесконтактных методов диагностирования и методами неразрушающего контроля. Данных об

отечественных работах по функциональной диагностике ЖРД в открытых периодических изданиях не обнаружено.

Научная новизна.

1 Разработана объединённая математическая модель стационарных процессов ЖРД, которая отличается от штатной математической модели наличием в ней контура автомата разгрузки и стояночного уплотнения ТНА, параметры которых функционально связаны с параметрами двигателя.

2 Введены дополнительные, по отношению к штатной методике, диагностические признаки, контролирующие относительные отклонения измеренных значений параметров от среднего и отклонения характеристик агрегатов, определённых при модельных испытаниях от реализованных при ОИ. На основании этих признаков определяется момент времени возникновения отказа, его развитие и локализация.

3 Разработана методика диагностирования, которая отличается от ранее используемой наличием многоуровневого контроля состояния двигателя, при котором каждый последующий уровень подтверждает результат, полученный на предыдущем уровне диагностирования. Реализована возможность определять параметры проточной части и силовые нагрузки в контуре автомата разгрузки и стояночного уплотнения ТНА ЖРД в составе объединённой математической модели стационарных процессов, недоступные для прямых измерений в процессе огневого испытания.

Теоретическая значимость работы

Результаты работы верифицированы и подтверждают корректность поставленных задач и их решения, подтверждают и дополняют существующие теоретические положения в области диагностирования сложных технических систем.

Практическая значимость.

Результаты работы и разработанное программное обеспечение (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021667684 от 01.11.2021, патент № 2800833 о настройке параметров САЗ) используются в Акционерном

обществе «НПО Энергомаш» имени академика В.П. Глушко при анализе состояния двигателей в процессе ОИ, что подтверждается «Актом № 271 о внедрении в АО «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко» результатов диссертационной работы Гемрановой Екатерины Анатольевны "Диагностика жидкостных ракетных двигателей с автоматом разгрузки и стояночным уплотнением турбонасосного агрегата» от 23.10.2025. Результаты работы могут быть использованы при контроле и диагностировании состояния мощных ЖРД в процессе эксплуатации в составе ракеты-носителя.

Результаты исследования изменения характеристик агрегатов ЖРД и нагружения РУП ТНА на основе разработанной методики диагностирования могут быть использованы для совершенствования элементов конструкции двигателя. Разработанная методика диагностирования применена в опытно-конструкторских работах по созданию системы функциональной диагностики (СФД) в режиме реального времени.

Апробация работы.

Результаты проведённых исследований докладывались и обсуждались на: VIII конгрессе молодых учёных Университета ИТМО (Санкт-Петербург, 2019г.); 18-й международной конференции «Авиация и космонавтика» (Москва, 2019г.); научном семинаре «Лопаточные насосы и турбонасосные агрегаты» (Москва, 2021г.); Всероссийской научно-технической конференции «Ракетно-космические двигательные установки» (Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020г.); научно – техническом совете предприятия АО «НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко» (Химки, 2023г.).

Положения, выносимые на защиту:

1. Объединённая математическая модель стационарных процессов ЖРД, включающая контур автомата разгрузки и стояночного уплотнения ТНА, верифицированная по результатам огневого испытания.
2. Методика диагностирования ЖРД.
3. Результаты контроля и диагностирования состояния ЖРД при огневых испытаниях.

В первой главе поставлена задача функционального диагностирования ЖРД, выполненного по схеме с дожиганием генераторного газа в камере сгорания, представлены пневмогидравлическая схема двигателя и соответствующая ей структурно-функциональная схема, являющаяся основой для составления математической модели рабочих процессов. Сформулированы основные задачи функциональной диагностики ЖРД. В данной работе эти задачи сведены в основном к определению момента времени возникновения отказа с последующим определением контура и элемента конструкции, правильное функционирование которых в результате нарушено. При этом математическая модель нормально функционирующего двигателя принимается в качестве эталона, отклонение от которого рассматривается как признак отказа.

Выполнен обзор патентных и литературных источников, анализ и выбор методов диагностирования, решающих поставленную задачу. В разделе результатов патентных исследований представлено описание способов контроля и диагностирования, которые наиболее приближены к решению задач данной работы, но обладают рядом недостатков. К ним можно отнести недостаточную информативность единичных измеряемых параметров для решения задачи локализации отказа, отсутствие учёта взаимосвязей между параметрами, используемыми для определения характеристик двигателя, ограничения видов диагностируемых отказов.

Кроме этого, рассмотрен ряд способов диагностирования, который успешно зарекомендовал себя при диагностике двигателей при ОИ на стенде. К этим способам следует, прежде всего, отнести метод структурного исключения, метод коэффициентов пропорциональности, метод контроля характеристик конструкции [23]. Показаны преимущества и недостатки, присущие этим методам.

Исходя из приведённого обзора, установлено, что в основу методов диагностирования, используемых для решения поставленных задач, может быть положена многоуровневая процедура контроля, включающая в себя:

- I. Контроль отклонений значений измеряемых параметров от их расчётных значений.

- II. Контроль отклонения характеристик агрегатов двигателя при ОИ от характеристик, полученных при автономных испытаниях.
- III. Локализация отказа с помощью метода структурного исключения [23].

Во второй главе контур АР и СУ ТНА анализируется как объект диагностирования. Рассмотрены конструкция и принципы работы автомата разгрузки и стояночного уплотнения, отмечены отказы, приведшие к нарушению нормального функционирования двигателя при ОИ.

В третьей главе разработана диагностическая модель двигателя, которая включает в себя математическую модель двигателя с контуром АР и СУ, систему измерений и алгоритмы, соответствующие выбранным методам диагностирования. Математическая модель представляет собой систему 270-и нелинейных алгебраических уравнений стационарных рабочих процессов двигателя, включая контур АР и СУ с модифицированными уравнениями локальной математической модели контура для обеспечения её «стыковки» с общей математической моделью двигателя. Разработаны расчётные гидравлическая схема и схема силовых нагрузок на элементы конструкции контура. В соответствии с этим составлена математическая модель, представляющая собой систему нелинейных уравнений, описывающих стационарные рабочие процессы в контуре. Определены параметры, по которым обеспечивается «стыковка» математической модели контура с полноразмерной моделью двигателя. Предложен способ коррекции математической модели двигателя по результатам ОИ, основанный на методе контроля характеристик двигателя. Количество контролируемых характеристик равно количеству контролируемых медленноменяющихся параметров двигателя (26 параметров), используемых при диагностировании.

Эта диагностическая модель является основным инструментом, который может быть положен в основу системы функционального диагностирования (СФД), применяемой в режиме реального времени [21], т.е. в темпе проведения ОИ.

В четвертой главе для решения поставленной задачи разработаны методика и программное обеспечение диагностирования, реализующее численные и

логические методы диагностирования. Методика регламентирует следующие уровни процедуры диагностирования:

1 Контроль отклонения текущих средних значений параметров двигателя от среднего измеренного значения в начале режима.

2 Контроль отклонений измеренных значений параметров от расчётных по математической модели.

3 Контроль отклонений характеристик агрегатов, полученных при автономных испытаниях, от реализованных при ОИ.

4 Локализация отказа по методу структурного исключения.

Достоверность принятия решения достигается за счёт перехода на каждый последующий уровень в зависимости от решения, принятого на предыдущем, тем самым снижая вероятность ложного срабатывания и пропуска дефекта. (новизна)

В пятой главе на основании разработанной методики диагностирования и программно-математического обеспечения проведена диагностика конкретных двигателей при ОИ на стенде.

Проведена процедура коррекции таких характеристик математической модели, как напорные и мощностные характеристики насосов, гидравлические характеристики магистралей, форсуночных головок, АР. Показано, что в результате коррекции математической модели расчётные значения практически полностью соответствуют измеренным на испытании, т.е. получена математическая модель, описывающая работу конкретного экземпляра двигателя. Проведён расчёт допустимых значений диагностических признаков, соответствующих нормальному функционированию двигателя.

При диагностике конкретного экземпляра ЖРД определён момент времени нарушения правильного функционирования двигателя и выявлен отказ, приведший к ненормальной работе дросселя горючего. При этом параметры функционирования контура АР и СУ были в норме. В другом случае, когда в результате диагностирования все основные параметры двигателя были в норме, отказ все же был обнаружен в контуре АР и СУ. Т.е. установлено, что в ряде

случаев основные параметры двигателя не чувствительны к отказам в этом контуре.

Определено, что в рассматриваемых ОИ, диагностирование позволяет сформировать команду системе управления двигателя на выключение (или переводе на безопасный режим работы) существенно раньше, чем системы аварийной защиты (САЗ): в первом случае на 1 секунду, во втором – на 26 секунд.

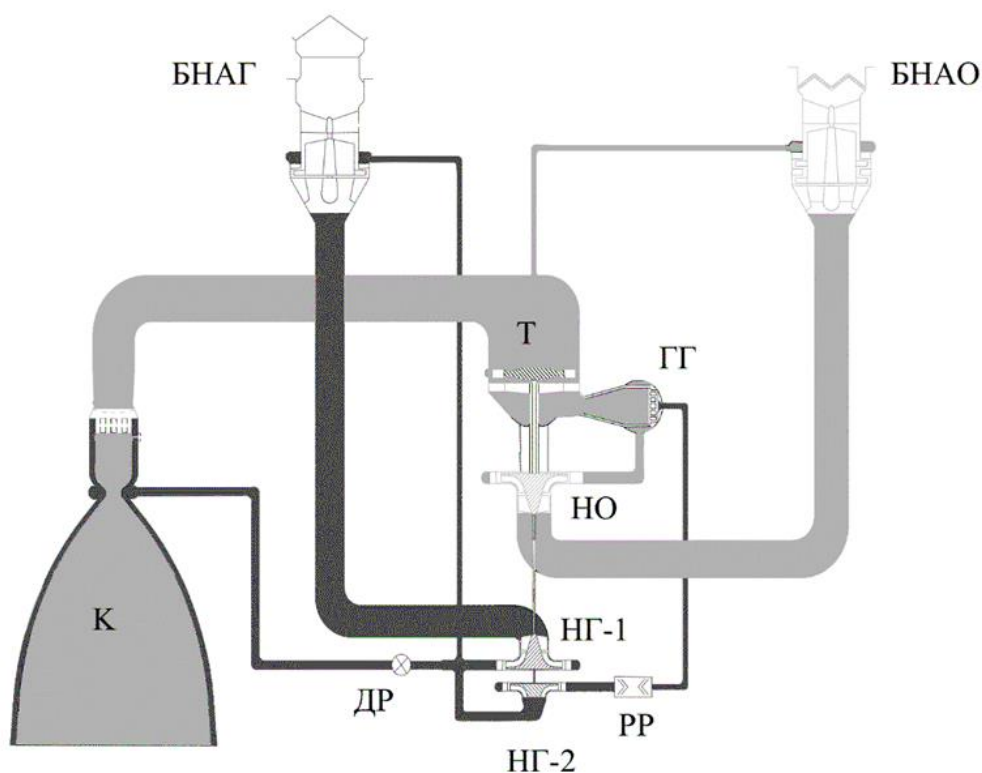
Таким образом, показана эффективность разработанной процедуры диагностирования при определении моментов времени возникновения конкретных отказов при ОИ [23], и вызванных ими изменений характеристик агрегатов и функциональных связей в двигателе.

В заключении каждой главы приведены выводы.

ГЛАВА 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ЖРД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ. ОБЗОР, АНАЛИЗ И ВЫБОР МЕТОДОВ ОБНАРУЖЕНИЯ ОТКАЗА

1.1 Постановка задачи функциональной диагностики ЖРД

На рисунке 1.1 представлена типичная пневмогидравлическая схема объекта исследования – однокамерного ЖРД с дожиганием генераторного газа, а на рисунке 1.2 – соответствующая ей структурно-функциональная схема.



БНАГ – бустерный насосный агрегат горючего; БНАО – бустерный насосный агрегат окислителя; Т– турбина основного ТНА; ГГ – газогенератор; НО – насос окислителя; НГ-1 – насос горючего 1-й ступени; НГ-2 – насос горючего 2-й ступени; К – камера; ДР – дроссель горючего; РР – регулятор расхода горючего.

Рисунок 1.1 – Схема типичного ЖРД с дожиганием генераторного газа.

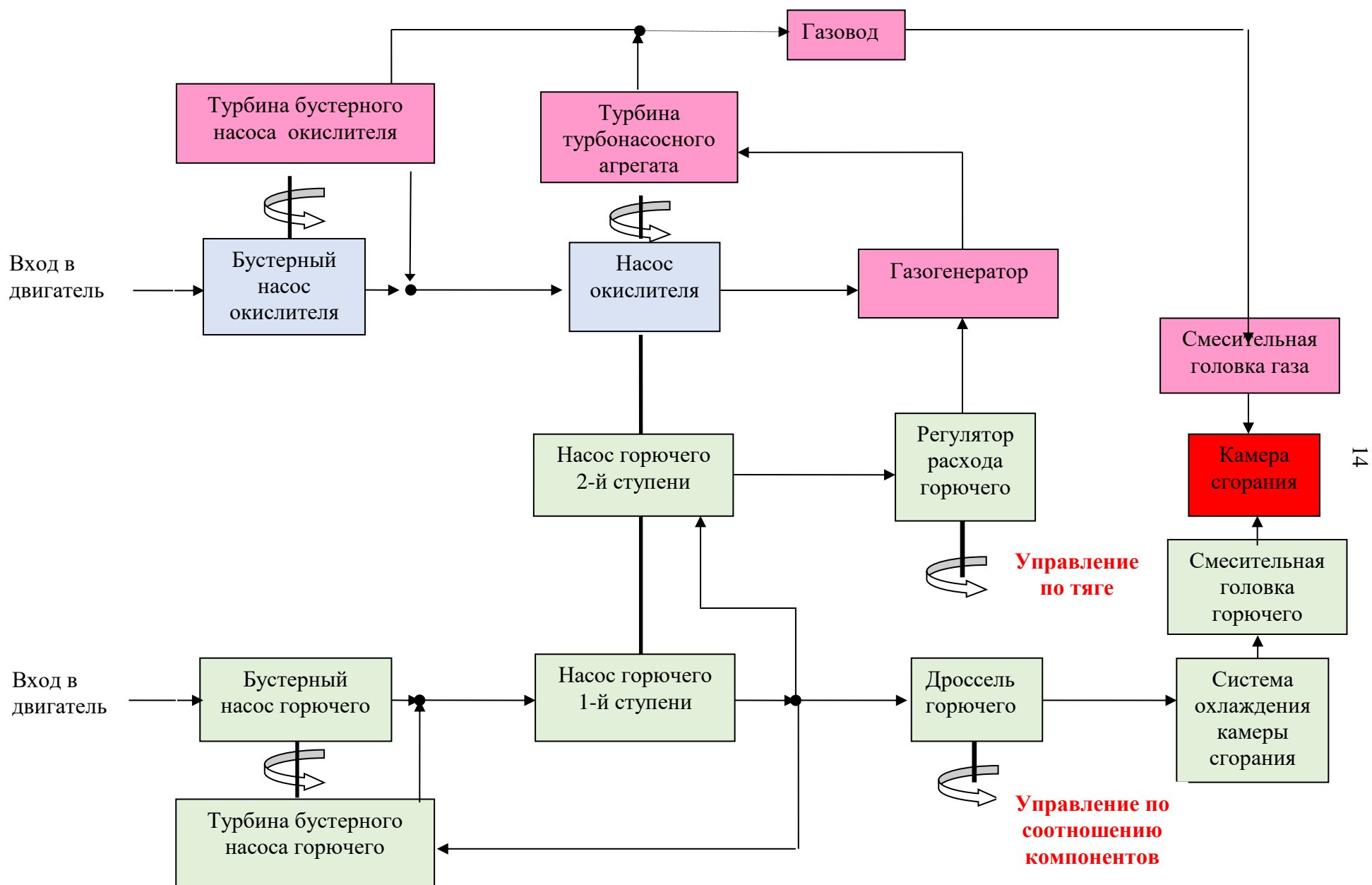


Рисунок 1.2 – Структурно функциональная блок-схема ЖРД

Рабочие процессы, агрегаты и элементы конструкции ЖРД именно такого типа рассматриваются в диссертационной работе как объекты функциональной диагностики. На структурно-функциональной схеме указаны основные агрегаты, техническое состояние которых необходимо диагностировать при ОИ. Решение главной задачи диагностирования - обнаружение отказов на ранних стадиях их развития, до наступления катастрофических последствий (разрушения двигателя и материальной части стенда) - обеспечивает безопасность проведения испытаний ЖРД на огневом стенде или в составе ракетносителя.

В настоящее время в процессе стендового огневого испытания ЖРД применяют разнообразные системы аварийной защиты для выключения двигателя при отказе в его работе. Обычно в работе таких систем, исходя из стремления обеспечения максимального быстродействия, используют достаточно простые алгоритмы, основанные на дублировании нескольких измеряемых параметров, например, температуры газа за турбиной, оборотов валов ТНА, осевых перемещений вала основного ТНА, расходов компонентов топлива на входе в двигатель. САЗ настраивают на предельные значения этих параметров, заданных конструкторскими документами и (или) моделируемыми для каждого экземпляра двигателя. САЗ обладает достаточным быстродействием при выключении двигателя совместно с системой управления режимами работы, примерно за 0,05 сек. Однако алгоритмы САЗ в настоящее время не обеспечивают обнаружение отказа в начале его развития, а «видят» его уже в тот момент, когда катастрофический исход испытания предотвратить невозможно, например, при возгораниях.

Можно выделить три вида методов, используемых для контроля и функционального диагностирования ЖРД: методы, основанные на обработке сигналов (измерений), методы, основанные на математических моделях рабочих процессов, методы, основанные на искусственном интеллекте.

Опыт штатного диагностирования ЖРД конструкции «НПО Энергомаш» показал, что задача обнаружения и локализации отказа на ранней стадии его развития успешно решается с помощью алгоритмов, основанных на использовании

математических моделей рабочих процессов ЖРД и системы измерения медленноменяющихся параметров двигателя: расходов, давлений, температур компонентов топлива, оборотов и осевых перемещений валов ТНА [21]. Эти алгоритмы построены, исходя из естественного предположения, что отказ приводит к нарушению взаимосвязей параметров, описываемых моделью нормально функционирующего двигателя. При этом модель нормально функционирующего двигателя можно рассматривать в качестве эталона, недопустимое отклонение от которого является диагностическим признаком отказа.

В настоящее время разработаны математические модели ЖРД, достаточно подробно описывающие стационарные рабочие процессы [5].

Помимо контроля работоспособности основных агрегатов двигателя, в настоящее время возникла необходимость более детальной диагностики основного ТНА: состояния стояночного уплотнения, охлаждения и нагружения радиально-упорного подшипника (РУП), работы автомата разгрузки, герметичности фланцевых соединений.

Сформулируем следующие задачи диагностики ЖРД на основе математической модели с АРУ и СУ:

1 Определение правильности функционирования двигателя на всех стационарных и квазистационарных режимах, заданных профилем (циклограммой) испытания.

2 Определение момента времени возникновения отказа.

3 Локализация отказа².

1.2 Обзор литературы, анализ и выбор методов диагностирования

1.2.1 Обзор зарубежной литературы

Обнаружение отказа в объекте диагностирования с использованием его

² Мартиросов Д.С., Подорванова Л.В., Задачи функциональной диагностики жидкостных ракетных двигателей по медленноменяющимся параметрам, Современные научные исследования и разработки, 2018.- № 10(27), с.557-559

математической модели требует глубоких знаний физических особенностей рабочих процессов, чтобы определить, как отказ может привести к нарушению взаимосвязей между параметрами этих процессов и каким образом это отражается на самих параметрах, доступных для измерения [115]. Подходы, основанные на моделях, можно разделить на аналитические, модельно-ориентированные подходы и качественные модельные подходы [108, 105].

В аналитических подходах к обнаружению отказов на основе моделей, как указано в [112], сначала составляют математическую модель, представляющую рабочие процессы в двигателе в соответствии со структурно-функциональной схемой, сравнивают расчётные значения параметров с измеряемыми значениями, характеризующими фактическое состояние двигателя, и оценивают полученное рассогласование. На этой основе американской компанией Rocketdyne был разработан алгоритм обнаружения аномалий (Rocketdyne Safety Algorithm, RSA) с целью обнаружения отказов двигателя. Zhang и др. [117] создали динамическую имитационную модель кислородо - водородного ракетного двигателя с тягой 50 тс на базе платформы моделирования AMESim, которая может идентифицировать и локализовать отказ в этом типе ЖРД. Zheng и др. [120] использовали программное обеспечение платформы AMESim для создания динамической математической модели каждого узла кислородо - водородного ракетного двигателя большой тяги с целью имитации отказа. Отмечается, что эта модель может быть использована для анализа отказов в работе двигателя и определения их локализации. Ye и др. [116] обнаружили отказ падения тяги силовой системы ракеты-носителя с использованием расширенного фильтра Калмана. Цзунми разработал модельный подход для обнаружения электромеханических отказов в работе ЖРД, а так же модель и программу диагностики на базе платформы Modelica [110]. Cha и др. [104] изучали обнаружение отказов в работе ЖРД открытого цикла с использованием нелинейного фильтра Калмана.

В рассмотренных работах отмечается, что точность результатов обнаружения отказов с использованием аналитической модели напрямую зависит от степени адекватности модели объекту диагностирования. Однако для такой сложной

системы, как ЖРД, пока ещё трудно создать модель, которая могла бы достаточно точно отразить механизм работы системы. Кроме того, подходы к обнаружению отказов с использованием аналитических моделей обычно специфичны и не могут использоваться для разных моделей или систем двигателя, и эти факторы ограничивают использование этого метода.

На основании приведённого обзора можно сделать вывод о том, что математические модели, используемые для диагностирования, должны быть объектно-ориентированными, то есть отражать свойства конструкции ЖРД, а также о необходимости коррекции модели каждого экземпляра двигателя, например, по результатам его ОИ.

1.2.2 Обзор патентных источников

В способе и устройстве контроля параметра ракетного двигателя [82] для анализа работы ЖРД в режиме реального времени в процессе испытания используются диагностические признаки, определяемые путём сравнения измеренных текущих значений параметров с их пороговыми значениями, определёнными в зависимости от режима работы двигателя. Расчётные значения получены, например, математическим моделированием, моделированием, с использованием нейронной сети, обучающейся по результатам предыдущих испытаний и погрешности получения расчётных оценок. Недостаток этого способа заключается в отсутствии информативности измеряемых единичных параметров для определения момента времени возникновения отказа в работе двигателя, а тем более для его локализации.

В одном способе контроля и диагностирования состояния пневмогидравлического объекта, работающего в экстремальных условиях [83] циклически измеряют параметры в контрольных точках объекта диагностирования, сравнивают их с расчётными пороговыми значениями и при выходе их за пороговые значения измеряют параметры в дополнительных контрольных точках, вычисляют по всем измеренным параметрам обобщённые характеристики пневмогидравлических узлов, составляющих объект, и

сравнивают их с пороговыми значениями обобщённых характеристик пневмогидравлических узлов, проводя локализацию отказа. При этом, с целью повышения достоверности и чувствительности способа и сокращения времени локализации отказа, предварительно измеряют параметры в основных и дополнительных контрольных точках, определяют по измеренным значениям параметров реальные пороговые значения обобщённых характеристик пневмогидравлических узлов, составляющих объект, которые используют для локализации отказа.

Однако, в этом способе при определении обобщённых характеристик не учитываются взаимосвязи между входящими в них параметрами, определяемые математической моделью. Поэтому для расчёта этих характеристик привлекаются дополнительные, не связанные с конкретным экземпляром двигателя и с конкретным огневым испытанием данные, например, плотности компонентов. Всё это снижает достоверность определения обобщённых характеристик.

В другом способе контроля и диагностирования состояния пневмогидравлического объекта [84] диагностирование проводят поэтапно и на каждом этапе фиксируют очерёдность и направление выхода параметров за их пороговые уровни, в соответствии с которыми диагностируют отказ. При этом, в момент выхода первого из параметров за его пороговый уровень, начинают отсчёт контрольного интервала времени, в течение которого фиксируют количество параметров, вышедших за свои пороговые уровни. В случае выхода за пороговые уровни более одного параметра устанавливают факт отказа и определяют дополнительные пороговые уровни измеряемых параметров, которые используют на следующем этапе диагностирования до полной локализации отказа, а величины дополнительных пороговых уровней выбирают на основе измерений текущих значений параметров на момент распознавания отказа на предыдущем уровне. Причём в случае выхода за пороговые уровни и последующего возврата в пределы исходных пороговых уровней в течение контрольного интервала времени только одного из

параметров принимают решение о его случайном выбросе, а в случае отсутствия возврата - решение об отказе датчика этого параметра.

Недостатком этого способа является необходимость до испытания определить направления выхода того или иного измеряемого параметра за пороговые значения при возникновении и развитии того или иного отказа: как показывает практика огневых испытаний ЖРД, где и какой именно отказ возникнет в двигателе и как он будет развиваться, зачастую непредсказуемо.

В алгоритме оценки технического состояния ЖРД [85] используются диагностические признаки, определяемые путём сравнения значений экспериментально полученных данных с их пороговыми значениями, определёнными в зависимости от технологических отклонений комплектующих данного двигателя и программы испытания.

Основным недостатком этого способа является то, что он позволяет фиксировать только те отказы, которые связаны с негерметичностью газовых или жидкостных магистралей двигателя, а диапазон изменения диагностических признаков зависит лишь от технологических особенностей сборки конкретного двигателя.

Тем не менее, этот способ может рассматриваться как прототип рассматриваемых далее методов, так как для его реализации используются диагностические признаки, формируемые на основе математической модели – уравнений, связывающих измеряемые и рассчитываемые параметры двигателя, а также технологические особенности сборки [23].

1.2.3 Обзор методов функциональной диагностики

Как отмечено в [76], метод структурного исключения является развитием и обобщением разнообразных методов сравнения параметров модели-эталона или двигателя с моделируемым отказом с параметрами, измеренными на работающем

двигателе. Ряд этих методов представлен в методах контурной увязки³ и контроля блоков и датчиков⁴. В этих методах объект диагностирования разбивают на отдельные блоки (контур), каждый из которых представляет собой отдельный элемент конструкции, агрегат или их объединение. Полагается, что блок контролируется локально, если количество измеренных параметров больше на единицу количества параметров, необходимых для решения системы уравнений, описывающих нормальную работу блока:

$$k \geq l + 1 \quad (1.1)$$

где k – количество измерений, l – количество замыкающих параметров.

Контур рассматривается как единое целое независимо от количества агрегатов его составляющих и от того, какова структура агрегатов. Критерием состояния контура является превышение отклонений (невязок) измеренных и рассчитанных параметров от регламентируемых значений, соответствующих нормальному функционированию контура. При выполнении условия (1.1) в контуре может быть вычислено p невязок:

$$p = k - l \geq 1, \quad (1.2).$$

где p – количество невязок.

Следует отметить, что ограниченное количество датчиков системы измерений накладывает ограничение на количество и состав контуров, формируемых в соответствии с (1.1). То есть разбиение на диагностируемые контуры неоднозначно. Формирование состава локально диагностируемых контуров усложняется тем, что выделенная в соответствии с критерием (1.1) система уравнений контура может быть неразрешима, хотя при этом условие равенства числа уравнений числу неизвестных может выполняться. Кроме того, контрольный датчик может оказаться вообще нечувствителен к отказу.

Метод структурного исключения более строго определяет процедуру выявления отказа, вызвавшего нарушение нормальной функциональной связи

³ Мартиросов Д.С. Диагностирование технического состояния мощных ЖРД методом контурной увязки медленноменяющихся параметров: диссертация ... кандидата технических наук: 05.07.05.- Химки, 1988. – 221с.: ил

⁴ Добромыслова Е.И., Польшикова Н.В. Подсистема допускового контроля параметров ЖРД / РК техника, сер. XIII, вып. 4, 1983.-С. 27-40

между параметрами.

Далее для ясности понимания, но не нарушая строгости изложения, будем полагать, что погрешности измерения и моделирования отсутствуют. Введём также следующие определения.

Уравнение:

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (1.3)$$

будем называть нарушенным в результате возникновения отказа, если, начиная с момента времени t_b , параметры x_1, x_2, \dots, x_n в (1.3) становятся связанными новой, вообще говоря, неизвестной, функциональной зависимостью:

$$\Phi(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (1.4)$$

причём такой, что:

$$f_i - \Phi = \delta f_i \neq 0 \quad (1.5)$$

для всех x_i на интервале времени $t \geq t_b$.

Из данного определения следует, что локализация отказа становится тривиальной, если все параметры измеряются. А именно, подставив в (1.5) измеренные значения $x_j = x_j^*, j=1, 2, \dots, n$, получим, что при нарушении уравнения f_i :

$$f_i(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) \neq 0, \quad (1.6)$$

где x^* - измеренное значение параметра, а для остальных, ненарушенных уравнений:

$$f_k(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) = 0, \quad k \neq 0, \quad (1.7)$$

Ясно, что прямое использование (1.6) для локализации отказа практически невозможно, так как обычно количество измеряемых параметров (датчиков) значительно меньше количества неизвестных переменных модели.

Тем не менее, условие (1.6) порождает процедуру, основанную на следующих положениях:

1. Пусть в результате отказа решение x_p^0 и x_q^0 исходной системы уравнений A не равно их измеренным значениям x_p^* и x_q^* , т.е.:

$$\delta x_p = x_p^0 - x_p^* \neq 0 \quad \text{и} \quad \delta x_q = x_q^0 - x_q^* \neq 0, \quad (1.8)$$

где δx – отклонение параметра, x^0 – расчётное значение параметра, p и q – индексы параметров.

2. Исключим нарушенное в результате отказа уравнение f_i из системы уравнений A . Тогда укороченная система A_{-i} будет описывать только нормально функционирующую, исправную часть двигателя.

3. Решить укороченную систему уравнений A_{-i} можно, присвоив, например, неизвестной x_p её измеренное значение x_p^* , т.е.:

$$x_p = x_p^* \quad (1.9)$$

4. Тогда решение $x_q^0(A_{-i})$ системы уравнений A_{-i} имитирует все остальные измерения, необходимые для подстановки в (1.6), т.е.:

$$x_j^0(A_{-i}) = x_j^*$$

и критерием того, что исключённое уравнение f_i нарушено является условие:

$$x_q^0(A_{-i}) = x_q^*, \quad (1.10)$$

Таким образом, можно сформулировать следующую гипотезу:

Уравнение f_i , системы A нарушено, если решение x_q^0 системы A_{-i} , получаемой исключением этого уравнения из A и подстановкой измеренного значения параметра x_p^* (1.8), становится равным измеренному значению параметра x_q^* (1.9).

Отсюда также следует, что минимальное количество измеряемых переменных (датчиков), обеспечивающее локализацию отказа, равно двум.

Понятно, что равенство (1.10), получаемое в результате процедуры исключения, выполняется и в случае, когда ни одно уравнение в исходной системе не нарушено, т.е. когда

$$\delta x_p = x_p^0 - x_p^* = 0 \quad \text{и} \quad \delta x_q = x_q^0 - x_q^* = 0$$

В этом случае ставится диагноз о нормальном функционировании, и процедура исключения не имеет смысла.

Измеряемый параметр x_p^* , с помощью которого нарушенное уравнение исключается, называется исключающим параметром, а параметр x_q^* , используемый для контроля того, что исключенное уравнение нарушено – контролирующим.

$$f_i(x_1^0, x_2^0, \dots, x_p^0, \dots, x_q^0, \dots, x_n^0) = \delta f_i \neq 0$$

Априори неизвестно, какое именно уравнение нарушено, поэтому простейший способ реализации процедуры исключения – метод перебора с ограничениями.

Преимуществом метода структурного исключения является и физическая, и математическая ясность получения информации о локализации отказа, а недостатком – большой объем вычислений и возникновение структурной вырожденности систем уравнений, получаемых в результате исключения «подозреваемых» уравнений, из-за выбора исключающих датчиков.

Метод коэффициентов пропорциональности [14] является разновидностью метода структурного исключения. В нем так же применяется процедура исключения, однако, контролю подвергается рассогласование отношений отклонений измеряемых и отношений отклонений расчётных параметров – коэффициентов пропорциональности, соответствующих нормальному функционированию двигателя на заданном режиме работы. В этом случае, удаётся определить взаимосвязь между двумя измеряемыми параметрами, инвариантную к неисправному состоянию двигателя, т.е. отражающую эту взаимосвязь и в нормально функционирующих контурах.

Для получения коэффициентов пропорциональности:

$$K_{ip} = \frac{\delta x_i}{\delta x_p} \quad (1.11)$$

где K_{ip} – коэффициент пропорциональности, необходимо сначала линеаризовать замкнутую систему уравнений математической модели двигателя:

$$a_{i1}\delta x_1 + a_{i2}\delta x_2 + \dots + a_{in}\delta x_n = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (1.12)$$

где $a_{i1} \dots a_{in}$ – коэффициенты полинома.

Затем обе части каждого уравнения (1.12) можно разделить, например, на $\delta x_p \neq 0$ и получить систему уравнений:

$$a_{i1}K_{1p} + a_{i2}K_{2p} + \dots + a_{in}K_{np} = -a_{ip}, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Система (1.12) переопределена: в ней количество уравнений на единицу больше числа неизвестных, так как $K_{pp} = 1$. Для того, чтобы решить эту систему, необходимо исключить из неё какое-либо уравнение i и найти коэффициент пропорциональности отклонения двух измеряемых параметров:

$$K_{qp}^{-i} = \frac{\delta x_q^{-i}}{\delta x_p^{-i}} = (-1)^{q-p} \frac{J_{iq}}{J_{ip}}$$

где J_{iq}, J_{ip} – определители подматрицы матрицы Якоби, полученные вычёркиванием строки i и столбцов p и q соответственно, индекс минус i означает, что параметр определён при исключённом уравнении f_i . Если

$$K_{qp}^* = \frac{\delta x_q^*}{\delta x_p^*} = K_{qp}^{-i} \neq K_{qp}^{-j}, \quad j \neq i, \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

где K^* – коэффициент пропорциональности для измеряемых параметров, то принимается версия о нарушении исключённого уравнения f_i .

Если $K_{qp}^* \neq K_{qp}^{-j}$ при всех $j \neq i$, принимается версия о недостоверности измерения одного или обоих измеряемых параметров. В случае, когда,

$$K_{qp}^{-i} = K_{qp}^{-i_1} = K_{qp}^{-i_2} = \dots, \quad \text{то уравнения } i_1, i_2 \dots \text{ образуют контур, т.е.}$$

$$K_{qp}^{-i} = K_{qp}^{-i_1} = K_{qp}^{-i_2} = \dots, \quad \text{и отказ локализуется в пределах этого контура.}$$

Процедура исключения уравнений проводится по методу структурного исключения [62, 54, 63, 67].

Отметим, что если знаменатель в (1.11) близок к нулю, т.е. $K_{qp}^{-i} \rightarrow \infty$, то $K_{pq}^{-i} \rightarrow 0$, и взаимосвязи между параметрами p и q нет.

Эталонные значения K_{qp}^{-i} , можно рассчитать с помощью модели до эксперимента.

Основным преимуществом этого метода является возможность установления линейных связей непосредственно между измеряемыми параметрами при нормальном функционировании двигателя, недостатком – необходимость определять эталонные значения коэффициентов пропорциональности в каждый момент времени в случае контроля на переходном режиме.

В методе контроля характеристик конструкции [65] кроме l измеряемых параметров, используемых для замыкания исходной системы уравнений, s параметров, оставшихся от общего количества измеряемых параметров, можно использовать как контрольные для определения каких-либо s характеристик конструкции двигателя, которые представлены в соответствующих уравнениях как

постоянные. Вполне можно предположить, что эти характеристики также могут измениться в результате возникновения отказа.

К таким характеристикам, в первую очередь, относят напорные и мощностные характеристики насосов, КПД насосов, турбин, коэффициенты гидросопротивления форсуночных головок и рубашки охлаждения камер.

Основная идея этого метода состоит в следующем. Замкнём систему уравнений исходной модели измеряемыми параметрами X_q^* , $q > l$. Введём дополнительно, помимо X_n , в качестве неизвестных переменных ещё и s параметров - C_s - коэффициентов, характеризующие изменение параметров конструкции при возникновении отказа:

$$C_s = \{c_1, c_2, \dots, c_s\}, \quad s = q - l$$

где C – поправочный коэффициент, изменяющийся при возникновении и развитии отказа, s – количество коэффициентов, т.е. замкнутая система уравнений с $n + s$ неизвестными принимает вид:

$$F_n(X_q^*, X_n, C_s, A_k) = 0,$$

$$X_s = F_s(X_s^*), \quad s = q - l$$

где F_s - связывает измеряемые параметры с соответствующими переменными.

Установлено, что коэффициенты C_s следует вводить в уравнения мультипликативно, например, следующим образом:

$$f^* = c \cdot f^0$$

где f^0 – характеристика конструкции, полученная при автономных испытаниях; f^* – характеристика, полученная в результате возникновения отказа.

Коэффициенты C_s могут изменяться при изменении режима испытания, т.е. являются функциями Ψ_s параметров X_u^* , определяющих режимы испытания, т.е.:

$$C_s = \Psi_s(X_u)$$

$$X_u^* = \{x_1^*, x_2^*, \dots, x_u^*\}, \quad u = n - m.$$

Процедура контроля характеристик конструкции сводится к следующему.

1. В систему уравнений математической модели вводятся дополнительные

неизвестные в виде мультипликативных коэффициентов C_s при регламентируемых документацией характеристиках конструкции.

2. Полученная система уравнений дополняется измеренными значениями параметров в количестве искомых коэффициентов и обеспечивающих структурную невырожденность системы уравнений.

3. В качестве диагностического признака рассматривается отклонение решения системы уравнений относительно искомых коэффициентов от единицы.

4. В случае превышения какого-либо одного отклонения допустимого значения принимается решение о нарушении соответствующей характеристики конструкции.

5. Если допустимое значение превысят одновременно несколько отклонений, то отказ по данному методу не локализован.

Преимуществом рассмотренного метода является ясный физический смысл диагностических признаков, характеризующих отклонения локальных характеристик двигателя в случае возникновения отказа, недостатком – неопределенность в выборе таких признаков, так как априори невозможно прогнозировать, какая из характеристик двигателя будет нарушена в результате отказа. Поэтому этот метод эффективен тогда, когда множество отказов может быть жёстко ограничено.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

Исходя из постановки задачи, обзора и анализа литературных и патентных источников можно сделать вывод, что при диагностировании состояния ЖРД в процессе ОИ для повышения достоверности определения неисправного состояния и локализации конкретного отказа целесообразно применять многоуровневую процедуру контроля, которая включает в себя такие методы, как:

- 1) Контроль отклонений измеренных значений параметров от их расчётных.
- 2) Контроль характеристик агрегатов двигателя от характеристик,

полученных при автономных испытаниях.

3) Локализация отказа по методу структурного исключения [23].

Достоверность диагностирования определяется тем, что каждый последующий уровень контроля должен подтверждать результаты, полученные на предыдущем уровне. Это обеспечивает снижение вероятности выдачи ложной команды на выключение двигателя и вероятности пропуска дефекта за счёт дублирования принятий решения на каждом уровне контроля.

ГЛАВА 2. КОНТУР АР И СУ КАК ОБЪЕКТ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Рассмотрим контур АР и СУ как самостоятельный объект диагностирования.

В основном контур автомата разгрузки и стояночного уплотнения ТНА представляет собой систему гидравлических магистралей, обеспечивающих охлаждение РУП, работу автомата разгрузки и стояночного уплотнения. Конструкция ТНА, включая контур автомата разгрузки и стояночного уплотнения ТНА, представлена на рисунке 2.1.

2.1 Принцип действия автомата разгрузки насоса окислителя ЖРД

Автомат разгрузки (рисунок 2.2) предназначен для разгрузки радиально-упорного подшипника от действия осевой силы и предохраняет его от сжатия, затиров и, как следствие, возможных возгораний в полости насоса окислителя. Осевая сила на рабочем колесе турбины возникает за счёт перепада давлений на входе и выходе рабочего колеса. Эта сила передаётся на вал, действует на радиально-упорный подшипник турбонасосного агрегата и уравнивается осевой силой, возникающей на шнеке и центробежном колесе насоса окислителя. Нарушение баланса этих сил может привести к превышению предельной нагрузки на РУП. Для решения задач минимизации усилий до значений, при которых будет обеспечиваться надёжная работа РУП, служит АР, который обеспечивает баланс осевых сил на всех режимах работы двигателя⁵.

При увеличении давления на радиально-упорный подшипник увеличивается давление в полости АР, что приводит к перемещению вала насоса окислителя в сторону противоположную действию осевой силы и, как следствие, уменьшению осевой силы и снижению нагрузки на РУП⁶. На валу насоса окислителя установлен датчик, регистрирующий осевое перемещение вала, которое связано с изменением

⁵ Каналин Ю.И., Чернышева И.А., Прогноз величины осевой силы турбины ТНА ЖРД большой тяги, Труды КБЭМ, 2014.- № 31, с.90-109

⁶ Марцинковский В.А., Ворона П.Н., Насосы атомных электростанций, М, Энергоатомиздат, 1987г., с.96

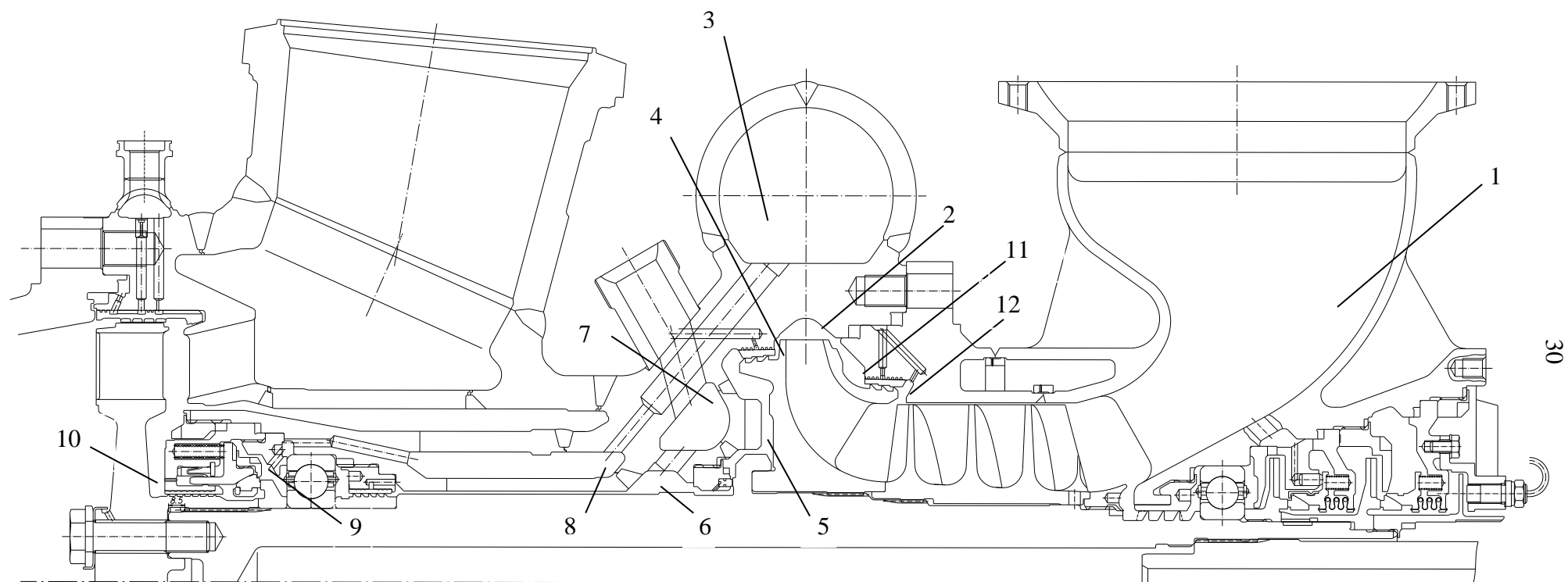


Рисунок 2.1 – Конструкция ТНА, включая контур автомата разгрузки и стояночного уплотнения

зазора в АР, определяющего регламентируемый диапазон перемещений вала ТНА, в котором РУП разгружен от действия сил на рабочем колесе турбины.

Обозначения на схеме контура АР и СУ ТНА:

- 1 – вход в насос окислителя,
- 2 – выход из центробежного колеса насоса окислителя,
- 3 – выход из насоса окислителя,
- 4 – лабиринтное уплотнение автомата разгрузки,
- 5 – щель автомата разгрузки
- 6 – коллектор перепуска,
- 7, 8 – место установки датчиков давления,
- 9 – полость перед РУП и СУ
- 10 – полость за СУ.
- 11 – лабиринтное уплотнение переднего диска ЦБК,
- 12 – выход из шнека,
- 2су – лабиринтное уплотнение СУ,
- 3су – проходные отверстия СУ,
- 2-11-12 – передний диск ЦБК,
- 3-8-9 – магистраль охлаждения РУП,
- 6-7-1 – магистраль перепуска.

Основные уравнения контура представлены в [32, 47] и скорректированы с целью интегрирования их в модель ЖРД в целом.

2.2 Принцип действия стояночного уплотнения

Стояночное уплотнение (рисунок 2.3) представляет собой уплотнение торцевого типа, работающее следующим образом. Пирографитовое кольцо контактирует с ползуном. Ползун совершает осевые перемещения внутри металлической манжеты, установленной в неподвижном корпусе. Ползун перемещается под действием сил пружин от разности сил, связанных с перепадом

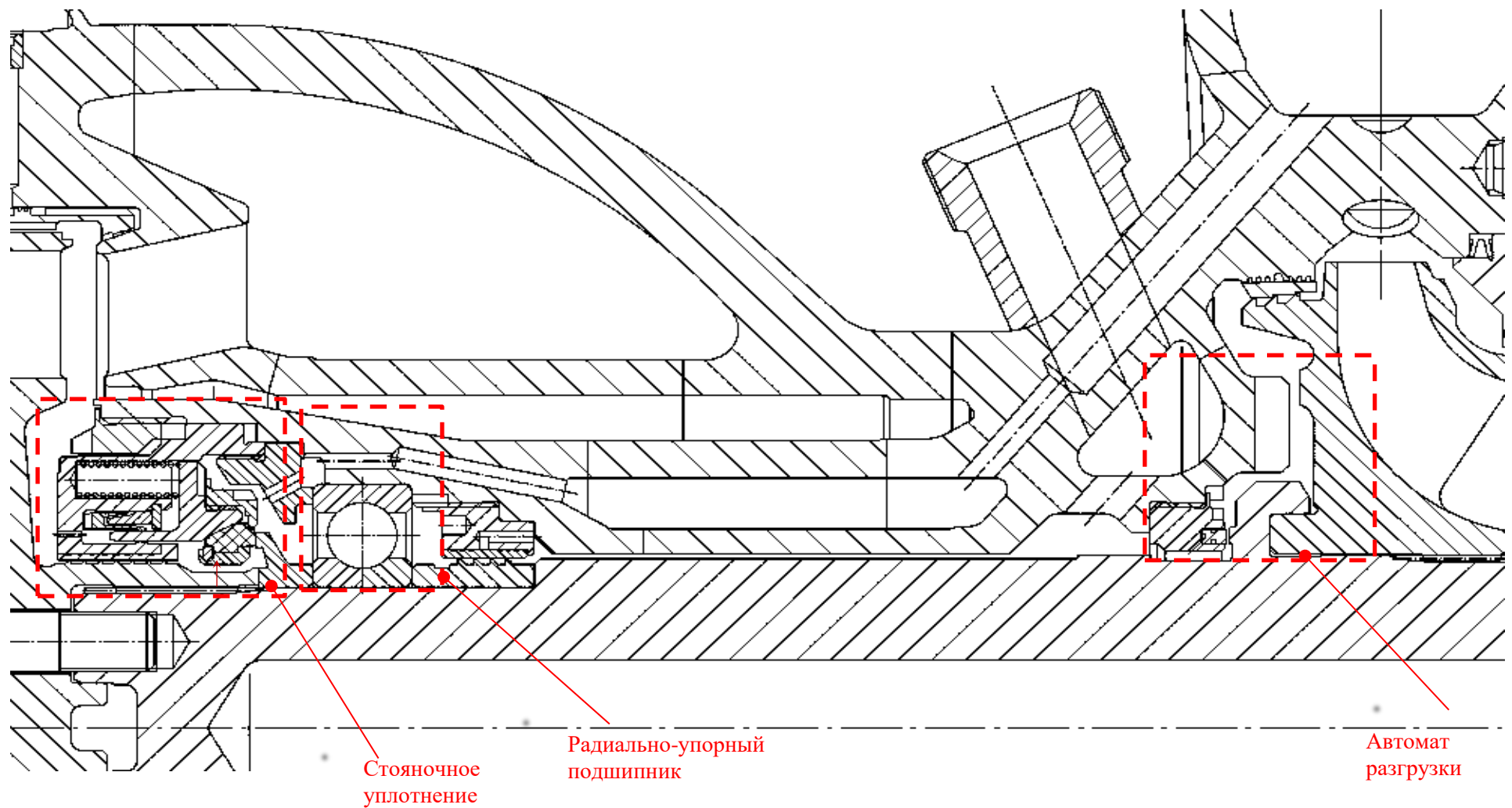


Рисунок 2.2 – Конструкция контура автомата разгрузки и стоячного уплотнения НО.

давления на ползуне, и силы трения между манжетой и ползуном, которые должны быть уравновешены⁷. Во время работы двигателя осевой зазор между пирографитовым и опорными кольцами обеспечивает отсутствие контакта и износа деталей СУ.

Момент открытия торцевого зазора в СУ наступает в процессе запуска двигателя с ростом частоты вращения вала ТНА, когда перепад давлений на СУ достигает такой величины, что создаются условия для преодоления силы поджатия, создаваемой пружинами, и силы трения ползуна.

Дальнейшее открытие торцевого зазора в СУ происходит при росте частоты вращения вала ТНА и, соответственно, увеличении перепада давлений на СУ до достижения установившегося режима работы. При этом величина торцевого зазора установится соответственно величине перепада давления на СУ и величине осевого зазора в АР. Перемещение ползуна СУ связано с перемещением диска АР следующим уравнением:

$$x_{cy} = A + (x_{ap} - x_{ap \text{ мин сб}})$$

где x_{cy} – перемещение ползуна, A – максимально возможное перемещение ползуна СУ ($= 2$ мм), x_{ap} – перемещение диска АР, $x_{ap \text{ мин сб}}$ – минимальный сборочный зазор АР.

При уменьшении частоты вращения ТНА и соответственно при уменьшении перепада на СУ постоянная величина торцевого зазора сохраняется до тех пор, пока не будет преодолена сила трения ползуна при его движении в обратном направлении.

При дальнейшем уменьшении частоты вращения ТНА и соответственно при уменьшении перепада на СУ происходит закрытие торцевого зазора в СУ.

Момент закрытия торцевого зазора в СУ наступает тогда, когда перепад давлений на СУ уменьшается до величины, при которой сила поджатия, создаваемая пружинами, начинает превышать силы, создаваемые гидравлическими потоками, и силу трения ползуна.

⁷ Гребенюк А.Т., Каналин Ю.И., Полетаев Н.П., Расчётно-методическое обеспечение проектирования стояночного уплотнения кислородного насоса ЖРД, Труды КБЭМ, 2014.- № 31, с.131-145

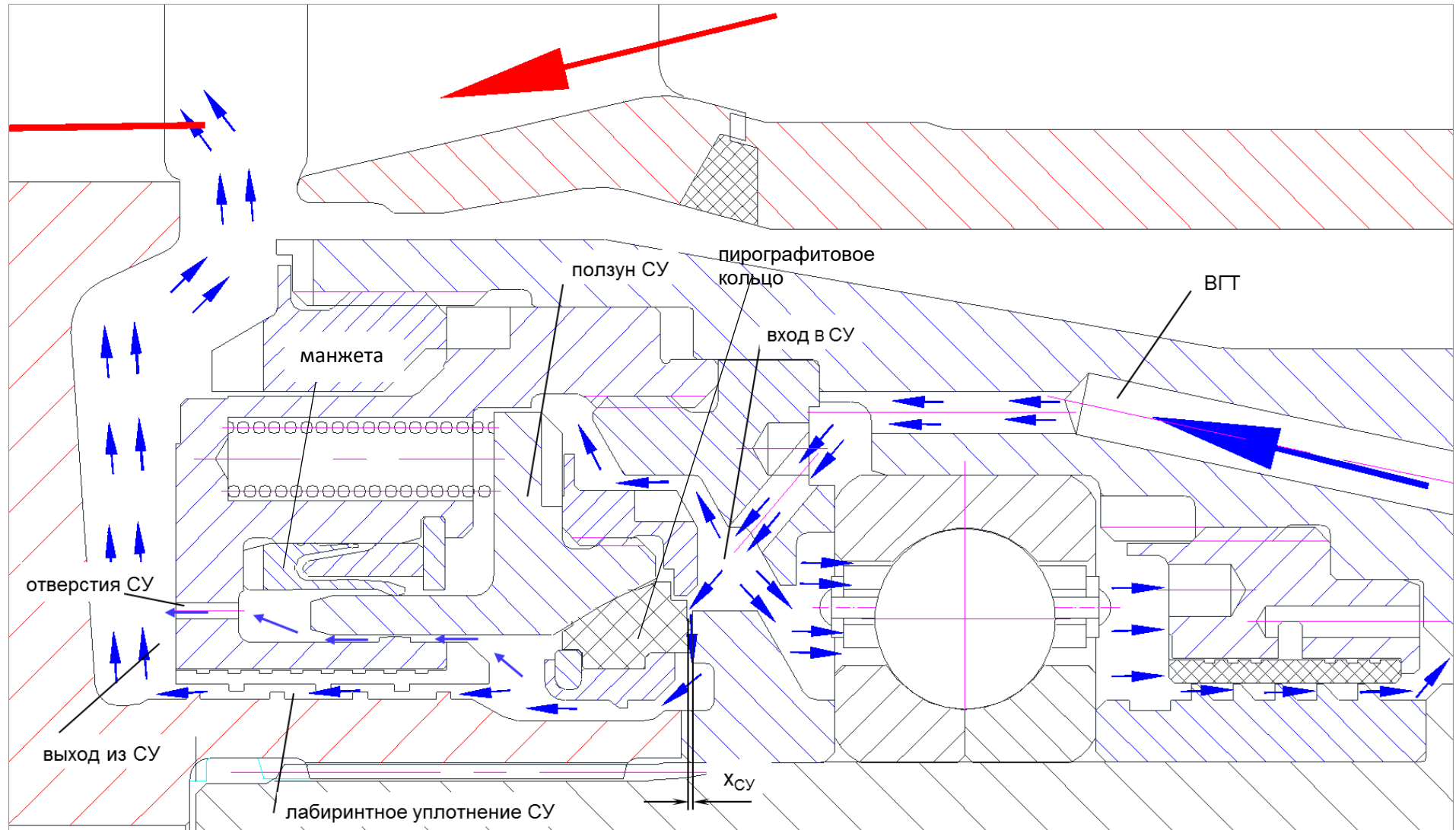


Рисунок 2.3 – Конструкция стояночного уплотнения и направление потоков окислителя (синие стрелки) и генераторного газа (красные стрелки).

2.3 Особенности нарушения нормального функционирования контура автомата разгрузки и стояночного уплотнения ТНА

При отработке мощных ЖРД конструкции НПО «Энергомаш» были отмечены следующие нарушения функционирования контура АР и СУ:

1. Мелкие сколы покрытия крыльчатки насоса окислителя, приводящие к нарушению прецизионной балансировки ТНА, к увеличению прецессии вала, перекрытию зазоров лабиринтных уплотнений и, как следствие, к возгораниям.

2. Надлом или намагничивание диска датчика осевого перемещения вала ТНА приводит к недостоверной оценке изменения щели АР, что может привести к ложному срабатыванию системы аварийной защиты

3. При многократных испытаниях ТНА корпусные детали деформируются в осевом направлении - «тянутся». В этом случае нарушается жёсткая связь между осевым перемещением и зазором в АР. Эти особенности учитываются при конструировании правильным выбором сборочных зазоров.

4. Возникновение трещин и выработки пирографитового кольца СУ, приводят к недопустимой негерметичности уплотнения.

5. При многократных испытаниях одного экземпляра двигателя истирается серебряное покрытие на усике манжеты при перемещении ползуна СУ, что приводит к уменьшению натяга манжеты и увеличению утечки.

6. Наволакивание материала серебряного покрытия усика манжеты на ползун приводит к тому, что манжета остаётся в открытом состоянии. Это приводит к утечке через СУ при неработающем двигателе. Если утечка большая, то колесо турбины охлаждается до - 180 °С. В этом случае при запуске от «теплового удара» на рабочем колесе турбины (РКТ) возникают трещины.

7. Увеличение зазора в лабиринтном уплотнении после РУП в результате износа материалов в процессе работы.

8. Задевание заднего бурта крыльчатки центробежного насоса за лабиринтное уплотнение (прецессия, изгиб вала).

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

1 Представлены особенности конструкции и работы АР и СУ в составе двигателя.

2 Представлен перечень отказов в контуре, возникших при ОИ двигателей.

3 Предполагается, что такие и аналогичные отказы могут быть выявлены на основе недопустимых отклонений измеренных значений параметров от расчётных по математической модели нормально функционирующего двигателя.

ГЛАВА 3 ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЖРД С КОНТУРОМ АР и СУ ТНА

3.1. Штатная математическая модель ЖРД

Штатная математическая модель ЖРД, используемая обычно для диагностирования работы двигателя в целом, представляет собой систему стандартных, общеизвестных нелинейных алгебраических уравнений стационарных рабочих процессов в основных агрегатах двигателя [5]. Прямое применение её для диагностики работы контура АР и СУ до недавнего времени не давало результатов из-за малой чувствительности медленноменяющихся параметров двигателя таких как давления, температуры, обороты вала ТНА, положения приводов агрегатов управления к отказам в контуре АР и СУ. Задачи диагностики контура решались с помощью локальной математической модели контура, граничные условия для которой определялись на основе среднестатистических параметров работы двигателя, т е не учитывали особенностей конкретной сборки и взаимовлияние агрегатов в процессе работы. И, следовательно, не позволяли достоверно определять состояние контура АР и СУ. Кроме того, по количеству уравнений, модель контура сопоставима со штатной моделью ЖРД и их совмещение порождало ряд проблем, связанных с трудностями решения больших систем уравнений и недостаточной мощностью компьютерной техники. В настоящее время, как будет показано далее, появилась возможность решить задачи объединения математических моделей в единую модель ЖРД.

3.2 Диагностическая модель контура АР и СУ

Для проведения диагностики функционирования контура автомата разгрузки и стояночного уплотнения ТНА необходимо разработать его диагностическую модель.

В состав диагностической модели входят:

1. Математическая модель рабочих процессов.

2. Система измерений параметров двигателя.
3. Алгоритмы процедур диагностирования.

Для разработки системы уравнений диагностической модели контура необходимо изучить особенности его конструкции, процессов гидравлики и нагрузок на основные элементы, входящие в его состав, а также типичные отказы.

3.3 Математическая модель контура автомата разгрузки и стояночного уплотнения ТНА

3.3.1. Модификация локальной математической модели контура АР и СУ для интеграции в штатную модель ЖРД

Для интеграции локальной математической модели контура АР и СУ в штатную модель ЖРД проведена замена эмпирических уравнений на классические уравнения гидрогазодинамики. В этом разделе представлены уравнения рабочих процессов контура АР и СУ с учётом её интеграции в штатную модель ЖРД.

1 Давление газа на входе в турбину в локальной модели определялось по формуле:

$$p_{\text{Газ ВХ Т}} = p_{\text{ОК ВХ ГГ}}^* + 1 - \Delta p_0, \quad (3.1)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta p_0 = & a_0 + a_1 \cdot (p_{\text{ОК ВХ ГГ}}^* + 1) + a_2 \cdot (p_{\text{ОК ВХ ГГ}}^* + 1)^2 + (K_m^* - K_m^{\text{НОМ}}) \cdot (b_0 + b_1 \cdot P_{\text{П}}^* + \\ & + b_2 \cdot P_{\text{П}}^{*2}) + (T_{\text{ОК ВХ Д}}^* - T_{\text{ОК ВХ Д}}^{\text{НОМ}}) \cdot (c_0 + c_1 \cdot P_{\text{П}}^* + c_2 \cdot P_{\text{П}}^{*2}) + (T_{\text{Г ВХ Д}}^* - \\ & T_{\text{Г ВХ Д}}^{\text{НОМ}}) \cdot (d_0 + d_1 \cdot P_{\text{П}}^* + d_2 \cdot P_{\text{П}}^{*2}), \end{aligned}$$

а, b, с и d – коэффициенты аппроксимации статистических данных, $P_{\text{П}}$ – тяга двигателя, $p_{\text{ОК ВХ ГГ}}$ – давление окислителя на входе в газогенератор, K_m – массовое соотношения компонентов топлива в камере сгорания, $T_{\text{ОК(Г) ВХ Д}}$ – температура окислителя (горючего) на входе в двигатель. Здесь и далее параметры, обозначенные звёздочкой, определены в процессе ОИ.

Для интеграции в штатную математическую модель давление газа на входе в турбину определяется следующим образом:

$$p_{\text{Газ ВХ Т}} = \sqrt{p_{\text{ГГ}}^2 - \zeta \cdot \dot{m}_{\text{ГГ}}^2 \cdot R_{\text{ГГ}} \cdot T_{\text{Газ ГГ}}}, \quad (3.2)$$

где ζ – коэффициент сопротивления газовой магистрали, $R_{ГГ}$ – газовая постоянная газогенератора, $\dot{m}_{ГГ}$ – расход через газогенератор, $T_{ГГ}$ – температура газа в газогенераторе, $p_{ГГ}$ – давление газа в газогенераторе. Здесь и далее параметры, входящие в формулы штатной математической модели определяются в процессе расчёта.

2 Статическое давление газа на выходе из турбины в локальной модели определялось по формуле:

$$p_{\text{Газ Вых Т Ст}} = p_{\text{Ок Вх ГГ}}^* + 1 - \Delta p_{\text{Т}}, \quad (3.3)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta p_{\text{Т}} = & a_0 + a_1 \cdot (p_{\text{Ок Вх ГГ}}^* + 1) + a_2 \cdot (p_{\text{Ок Вх ГГ}}^* + 1)^2 + (K_m^* - K_m^{\text{НОМ}}) \cdot (b_0 + b_1 \cdot P_{\text{П}}^* + \\ & + b_2 \cdot P_{\text{П}}^{*2}) + (T_{\text{Ок Вх Д}}^* - T_{\text{Ок Вх Д}}^{\text{НОМ}}) \cdot (c_0 + c_1 \cdot P_{\text{П}}^* + c_2 \cdot P_{\text{П}}^{*2}) + (T_{\text{Г Вх Д}}^* - \\ & - T_{\text{Г Вх Д}}^{\text{НОМ}}) \cdot (d_0 + d_1 \cdot P_{\text{П}}^* + d_2 \cdot P_{\text{П}}^{*2}). \end{aligned}$$

Для интеграции в штатную математическую модель статическое давление газа на выходе из турбины определяется следующим образом:

$$p_{\text{Газ Вх Т Ст}} = \sqrt{p_{\text{Газ Вх ГД Ст}}^2 + \zeta \cdot \dot{m}_{\text{Вых Т}}^2 \cdot R_{ГГ} \cdot T_{\text{Газ ГГ}}}, \quad (3.4)$$

где $\dot{m}_{\text{Вых Т}}^2$ – расход газа через турбину, $p_{\text{Газ Вх ГД Ст}}$ – статическое давление газа на входе в газовод.

3 Давление окислителя на входе в насос в локальной модели определялось по формуле:

$$p_{\text{Ок Вх Н}} = p_{\text{Ок Вых Ф}}^* - \Delta p_{\text{Ок Вх Н}} + 0,1 \cdot \frac{\rho_{\text{Ок Вх БН}} - \rho_{\text{Ок Вых БН}}}{2} \cdot \left(H_{\text{Ок БН}}^* - \frac{c_{\text{Ок Вых БН}}^2 - c_{\text{Ок Вх БН}}^2}{2 \cdot g} \right), \quad (3.5)$$

где $p_{\text{Ок Вых Ф}}$ – давление окислителя на выходе из фильтра, $\rho_{\text{Ок Вх(Вых) БН}}$ – плотность окислителя на входе (выходе) в бустерный насос, $H_{\text{Ок БН}}$ – напор бустерного насоса окислителя, $c_{\text{Ок Вых(Вх) БН}}$ – скоростной напор на выходе(входе) в бустерный насос окислителя.

Для интеграции в штатную математическую модель давление окислителя на входе в насос определяется следующим образом:

$$p_{\text{Ок Вх Н}} = p_{\text{Ок Вых БН}} - \zeta \cdot \left(\frac{\dot{m}_{\text{Ок Н}}}{\dot{m}_{\text{Ок Н}}^{\text{НОМ}}} \right)^2 \cdot \frac{\rho_{\text{Ок Вх БН}}^{\text{НОМ}}}{\rho_{\text{Ок Вх БН}}}, \quad (3.6)$$

где $p_{\text{ок вых бн}}$ – давление окислителя на выходе из бустерного насоса, $\dot{m}_{\text{ок н}}$ – расход насоса окислителя.

4 Давление окислителя на выходе из насоса в локальной модели определялось по формуле:

$$p_{\text{ок вых н}} = p_{\text{ок вх гт}}^* , \quad (3.7)$$

где $p_{\text{ок вх гт}}$ – давление окислителя на входе в газогенератор.

Для интеграции в штатную математическую модель давление окислителя на выходе из насоса определяется следующим образом:

$$p_{\text{ок вых н}} = p_{\text{ок вх н}} + H_{\text{НО}} , \quad (3.8)$$

где $H_{\text{НО}}$ – напор насоса окислителя.

5 Давление окислителя на входе в газогенератор в локальной модели определялось по формуле:

$$p_{\text{ок вх гт}} = p_{\text{ок вх н}}^* - \Delta p_{\text{ок вх гт}} + 0,1 \cdot \frac{\rho_{\text{ок вх н}} - \rho_{\text{ок вых н}}}{2} \cdot \left(H_{\text{ок н}}^* - \frac{c_{\text{ок вых н}}^2 - c_{\text{ок вх н}}^2}{2 \cdot g} \right) , \quad (3.9)$$

где $c_{\text{ок вых(вх) н}}$ – скоростной напор на выходе(входе) в насос окислителя, $\rho_{\text{ок вх(вых) н}}$ – плотность окислителя на входе (выходе) в насос.

Для интеграции в штатную математическую модель давление окислителя на выходе из насоса определяется следующим образом:

$$p_{\text{ок вых н}} = p_{\text{ок вх н}} + H_{\text{НО}} . \quad (3.10)$$

6 Напор насоса окислителя в локальной модели определялось по формуле:

$$H_{\text{НО}} = \frac{p_{\text{ок вх гт}}^* - p_{\text{ок вх н}}^*}{0,1 \cdot \frac{\rho_{\text{ок вх н}} - \rho_{\text{ок вых н}}}{2}} + \frac{\Delta p_{\text{вх гт}}}{0,1 \cdot \rho_{\text{ок вых н}}} , \quad (3.11)$$

где $\Delta p_{\text{вх гт}}$ – потери давления на входе в газогенератор

Для интеграции в штатную математическую модель статическое давление газа на выходе из турбины определяется следующим образом:

$$H_{\text{НО}} = a_0 \cdot n^2 \cdot \frac{\rho_{\text{ок н}}}{\rho_{\text{ок н}}^{\text{НОМ}}} + a_1 \cdot n \cdot \dot{m}_{\text{ок н}} + a_2 \cdot \dot{m}_{\text{ок н}}^2 \cdot \frac{\rho_{\text{ок н}}^{\text{НОМ}}}{\rho_{\text{ок н}}} + a_3 \cdot \frac{\dot{m}_{\text{ок н}}^3}{n} \cdot \left(\frac{\rho_{\text{ок н}}^{\text{НОМ}}}{\rho_{\text{ок н}}} \right)^2 , \quad (3.12)$$

где a – коэффициенты характеристики напора насоса, n – число оборотов вала ТНА, $\rho_{\text{ок н}}$ – плотность окислителя в насосе.

7 Температура газа на входе в турбину в локальной модели определялась по формуле:

$$T_{\text{газ вх т}} = T_{\text{газ вх т}}^* + 273 - \Delta T_0, \quad (3.13)$$

где

$$\Delta T_0 = a_0 + a_1 \cdot (T_{\text{газ вх т}}^* + 273) + a_2 \cdot (T_{\text{газ вх т}}^* + 273)^2 + (K_m^* - K_m^{\text{НОМ}}) \cdot (b_0 + b_1 \cdot P_{\text{п}}^* + b_2 \cdot P_{\text{п}}^{*2}) + (T_{\text{ок вх д}}^* - T_{\text{ок вх д}}^{\text{НОМ}}) \cdot (c_0 + c_1 \cdot P_{\text{п}}^* + c_2 \cdot P_{\text{п}}^{*2}) + (T_{\text{г вх д}}^* - T_{\text{г вх д}}^{\text{НОМ}}) \cdot (d_0 + d_1 \cdot P_{\text{п}}^* + d_2 \cdot P_{\text{п}}^{*2}),$$

$T_{\text{газ вх т}}$ – температура газа на входе в турбину.

Для интеграции в штатную математическую модель температура газа на входе в турбину определяется следующим образом:

$$T_{\text{газ вх т}} = a_0 \cdot K_{m \text{ т}}^{-0,877} + (b_0 + b_1 \cdot K_{m \text{ т}}) \cdot (T_{\text{ок вх н}} - T_{\text{ок вх н}}^{\text{НОМ}}) + c \cdot (T_{\text{г вх н2}} - T_{\text{г вх н2}}^{\text{НОМ}}) + d \cdot (p_{\text{газ вх т}} - p_{\text{газ вх т}}^{\text{НОМ}}), \quad (3.14)$$

где $K_{m \text{ т}}$ – массовое соотношения компонентов топлива на турбине, $T_{\text{ок(г) вх н(н2)}}$ – температура окислителя и горючего на выходе из насосов.

8 Расход газа через турбину в локальной модели определялся по формуле:

$$\dot{m}_{\text{т}} = b_0 + b_1 \cdot P_{\text{п}}^* + b_2 \cdot P_{\text{п}}^{*2}, \quad (3.15)$$

где b – коэффициенты аппроксимации.

Для интеграции в штатную математическую модель давление газа на входе в турбину определяется следующим образом:

$$\dot{m}_{\text{т}} = \mu F_{\text{т}} \cdot p_{\text{газ вх т}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{\chi}{\chi-1} \cdot \frac{1}{R_{\text{гг}} \cdot T_{\text{газ гг}}}} \cdot \left[\left(\frac{p_{\text{газ вх рот}}}{p_{\text{газ вх т}}} \right)^{\frac{2}{\chi}} - \left(\frac{p_{\text{газ вх рот}}}{p_{\text{газ вх т}}} \right)^{\frac{\chi+1}{\chi}} \right], \quad (3.16)$$

где χ – показатель адиабаты в газогенераторе, μF – эффективная площадь проточной части турбины, g – ускорение свободного падения, $p_{\text{газ вх рот}}$ – давление газа на входе в ротор турбины.

9 В локальной модели расчёты проводятся с использованием объёмного расхода окислителя через насос.

Объёмный расход окислителя на входе в насос:

$$V_{\text{ок вх н}} = \frac{V_{\text{ок вх д}}^* \cdot \rho_{\text{ок вх бн}} + a \cdot \left(\frac{n_{\text{ок бн}}^*}{n_{\text{ок бн}}^{\text{НОМ}}} \right)^{1,17}}{\rho_{\text{ок вх н}}}, \quad (3.17)$$

где $V_{\text{ок вх д}}$ – объёмный расход окислителя на входе в двигатель, $n_{\text{ок бн}}$ – число оборотов вала бустерного насоса окислителя, a – коэффициент аппроксимации.

Объёмный расход окислителя на выходе из насоса:

$$V_{\text{OK Вых Н}} = \frac{V_{\text{OK Вх Н}} \cdot \rho_{\text{OK Вх Н}} + a \cdot \left(\frac{n^*}{n_{\text{НОМ}}}\right)^{1,1}}{\rho_{\text{OK Вх Н}}} . \quad (3.18)$$

В штатной математической модели расчёты проводятся с использованием массовых расходов:

$$\dot{m}_{\text{OK Вх Н}} = \dot{m}_{\text{OK К}} + \dot{m}_{\text{OK Подш}} + \dot{m}_{\text{Т бн}}, \quad (3.19)$$

$$\dot{m}_{\text{OK Вых Н}} = \dot{m}_{\text{OK Вх Н}} - \dot{m}_{\text{OK Ут}} - \dot{m}_{\text{OK Подш}}, \quad (3.20)$$

где $\dot{m}_{\text{OK К}}$ расход окислителя через камеру сгорания, $\dot{m}_{\text{OK Подш}}$ расход окислителя на охлаждение подшипника, $\dot{m}_{\text{Т бн}}$ – расход окислителя на привод турбины бустерного насоса, $\dot{m}_{\text{OK Ут}}$ – расход окислителя на утечку в полости насоса.

3.3.2 Расчётные схемы контура АР и СУ и схема силовых нагрузок

Расчётная гидравлическая схема контура автомата разгрузки и стояночного уплотнения ТНА представлена на рисунке 3.1; схема сил, действующих на элементы конструкции ТНА – на рисунке 3.2.

3.3.3 Балансы расходов

1) баланс расходов на входе в насос окислителя (рисунок 2.1, точка 1):

$$\dot{m}_{1-12} = \dot{m}_{6-1} + \dot{m}_{\text{OK Вх Н}} \quad (3.21)$$

где \dot{m}_{1-12} - расход на шнеке, \dot{m}_{6-1} - расход в коллекторе перепуска, $\dot{m}_{\text{OK Вх Н}}$ - расход на входе в насос.

2) баланс расходов на выходе из центробежного колеса насоса (точка 2):

$$\dot{m}_{\text{цбк}} = \dot{m}_{2-3} + \dot{m}_{4-6} + \dot{m}_{2-12}, \quad (3.22)$$

где $\dot{m}_{\text{цбк}}$ - расход через ЦБК, \dot{m}_{2-3} - расход на выходе из насоса, \dot{m}_{4-6} - расход в

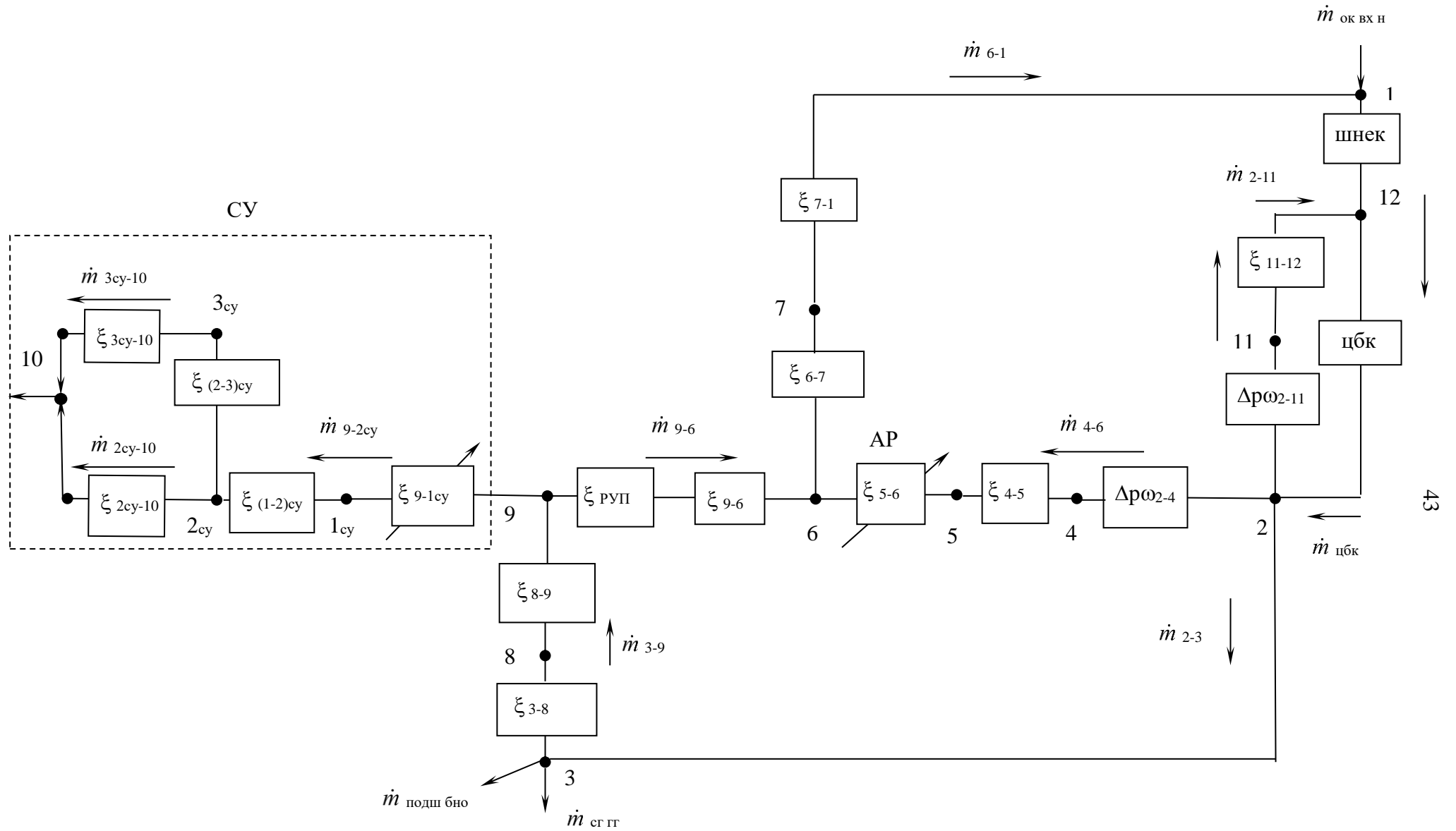


Рисунок 3.1 – Расчётная гидравлическая схема контура автомата разгрузки и стояночного уплотнения ТНА.

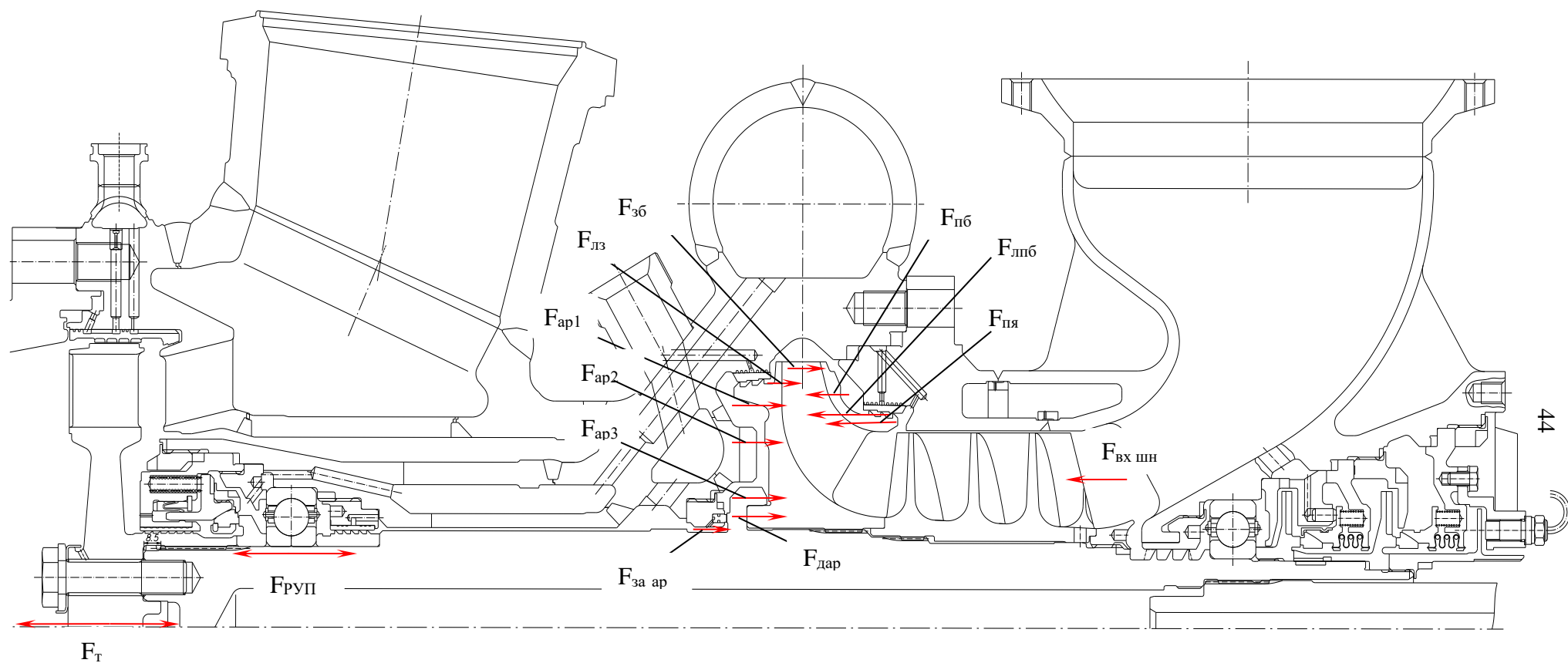


Рисунок 3.2 – Расчётная схема сил, действующих на элементы конструкции ТНА.

автомате разгрузки, \dot{m}_{2-12} - расход через лабиринтное уплотнение переднего диска ЦБК.

3) баланс расходов в узле магистралей перепуска (точка 6):

$$\dot{m}_{6-1} = \dot{m}_{9-6} + \dot{m}_{4-6}, \quad (3.23)$$

где \dot{m}_{9-6} - расход через РУП.

4) баланс расходов на входе в радиально-упорный подшипник и стояночное уплотнение (точка 9):

$$\dot{m}_{3-9} = \dot{m}_{9-10} + \dot{m}_{9-6}, \quad (3.24)$$

где \dot{m}_{3-9} - расход на РУП и СУ, \dot{m}_{9-10} - расход через стояночное уплотнение.

5) расход окислителя через СУ:

$$\dot{m}_{9-10} = \dot{m}_{2cy-10} + \dot{m}_{3cy-10}, \quad (3.25)$$

где \dot{m}_{2cy-10} - расход через лабиринтное уплотнение СУ, \dot{m}_{3cy-10} - расход через отверстия СУ.

6) баланс расходов на входе в центробежное колесо насоса окислителя (точка 12):

$$\dot{m}_{цбк} = \dot{m}_{1-12} + \dot{m}_{2-12} \quad (3.26)$$

7) баланс расходов на выходе из насоса окислителя (точка 3):

$$\dot{m}_{ок\ вх\ сг\ гг} = \dot{m}_{2-3} - \dot{m}_{3-9} - \dot{m}_{подш\ бно}, \quad (3.27)$$

где $\dot{m}_{ок\ вх\ сг\ гг}$ - расход окислителя на входе в газогенератор, $\dot{m}_{подш\ бно}$ - расход окислителя через подшипник бустерного насоса.

3.3.4 Уравнения гидравлических магистралей

1) магистраль охлаждения РУП, перед СУ и РУП (участок 8-9):

$$p_9 = p_8 - \left(\frac{\xi_{8-9}}{\rho_{8-9}} \right) \cdot \dot{m}_{3-9}^2, \quad (3.28)$$

где p_9 – давление перед СУ и РУП, p_8 – давление в точке 8, ξ_{8-9} – сопротивление на участке 8-9, ρ_{8-9} – плотность компонента на участке 8-9.

2) магистраль охлаждения РУП (участок 3-8):

$$p_8 = p_3 - \left(\frac{\xi_{3-8}}{\rho_{3-8}} \right) \cdot \dot{m}_{3-9}^2, \quad (3.29)$$

где p_3 – давление на выходе из насоса окислителя, ξ_{3-8} – сопротивление на участке 3-8, ρ_{3-8} – плотность компонента на участке 3-8.

3) на входе в СУ(участок 9-2су):

$$p_9 = p_{2СУ} + \left(\frac{\xi_{9-1СУ}}{\rho_{9-1СУ}} + \frac{\xi_{(1-2)СУ}}{\rho_{(1-2)СУ}} \right) \cdot \dot{m}_{9-10}^2, \quad (3.30)$$

где $p_{2СУ}$ – давление перед лабиринтом СУ, $\xi_{9-1СУ}$, $\xi_{(1-2)СУ}$ – , сопротивления на участке 9-2су, $\rho_{9-1СУ}$, $\rho_{(1-2)СУ}$ – плотности компонента на участке 9-2су.

4) магистраль от РУП до коллектора перепуска (участок 9-6):

$$p_9 = p_6 + \left(\frac{\xi_{9-6}}{\rho_{9-6}} \right) \cdot \dot{m}_{9-6}^2, \quad (3.31)$$

где p_6 – давление перед коллектором перепуска, ξ_{9-6} – сопротивление на участке 9-6, ρ_{9-6} – плотность компонента на участке 9-6.

5) давление окислителя в полости за СУ (точка 10):

$$p_{10} = p_{\text{газ вх т кор}} + k \cdot \dot{m}_{9-10}, \quad (3.32)$$

где p_{10} – давление на выходе из стояночного уплотнения, $p_{\text{газ вх т кор}}$ – давление в корневом сечении на входе в лопатки турбины ТНА, k – коэффициент аппроксимации.

б) давление в стояночном уплотнении (точка 3_{cy}):

$$p_{3_{\text{cy}}} = p_{2_{\text{cy}}} - \left(\frac{\xi_{2_{\text{cy}}-3_{\text{cy}}}}{\rho_{2_{\text{cy}}-10}} \right) \cdot \dot{m}_{3_{\text{cy}}-10}^2, \quad (3.33)$$

где $p_{3_{\text{cy}}}$ – давление в стояночном уплотнении, $\xi_{2_{\text{cy}}-3_{\text{cy}}}$ – сопротивление в точке 3_{cy} , $\rho_{2_{\text{cy}}-10}$ – плотность компонента в точке 3_{cy} .

7) давление окислителя в полости за СУ:

$$p_{10} = p_{3_{\text{cy}}} - \left(\frac{\xi_{3_{\text{cy}}-10}}{\rho_{3_{\text{cy}}-10}} \right) \cdot \dot{m}_{3_{\text{cy}}-10}^2, \quad (3.34)$$

где $\xi_{3_{\text{cy}}-10}$ – сопротивление в полости за СУ, $\rho_{3_{\text{cy}}-10}$ – плотность компонента в полости за СУ.

8) давление окислителя в лабиринте СУ (участок $2_{\text{cy}}-10$):

$$p_{10} = p_{2_{\text{cy}}} - \left(\frac{\xi_{2_{\text{cy}}-10}}{\rho_{2_{\text{cy}}-10}} \right) \cdot \dot{m}_{2_{\text{cy}}-10}^2, \quad (3.35)$$

где $\xi_{2_{\text{cy}}-10}$ – сопротивление в лабиринте СУ, $\rho_{2_{\text{cy}}-10}$ – плотность компонента в лабиринте СУ.

9) давление перед входом в коллектор перепуска (точка б):

$$p_6 = p_7 + \left(\frac{\xi_{6-7}}{\rho_{6-7}} \right) \cdot \dot{m}_{6-1}^2, \quad (3.36)$$

где p_7 – давление в коллекторе перепуска, ξ_{6-7} - сопротивление дренажной полости, ρ_{6-7} - плотность компонента в дренажной полости.

10) давление в коллекторе перепуска, (точка 7):

$$p_7 = p_1 + \left(\frac{\xi_{7-1}}{\rho_{7-1}} \right) \cdot \dot{m}_{6-1}^2 \quad (3.37)$$

где p_1 – давление на входе в насос, ξ_{7-1} - сопротивление в дренажной полости, ρ_{7-1} - плотность компонента в дренажной полости.

11) давление окислителя на входе в центробежное колесо (точка 12):

$$p_{12} = p_2 - \Delta p_{\omega(2-12)} - \left(\frac{\xi_{1-12}}{\rho_{11-12}} \right) \cdot \dot{m}_{2-12}^2, \quad (3.38)$$

где

$$\Delta p_{\omega(2-12)} = B \cdot \rho_{2-12} \cdot n^2 \cdot \phi^2 \cdot [(0,1 \cdot D_{к2})^2 - (0,1 \cdot D_{пл1})^2], \quad (3.30)$$

p_2 – давление на периферии ЦБК насоса, $\Delta p_{\omega(2-12)}$ - перепад давления от периферии до бурта на переднем диске центробежного колеса за счёт закрутки потока, p_2 - давление на выходе из ЦБК насоса, ξ_{1-12} - сопротивление на выходе из ЦБК насоса, ρ_{11-12} - плотность компонента на выходе из ЦБК насоса, B – коэффициент пропорциональности, n – частота вращения вала ТНА, ϕ – коэффициент закрутки потока, $D_{к2}$ – диаметр на выходе ЦБК, $D_{пл1}$ - диаметр переднего бурта на входе в лабиринтное уплотнение (по потоку).

12) давление окислителя на выходе из насоса, входе в лабиринтное уплотнение, расположенное на заднем диске ЦБК (точка 3):

$$p_3 = p_2 - \left(\frac{\xi_{2-3}}{\rho_{2-3}} \right) \cdot \dot{m}_{2-3}^2 \quad (3.40)$$

где ξ_{2-3} - сопротивление на выходе из насоса [21].

13) давление окислителя в полости АР (точка 5):

$$p_5 = p_2 - \Delta p_{\omega(2-4)} - \left(\frac{\xi_{4-5}}{\rho_{4-5}} \right) \cdot m_{4-6}^2, \quad (3.41)$$

где

$$\Delta p_{\omega(2-4)} = B \cdot \rho_{2-4} \cdot n^2 \cdot \phi^2 \cdot [(0,1 \cdot D_{к2})^2 - (0,1 \cdot D_{зл1})^2], \quad (3.41)$$

$\Delta p_{\omega(2-4)}$ - перепад давления от периферии до бурта на заднем диске ЦБК, p_5 - давление в АР, ξ_{4-5} - сопротивление в АР, ρ_{4-5} - плотность компонента в АР, $D_{зл1}$ - диаметр заднего бурта на входе в лабиринтное уплотнение (по потоку).

14) давление окислителя в полости АР:

$$p_5 = p_6 + \left(\frac{\xi_{5-6}}{\rho_{5-6}} \right) \cdot m_{4-6}^2, \quad (3.42)$$

где ξ_{5-6} - сопротивление в АР, ρ_{5-6} - плотность компонента в АР.

15) давление за шнеком насоса окислителя:

$$p_{12} = p_{ок\ вх\ н} + n^2 \cdot \rho_{шн} \cdot \left(A_1 \cdot \frac{V}{n} + A_2 \right) \cdot 10^{-7}, \quad (3.43)$$

где A_1 и A_2 - коэффициенты аппроксимации, V - объёмный расход насоса окислителя.

16) Давление на периферии ЦБК:

$$p_2 = p_{ок\ вх\ н} + \left[a_{2кк} \cdot \left(\frac{V}{n} \right)_{НО}^2 + b_{2кк} \cdot \left(\frac{V}{n} \right)_{НО} + c_{2кк} \right] \cdot (p_3 - p_{ок\ вх\ н}), \quad (3.44)$$

где $a_{2кк}$, $b_{2кк}$ и $c_{2кк}$ - коэффициенты характеристики;

17) коэффициент гидросопротивления в зазоре АР:

$$\xi_{5-6} = \xi_{цмл\ исх} + \frac{\xi_{наз} \cdot \xi_{м.ц.}}{\left(\sqrt{\xi_{наз}} + \sqrt{\xi_{м.ц.}} \right)^2}, \quad (3.45)$$

где $\xi_{м.ц.}$, $\xi_{наз}$, $\xi_{цмл\ исх}$ - коэффициенты гидросопротивления в щели АР,

$$\xi_{м.ц.} = \frac{\left[0,275 + \left(\frac{D_{AP1}}{D_{AP2}} \right)^2 + \frac{0,03 \cdot D_{AP1} \cdot \left(\frac{D_{AP1}}{D_{AP2}} - 1 \right)}{4 \cdot x_{AP}} \right] \cdot 10^{-7}}{2 \cdot g \cdot \left(\pi \cdot 10^{-6} \cdot D_{AP1} \cdot x_{AP} \right)^2}, \quad (3.46)$$

где D_{AP1} - внутренний диаметр рёбер в полости, D_{AP2} - наружный диаметр рёбер в полости AP, X_{AP} – осевой зазор AP.

18) Коэффициент гидросопротивления зазора стояночного уплотнения:

$$\xi_{9-1CY} = \frac{\left[0,25 + \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 + \frac{0,03 \cdot d_1 \cdot \left(\frac{d_1}{d_2} - 1 \right)}{4 \cdot x_{CY}} \right] \cdot 10^{-7}}{2 \cdot g \cdot (\pi \cdot 10^{-6} \cdot d_1 \cdot x_{CY})^2}, \quad (3.47)$$

где d_1, d_2 - диаметры элементов конструкции СУ, согласно схеме (рисунок 3.3), X_{CY} – торцевой зазор СУ.

3.3.5 Балансы сил

Схема сил, действующих на элементы конструкции и контур AP и СУ ТНА представлена на рисунке 3.2.

Уравнение баланса сил на насосе и турбине:

$$F_H = F_T, \quad (3.48)$$

где F_H – сумма сил, действующих на элементы конструкции насоса окислителя, F_T - сумма сил, действующих на рабочее колесо турбины ТНА.

Силы, действующие на элементы конструкции насоса

1) суммарная осевая сила на валу насоса:

$$F_H = \Delta F_{ми} + F_{зд} + F_{пд}, \quad (3.49)$$

где $\Delta F_{ми}$ – осевая сила, измеренная при модельных испытаниях, $F_{зд}$ – суммарная осевая сила, действующая на задний диск, $F_{пд}$ - осевая сила, действующая на передний диск.

2) осевая сила, действующая на передний диск:

$$F_{пд} = F_{вх шн} + F_{пя} + F_{пб} + F_{лб}, \quad (3.50)$$

где $F_{вх шн}$ - осевая сила, действующая на шнек на входе, $F_{пя}$ - осевая сила,

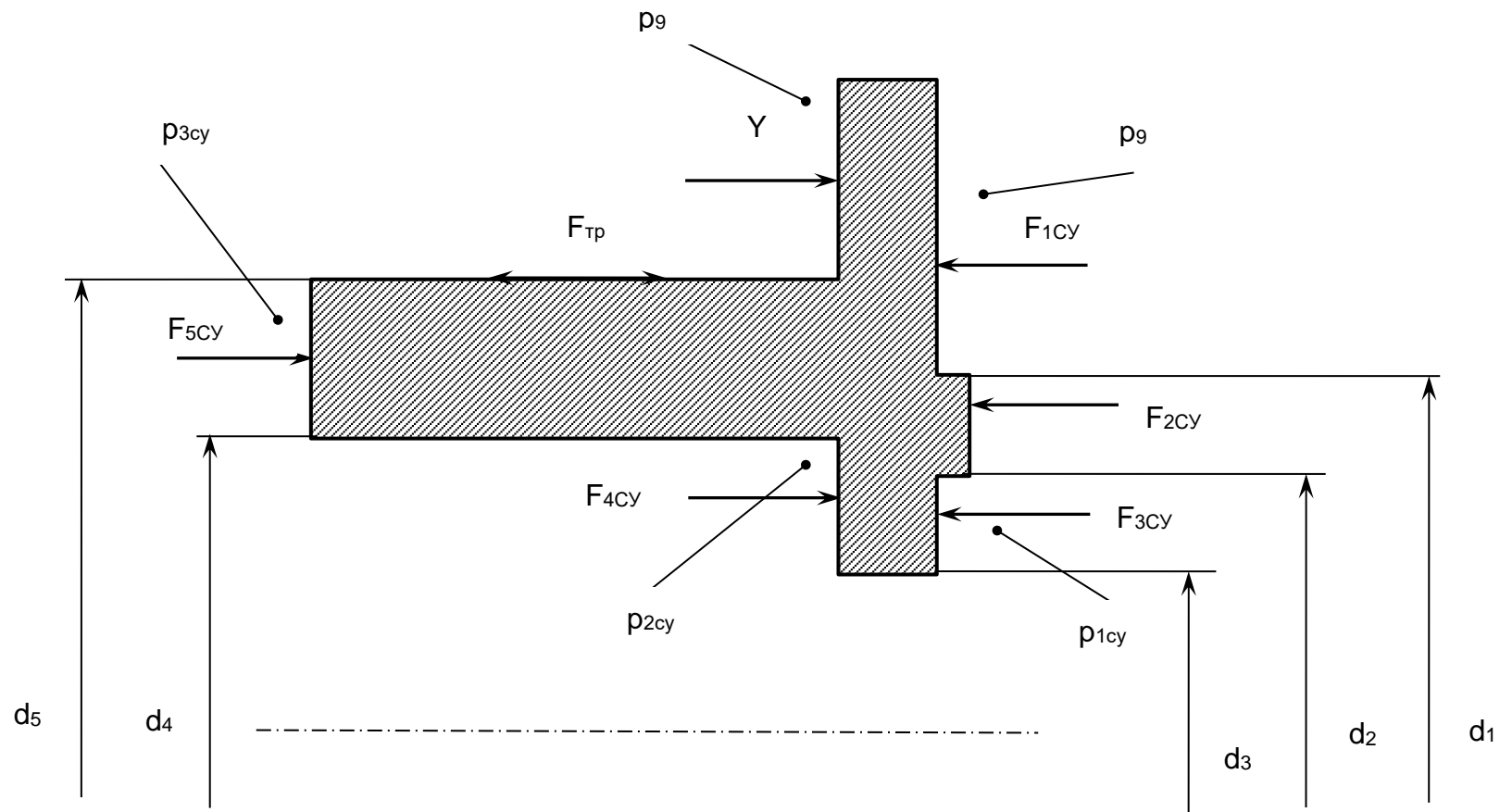


Рисунок. 3.3 – Схема сил, действующих на ползун стояночного уплотнения.

действующая на поясok диска крыльчатki, $F_{пб}$ - осевая сила, действующая на передний диск до бурта центробежного колеса, $F_{лпб}$ - осевая сила, действующая на передний диск центробежного колеса (под лабиринтом).

3) осевая сила, действующая на шнек на входе:

$$F_{вх шн} = S_{вх шн} \cdot P_1, \quad (3.51)$$

где $S_{вх шн}$ – площадь сечения на входе в шнек насоса окислителя.

4) осевая сила, действующая на поясok диска крыльчатki:

$$F_{пя} = S_{пя} \cdot P_{12}, \quad (3.52)$$

где $S_{пя}$ – площадь пояска.

5) осевая сила, действующая на передний диск до бурта центробежного колеса:

$$F_{пб} = (p_2 - 0,5 \cdot \Delta p_{\omega(2-11)}) \cdot S_{пб}, \quad (3.53)$$

где $S_{пб}$ – площадь переднего бурта ЦБК.

6) осевая сила, действующая на передний диск центробежного колеса (под лабиринтом):

$$F_{лпб} = 0,5 \cdot (p_2 - \Delta p_{\omega(2-12)} + p_{12}) \cdot S_3, \quad (3.54)$$

где S_3 – площадь переднего диска ЦБК.

7) суммарная осевая сила, действующая на задний диск ЦБК:

$$F_{зд} = F_{зб} + F_{лзб} + F_{ар} + F_{дар} + F_{за ар} + F_{рун} \quad (3.55)$$

где $F_{зб}$ - осевая сила, действующая на задний диск до бурта, $F_{лзб}$ - осевая сила, действующая на задний диск центробежного колеса, (под лабиринтом), $F_{ар}$ - осевая сила, действующая на задний диск в полости АРУ, $F_{дар}$ - осевая сила, действующая на диск АРУ, $F_{за ар}$ – осевая сила за автоматом разгрузки, $F_{рун}$ - осевая сила, действующая на радиально-упорный подшипник.

8) осевая сила, действующая на задний диск до бурта:

$$F_{зб} = -(p_2 - 0,5 \cdot \Delta p_{\omega(2-4)}) \cdot S_5, \quad (3.56)$$

где S_5 – площадь заднего диска ЦБК до бурта.

9) осевая сила, действующая на задний диск центробежного колеса, (под лабиринтом):

$$F_{лзб} = -0,5 \cdot (p_2 - \Delta p_{\omega(2-4)} + p_5) \cdot S_6, \quad (3.57)$$

где S_6 – площадь заднего диска ЦБК под лабиринтом.

10) осевая сила, действующая на задний диск в полости АРУ:

$$F_{AP} = -(p_5 - 0,5 \cdot \Delta p_{\omega AP 1}) \cdot S_7 + (p_5 - \Delta p_{\omega AP 1}) \cdot S_8 + (p_5 - \Delta p_{\omega AP 1} - 0,5 \cdot \Delta p_{\omega AP 2}) \cdot S_{ap 3}, \quad (3.58)$$

где

$$\Delta p_{\omega AP 1} = B \cdot \rho_{2-4} \cdot n^2 \cdot \varphi^2 \cdot [(0,1 \cdot D_{зи 2})^2 - (0,1 \cdot D_{AP 2})^2], \quad (3.59)$$

$$\Delta p_{\omega AP 2} = B \cdot \rho_{2-4} \cdot n^2 \cdot \varphi^2 \cdot [(0,1 \cdot D_{AP 1})^2 - (0,1 \cdot D_{AP 2})^2] \quad (3.60)$$

$\Delta p_{\omega AP 1}$ - перепад давления от бурта на заднем диске центробежного колеса до рёбер в полости автомата разгрузки, $\Delta p_{\omega AP 2}$ - перепад давления от рёбер в полости автомата разгрузки до торцевой щели.

11) осевая сила, действующая на диск АРУ:

$$F_{дAP} = -0,5 \cdot (p_5 - \Delta p_{\omega AP 1} - \Delta p_{\omega AP 2} + p_6) \cdot S_{10} \quad (3.61)$$

12) осевая сила за автоматом разгрузки:

$$F_{за ар} = -S_{11} \cdot P_6 \quad (3.62)$$

$$\Delta F_{ми} = (H \cdot \rho \cdot n^2) \quad (3.63)$$

где H – коэффициент аппроксимации

13) осевая сила, действующая на радиально-упорный подшипник:

Если $x_{AP} < x_{АРМИН}$, то:

$$F_{РУП} = B_1 \cdot (x_{AP} - x_{АРМИН})^3 + B_2 \cdot (x_{AP} - x_{АРМИН})^2 + B_3 \cdot (x_{AP} - x_{АРМИН}) \quad (3.64)$$

эмпирическая зависимость, полученная по результатам специальных испытаний, $B_1...B_3$ – коэффициенты аппроксимации.

Если $x_{АРМИН} < x_{AP} < x_{АРМАКС}$, то:

$$F_{РУП} = 0 \quad (3.65)$$

Если $x_{AP} > x_{АРМАКС}$, то:

$$F_{РУП} = C_1 \cdot (x_{AP} - x_{АРМАКС})^3 + C_2 \cdot (x_{AP} - x_{АРМАКС})^2 + C_3 \cdot (x_{AP} - x_{АРМАКС}), \quad (3.66)$$

где $C_1...C_3$ – коэффициенты аппроксимации

$x_{АРМИН сб} = 0.2$ мм - минимальное значение при сборке при осевой силе 1 т. После снятия усилия с учётом упруго-деформированного состояния узла установки

подшипника принимается $x_{AP \text{ мин}} = 0.34 \text{ мм.}$

Осевые силы, действующие на рабочее колесо турбины ТНА

Основное уравнение:

$$F_T = F_{\text{МИ КР}} \cdot \left(\frac{P_{\text{ВЫХ Т СТ}}}{n_{\text{КТ}}} \right) + \Delta F(u/c_{\text{ад}}) + \Delta F(\pi_T) + \Delta F_{\text{заз}} + \Delta F_{\text{прод}} + \Delta F_{\text{ут}}, \quad (3.67)$$

Где $F_{\text{МИ КР}}$ – осевая сила на контрольном режиме при модельном испытании, ΔF – поправки для огневого испытания.

1) поправка осевой силы по $u/c_{\text{ад}}$:

$$\Delta F(u/c_{\text{ад}}) = \left\{ a_{1u/c} \cdot \left(\frac{u}{c_{\text{ад}}} - \left(\frac{u}{c_{\text{ад}}} \right)_{\text{НОМ}} \right) + a_{2u/c} \cdot \left[\left(\frac{u}{c_{\text{ад}}} \right)^2 - \left(\frac{u}{c_{\text{ад}}} \right)_{\text{НОМ}}^2 \right] + a_{3u/c} \cdot \left[\left(\frac{u}{c_{\text{ад}}} \right)^3 - \left(\frac{u}{c_{\text{ад}}} \right)_{\text{НОМ}}^3 \right] \right\} \cdot \frac{P_{\text{ВЫХ Т СТ}}}{P_{\text{ВЫХ Т Н}}} \quad (3.68)$$

2) поправка осевой силы по π_T :

$$\Delta F(\pi_T) = \left\{ a_{1\pi} \cdot (\pi_T - \pi_T^{\text{НОМ}}) + a_{2\pi} \cdot [\pi_T^2 - (\pi_T^{\text{НОМ}})^2] + a_{3\pi} \cdot \left[\frac{\pi_T^3}{(\pi_T^{\text{НОМ}})^3} \right] \right\} \cdot \frac{P_{\text{ВЫХ Т СТ}}}{P_{\text{ВЫХ Т Н}}}, \quad (3.69)$$

где $\pi_T = \frac{P_{\text{ВХ Т}}}{P_{\text{ВЫХ Т}}}$.

3) поправка осевой силы, обусловленная изменением радиального зазора:

$$\Delta F_{\text{заз}} = E \cdot P_{\text{П}} \cdot \frac{P_{\text{ВЫХ Т СТ}}}{P_{\text{ВЫХ Т Н}}}, \quad (3.70)$$

где E – коэффициент аппроксимации.

4) поправка осевой силы, обусловленной наличием потока на продувку:

$$\Delta F_{\text{прод}} = K \cdot \frac{\dot{m}_{\text{прод}}}{\dot{m}_T} \cdot \frac{P_{\text{ВЫХ Т СТ}}}{P_{\text{ВЫХ Т Н}}}, \quad (3.71)$$

$$\text{где} \quad \dot{m}_{\text{прод}} = D_1 + D_2 \cdot P_{\text{П}} + D_3 \cdot P_{\text{П}}^2, \quad (3.72)$$

K – коэффициент аппроксимации, $\dot{m}_{\text{прод}}$ – расход на продувку, $D_1..D_3$ – коэффициенты аппроксимации.

5) поправка осевой силы от утечки через стояночное уплотнение:

$$\Delta F_{\text{ут}} = L \cdot \frac{\dot{m}_{9-10}}{\dot{m}_T} \cdot \frac{P_{\text{ВЫХ Т СТ}}}{P_{\text{ВЫХ Т Н}}}, \quad (3.73)$$

где L – коэффициент аппроксимации.

Силы, действующие на ползуне СУ

Схема сил, действующих на ползун стояночного уплотнения, представлена на рисунке 3.3. Так же на рисунке указаны диаметры, по которым рассчитаны площади, используемые в расчёте сил.

Уравнение баланса сил:

$$F_{\Sigma \text{полз су}} = F_{1\text{су}} + F_{2\text{су}} + F_{3\text{су}} - F_{4\text{су}} - F_{5\text{су}} - F_{\text{тр}}, \quad (3.74)$$

где сила трения на манжете принимается равная нулю.

$$F_{\text{тр}} = 0; \quad (3.75)$$

$$F_{1\text{су}} = P_9 \cdot S_1 \quad (3.76)$$

$$F_{2\text{су}} = 0,5 \cdot \left(p_9 + p_9 - \left(\frac{\xi_{9-1\text{су}}}{\rho_{9-1\text{су}}} \right) \cdot \dot{m}_{9-10}^2 \right) \cdot S_2 \quad (3.77)$$

$$F_{3\text{су}} = \left(p_9 - \left(\frac{\xi_{9-1\text{су}}}{\rho_{9-1\text{су}}} \right) \cdot \dot{m}_{9-10}^2 \right) \cdot S_3 \quad (3.78)$$

$$F_{4\text{су}} = \left(p_9 - \left(\frac{\xi_{9-1\text{су}}}{\rho_{9-1\text{су}}} + \frac{\xi_{(1-2)\text{су}}}{\rho_{(1-2)\text{су}}} \right) \cdot \dot{m}_{9-10}^2 \right) \cdot S_4 \quad (3.79)$$

$$F_{5\text{су}} = \left(p_{10} - \left(\frac{\xi_{3\text{су}-10}}{\rho_{9-1\text{су}}} \right) \cdot \dot{m}_{3\text{су}-10}^2 \right) \cdot S_3 \quad (3.80)$$

где $S_2..S_4$ - площади участков ползуна. Индексы соответствуют диаметрам на рисунке 3.3.

Максимальный зазор в стояночном уплотнении:

$$X_{\text{АР макс}} = \{2 + (X_{\text{АР}} - X_{\text{АРминсб}})\} \quad (3.81)$$

Если $x_{\text{су}} < X_{\text{АР макс}}$, то:

$$F_{\text{пр}} = k_{\text{пр}} \cdot z_{\text{пр}} \cdot \left[y_0 - \left(y_{\text{пр}} + X_{\text{АР}} - X_{\text{АРминсб}} - x_{\text{су}}^{\text{расч}} \right) \right], \quad (3.82)$$

где $k_{\text{пр}}$ - коэффициент жёсткости пружины, $z_{\text{пр}}$ - количество пружин, y_0 - длина пружины в свободном состоянии, y - длина пружины в собранном СУ.

В противном случае :

$$F_{\text{пр}} = k_{\text{пр}} \cdot z_{\text{пр}} \cdot \left[y_0 - \left(y_{\text{пр}} + X_{\text{АР}} - X_{\text{АРминсб}} - x_{\text{су}}^{\text{макс возм}} \right) \right] \quad (3.83)$$

Определение перемещения стояночного уплотнения X_{cy} :

$$\frac{Y_{1cy}+Y_{2cy}+Y_{3cy}+Y_{4cy}+Y_{5cy}+Y_{тр}}{k_{пр} \cdot z_{пр}} - [y_0 - (y + x_{AP} - x_{АРминсб})] \leq 2 + (x_{AP} - x_{АРминсб}) \quad (3.84)$$

то

$$x_{cy} = \frac{F_{1cy}+F_{2cy}+F_{3cy}+F_{4cy}+F_{5cy}}{k_{пр} \cdot z_{пр}} - [y_0 - (y + x_{AP} - x_{АРминсб})] \quad (3.85)$$

В противном случае:

$$x_{cy} = 2 + (x_{APУ} - x_{АРУминсб}) \quad (3.86)$$

При открытии СУ, с ростом частоты вращения вала ГНА, $F_{тр}$ имеет знак «минус», в процессе закрытия - знак «плюс».

Для определения величины торцевого зазора x_{cy} на режимах меньших, чем максимально реализованный на запуске двигателя, и следующих за ним режимах, сначала нужно определить зазор x_{cy} на максимальном режиме, а затем, определять зазор на меньших режимах.

Если в процессе снижения тяги зазор x_{cy} , определяемый по уравнению (3.84) с учётом изменения знака силы трения $F_{тр}$ с минуса на плюс, больше чем зазор, определённый на максимально реализованном режиме $x_{cy} > x_{cy \text{ макс}}$, то $x_{cy} = x_{cy \text{ макс}}$.

Если в процессе снижения тяги зазор x_{cy} меньше, чем зазор, определённый на максимально реализованном режиме $x_{cy} < x_{cy \text{ макс}}$, то x_{cy} определяется по уравнению (3.84).

Зазор СУ зависит от баланса сил на ползуне. В АР от баланса сил насоса и турбины.

15. Перепад давления $\Delta P_{подш}$ на РУП:

$$\dot{m}_{9-6} = 0,9 \cdot 1000 \cdot \rho_{9-6} \cdot F_{подш} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot 10 \cdot \Delta p_{подш}}{\rho_{9-6}} - 8,5 \cdot \left(\frac{g \cdot 10 \cdot \Delta p_{подш}}{\rho_{9-6} \cdot u_{cen}^2} \right)^{0,775}} \cdot \omega_{cen}^2 \cdot (0,001 \cdot d_{ш})^2 \quad (3.87)$$

По схеме контура АР и СУ давление в точке 5 соответствует давлению в

автомате разгрузки, измеряемому при НИ, давление в точке 7 – давлению в коллекторе перепуска и давление в точке 8 – давлению до РУП. Поэтому расчётные величины давлений в этих точках нужно сравнивать с измеренными при ОИ.

3.4 Сопряжение математической модели контура автомата разгрузки и стояночного уплотнения со штатной математической моделью ЖРД

Решением системы уравнений математической модели ЖРД являются значения давлений, расходов, плотностей компонентов топлива при заданных условиях на входе в двигатель. Систему уравнений контура автомата разгрузки и стояночного уплотнения ТНА следует замкнуть параметрами, по которым он стыкуется с основными параметрами двигателя. К этим параметрам относятся:

- давление окислителя на входе в насос;
- давление окислителя на выходе из насоса;
- давление газа на входе в турбину;
- статическое давление газа на выходе из турбины;
- давление газа на входе в ротор турбины корневое;
- уровень режима работы двигателя;
- частота вращения вала ТНА;
- расход окислителя через насос;
- расход окислителя на входе в смесительную головку газогенератора;
- расход газа через турбину ТНА;
- отношение окружной скорости турбины к адиабатной [21].

3.5 Система измерений ЖРД, включая контур автомата разгрузки и стояночного уплотнения

Система измерения параметров двигателя в процессе огневого испытания предназначена для получения максимально возможной информации о работе агрегатов и внутридвигательных процессах. Но, к сожалению, особенности конструкции датчиков, конструкции самого двигателя [21] и ограниченность

количества датчиков не всегда обеспечивают возможность измерения параметров, необходимых для достижения требуемой глубины диагностирования. Глубина диагностирования (глубина поиска дефекта) – это характеристика поиска дефектов (диагностирования), задаваемая указанием тех составных частей объекта диагностирования, с точностью до которых определяется место дефекта [10].

К системе измерения относятся следующие параметры: давления, расходы, температуры компонентов топлива, угловые положения регулирующих органов, осевые перемещения валов ТНА.

Контролируемыми параметрами контура автомата разгрузки и стояночного уплотнения ТНА являются:

- давление окислителя в контуре автомата разгрузки и стояночного уплотнения;
- давление окислителя в полости автомата разгрузки;
- давление окислителя в коллекторе перепуска;
- осевое перемещение вала насоса окислителя;

Состав датчиков, используемых для диагностирования, представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Состав измеряемых параметров ЖРД

№ п.п.	Наименование параметра
1	Угловое положение вала привода регулятора расхода
2	Угловое положение вала привода дросселя горючего
3	Давление окислителя после фильтра
4	Температура окислителя на входе в двигатель
5	Частота вращения бустерного окислителя
6	Расход окислителя на входе в двигатель
7	Давление окислителя на входе в насос
8	Давление окислителя перед форсунками газогенератора
9	Давление горючего после фильтра
10	Температура горючего на входе в двигатель
11	Частота вращения бустерного горючего
12	Расход горючего на входе в двигатель

№ п.п.	Наименование параметра
13	Давление горючего на входе в насос
14	Давление горючего на выходе из первой ступени насоса
15	Давление на входе в турбину бустерного горючего
16	Давление горючего на выходе из второй ступени насоса
17	Давление горючего на выходе из дросселя
18	Давление горючего на выходе из регулятора расхода
19	Частота вращения ТНА
20	Температура газа за турбиной
21	Осевое перемещение вала ТНА
22	Давление горючего в смесительной головке камеры
23	Температура горючего перед форсунками камеры
24	Давление окислителя в полости авторазгрузки
25	Давление окислителя в коллекторе перепуска
26	Давление окислителя перед радиально-упорным подшипником

Схема установки датчиков представлена на рисунке 3.4.

Обозначение параметров на рисунке 3.4:

- ДОДН - Давление окислителя на входе в насос
- ДОДГ - Давление окислителя перед форсунками газогенератора
- КТГ - Контроль температуры газа после турбины в газовой камере
- КПО - Контроль осевого перемещения вала ТНА
- ДОАН - Давление окислителя в полости авторазгрузки
- ДОКП - Давление окислителя в коллекторе перепуска
- ДОДШ - Давление окислителя перед радиально-упорным подшипником

3.6 Коррекция математической модели

Для повышения достоверности диагностирования каждого экземпляра двигателя должна быть определена индивидуальная математическая модель – эталон, отклонение от которого является диагностическим признаком отклонения от нормального функционирования [31]. В этой модели характеристики агрегатов,

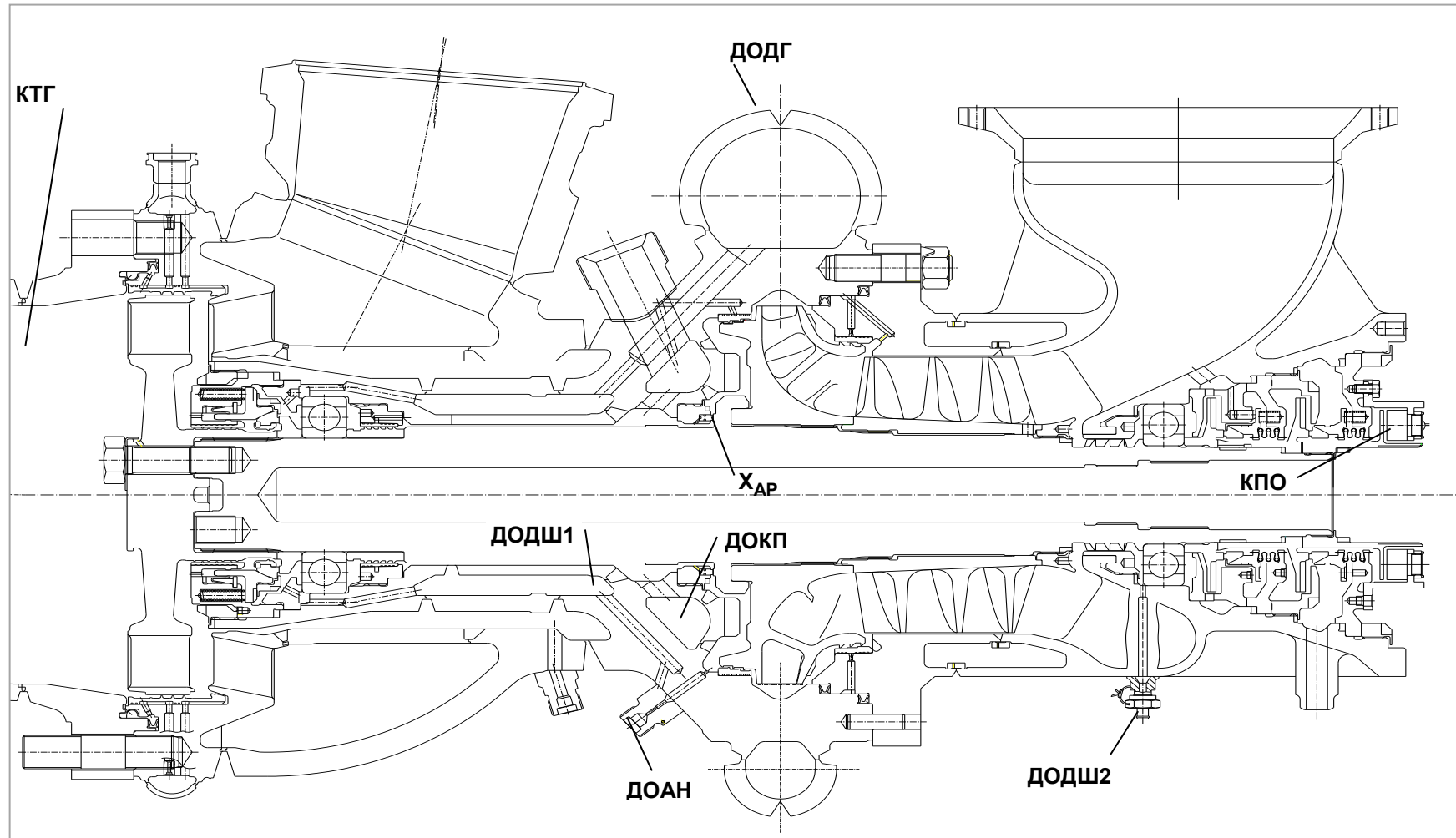


Рисунок 3.4 – Схема установки датчиков

реализуемые при ОИ, отличаются от характеристик, полученных при автономных испытаниях агрегатов, так как условия проведения ОИ существенно отличаются от условий автономных испытаний агрегатов, входящих в двигатель конкретной сборки.

Для формирования модели-эталона конкретного экземпляра двигателя проводится коррекция исходной модели – модели, так называемого, «среднего» двигателя. Обычно, модель «среднего» двигателя представляет собой модель, в которой характеристики агрегатов определены расчётным путём на основе проектных разработок.

Алгоритм коррекции математической модели основан на минимизации невязок измеренных и расчётных значений параметров на всех режимах работы исправного двигателя. При этом на каждом режиме в математическую модель вводятся коэффициенты коррекции, определяемые как решение системы уравнений математической модели при равенстве ряда переменных их измеренным значениям [65].

Алгоритм расчёта коэффициентов коррекции, аналогичен алгоритму, изложенному в разделе 1.2.3, где параметры « C_s » рассматриваются в качестве коэффициентов коррекции.

В таблице 2.2 представлены характеристики двигателя, используемые в данной работе для коррекции диагностической модели.

Таблица 3.2 – Характеристики двигателя, корректируемые в диагностической модели

№ п.п.	Наименование характеристики модели
1	Характеристика мощности бустерного горючего
2	Характеристика мощности бустерного окислителя
3	Характеристика мощности турбины ТНА
4	Характеристика напора бустерного горючего

№ п.п.	Наименование характеристики модели
5	Характеристика напора насоса горючего 1-й ступени
6	Характеристика напора насоса горючего 2-й ступени
7	Характеристика напора бустерного окислителя
8	Характеристика напора насоса окислителя
9	Перепад давления в магистрали подвода горючего к турбине БНАГ
10	Характеристика расходного комплекса турбины ТНА
11	Характеристика температуры газа за турбиной ТНА
12	Характеристика перепада давления на дросселе горючего
13	Перепад давления в рубашке камеры
14	Перепад температуры в рубашке камеры
15	Характеристика расходного комплекса камеры
16	Изменение зазора стояночного уплотнения
17	Перепад давления автомата разгрузки насоса окислителя
18	Сила, действующая в насосе окислителя

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

Разработана диагностическая модель ЖРД, включающая контур АР и СУ ТНА, в состав которой входят математическая модель конкретного экземпляра двигателя, система измерения параметров в ходе испытания двигателя и методы диагностирования, выбранные в главе 1. Такая модель рассматривается как инструмент для формирования косвенных измерений параметров двигателя, в том числе, недоступных для прямого измерения в процессе ОИ. Именно это свойство математической модели является основой для проведения диагностических процедур.

ГЛАВА 4 МЕТОДИКА И ПРОГРАММНО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

4.1 Методика диагностирования

Для решения поставленной задачи разработаны методика и программное обеспечение, реализующее численные и логические методы диагностирования. Методика реализует многоуровневый способ принятия решения и определяет основные уровни процедуры диагностирования ЖРД:

- 1 Определение момента времени возникновения отказа.
- 2 Подтверждение момента времени возникновения отказа, полученного на 1-м уровне.
- 3 Локализация отказа.
- 4 Подтверждение локализации отказа.

В данной методике используются алгоритмы, изложенные в главе 1.

На первом уровне в начале каждого стационарного режима работы двигателя выделяется диапазон времени, на котором измеряют значения каждого параметра и определяют его среднее значение. Эти средние значения принимаются за эталонные. Затем производят коррекцию объединённой математической модели. Для этого средние значения измеренных параметров подставляют в систему уравнений математической модели и из её решения определяют коэффициенты коррекции, представляющие собой поправки на характеристики, перечисленные в 3-ей главе. Эти коэффициенты вводят в исходную систему уравнений и получают эталонные характеристики модели, адекватной двигателю конкретной сборки при ОИ - объединённой скорректированной модели (ОСМ). По полученной ОСМ рассчитывают эталонные значения параметров, включая параметры контура АР и СУ, прямые измерения которых не производится в процессе ОИ. Далее в каждый момент времени проводится сравнение измеренных параметров с эталонными измерениями и, таким образом, формируются диагностические признаки первого вида. Если три и более признака, начиная с момента времени t_0 , одновременно или

последовательно пересекут границы своих допусков, рассчитанных для нормально функционирующих двигателей, то принимается решение о возможном отказе в работе двигателя, возникшем в момент времени t_0 . Решение о возникновении отказа принимается по трём параметрам для минимизации вероятности принятия ложного решения из-за возникновения недостоверности измерений. За время возникновения отказа принимается время выхода последнего из трёх параметров за границу допуска. Для подтверждения достоверности принятого решения переходят ко второму уровню диагностирования.

На втором уровне определяют отклонения измеренных параметров, вышедших за пределы допуска, от их расчётных значений, полученных по ОСМ и проводят контроль этих отклонений от допустимых значений и формируются диагностические признаки второго вида. Если допуск превышен, то принимается решение о возможности отказа в работе двигателя и переходят к следующему уровню – локализации отказа, т. е. выявлению элементов конструкции или агрегатов двигателя, в котором произошёл отказ.

На третьем уровне по ОСМ рассчитывают контролируемые характеристики двигателя, включая не измеряемые в процессе ОИ, и вычисляют диагностические признаки третьего вида – отклонения значений характеристик от эталонных. Если один из этих признаков выходит за границы допуска, значит характеристика данного агрегата при ОИ не соответствует характеристике, полученной при его автономном испытании и принимают решение, что отказ локализован в данном агрегате. Если таких признаков несколько, то принимается решение, что отказ не локализован.

На четвёртый уровень следует переходить при пост-диагностике двигателя, т.е. после огневого испытания, когда возникает необходимость локализации неисправности в пределах контура двигателя, определяемого совокупностью элементов конструкции. Обычно, при пост-диагностике выделяются версии в каком контуре двигателя содержится отказ. Поэтому можно выделить соответствующие подсистемы уравнений математической модели, описывающие рабочие процессы в том или ином контуре двигателя, и для локализации отказа в

нём использовать модифицированный метод структурного исключения, в котором при поиске отказа применяется множественное исключение уравнений. При этом формируются диагностические признаки четвёртого вида. Указанная процедура выполняется до тех пор, пока отказ не будет локализован.

Достоверность принятия решения достигается за счёт перехода на каждый последующий уровень в зависимости от решения, принятого на предыдущем, тем самым снижая вероятность ложного срабатывания и пропуска отказа. Момент времени фиксирования отказа средствами СФД можно было бы определить точнее, сузив допуск на диагностические признаки. Но в этом случае повышается вероятность ложного срабатывания СФД из-за не учёта погрешностей измерений.

Определён состав диагностических признаков, по которым проводится процедура принятия решения на каждом уровне:

- признаки 1-го вида – отклонения текущих измеренных значений параметров от эталонных среднеарифметических в начале режима. Контролируются параметры: частоты вращения основного и бустерных ТНА, расходы компонентов топлива на входе в двигатель, давления окислителя на входе в насос и ГГ, давления горючего на входе и выходе из ступеней насоса, за регулируемыми органами, давления и температуры в форсуночной головке КС, температура генераторного газа, давления окислителя в полостях АР, в коллекторе перепуска и перед РУП, а так же осевое перемещение вала ТНА;

- признаки 2-го вида – отклонения измеренных значений параметров от расчётных, определённых по скорректированной математической модели. Контролируются те же параметры, что на первом уровне диагностирования;

- признаки 3-го вида – отклонения характеристик агрегатов, реализовавшиеся при ОИ от характеристик при автономных испытаниях. Контролируются мощностные и напорные характеристики основных и бустерных насосов, мощностная, расходная и температурная характеристики турбины ТНА, перепады давления в магистралях гидротурбины горючего, дросселя горючего и в рубашке (КС), расходный комплекс КС и температура в рубашке охлаждения, изменение зазора в стояночном уплотнении, перепад давления АР насоса окислителя и сила,

действующая в насосе окислителя;

- признаки 4-го вида – нарушение взаимосвязей параметров, описываемых исключаемыми уравнениями математической модели, определяемое с помощью подстановки в эти уравнения и расчётных, и измеренных значений параметров.

Признаки 1-го вида позволяют определить момент отказа на ранней стадии его развития даже по тем параметрам, прямое измерение которых не производится в процессе ОИ. Ранее момент времени возникновения отказа определялся только по анализу измеряемых параметров. Признаки 2-го вида подтверждают предыдущее решение, что позволяет не допустить ложного срабатывания СФД и необоснованного отключения двигателя. Признаки 3-го вида позволяют определить агрегат, в котором произошёл отказ. Признаки 4-го вида подтверждают решение о локализации отказа.

Признаки 1-го и 3-го видов являются вновь введёнными по сравнению со штатной методикой диагностирования, применяемой ранее.

Основные преимущества применения данной методики диагностирования по сравнению со штатной перечислены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 Основные преимущества новой методики диагностирования

Номер п.п.	Структурные элементы СФД	Штатная методика	Новая методика	Преимущество новой методики
1	Телеметрия	Точечные средние значения измеряемых параметров на всех режимах протокола ОИ	Измеренные значения параметров ОИ с заданной дискретностью по времени	Определение момента времени возникновения отказа. Возможность применить СФД в режиме реального времени
2	Математическая модель	1 Без контура АР и СУ	1 С контуром АР и СУ	Охват контролем контура АР и СУ двигателя
		2 Без коррекции математической модели на каждом режиме ОИ	2 С коррекцией математической модели в начале каждого режима ОИ	Определяется математическая модель двигателя конкретной сборки применительно к условиям ОИ.
3	Диагностические признаки	Относительные отклонения	1 Относительные отклонения	Определение момента времени

Номер п.п.	Структурные элементы СФД	Штатная методика	Новая методика	Преимущество новой методики
		измеренных значений параметров от расчётных по математической модели	измеренных значений параметров от средних значений, рассчитанных в начале каждого режима ОИ	возникновения отказа
			2 Отклонения характеристик агрегатов, рассчитанных при ОИ, от характеристик автономных испытаний	Повышение достоверности локализации отказа. Снижение вероятности ложного срабатывания СФД

Основные отличия новой методики диагностирования от штатной:

1 В штатной методике контроль состояния двигателя проводится по осреднённым значениям параметра на режиме ОИ. В новой методике контролируются текущие значения параметров с заданной дискретностью по времени. Это даёт возможность определить момент времени возникновения отказа.

2 В разработанной методике, помимо основных агрегатов двигателя, контролем охвачен контур АР и СУ.

3 Введена коррекция математической модели ЖРД в начале каждого режима, учитывающая особенности экземпляра двигателя конкретной сборки применительно к условиям проведения ОИ.

4 В штатной методике используются два вида диагностических признаков – относительные отклонения измеренных значений параметров от расчётных по математической модели и нарушение взаимосвязей параметров, описываемых уравнениями математической модели, для каждого режима работы двигателя. Кроме этих признаков в новой методике используются два новых вида диагностических признаков: относительные отклонения измеренных значений параметров от среднего значения, определённого в начале каждого режима и отклонения характеристик агрегатов, реализованных при ОИ, от характеристик автономных испытаний, что обеспечивает достоверность локализации отказа.

4.1.1 Определение момента времени возникновения отказа.

В начале каждого стационарного режима работы двигателя выделяется диапазон времени на котором измеряют значения x_m^* каждого параметра x_m , и определяют среднее значение \bar{x}_m :

$$\bar{x}_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_m^*(t_i), \quad (3.1)$$

где n – количество измерений; $t \in M$, и M – множество индексов контролируемых измеряемых параметров.

Средние значения \bar{x}_m , используют для последующего формирования диагностических признаков отказа.

На этом же интервале времени, по полученным средним значениям производится коррекция математической модели. Описание процедуры коррекции математической модели приведено в главе 3, раздел 3.6.

Коэффициенты коррекции $C_m = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ определяют из решения системы уравнений математической модели, дополнительно замкнутой значениями \bar{x}_m (3.1) и вводят мультипликативно в характеристики конструкции двигателя:

$$f_i^0 = c_i \cdot f_i^a, \quad i \in M, \quad (3.2)$$

где f_i^a – характеристика конструкции, полученная при автономных испытаниях; f_i^0 – характеристика, конструкции, определяемая в результате коррекции модели с учетом условий проведения огневого испытания.

Далее определяют отклонения измеренных значений параметров от их средних значений определяются по формуле:

$$\Delta_m = \left| \frac{x_m^* - \bar{x}_m}{\bar{x}_m} \right| \quad (3.3)$$

Если три и более признака Δ_m (3.3), начиная с момента времени t_0 , одновременно или последовательно пересекут границы своих допусков, т.е.:

$$\Delta > \Delta_{\text{доп}} \quad (3.4)$$

то принимается решение о возможном отказе в работе двигателя, возникшего в момент времени t_0 , и переходят на следующий уровень диагностирования.

4.1.2 Контроль отклонений измеренных и расчётных значений параметров.

На этот уровень переходят для подтверждения достоверности принятого решения на первом уровне после принятия решения о возникновении отказа в момент времени t_0 .

В момент времени t_0 возникновения предполагаемого отказа определяют отклонения измеренных параметров x^* , вышедших за пределы допуска на первом уровне, от их расчётных значений x^0 , полученных по математической модели:

$$\Delta^0 = \left| \frac{x^* - x^0}{x^0} \right| \quad (3.5)$$

и проводят контроль отклонений признаков Δ_m^0 от допустимых значений. Если

$$\Delta^0 > \Delta_{\text{дол}}^0 \quad (3.6)$$

то принимается решение об отказе в работе двигателя и переходят на следующий уровень - его локализации.

4.1.3 Локализация отказа.

Для локализации отказа в зафиксированный момент времени t_0 его возникновения вычисляют диагностические признаки вида:

$$\Delta_c = \left| \frac{f^*}{f^0} \right| \quad (3.7)$$

где f^* - значение характеристики f , вычисленной по математической модели, замкнутой измеренными значениями параметров x_m^* ; f^0 - значение характеристики f , полученное при коррекции модели на 1-ом уровне. (см также: глава 1, раздел 1.2.3)

Характеристику f принимают нарушенной, если:

$$\Delta_c > \Delta_{\text{с доп}} \quad (3.8)$$

Если условие (3.8) реализуется только для одной характеристики, то принимают решение, что отказ локализован в агрегате, характеристика которого нарушена.

В случае, когда условие (3.8) реализуется для нескольких характеристик,

принимается решение, что отказ не локализован.

4.1.4 Подтверждение локализации отказа.

На этот уровень следует переходить при пост - диагностике двигателя, т.е. после огневого испытания, когда возникает необходимость локализации отказа в пределах контура двигателя, определяемого совокупностью элементов конструкции. Обычно, при пост - диагностике выделяются версии в каком контуре двигателя произошёл отказ. Поэтому можно выделить соответствующие подсистемы уравнений математической модели, описывающие рабочие процессы в том или ином контуре двигателя и для локализации отказа в нем использовать модифицированный метод структурного исключения (глава 1, раздел 1.2.3), в котором при поиске отказа применяется множественное исключение уравнений.

Процедура исключения состоит в следующем.

В исходную замкнутую систему уравнений математической модели:

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_N) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3.9)$$

подставляют значения измеряемых параметров x^* , например, упорядочив их следующим образом:

$$x_1 = x_1^*, x_2 = x_2^*, \dots, x_Q = x_Q^*, \quad Q \ll N, \quad (3.10)$$

где Q - количество измеряемых параметров, и формируют переопределённую систему N уравнений с $(N-Q)$ неизвестными:

$$f_i(x_1^*, x_2^*, \dots, x_Q^*, x_{Q+1}, x_{Q+2}, \dots, x_{N-Q}), \quad (3.11)$$

Из системы (3.11) последовательно исключают совокупности Q уравнений, описывающих работу двигателя в контуре, включающем, диагностируемый контур:

$$f_k(x_1^*, x_2^*, \dots, x_Q^*, x_{Q+1}, x_{Q+2}, \dots, x_{N-Q}), \quad k = j, j + 1, \dots, j + Q - 1; j = 1, 2, \dots \quad (3.12)$$

и на каждом шаге k исключения решают укороченные системы $(N - Q)$ уравнений:

$$f_p(x_1^*, x_2^*, \dots, x_Q^*, x_{Q+1}, x_{Q+2}, \dots, x_{N-Q}), \quad p = j, j + Q, j + Q + 1, \dots, N; j = 1, 2, \dots$$

относительно $x_{Q+1}, x_{Q+2}, \dots, x_{N-Q}$, полученные решения:

$$x_{Q+1}^0, x_{Q+2}^0, \dots, x_{N-Q}^0$$

подставляют в исключённые Q уравнения (3.12) и формируют диагностические признаки:

$$\Delta_{fk} = |f_k(x_1^*, x_2^*, \dots, x_Q^*, x_{Q+1}^0, x_{Q+2}^0, \dots, x_{N-Q}^0)| \quad (3.13)$$

Процедуру исключения продолжают до тех пор, пока хотя бы один диагностический признак (3.13) не окажется в норме. Тогда, если признак Δ_k превышает допустимое значение:

$$\Delta_{fk} > \Delta_{fk \text{ доп}} \quad (3.14)$$

то отказ локализован в контуре двигателя, для уравнений которого выполняется данное условие.

Указанная процедура выполняется до тех пор, пока отказ не будет локализован.

На рисунке 4.1 представлена логическая схема процедуры диагностирования.

4.2 Программно-математическое обеспечение диагностирования

4.2.1 Основные положения

Для решения задач контроля состояния ЖРД, включая контур автомата разгрузки и стояночного уплотнения ТНА, с использованием диагностической модели разработан комплекс компьютерных программ. Исходными языками разработки являются FORTRAN 77 и C++. Среда разработки - компилятор Microsoft Developer Studio и C++ Builder 6.0.

Программа составлена по блочному принципу. Математическая модель двигателя в целом и контура автомата разгрузки и стояночного уплотнения ТНА, в частности, записывается в виде блочной модели. Исходными данными для программы являются заданные уровни режима работы двигателя по тяге и соотношению компонентов топлива, значения давлений и температур компонентов топлива на входе в двигатель, напорные и мощностные характеристики бустерных и основных насосов окислителя и горючего, характеристики турбины, камеры сгорания, газогенератора, регулятора расхода, дросселя горючего [21].

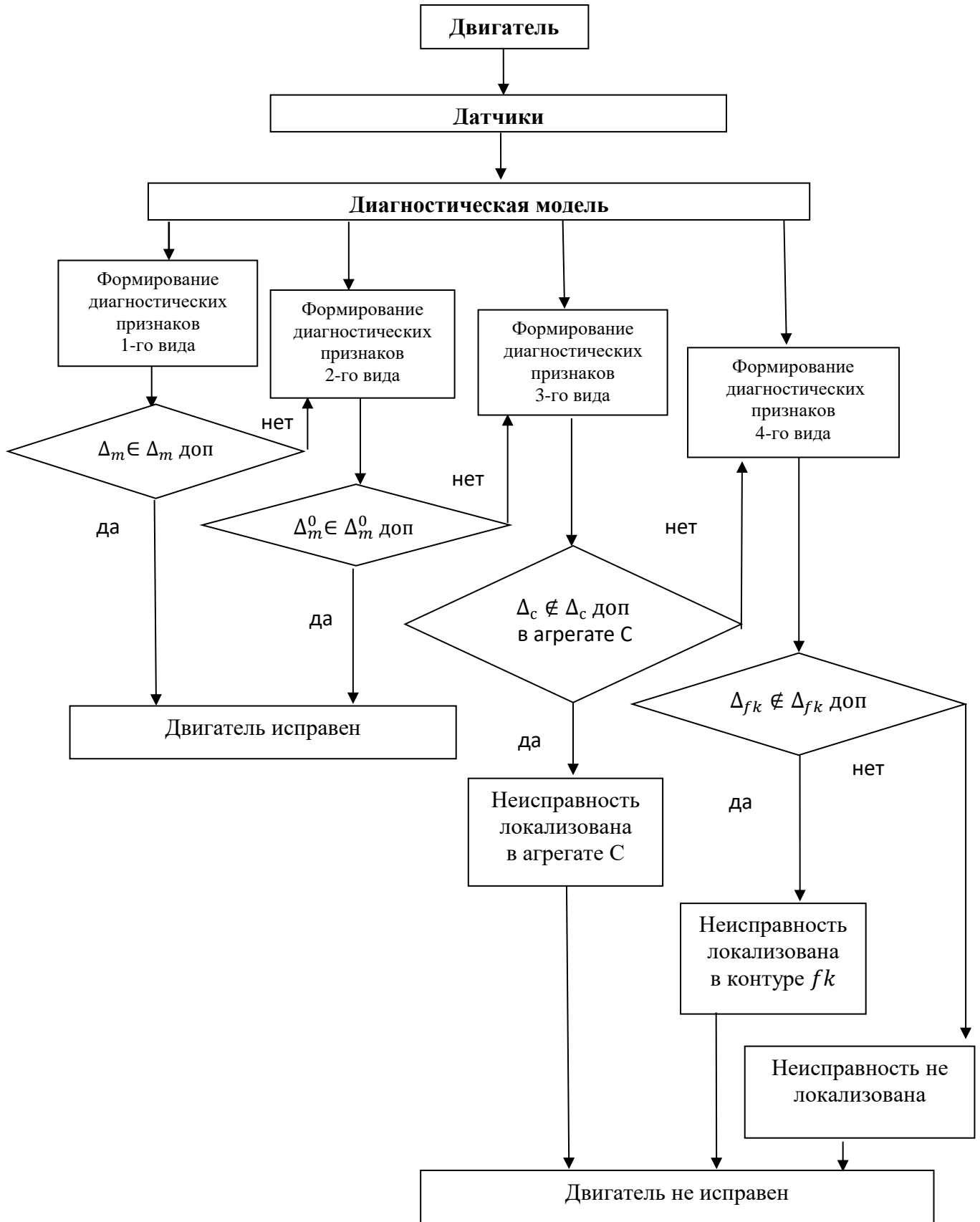


Рисунок 4.1 – Логическая схема процедуры диагностирования

4.2.2 Основные задачи, решаемые с помощью программного обеспечения

1. Формирование математической модели среднего ЖРД из заданных блоков в виде системы уравнений типа:

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad n > m, \quad (3.15)$$

$$x_j = \varphi_j(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (3.16)$$

2. Формирование математической модели конкретного экземпляра ЖРД, поступающего на огневые испытания, с использованием характеристик агрегатов, полученных при их автономных испытаниях.

3. Приведение характеристик агрегатов, полученных при их автономных испытаниях, к условиям проведения огневого испытания.

4. Приведение данных телеметрии к виду исходных данных программы расчёта.

5. Фильтрация (сглаживание измеряемых параметров).

6. Связь параметров телеметрии с параметрами модели.

7. Расчёты по формированию диагностических признаков, указанных в методике диагностирования.

8. Формирование таблиц «время - диагностический признак».

9. Принятие решение о состоянии двигателя в автоматическом режиме.

4.2.3 Основные функции программного обеспечения

В данной главе представлена блок-схема программного обеспечения и описан порядок работы с программой в диалоговом режиме.

На первом этапе из составленной блочной модели, с помощью файла, описывающего взаимосвязь блоков, происходит формирование модели двигателя, которая используется в программе расчёта. (рисунок 4.2).

В связи с тем, что вид характеристик, полученных при модельных испытаниях агрегатов, не соответствует виду, используемому в математической модели, на следующем этапе происходит преобразование модельных характеристик к виду, пригодному для использования в программных расчётах. В результате этой

процедуры получаем математическую модель конкретного экземпляра двигателя (рисунок 4.3).

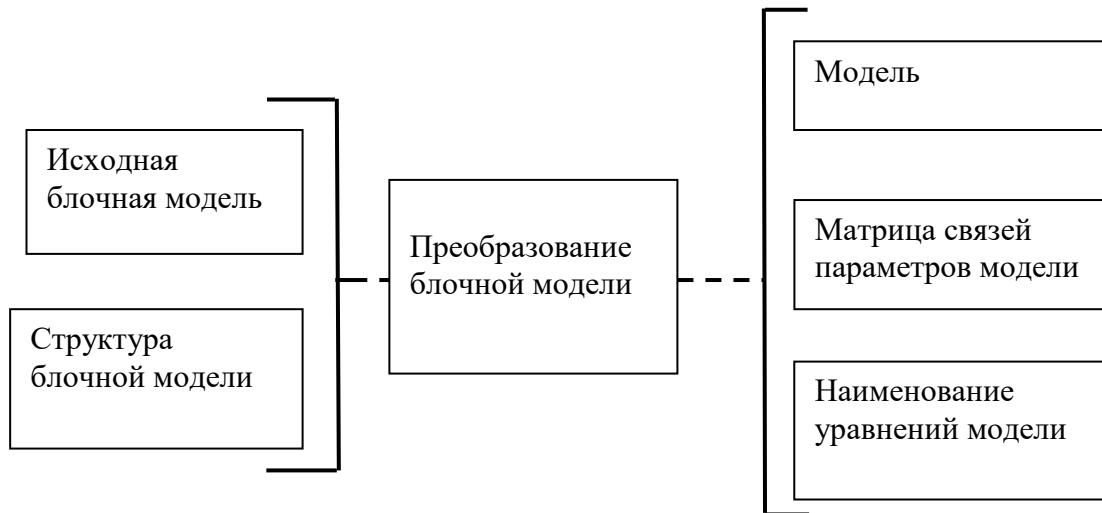


Рисунок 4.2 – Формирование модели среднего двигателя

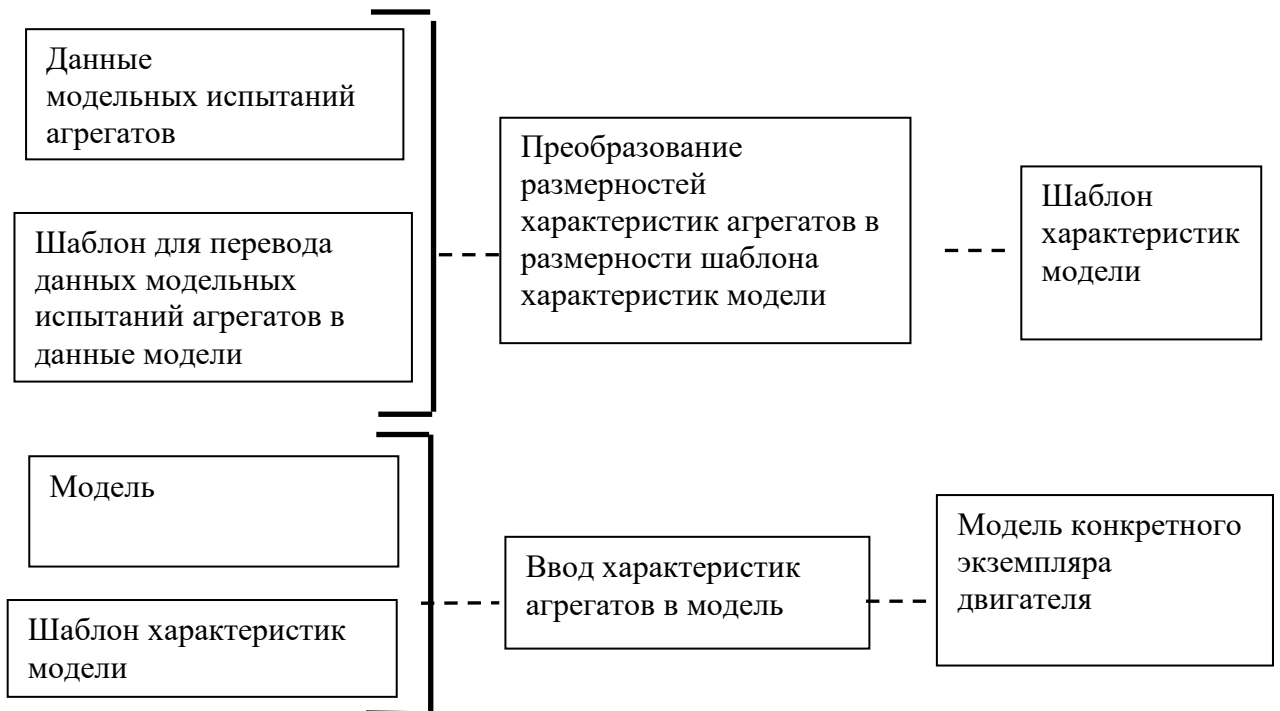


Рисунок 4.3 – Формирование модели конкретного экземпляра двигателя.

На следующем этапе происходит преобразование данных телеметрии, полученных при ОИ, к виду, пригодному для использования в расчётах по программе (рисунок 4.4) и их фильтрация (рисунок 4.5).



Рисунок 4.4. – Преобразование файла данных телеметрии.

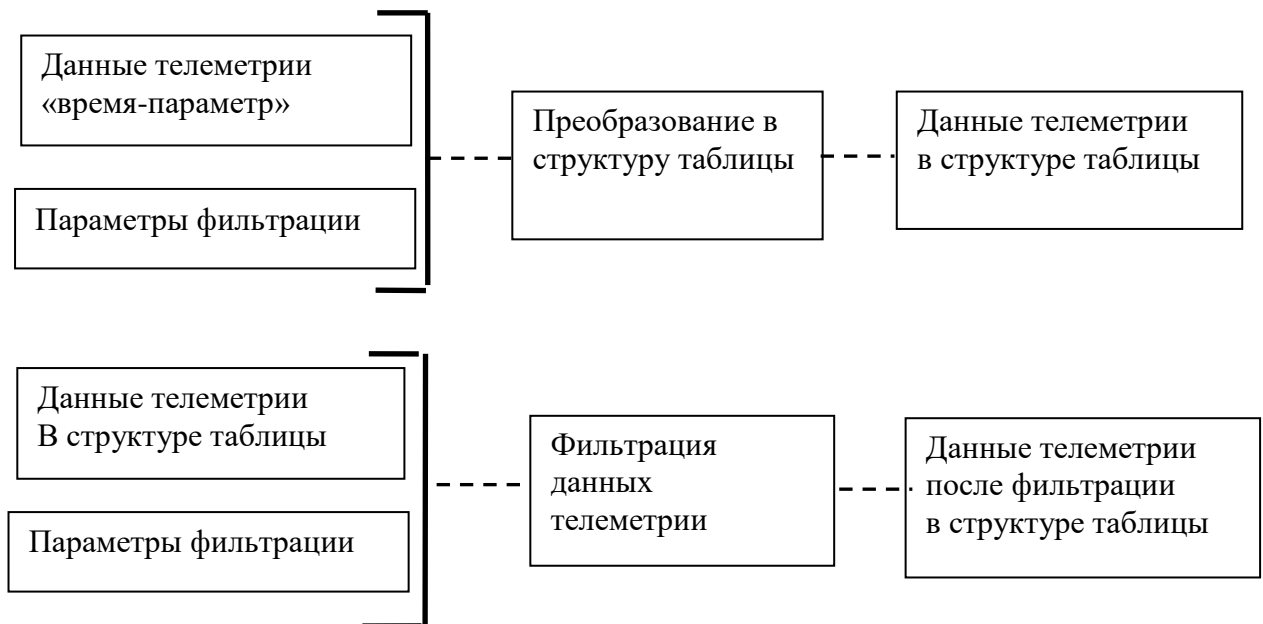


Рисунок 4.5. – Фильтрация файла данных телеметрии.

Затем данные телеметрии связываются с параметрами модели двигателя (рисунок 4.6) и происходит непосредственно процедура расчёта (рисунок 4.7).



Рисунок 4.6 – Связь параметров телеметрии с параметрами модели



Рисунок 4.7 – Проведение расчётов

Полученные результаты иллюстрируются рядом графиков, автоматически получаемых в процессе расчёта (рисунок 4.8).

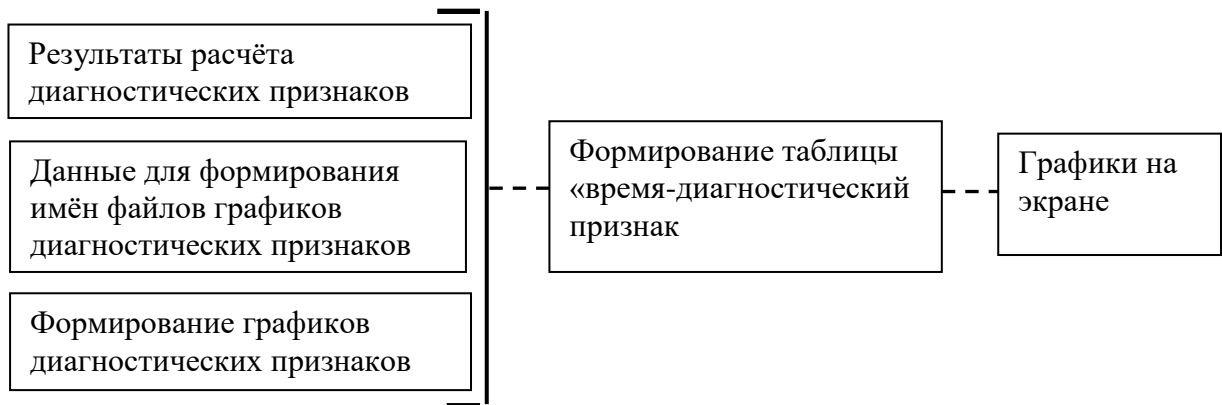


Рисунок 4.8 – Построение анимационных графиков признаков на экране.

4.2.4. Интерфейс программы

Интерфейс программы обеспечивает:

1. Ввод исходных данных математической модели двигателя и характеристики агрегатов в интерактивном режиме.
2. Ввод исходных данных телеметрии в автоматическом режиме.
3. Вывод результатов расчётов фильтрации телеметрии на экран.
4. Проведение расчётных процедур по формированию диагностических признаков.
5. Вывод на экран графической информации «время – диагностический признак».
6. Запись в отдельные файлы на жёстком диске выходных данных: «время – параметр», «время – диагностический признак».
7. Формирование протокола диагностирования результата испытания.

Программа написана в диалоговом режиме. На рисунках 4.9-4.17 показаны примеры диалога и описаны процедуры, соответствующие каждому пункту меню программы.

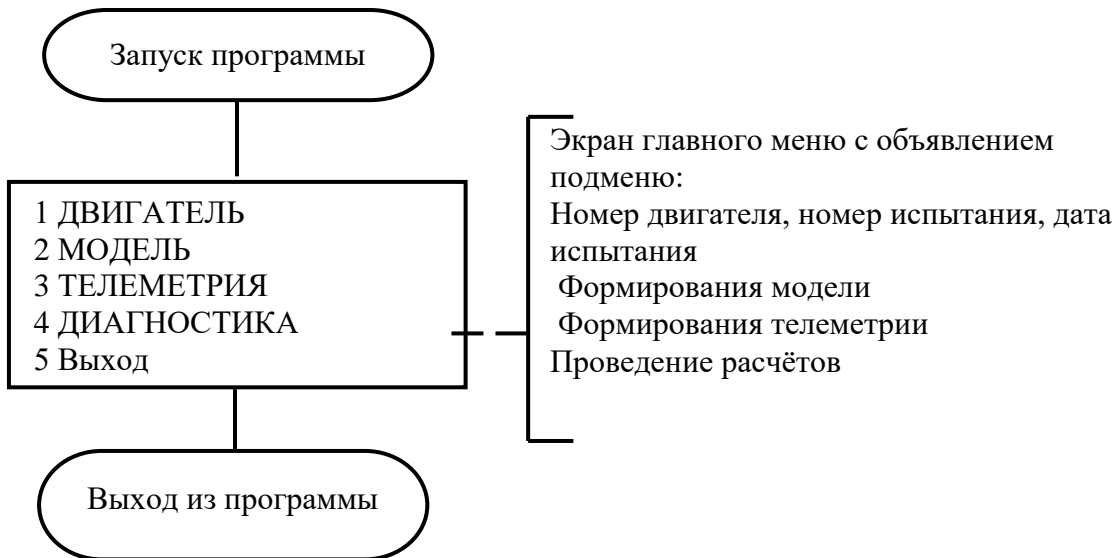


Рисунок 4.9. – Главное меню

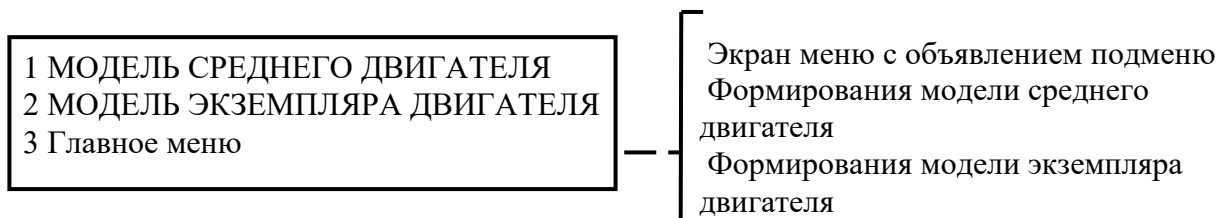


Рисунок 4.10. – Формирование модели двигателя

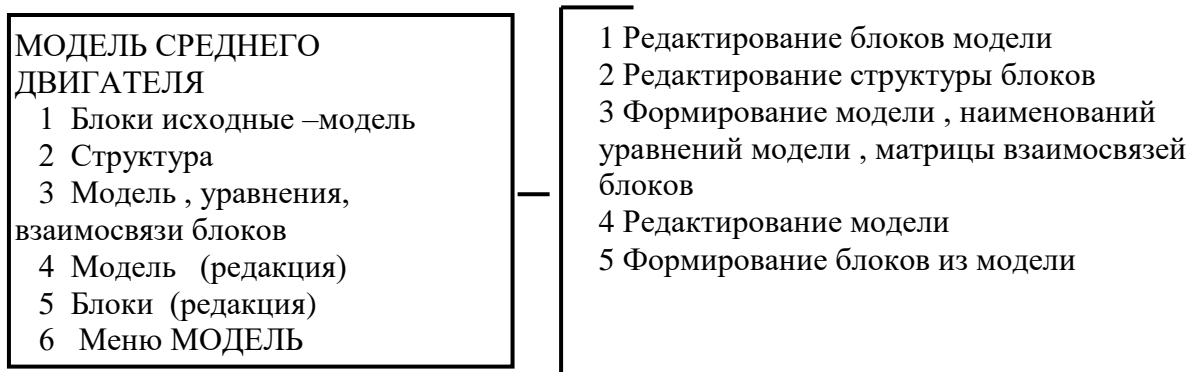


Рисунок 4.11 – Составление модели среднего двигателя.

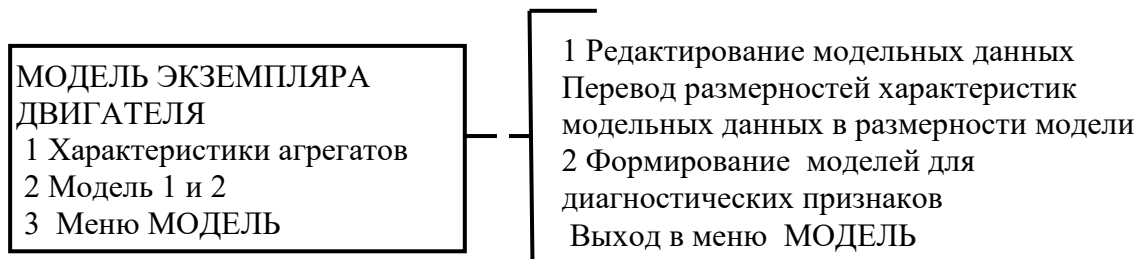


Рисунок 4.12 – Составление модели конкретного экземпляра двигателя.



Рисунок 4.13 – Обработка параметров телеметрии.



Рисунок 4.14 – Подготовка данных для диагностических расчётов.

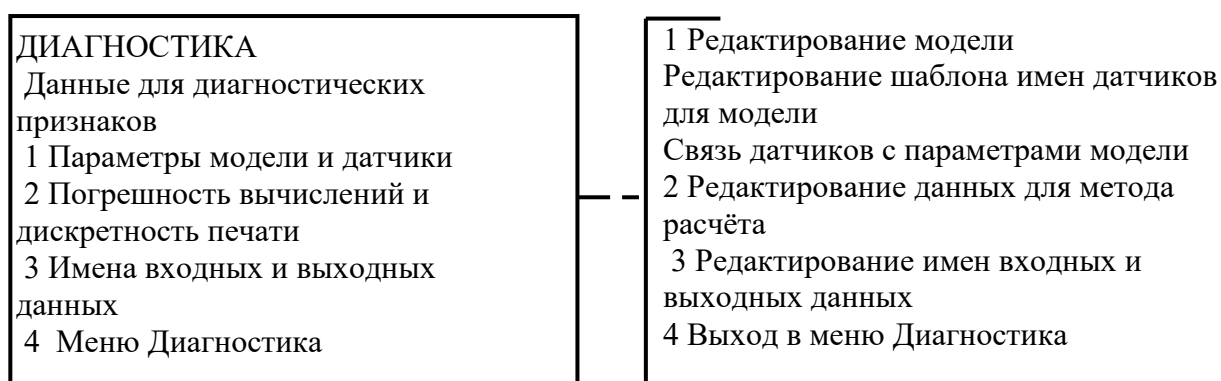


Рисунок 4.15 – Данные для диагностических признаков



Рисунок 4.16 – Расчёт диагностических признаков

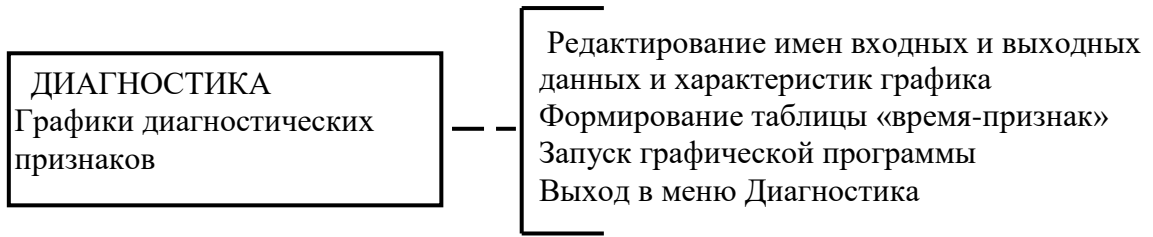


Рисунок 4.17 – Построение графиков диагностических признаков 1-го вида

4.3. Описание блоков

Как было указано выше, программа написана по блочному принципу. Т.е. система уравнений математической модели представлена в виде совокупности подсистем, каждая из которых представлена отдельным блоком. В каждом блоке содержится одно или несколько уравнений процессов в основных агрегатах двигателя и/или отдельно рассчитываемых параметров.

Соединение блоков осуществляется по одинаковым символьным обозначениям параметров.

Ниже приведены примеры составления блоков, и способы их объединения в модель двигателя.

Исходная блочная модель среднего двигателя.

При составлении блоков данные строго позиционированы.

Фрагмент описания блоков, содержащие уравнения вида:

$$x_j = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

представлен на рисунке 4.18.

1	40	0	Пересчёт измеренного угла регулятора
	1	0.00000D+00	ind rec
	2	4.91710D+01	AL pp пр
	3	2.28000D+02	AL pp макс
	4	1.80000D+01	AL pp ст
	5	2.83500D+01	AL pp

Рисунок 4.18 – Фрагмент описания блоков, содержащих уравнения вида

$$x_j = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Состав блока.

1-я строка блока содержит:

- номер блока по порядку
- номер блока в программе
- число уравнений в блоке .
- текстовая информация

2-я и последующие строки содержат:

- индекс печати ≥ 1 – печать, 0 или пробел-нет
- индекс параметра ≥ 1 – неизвестное, 0 или пробел-нет
- номер параметра блока по порядку
- численное значение параметра
- наименование параметра

Фрагмент описания блоков, содержащих уравнения вида $f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$,

представлен на рисунке 4.19.

83	27	3	Расход через Т	БНГ
84	27	3	Момент на Т	БНГ
85	27	3	КПД Т	БНГ
	1	1	3.14900D+02	Р г вх т бнг
	1	2	9.18641D+00	Р г вых бнг
	1	3	8.44577D+00	Г г т бнг
	1	4	1.99892D+03	М т бнг
	1	5	6.83000D+01	п т бнг
		6	8.40960D-04	D г вх т бнг
		7	8.40960D-04	D г вых бнг
		8	9.80665D+02	g=980.665
		9	2.10000D+01	d т бнг
		10	2.93000D-01	s т бнг
		11	7.50005D-03	e1 т бнг
		12	2.30238D+00	e2 т бнг
		13	3.90476D+00	e3 т бнг

Рисунок 4.19 – Фрагмент описания блоков, содержащих уравнения вида

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 .$$

Количество первых строк равно количеству уравнений в блоке.

1-й столбец – номер уравнения по порядку;

2-й столбец – номер типа блока;

3-й столбец – количество уравнений в блоке.

Позиционирование других параметров такое же, как в блоке в предыдущем примере.

Модель двигателя.

Фрагмент структуры файла модели среднего двигателя – приведён на рисунке 4.20.

	1	0.00000D+00	ind rec
	1	2 4.91710D+01	AL pp пр
		3 2.28000D+02	AL pp макс
		4 1.80000D+01	AL pp ст
1	5	2.83500D+01	AL pp
	2	6 1.24410D+02	AL др пр
		7 0.00000D+00	AL др макс
		8 1.11800D+02	AL др ст
1	9	5.00000D+01	AL др
	3	10 5.40000D+00	P ок вх дв
	4	11-1.82700D+02	T ок вх дв
	5	12 6.30000D+00	P г вх дв
	6	13 1.80000D+01	T г вх дв
	7	14 2.24000D+01	P ок вх но
	8	15 5.96076D+02	P ок вх сг гг

Рисунок 4.20 – Фрагмент описания структуры модели среднего двигателя

Файл наименования уравнений

Наименование уравнений приведено на рисунке 4.21

1	40	0	Пересчёт измеренного угла регулятора
2	40	0	Пересчёт измеренного угла дросселя горючего
3	49	0	Поправка для реконструкции
4	96	0	Удельный вес горючего на входе в двигатель
5	96	0	Удельный вес горючего в БНГ

Рисунок 4.21 – Файл наименования уравнений.

Для сопряжения блоков создаётся файл структуры блоков (рисунок 4.22), с помощью которого с учётом сопряжения по одноимённым параметрам из блочной модели (рисунки 4.18 и 4.19), формируется файл модели среднего двигателя (рисунок 4.20).

Номер блока	Число уравнений	Число переменных
1	1	7
2	0	11
3	1	6
4	1	7
5	1	8
6	1	12
7	1	13
8	1	11
9	1	3
10	1	4
11	1	4
12	1	5
13	1	5
14		
15	1	4
16	2	4
17	2	5
18	2	5

Рисунок 4.22 – Фрагмент описания структуры блоков модели.

4.4 Исходные данные

Исходными данными для программы расчётов являются схема двигателя и система статических нелинейных уравнений двигателя. Исходными данными для системы нелинейных уравнений двигателя являются:

- зависимости плотностей жидкого кислорода и керосина от давления и температуры;
- зависимости расходного комплекса камеры и удельного импульса тяги в пустоте от массового соотношения компонентов топлива, температуры компонентов топлива на входе в двигатель и давления в камере сгорания,

полученные по результатам газодинамического расчёта камеры;

- зависимость температуры генераторного газа от массового соотношения компонентов топлива на входе в турбину, температуры компонентов топлива на входе в газогенератор и давления в газогенераторе, полученная по результатам термодинамического расчёта газогенератора;

- характеристики основных и бустерных насосов $H = f(m, n)$ и $N = f(m, n)$;

- характеристики турбин основной и БНА $\eta_T = f(W_{окр}/W_{ад})$ и $\theta_T = f(W_{окр}/W_{ад})$;

- номинальные значения гидравлических сопротивлений.

Исходными данными для решения математической модели контура автомата разгрузки и стояночного уплотнения ТНА являются следующие параметры:

- 1) рабочие параметры насоса окислителя;
- 2) геометрические размеры конструктивных элементов;
- 3) коэффициенты потерь контура автомата разгрузки и стояночного уплотнения;
- 4) данные автономных испытаний насоса окислителя и турбины.

Ряд обозначений исходных данных представлен в главе 2.

Рабочие параметры насоса окислителя.

Параметры, определяемые конструкторской документацией:

- осевая сила на контрольном режиме - $Y_{кт}$;
- частота вращения вала ТНА на контрольном режиме - $n_{кт}$.

Параметры насоса окислителя, полученные на модельных испытаниях

- осевая сила на контрольном режиме при МИ - $Y_{МИ\ кт}$.

Геометрические размеры элементов конструкции.

- 1) шнек и ЦБК

- диаметр центробежного колеса на выходе $D_{к2}$;
- диаметр переднего бурта на входе в лабиринтное уплотнение (по потоку) $D_{нл1}$;
- диаметр переднего бурта на выходе из лабиринтного уплотнения $D_{нл2}$;

- диаметр заднего бурта на входе в лабиринтное уплотнение (по потоку) $D_{зл1}$;
- диаметр заднего бурта на выходе из лабиринтного уплотнения (по потоку) $D_{зл2}$;
- наружный диаметр торцевой щели АР D_{AP2} ;
- внутренний диаметр торцевой щели АР D_{AP1} ;
- минимальный сборочный осевой зазор в АР $X_{APмин сб}$;
- минимальный осевой зазор в АР, при котором сила на РУП $Y_{РУП}=0$ $X_{APмин}$;
- максимальный осевой зазор в АР, при котором сила на РУП $Y_{РУП}=0$ $X_{APмакс}$.

2) стояночное уплотнение :

- диаметры элементов конструкции - d_1, d_2, d_3, d_4, d_5 .

3) пружина СУ

- длина пружины в свободном состоянии y_0 ;
- длина пружины в собранном СУ y ;
- количество пружин $z_{пр}$.

Коэффициенты потерь.

Гидравлические сопротивления контура автомата разгрузки и стояночного уплотнения в точках, согласно схеме на рисунке 2.2:

- в магистрали охлаждения РУП ξ_{3-8} , ξ_{8-9} ;
- в магистрали перепуска ξ_{6-7} , ξ_{7-1} ;
- в лабиринтных уплотнениях ξ_{4-5} , ξ_{11-12} ;
- в стояночном уплотнении $\xi_{2су-10}$;
- за радиально-упорным подшипником ξ_{9-6} .

Коэффициенты потерь $\xi = \frac{\Delta p \cdot \rho}{m^2}$ участков гидравлических магистралей были

определены по справочным данным⁸ и уточнены по данным автономных испытаний.

Данные автономных испытаний насоса окислителя и турбины

1) Характеристики насоса окислителя:

⁸ Идельчик И.Е., Справочник по гидравлическим сопротивлениям, Москва, Машиностроение, 1975, 960с

- коэффициенты напорной характеристики $\frac{H_{НОМН}^*}{(n)^2} = f\left(\frac{V_{НО}}{n}\right)$;

- значение осевой силы на контрольном режиме – $Y_{КТ}$; кгс.

2) характеристики турбины:

- осевая сила на контрольном режиме - $Y_{МИКР}$ [кгс];

- реактивность на контрольном режиме - $\theta_{МИКР}$;

- коэффициенты характеристик осевых сил: $Y=F(u/c_{ad})$, $Y=F(\pi_T)$;

- коэффициенты характеристик реактивности: $\theta=F(u/c_{ad})$, $\theta=F(\pi_T)$.

4.5. Выходные данные

Выходными данными являются:

1) расчётные значения параметров рабочих процессов: давления, температуры, расходы компонентов топлива, частоты вращения валов турбонасосных агрегатов, перемещения ползуна в стояночном уплотнении и диска агрегата разгрузки, осевые силы действующие на элементы конструкции основного ТНА;

2) Расчётные значения диагностических признаков: отклонения расчётных значений параметров от измеренных, отклонения расчётных характеристик агрегатов от характеристик, полученных при модельных испытаниях, результаты диагностирования [23].

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

1 Разработана многоуровневая методика процедуры диагностирования ЖРД, которая включает:

1.1 Определение момента времени возникновения отказа;

1.2 Подтверждение момента времени возникновения отказа;

1.3 Определение неисправного контура или элемента конструкции двигателя;

1.4 Подтверждение локализации отказа.

2 Внедрение разработанной методики диагностирования позволило проводить анализ параметров двигателя, недоступных для прямого измерения в процессе ОИ и повысить безопасность и качество проведения ОИ за счёт раннего обнаружения отказа до наступления аварийного выключения двигателя.

3 Разработано программное обеспечение, которое может использоваться для проведения диагностических процедур при определении состояния ЖРД в процессе ОИ на стенде.

3.1 Представлена структура ПО, обеспечивающая гибкое управление при переключении программы для работы на разных уровнях диагностирования: определения момента времени возникновения отказа и его локализации. Такая структура позволяет адаптировать ПО к изменению математической модели при изменении подробности описания процессов, изменению конструкции двигателя или состава телеметрии.

3.2 Подробно представлено описание исходных данных, необходимых для работы программы, включая данные по конструкции и автономным испытаниям контура АР и СУ.

3.3 Разработан пользовательский интерфейс, удобный для подготовки и ввода в ПО исходных данных по автономным испытаниям агрегатов, формирования протокола диагностирования и графической информации.

ГЛАВА 5. ДИАГНОСТИКА ЖРД ПРИ ОГНЕВЫХ ИСПЫТАНИЯХ

Для иллюстрации эффективности разработанных методов, алгоритмов и программно-математического обеспечения представлены примеры диагностирования ЖРД конструкции НПО «Энергомаш» при стендовых огневых испытаниях, завершившихся аварийным выключением двигателя (АВД).

Диагностика ОИ проводилась в соответствии с процедурами, изложенными в разделе 4.1.

Состав измеряемых параметров двигателя, используемых при ОИ в процедурах контроля и диагностики, включая контур автомата разгрузки стояночного уплотнения представлен в таблице 2.1. Схема установки датчиков в рассматриваемом контуре представлена на рисунке 3.4.

5.1 Коррекция математической модели в процессе ОИ

В соответствии с методикой диагностирования в начале каждого стационарного режима необходимо провести коррекцию математической модели данного экземпляра двигателя. Коррекция проводится для получения новой модели, адекватной данному стационарному режиму испытания, определяемому положением приводов управления по тяге и соотношению компонентов. Коррекция производится на интервале времени, на котором закачивается переходный процесс при переходе двигателя на заданный режим. Для рассматриваемых двигателей этот интервал выбран равным 0,1 с.

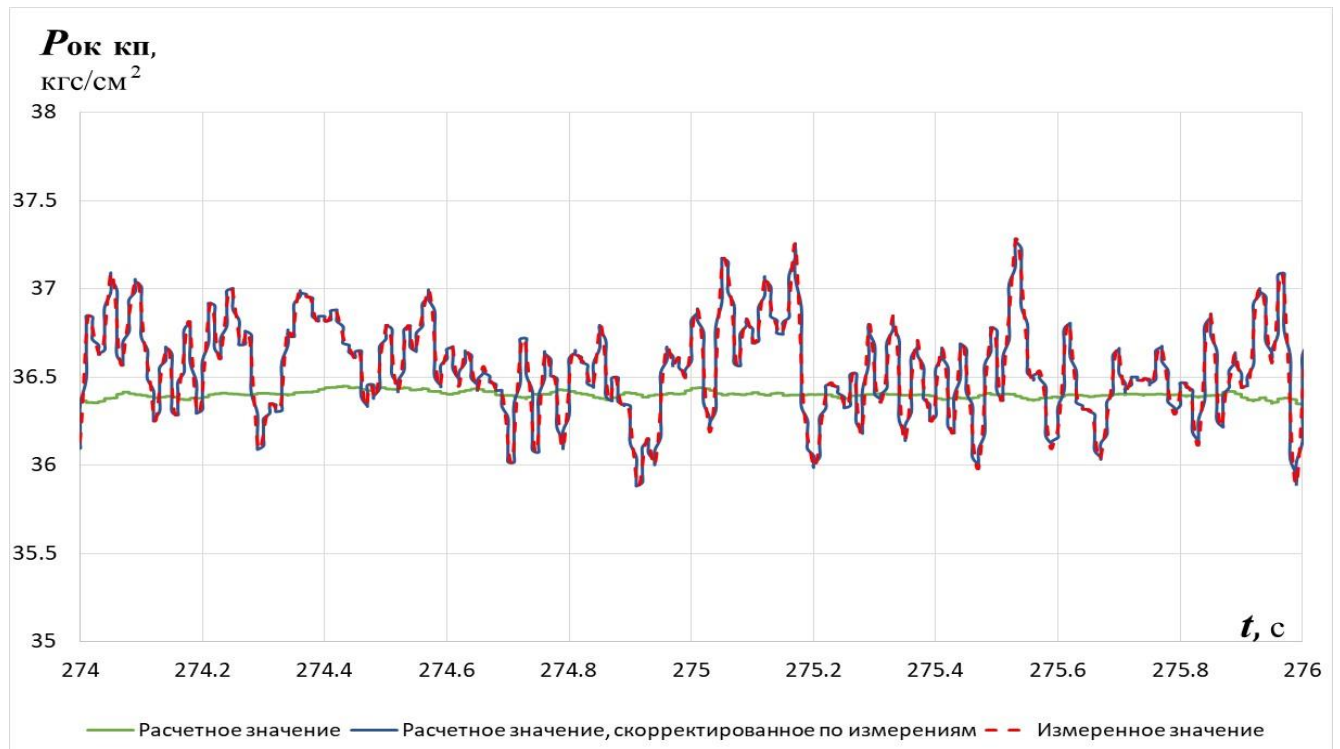
Результаты коррекции математической модели представлены в таблице 5.1 и на рисунке 5.1.

В таблице 5.1 на примере обработки результатов одного из ОИ двигателя приведены результаты рассогласования измеренных и расчётных параметров контура авторазгрузки и стояночного уплотнения ТНА до и после коррекции математической модели. Из таблицы видно, что в результате коррекции измеренные и расчётные значения параметров практически совпадают.

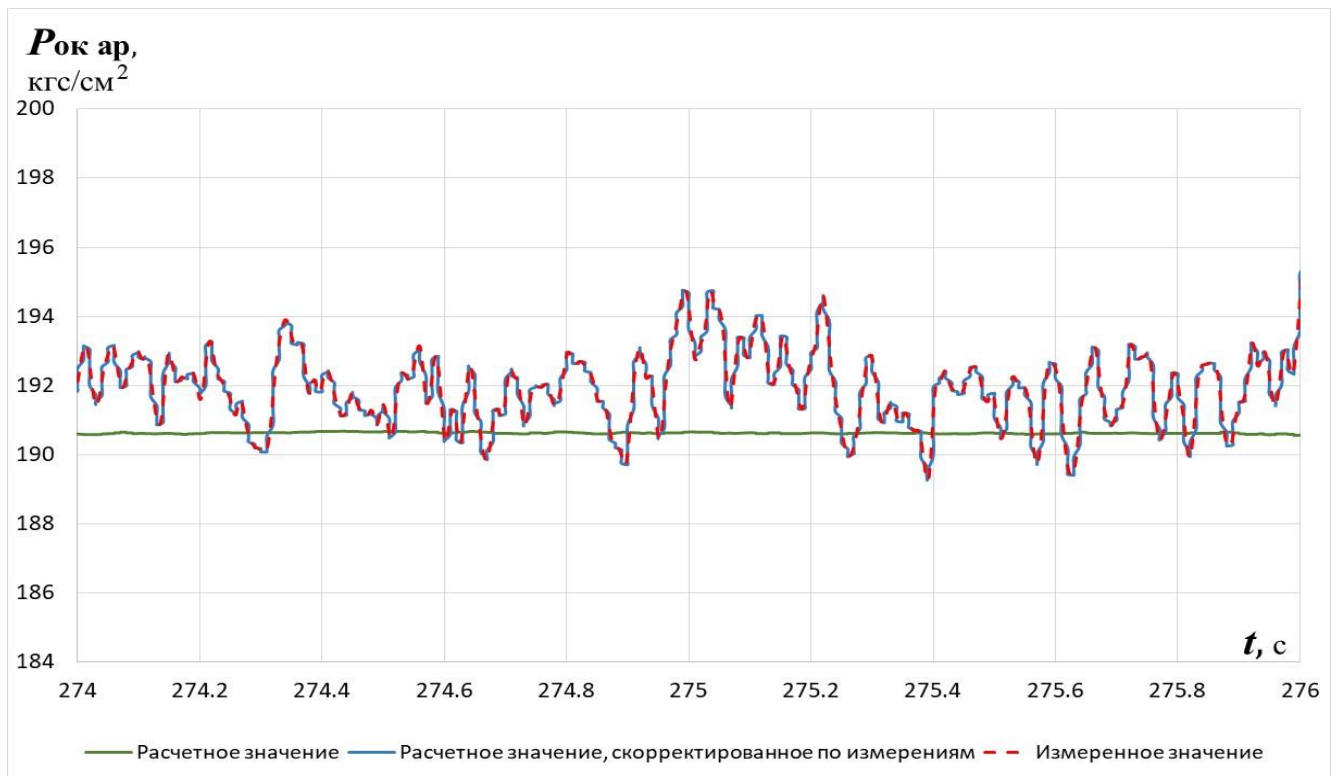
Таблица 5.1 – Рассогласование измеренных и расчётных параметров контура АР и СУ ТНА до и после коррекции математической модели.

Параметр	Измеренное значение параметра	Расчётное значение параметра		Абсолютное отклонение измеренного значения параметра от расчётного	
		до коррекции	после коррекции	до коррекции	после коррекции
Давление в АР, кгс/см ²	191,67	161,28	190,56	30,39	1,11
Давление до РУП, кгс/см ²	378,86	341,28	378,44	37,58	0,42
Давление окислителя в коллекторе, кгс/см ²	36,53	30,965	36,33	5,56	0,2
Температура газа, К	777,7	772,42	777,33	5,28	0,37

На рисунке 5.1 на примере изменения двух параметров – давлений окислителя в коллекторе перепуска и в автомате разгрузки видно, что в результате коррекции математической модели расчётные значения практически полностью соответствуют измеренным на испытании. Аналогичные результаты получены при сравнении расчётных и измеренных значений остальных параметров двигателя.



а)



б)

Рисунок 5.1* – Сравнение измеренных, расчётных и скорректированных значений параметров: а) давления окислителя в коллекторе перепуска, б) давления окислителя в автомате разгрузки

*Составлено автором по результатам расчётов

Для подтверждения достоверности разработанной модели на рисунке 5.2 приведено сравнение расчётного значения осевой силы, действующей на рабочее колесо турбины, определённое по математической модели, по скорректированной модели и рассчитанное по штатной методике. Отличие результатов расчётов по разработанной модели от расчётов по локальной модели контура АР и СУ обусловлено тем, что граничные условия для замыкания локальной модели контура не отражают реальную взаимосвязь агрегатов при работе двигателя.

Следует особо отметить, что данный метод обеспечивает коррекцию параметров модели, не только измеряемых в процессе испытания, но также параметров недоступных для прямого измерения. К таким параметрам можно отнести: силу, действующую на РУП, зазор в автомате разгрузки насоса окислителя, зазор в стояночном уплотнении насоса окислителя.

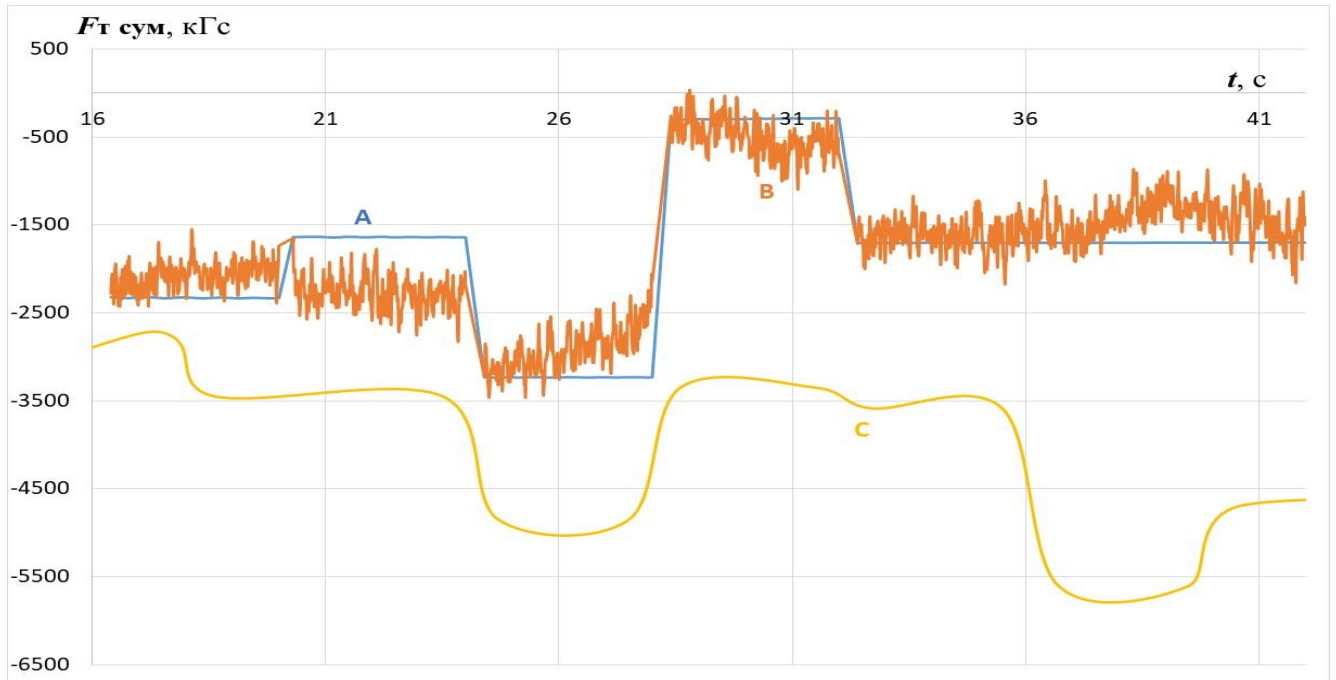


Рисунок 5.2* – Осевая сила, действующая на рабочее колесо турбины, определённая: А – по разработанной математической модели, В – по скорректированной модели, С – по штатной методике.

*Составлено автором по результатам расчётов

5.2 Расчёт допустимых значений диагностических признаков

Как отмечалось в разделе 4.1, при многоуровневом диагностировании двигателя используется четыре вида диагностических признаков, которые можно классифицировать как:

- признаки 1-го вида – отклонения текущих измеренных значений параметров от эталонных;
- признаки 2-го вида – отклонения измеренных значений параметров от расчётных, определённых по скорректированной математической модели;
- признаки 3-го вида – отклонения характеристик агрегатов, реализовавшиеся при ОИ от характеристик при автономных испытаниях;
- признаки 4-го вида – нарушение взаимосвязей параметров, описываемых исключаемыми уравнениями математической модели, определяемое с

помощью подстановки в эти уравнения и расчётных, и измеренных значений параметров [23].

Результаты расчётов среднеарифметических значений диагностических признаков, полученных при огневых испытаниях, нормально функционирующих ЖРД на стенде НПО «Энергомаш» представлены в таблицах 5.2 - 5.5.

Как видно, средние значения диагностических признаков близки к нулю, несмотря на то, что регламентированная погрешность измерения составляет для большинства параметров около 2 % шкалы датчика. Это достигнуто за счёт коррекции математической модели в процессе ОИ. Исходя из результатов определения допусков на диагностические признаки и погрешностей каналов измерения параметров на данном этапе разработки нижняя граница допустимых значений диагностических признаков первого и второго вида принята не ниже $\pm 2,0\%$.

Таблица 5.2 - Диагностические признаки первого вида

№п/п	Наименование параметра	Среднее значение, %	Допуск, $\pm\%$
1	Частота вращения вала бустерного окислителя	0,14	0,23
2	Расход окислителя на входе в двигатель	0,28	1,06
3	Давление до насоса окислителя	1,99	2,56
4	Давление окислителя до газогенератора	-0,09	0,48
5	Частота вращения вала бустерного горючего	-0,07	0,26
6	Расход горючего на входе в двигатель	-0,03	0,39
7	Давление до насоса горючего	-0,54	1,47
8	Давление за первой ступенью насоса горючего	0,15	0,45
9	Давление за второй ступенью насоса горючего	0,03	0,46
10	Давление за дросселем горючего	-0,25	0,51
11	Давление горючего за регулятором расхода	0,02	0,50
12	Давление горючего в смесительной головке камеры	0,03	0,36
13	Температура горючего перед форсунками камеры	-0,03	0,23
14	Частота вращения вала ТНА	-0,02	0,22

№п/п	Наименование параметра	Среднее значение, %	Допуск, ±%
15	Температура газа за турбиной	-0,12	0,34
16	Давление до турбины БНАГ	-0,09	0,65
17	Осевое перемещение вала ТНА	0,08	0,51
18	Давление окислителя в полости авторазгрузки	0,15	0,66
19	Давление окислителя перед радиально-упорным подшипником	-0,04	0,57
20	Давление окислителя в коллекторе перепуска	0,01	0,85

Таблица 5.3 - Диагностические признаки второго вида

№ п/п	Наименование параметра	До коррекции		После коррекции	
		среднее значение, %	допуск, ± %	среднее значение, %	допуск, ± %
1	Частота вращения вала бустерного окислителя	-3,63	0,22	0,44	0,22
2	Расход окислителя на входе в двигатель	-2,93	1,03	-0,28	1,06
3	Давление до насоса окислителя	-4,38	2,40	-2,19	2,46
4	Давление окислителя до газогенератора	-0,91	0,47	0,05	0,48
5	Частота вращения вала бустерного горючего	-0,16	0,26	-0,10	0,26
6	Расход горючего на входе в двигатель	-1,01	0,398	-0,11	0,39
7	Давление до насоса горючего	6,74	1,66	1,26	1,57
8	Давление за первой ступенью насоса горючего	-2,014	0,45	0,31	0,46
9	Давление за второй ступенью насоса горючего	-3,93	0,44	-0,412	0,46
10	Давление за дросселем горючего	-5,76	0,48	-0,01	0,51
11	Давление горючего за регулятором расхода	-10,59	0,44	-10,01	0,45
12	Давление горючего в смесительной головке камеры	-2,91	0,35	0,005	0,36
13	Температура горючего до форсунок камеры	6,81	0,24	-0,03	0,23
14	Давление до турбины бустерного горючего	-1,14	0,65	0,32	0,65
15	Частота вращения вала ТНА	-0,60	0,22	-0,05	0,22

№ п/п	Наименование параметра	До коррекции		После коррекции	
		среднее значение, %	допуск, ± %	среднее значение, %	допуск, ± %
16	Температура газа за турбиной	0,54	0,34	-0,09	0,34
17	Осевое перемещение вала ТНА	351,15	2,29	295,66	2,00
18	Давление окислителя в полости авторазгрузки	18,98	0,79	0,69	0,66
19	Давление окислителя перед радиально- упорным подшипником	10,97	0,62	0,07	0,56
20	Давление окислителя в коллекторе перепуска	17,77	1,07	0,39	0,90

Таблица 5.4 - Диагностические признаки третьего вида

№п/п	Наименование параметра	Среднее значение, %	Допуск, ±%
1	Характеристика мощности бустерного горючего	0,71	1,97
2	Характеристика мощности бустерного окислителя	-1,11	2,13
3	Характеристика мощности турбины ТНА	-0,35	1,33
4	Характеристика напора бустерного горючего	1,58	6,22
5	Характеристика напора насоса горючего 1-й ступени	0,39	0,88
6	Характеристика напора насоса горючего 2-й ступени	-1,92	2,91
7	Характеристика напора бустерного окислителя	-5,03	10,13
8	Характеристика напора насоса окислителя	0,13	0,83
9	Потери давления до турбины БНАГ	-0,004	1,39
10	Характеристика перепада давления на дросселе горючего	1,26	3,71
11	Потери давления в рубашке камеры	0,08	1,45
12	Понижение температуры в рубашке камеры	0,28	2,32
13	Характеристика расходного комплекса камеры	-0,25	1,33
14	Характеристика расходного комплекса турбины ТНА	-0,25	1,28
15	Характеристика температуры газа до турбины	0,33	1,47
16	Изменение зазора стояночного уплотнения	-0,85	5,18
17	Перепад давления в автомате разгрузки насоса окислителя	-3,13	7,26
18	Сила, действующая на насосе окислителя	3,68	14,75

Таблица 5.5 - Диагностические признаки четвёртого вида

№п/п	Наименование параметра	Среднее значение, %	Допуск, ± %
1	Баланс расходов горючего на выходе бустерного	1,17	1,52
2	Магистраль горючего от бустерного до насоса	-0,27	0,88
3	Магистраль горючего на рулевые привода	-0,97	1,77
4	Магистраль горючего от регулятора расхода до газогенератора	0,02	0,12
5	Рубашка охлаждения камеры	-1,60	2,57
6	Температура горючего на форсунках камеры	-0,50	1,59
7	Баланс расходов горючего за первой ступенью насоса	0,89	0,99
8	Баланс расходов горючего перед регулятором	0,11	0,52
9	Магистраль окислителя от бустерного до насоса	-0,23	0,60
10	Баланс расходов окислителя за бустерного	0,31	3,89
11	Баланс расходов окислителя до газогенератора	-0,65	2,31
12	Температура газа за турбиной	1,69	5,08
13	Баланс моментов основного ТНА	0,10	0,61
14	Баланс моментов БНАГ	0,11	1,01
15	Баланс моментов БНАО	0,30	0,76
16	Перепад давления на дросселе горючего	0,89	10,30
17	Давление на входе в стояночное уплотнение	-0,24	0,61
18	Давление на входе в коллектор перепуска	-0,28	0,57
19	Баланс сил Насосы - Турбина	-0,06	0,60

5.3 Диагностика ОИ двигателей, закончившихся аварийным отключением

Представлены результаты диагностирования двух двигателей, ОИ которых завершились аварийным отключением. В одном из двигателей произошло нарушение работы в контуре дросселя горючего, а во втором отказ возник в лабиринтном уплотнении насоса окислителя на входе в автомат разгрузки. Диагностирование проводилось в соответствии с разработанной методикой.

5.3.1 Нарушение нормальной работы дросселя горючего

5.3.1.1 Определение момента времени возникновения отказа

На первом уровне диагностирования, в соответствии с разработанной методикой, изложенной в разделе 4.1, контролируются диагностические признаки 1-го вида — отклонения текущих измеренных значений параметров от эталонных (средних измеренных значений в начале режима). На рисунке 5.3а можно видеть, что ряд диагностических признаков 1-го вида выходит за границы допусков, обозначенных красными линиями. Первые три из этих признаков для наглядности выделены на рисунке 5.3б [23]. Как видно на рисунках с момента времени $t=280$ с начался тренд диагностических признаков, в результате которого за границу допуска последовательно вышли следующие диагностические признаки 1-го вида: изменение давления горючего на входе в насос – $t = 280,3$ с, изменение давления горючего за дросселем- $t=280,43$ с, изменение давления горючего за насосом первой ступени – $t=280,45$ с. В момент времени $t=280,45$ с три диагностических

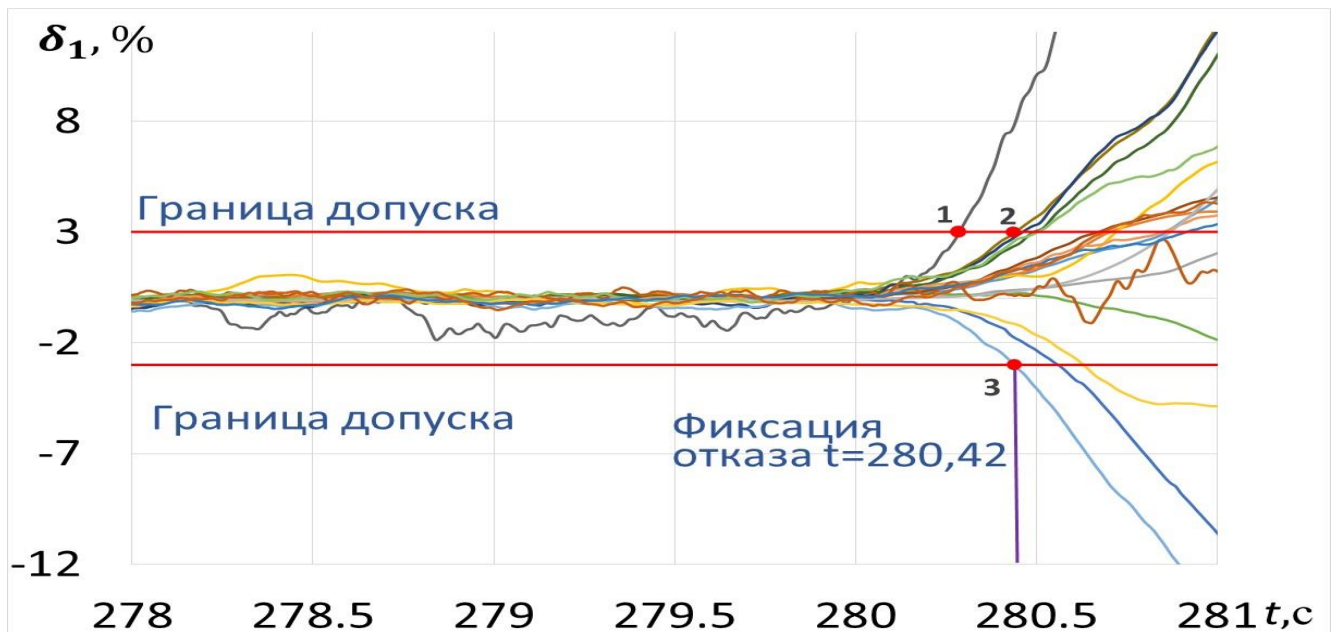


Рисунок 5.3 а) – Контроль отклонения текущих средних значений параметров двигателя от эталонных: все параметры



Рисунок 5.3 б) – Контроль отклонения текущих средних значений параметров двигателя от эталонных: три первых параметра, вышедшие за границу допуска

признака вышли за границы допуска, следовательно, в соответствии с принятой методикой этот момент времени фиксируется как момент времени возникновения отказа и переходим на 2-й уровень диагностирования [21].

Отметим, что именно с этого момента времени вступают в работу процедуры диагностирования, подтверждающие возникновение отказа и его локализацию. Корректное применение диагностической модели ограничено малой окрестностью момента времени фиксации отказа из-за нарушения физических связей между параметрами, соответствующих нормальному функционированию двигателя.

На рисунке 5.4а представлены изменения отклонений измеренных значений параметров от расчётных, полученных по диагностической модели, а на рисунке 5.4б – первые три признака, вышедшие за границу допуска. В момент времени $t=280,25$ с отклонение измеренного значения давления горючего на входе в насос от расчётного выходит за границу допуска, в момент времени $t=280,33$ с отклонение параметра давления горючего за дросселем выходит за пределы допуска и в момент времени $t=280,43$ с отклонения параметров давления горючего за насосом первой ступени, давление окислителя в автомате разгрузки и давление горючего на турбине бустерного насоса вышли за границы допуска.

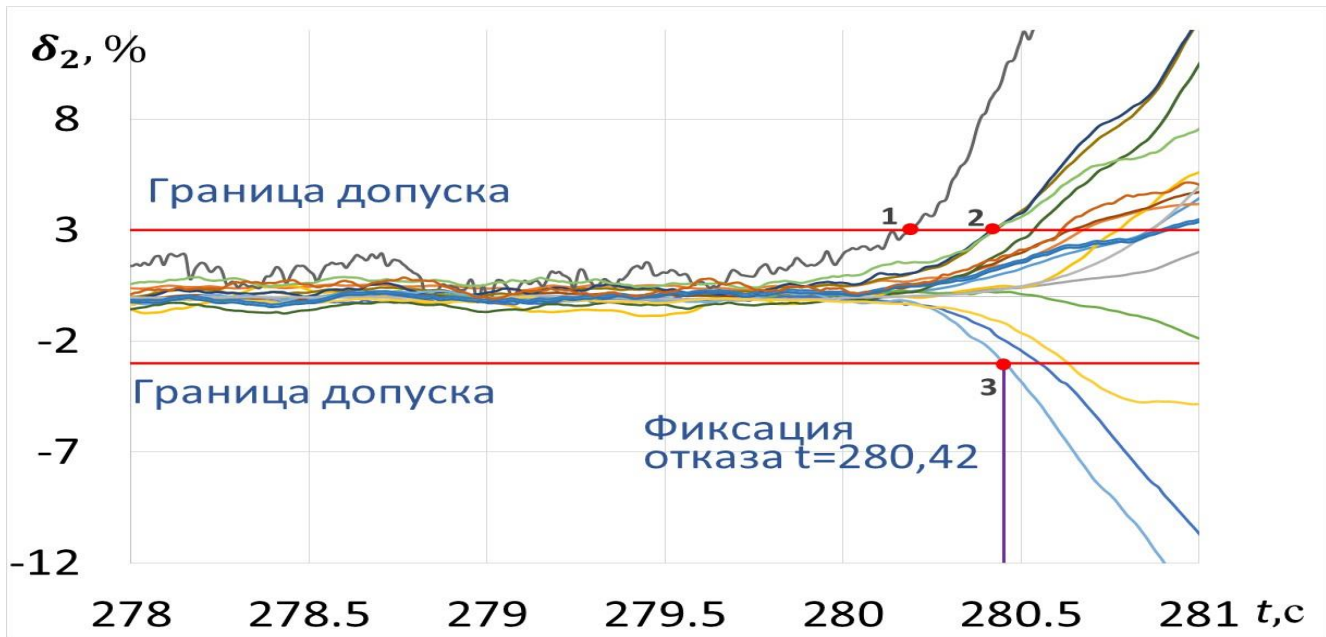


Рисунок 5.4 а – Контроль отклонения измеренных параметров от расчётных по математической модели



Рисунок 5.4 б – Контроль отклонения измеренных параметров от расчётных по математической модели: три параметра последовательно выходят за границы допуска

Эти признаки имеют один и тот же физический смысл что и признаки, полученные на первом уровне, и это подтверждает зафиксированное ранее возникновение предполагаемого отказа. Таким образом, факт возникновения отказа подтверждён, и переходим на 3-й уровень диагностирования – локализации

отказа по отклонению характеристик агрегатов двигателя, реализовавшиеся при ОИ, от характеристик при автономных испытаниях агрегатов.

5.3.1.2 Локализация отказа по отклонению характеристик агрегатов

Локализация отказа проводится по отклонению характеристик двигателя, реализовавшиеся при ОИ от характеристик, полученных при автономных испытаниях агрегатов. На рис 5.5 видно, что с момента времени $t=280,15$ с диагностический признак 3-го вида - отклонение рабочей характеристики дросселя горючего превышает допустимое значение. На этом основании ставится диагноз, что отказ вызван нарушением правильного функционирования именно этого агрегата.

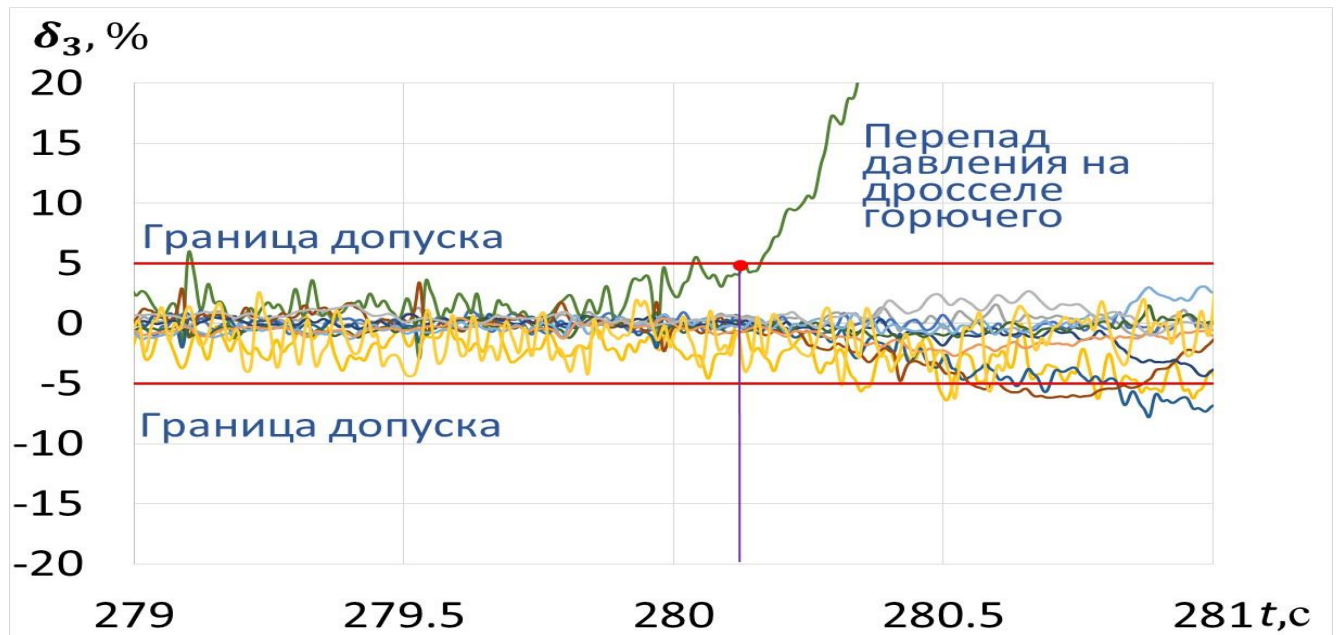


Рисунок 5.5 – Локализация отказа по отклонению характеристики: отклонение рабочей характеристики дросселя горючего

5.3.1.3 Локализация отказа по функциональным связям параметров

Для повышения достоверности решения, принятого на 3-м уровне процедуры диагностирования, переходим на 4-й уровень, на котором проверяем по алгоритму, представленному в разделе 4.1, вызван ли отказ нарушением взаимосвязей параметров двигателя именно в том уравнении математической модели, которое

описывает рабочий процесс в дросселе горючего.

На рисунке 5.6 представлены изменения диагностических признаков 4-го вида - нарушение взаимосвязей параметров, описываемых исключаемыми уравнениями математической модели, определяемое с помощью подстановки в эти уравнения и расчётных, и измеренных значений параметров. Действительно, в момент времени $t=280,15$ с произошло нарушение взаимосвязей параметров в уравнении перепада давления на дросселе горючего, что подтверждает диагноз, поставленный на 3-ем уровне [21].

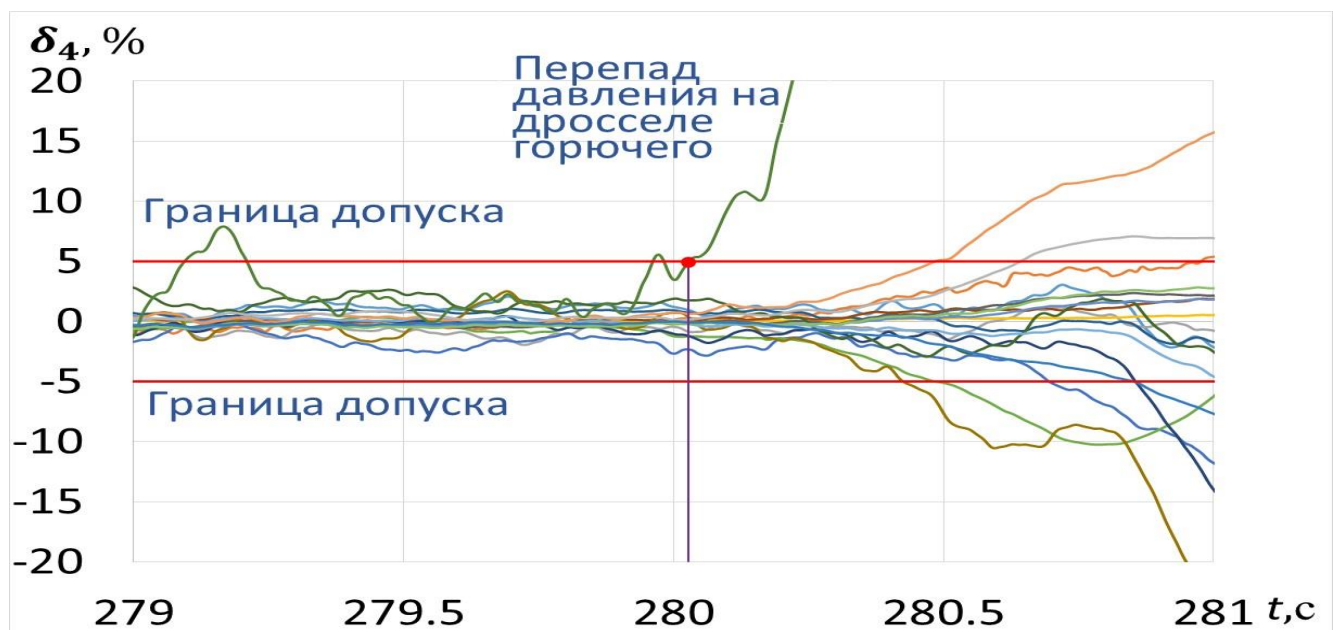


Рисунок 5.6 – Локализация отказа по методу структурного исключения: нарушение взаимосвязи параметров в уравнении перепада давления на дросселе горючего

Заключение по штатному протоколу ОИ: «Произошло самопроизвольное изменение режима работы двигателя вследствие закрытия дросселя из-за разрушения трубопровода. В результате значение K_m превысило предельно допустимую величину и стендовой системой аварийной защиты (САЗ) по каналу K_m была сформирована и выдана на 281,3 с команда на выключение двигателя. В этот момент двигатель был разрушен.»

Заключение по протоколу диагностирования ОИ: «На 280,15 секунде произошло нарушение нормального функционирования двигателя, вызванное нарушением работы дросселя горючего».

Таким образом, СФД выявила отказ на 1,15 секунды, т.е. раньше, чем САЗ, и своевременный останов двигателя обеспечил бы сохранность материальной части двигателя и стенда.

5.3.2 Отказ в автомате разгрузки

В этом разделе приведена процедура диагностирования двигателя, испытание которого завершились АД, как указано в протоколе ОИ, при достижении допустимого значения осевого перемещения вала насоса окислителя ТНА.

5.3.2.1 Определение момента времени возникновения отказа

При анализе отклонений измеряемых параметров от эталонных, полученных в соответствии с методикой диагностирования, видно (рисунки 5.7а, 5.7б), что до 42 секунды все параметры ведут себя стабильно, отклонения не выходят за границы заданных диапазонов. С момента времени $t=45,8$ с начинается тренд параметров, а к моменту времени $t=51,4$ с три параметра (давление окислителя до подшипника, перемещение вала ТНА и давление окислителя в коллекторе перепуска) последовательно вышли за границы допустимого диапазона, принятого для оценки работы нормально функционирующего двигателя. Следовательно, момент времени $t=51,4$ с (выход третьего параметра – перемещение вала ТНА–за границы допуска) принимается за момент времени возникновения отказа, фиксируемый средствами измерения двигателя [21].

Следует также особо отметить, что при этом измеряемые параметры двигателя, не входящие в контур автомата разгрузки и стояночного уплотнения, практически не отреагировали на возникновение в нём отказа. Это подтверждает, что основные параметры двигателя не чувствительны к отказам в рассматриваемом контуре. Для повышения достоверности определения момента времени

возникновения отказа переходим на 2-й уровень диагностирования [21].

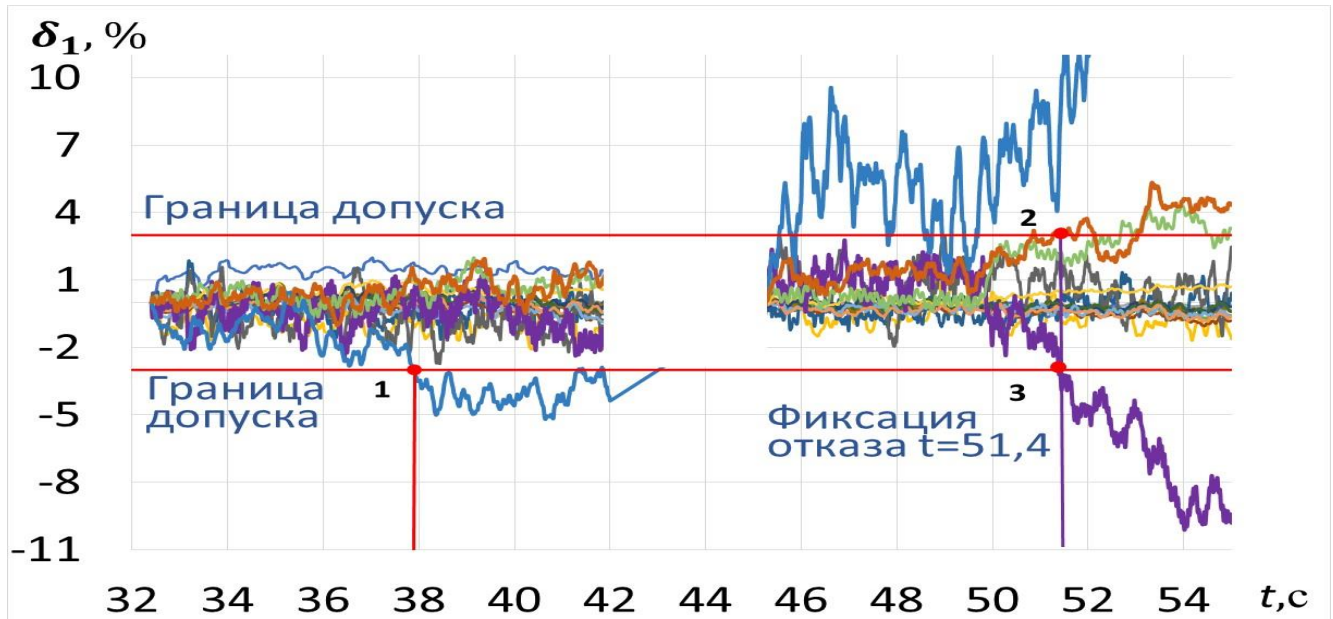


Рисунок 5.7* а) – Контроль отклонения текущих средних значений параметров двигателя от среднего измеренного значения в начале режима при возникновении отказа: все параметры.



Рисунок 5.7* б) – Контроль отклонения текущих средних значений параметров двигателя от среднего измеренного значения в начале режима: три параметра, вышедшие за границу допуска

*Составлено автором по результатам расчётов

При контроле отклонений измеренных значений параметров от рассчитанных по математической модели видно (рисунки 5.8а, 5.8б), что в момент времени

$t=51,9$ с три диагностических признака вышли за пределы допусков, равных 3% от расчётного значения параметра на данном режиме (давление окислителя до подшипника, давление окислителя в коллекторе перепуска и давление окислителя на входе в насос).

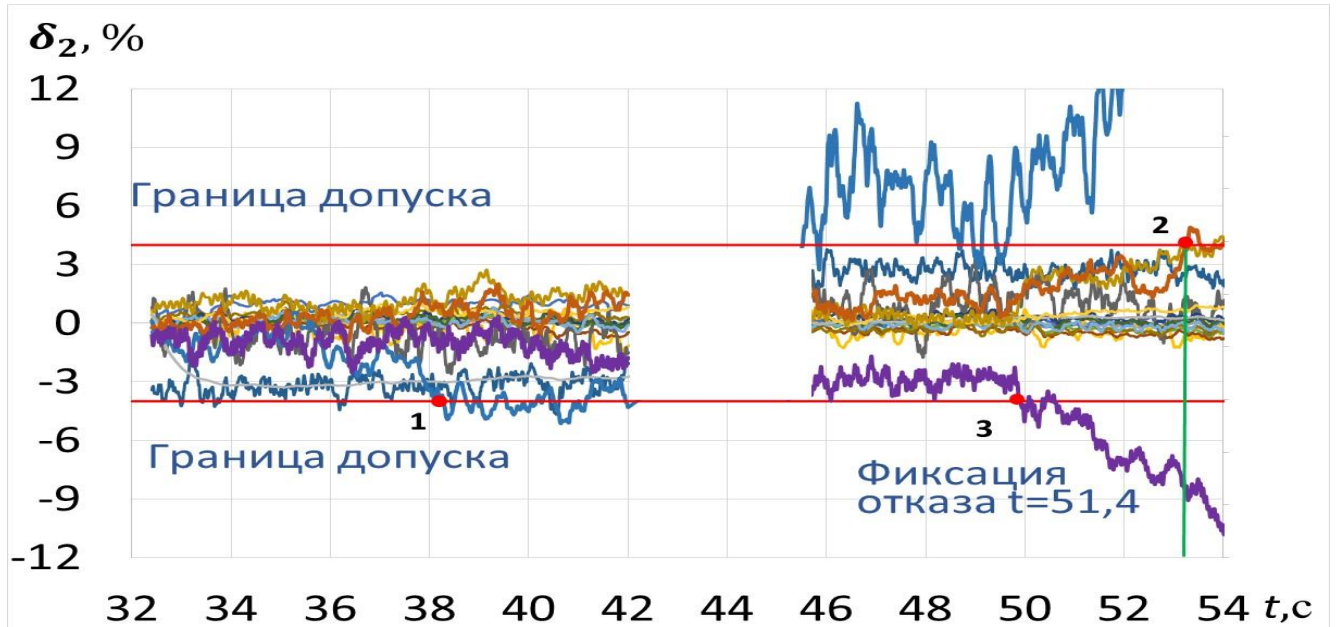


Рисунок 5.8 а) – Контроль отклонения измеренных параметров от расчётных по математической модели: все параметры.



Рисунок 5.8 б) – Контроль отклонения измеренных параметров от расчётных по математической модели: три параметра, вышедшие за границу допуска

Это время на 0,5 с позже времени, определённого непосредственно по измеряемым параметрам. Это подтверждает зафиксированное ранее возникновение предполагаемого отказа. Таким образом, факт возникновения отказа подтверждён, и переходим на 3-й уровень диагностирования [21].

Очевидно, что после обнаружения отказа, математическая модель нормального функционирования адекватна лишь на ограниченном отрезке времени

5.3.2.2 Локализация отказа по отклонению характеристик агрегатов

После принятия решения о наличии отказа производится его локализация путём контроля характеристик двигателя реализовавшихся при ОИ, от характеристик при автономных испытаниях с использованием всех измеряемых параметров.

На рисунке 5.9 показано что локализация отказа определяется недопустимыми отклонениями следующих параметров:

1. Силы, действующей на передний диск центробежного колеса насоса окислителя при ОИ от силы, определённой характеристике при автономных испытаниях.
2. Величины зазора в стояночном уплотнении [21].

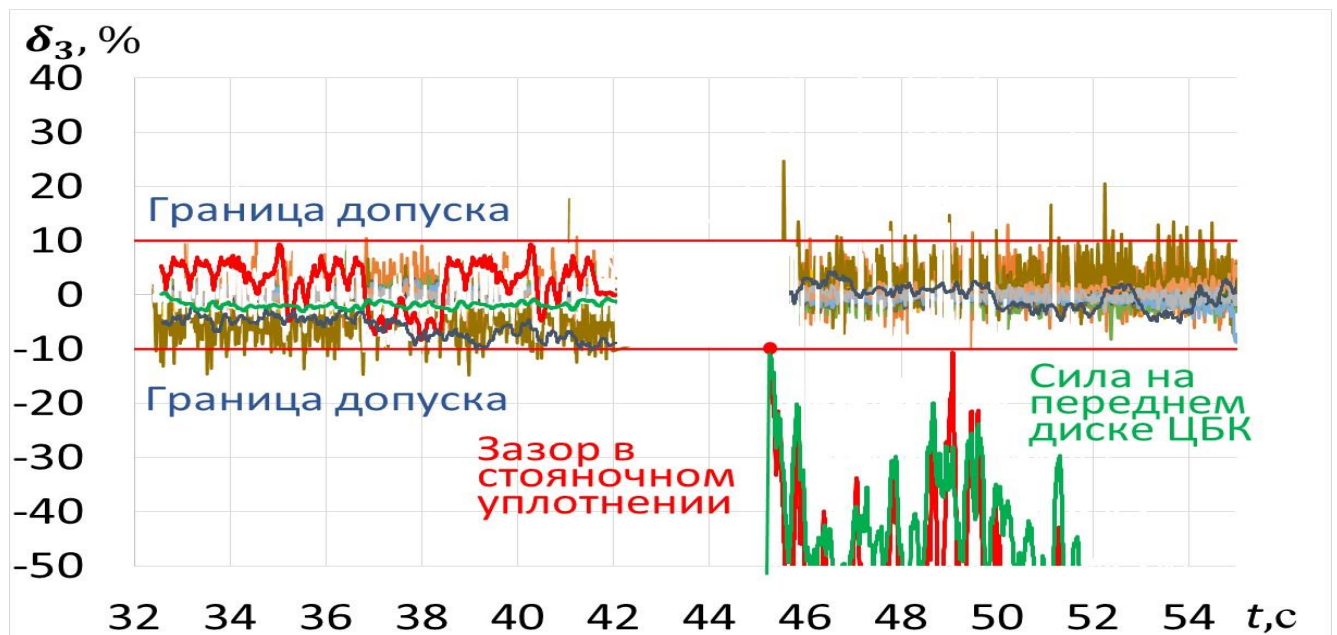


Рисунок 5.9 – Локализация отказа по отклонению характеристик АР и СУ.

Остальные отклонения от характеристик агрегатов нормально функционирующего двигателя - в норме.

5.3.2.3 Локализация отказа по функциональным связям параметров

Для подтверждения результатов, полученных при локализации отказа по контролю характеристик двигателя, производится контроль диагностических признаков 4-го вида (по алгоритму, представленному в разделе 4.1) с помощью которых определяются причины нарушения указанных характеристик. На рис 5.10 видно, что дисбаланс сил на радиально-упорном подшипнике насоса окислителя фиксируется СФД с момента времени $t = 51,9$ с. Следовательно, с этого момента времени СФД фиксирует нагружение подшипника, что может привести к его разрушению.

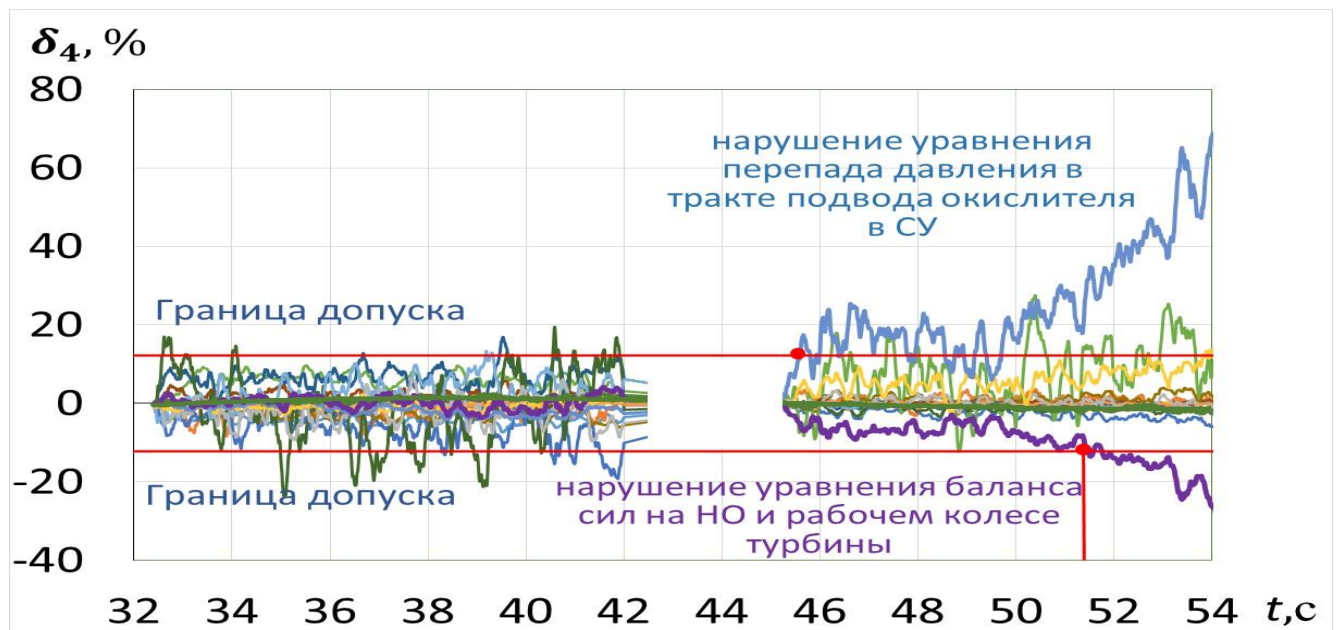


Рисунок 5.10 – Локализация отказа по методу структурного исключения:
нарушение взаимосвязи параметров в уравнении баланса сил на ЦБ колесе насоса окислителя и РК турбины

Заключение аварийной комиссии.

«При дефектации двигателя после ОИ определено, что причиной разрушения двигателя стало «наматывание» покрытия на заднем бурте ЦБК насоса окислителя, которое привело к изменению гидросопротивления лабиринтного уплотнения, а следовательно, к дисбалансу сил в автомате разгрузки.»

Заключение по протоколу диагностирования ОИ.

«На **51,9** секунде произошло нарушение нормального функционирования двигателя, вызванное недопустимым дисбалансом сил на центробежном колесе насоса окислителя и рабочем колесе турбины ».

Таким образом, СФД выявила и локализовала отказ существенно -на 26,1 секунды (!) - раньше, чем САЗ, и своевременный останов двигателя обеспечил бы сохранность материальной части двигателя и стенда.

При дефектации двигателя после ОИ определено, что причиной разрушения двигателя стало «наматывание» покрытия на заднем бурте ЦБК насоса окислителя, которое привело к изменению гидросопротивления лабиринтного уплотнения, а, следовательно, к дисбалансу сил в автомате разгрузки.

Отключение двигателя по команде САЗ произошло на 77 секунде. В этот момент двигатель был разрушен.

Система функциональной диагностики двигателя зафиксировала момент времени возникновения и локализовала отказ на 51,9 секунде.

Из графиков видно, что основные параметры двигателя не среагировали на возникновение отказа. Изменения видны только на параметрах, описывающих работу контура АР и СУ. Что говорит об увеличении глубины диагностирования при использовании данного метода.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5

Представлены результаты коррекции математической модели в процессе проведения ОИ. Проведён расчёт допустимых значений диагностических признаков. Показана эффективность разработанной методики диагностирования при определении моментов времени возникновения конкретных неисправностей

при ОИ, и вызванных ими изменений характеристик агрегатов и функциональных связей в двигателе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе содержится решение научной задачи, имеющей значение для технической диагностики сложных систем, направленное на совершенствование методов диагностирования ЖРД с целью обеспечения повышения безопасности и качества огневых испытаний. Решение этой задачи определяется следующими основными результатами работы:

1 Впервые штатная математическая модель ЖРД дополнена уравнениями процессов в контуре АР и СУ ТНА, параметры которого функционально связаны с основными параметрами двигателя. Это позволило проводить анализ параметров двигателя, недоступных для прямого измерения в процессе огневого испытания.

2 Разработана методика многоуровневого диагностирования ЖРД, которая содержит, дополнительно к штатной методике, диагностические признаки для контроля относительных отклонений: измеренных значений параметров от среднего в начале стационарного режима и отклонения характеристик агрегатов, определённых при модельных испытаниях от реализованных при огневом испытании. Многоуровневый контроль повышает качество проведения испытаний за счёт снижения вероятности ложного срабатывания системы функциональной диагностики или пропуска отказа.

3 Диагностирование на основе разработанной методики, проведённое при реальных огневых испытаниях ЖРД, показало, что сигнал о возникновении отказа может быть сформирован в одном случае на 1,15 секунды, в другом - на 26 секунд раньше, чем срабатывает штатная система аварийной защиты. Это обеспечивает возможность предотвратить разрушение материальной части двигателя и стенда, повышая тем самым безопасность проведения испытаний.

4 Результаты работы и разработанное программное обеспечение (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021667684 от 01.11.2021, патент № 2800833 о настройке параметров САЗ) используются в Акционерном обществе «НПО Энергомаш» имени академика В.П. Глушко при анализе состояния двигателей в процессе ОИ, что подтверждается

«Актом № 271 о внедрении в АО «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко» результатов диссертационной работы Гемрановой Екатерины Анатольевны "Диагностика жидкостных ракетных двигателей с автоматом разгрузки и стояночным уплотнением турбонасосного агрегата» от 23.10.2025.

Перспективой дальнейшего развития результатов работы является их применение для системы функциональной диагностики ЖРД при огневых испытаниях, работающей в режиме реального времени.

Результаты работы могут быть также использованы для разработки систем диагностики других сложных технических систем

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АВД	аварийное выключение двигателя
АРУ	автомат разгрузки
БНАГ	Бустерный насосный агрегат горючего
БНАО	Бустерный насосный агрегат окислителя
ЖРД	жидкостный ракетный двигатель
КТ	контрольная точка
ММП	медленноменяющиеся параметры
МИ	модельные испытания
ОИ	огневое испытание
РУП	радиально-упорный подшипник
РКТ	рабочее колесо турбины ТНА
САЗ	система аварийной защиты
СФД	система функциональной диагностики
СУ	стояночное уплотнение
ТНА	турбонасосный агрегат
ЦБК	центробежное колесо

Обозначения, сокращения, индексы и единицы измерений на схеме и в системе уравнений.

p - давление, кгс/см²

\dot{m} - массовый расход, кг/с,

V – объёмный расход, л/с,

F – сила, кгс

ξ - коэффициент потерь, с/см⁵

ρ - удельный вес компонента топлива, кг/см³

x – перемещение, мм

S – площадь, см²

u – окружная скорость рабочего колеса турбины,

n – частота вращения вала ТНА,

$c_{ад}$ – адиабатическая скорость рабочего колеса турбины.

бно – бустерный насос окислителя;

ВХ – ВХОД;

ВЫХ – ВЫХОД;

Г – горючее;

ГГ – газогенератор;

газ – генераторный газ;

Д – двигатель;

заз – зазор;

зд – задний диск;

кор – корневое;

КТ – контрольная точка;

макс – максимальное;

мин – минимальное;

Н – насос;

НОМ – номинальное значение;

ОК – окислитель;

пб – передний борт;

ПОДШ – подшипник;

ПОЛЗ – ползун;

пр – пружина;

прод – продувка;

СГ ГГ – смесительная головка газогенератора;

сеп – сепаратор;

Т – турбина;

тр – трение;

Т.Щ. – торцевая щель;

ЦИЛ – цилиндр;

ШН – шнек;

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абугов, Д.И. Лабораторные работы по тепловым процессам и характеристикам реактивных двигателей [Текст] / Д.И.Абугов. – М.: МАИ, 1962. - 101 с.
2. Архангельский, Н.А. Алгоритмы решения некоторых линейных и нелинейных задач алгебры на ЭВМ. Аппроксимация в инженерных расчётах [Текст] / Н.А. Архангельский, П.В. Бирюков - М.: Изд-во МАИ, 1983. - 80 с.
3. Барботько, Л.Н. Коррекция математической модели ЖРД по результатам огневого испытания для задач диагностики [Текст] / Л.Н. Барботько, Д.С. Мартиросов // Труды НПО Энергомаш, - 2001. - № 21. – С. 91-104.
4. Белоусов, А.И. Расчёт осевых сил, действующих в турбомашинах [Текст] / А.И. Белоусов, А.И. Иванов / -Куйбышев: КуАИ, - 1981. - 84 с.
5. Беляев, Е.Н. Математическое моделирование рабочего процесса жидкостных ракетных двигателей [Текст] / Е.Н. Беляев, В.К. Чванов, В.В.Черваков. - М.: Изд-во МАИ, 1999. - 226 с.
6. Беляев, Е.Н. Методы отбраковки недостоверной информации при испытаниях ЖРД [Текст] / Е.Н. Беляев, В.М. Жук, Ю.Н. Ткаченко - М.: Изд-во МАИ, 1994. - 20 с.
7. Бен-Хаим, Я. Оптимизация многогипотезного алгоритма диагностирования отказов исполнительных органов управления в линейных системах [Текст] / Я. Бен-Хаим // Аэрокосмическая техника – 1991. - №3. - С. 138-145.
8. Березанская, Е.Л. Руководство к лабораторным работам по курсу "Теория ракетных двигателей" [Текст] / Е.Л. Березанская, Х.В. Кесаев, В.Д. Курпатенков, В.Е. Шепелев; под ред. Абугова Д.И. – М.: МАИ, 1977. - 57с.
9. Биргер, И.А. Техническая диагностика [Текст] / И. А. Биргер. - М: Машиностроение, 1978. - 239 с.
10. Бородин, С.М., Основы технической диагностики электронных средств

[Текст] / С.М. Бородин / –Ульяновск: УЛГТУ, - 2019. – 48 с.

11. Буканов, Б.Т., Проблемы функциональной диагностики жидкостных ракетных двигателей [Текст] / Б.Т. Буканов, П.С. Левочкин, Д.С. Мартиросов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2013. -№ 1(90). – С. 72-78.

12. Буканов, В.Т. Диагностические модели ЖРД [Текст] / В.Т. Буканов, С.С. Каменский, Д.С. Мартиросов // Труды НПО Энергомаш. -2017.- № 37. - С.81-96.

13. Буканов, В.Т. Анализ связи между процедурами диагностирования, управления и регулирования ЖРД [Текст] / В.Т. Буканов, А.И. Колбасенков, Д.С. Мартиросов//Труды НПО Энергомаш. - 2012. -№ 29. - С. 174-187.

14. Буканов, В.Т. Функциональная диагностика на основе коэффициентов пропорциональности отклонений измеряемых параметров [Текст] / В.Т. Буканов, Д.С. Мартиросов, // Труды НПО Энергомаш. -2010.-№ 27. –С.122-139.

15. Васин, А.С. Автоматизированный контроль и диагностика сложных пневмогидравлических объектов [Текст] / А.С. Васин, Э.В. Венгерский // Новые наукоёмкие технологии в технике: Энциклопедия. – М.: МЦ «Аспект», 1994. Т.1. - 280 с.

16. Видишев, В.И. Уравновешивание и контроль осевой нагрузки радиально-упорных подшипников агрегатов подачи ЖРД РД170 [Текст] / В.И. Видишев, Ю.И. Каналин, В.Н. Кухарев, С.А. Маликова, Н.П. Полетаев // Труды НПО Энергомаш. - 2000.- № 18. -С. 100-114.

17. Волков, Е.Б. Основы теории надёжности ракетных двигателей [Текст] / Е.Б. Волков, Р.С. Судаков, Т.А. Сырицын. -М.: Машиностроение, 1974. - 399 с.

18. Воробьев, В.В. Функциональная диагностика ЖРД на основе эквивалентной разрешающей способности измеряемых параметров [Текст] / В.В. Воробьев, Д.С. Мартиросов // Труды НПО Энергомаш. – 2006.-№24. –С.95-113.

19. Галеев, А.Г. Методология экспериментальной отработки ЖРД и ДУ, основы проведения испытаний и устройства испытательных стендов [Текст] / А.Г. Галеев, В.Н. Иванов, А.В. Катенин, В.А. Лисейкин, В.П. Пикалов, А.Д. Поляхов, Г.Г. Сайдов, А.А. Шибанов. – Киров: НИЦ РКП, 2015. -435 с.

20. Гафуров, Р. А. Диагностика внутрикамерных процессов в энергетических установках [Текст] / Р. А. Гафуров, В. В. Соловьёв. – М.: Машиностроение, 1991. – 272 с.
21. Гемранова, Е.А. Диагностирование состояния контура автомата разгрузки и стояночного уплотнения турбонасосного агрегата жидкостного ракетного двигателя [Текст] // Вестник МАИ, – М.: МАИ, 2021, – Т. 28, № 3, С. 24-30.
22. Гемранова, Е.А. Влияние кавитации в насосе ТНА на параметры работы ЖРД [Текст] / Е.А. Гемранова, Ю.И. Каналин, Н. П. Полетаев, А. А. Фролов // Труды НПО Энергомаш. – М.: НПО Энергомаш – 2019. – № 36. – С. 51-66.
23. Гемранова, Е.А. Масштабирование диагностических признаков при контроле технического состояния ЖРД [Текст] / Е.А. Гемранова, С.С. Каменский, Д.С. Мартиросов // Труды НПО Энергомаш. – М.: НПО Энергомаш – 2022. – № 38-39. – С. 71-79.
24. Гемранова, Е.А. Вероятностные оценки достоверности принятия решения в системе диагностики ЖРД [Текст] / Е.А. Гемранова, М.И. Завьялова, Д.С. Мартиросов // Труды НПО Энергомаш. – М.: НПО Энергомаш – 2023. – № 40. – С. 29-39.
25. Гемранова, Е.А. Алгоритм управления по соотношению компонентов топлива с "нелинейным" регулированием [Текст] / Е.А. Гемранова, А.И. Колбасенков, С.Н. Семенов. // Труды НПО Энергомаш. – М.: НПО Энергомаш – 2016. – № 33. – С. 141-147.
26. Гемранова, Е.А. Корректировка математической модели ЖРД, содержащей модель контура автомата разгрузки ТНА, по результатам ОИ двигателя [Текст] / Е.А. Гемранова, Д.С. Мартиросов // Тезисы докладов Всероссийской научно – технической конференции «Ракетно-космические двигательные установки» – Москва, 22-23 октября 2020г., – М. МГТУ им. Н.Э. Баумана, – 2020. – С.38-40.
27. Гемранова, Е.А. Диагностическая модель контура автомата разгрузки и стояночного уплотнения ТНА ЖРД [Электронное издание] // Тезисы докладов VIII

Конгресса молодых учёных Университета ИТМО – СПб, 15-19 апреля 2019 г., <https://kmu.itmo.ru/digests/article/1070>.

28. Гемранова, Е.А. Анализ состояния ЖРД после огневого испытания с использованием диагностической модели, содержащей контур автомата разгрузки и стояночного уплотнения ТНА [Текст] / Е.А. Гемранова, Д.С. Мартиросов // Тезисы докладов 18-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика», Москва, 18-22 ноября 2019г., – М: «Логотип». – 2019. – С. 46.

29. Гликман, Б.Ф. Математические модели пневмогидравлических систем [Текст] / Б.Ф. Гликман. М.: Наука, 1986. 368с.

30. Гликман, Б.Ф. Теория автоматического регулирования жидкостными ракетными двигателями [Текст] / Б.Ф. Гликман. 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1989. -296с.

31. Гликман Б.Ф. Автоматическое регулирование ракетных двигателей [Текст] / Б.Ф. Гликман. М.: Машиностроение, 1979. - 396 с.

32. Гликман, Б.Ф. Технический отчёт по контракту N ДААН01-95-С-R139 [Текст] / Б.Ф. Гликман, В.А. Овчинников, А.А. Сергиенко и др.// Международный учебно-научный центр "Космос" -1998. - С. 122-153.

33. Глушко, В. П. Развитие ракетостроения и космонавтики в СССР: [Посвящается 30-летию космич. эры, 1957-1987] [Текст] / В. П. Глушко. - 3-е изд., доп. - М.: Машиностроение, 1987. - 302 с.

34. Гнедов, Г.М. Проектирование систем контроля ракет [Текст] / Г.М. Гнедов, О.Б. Росенбаули, Ю.А. Шумов. М.: Машиностроение, 1975. - 224 с.

35. Гребенюк, А.Т. Расчётно-методическое обеспечение проектирования стояночного уплотнения кислородного насоса ЖРД [Текст] / А.Т. Гребенюк, Ю.И. Каналин, Н.П. Полетаев // Труды НПО Энергомаш. -2014.- № 31. - С.131-145.

36. Деннис, Дж. мл. Численные методы безусловной оптимизации и решения нелинейных уравнений [Текст] / Дж. Деннис мл., Р.Шнабель. Пер. с англ. М.: Мир, 1988. - 440 с.

37. Джавел, Ли. Диагностирование сложных пневмогидромеханических систем на основе математических моделей методом структурного исключения: дис.

... канд. техн. наук: 05.07.05 [Текст] / Ли Джиавел. – М., 2000. - 122 с.

38. Добровольский М.В., Ягодников Д.А. Жидкостные ракетные двигатели Основы проектирования: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров и магистров "Ракетные комплексы и космонавтика", специальности "Проектирование авиационных и ракетных двигателей" направления подготовки дипломированных специалистов "Двигатели летательных аппаратов" [Текст]. / М. В. Добровольский; под ред. Д. А. Ягодникова. - 3-е изд., доп. - Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. - 474 с.

39. Добромыслова, Е.И. Подсистема допускового контроля параметров ЖРД / Е.И. Добромыслова, Н.В. Польшикова // РК техника, сер. XIII, вып. 4. -1983. -С. 27-40.

40. Дорофеев, А. А. Основы теории тепловых ракетных двигателей. Теория, расчёт и проектирование: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров и магистров 160400.62.68 "Ракетные комплексы и космонавтика" и инженеров по специальности 160700.65 "Проектирование авиационных и ракетных двигателей"[Текст] / А. А. Дорофеев. - Изд. 3-е, перераб. и доп. - Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, -2014. -576с.

41. Евдокимов, С.Л. Математическое моделирование параметров потока в элементах турбонасосного агрегата с применением 1D и 3D моделирования [Текст] / С.Л. Евдокимов // Труды НПО Энергомаш, - 2023. - № 40. – С. 4-19.

42. Жарковский, А. А. Математическое моделирование рабочих процессов в центробежных насосах низкой и средней быстроходности для решения задач автоматизированного проектирования [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук: 05.04.13/ Жарковский Александр Аркадьевич. - Санкт-Петербург, 2003. - 568 с.

43. Жиравок, А.Н. Поиск дефектов в нелинейных системах методом функционального диагностирования на основе обобщённых алгебраических инвариантов [Текст] / А.Н. Жиравок // Автоматика и телемеханика. -1994. -№ 7. - С. 160-168.

44. Жиравок, А.Н. Функциональное диагностирование непрерывных

динамических систем, описываемых уравнениями с полиномиальной правой частью [Текст] / А.Н. Жиравок, А.Е. Шумский // Автоматика и телемеханика. -1987. -№ 7. -С. 154-164.

45. Жуковский, А.Е. Испытания жидкостных ракетных двигателей [Текст] / А.Е. Жуковский, В.С. Кондрусев, В.В. Окорочков. -М.: Машиностроение, 1992. - 352 с.

46. Зарин, А. А. Обеспечение выходных параметров топливорегулирующих агрегатов ДЛА в процессе сборки и регулирования [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.04. / Зарин Александр Анатольевич. - Москва, 1984. - 128 с.

47. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям [Текст] / - М.: Машиностроение, 1975. - 960 с.

48. Каменский, С.С. Метод определения расчётно-экспериментальных зависимостей для оперативного прогнозирования параметров ЖРД при повторных испытаниях [Текст] / С.С. Каменский, Д.С. Мартиросов // Труды НПО Энергомаш, - 2016.- № 33, - С.128-140.

49. Каменский, С.С. Применение методов теории подобия для анализа стационарных рабочих процессов жидкостных ракетных двигателей [Текст] / С.С. Каменский, Д.С. Мартиросов, А.И. Коломенцев // Вестник Московского авиационного института. - 2016. - Т. 23. - № 1. -С.32-37.

50. Канагин, Ю.И. Прогноз величины осевой силы турбины ТНА ЖРД большой тяги [Текст] / Ю.И. Канагин, И.А. Чернышева // Труды НПО Энергомаш. - 2014. - № 31, -С.90-109.

51. Карибский, В.В. Основы технической диагностики [Текст] / В.В. Карибский, П.П. Пархоменко, Е.С. Согомоян, В.Ф. Халчев. -М.: Энергия, 1976. – 234с.

52. Клюев, В. В. Технические средства диагностирования: справочник [Текст] / В. В. Клюев, П. П. Пархоменко, В. Е. Абрамчук [и др.]; общ. ред. В. В. Клюев - М. : Машиностроение, 1989. - 671 с.

53. Коломенцев, А.И. Прикладные методы функционально диагностирования сложных газодинамических систем [Текст] / А.И. Коломенцев,

Ли Джиавел, Д.С. Мартиросов // Чкаловские чтения, Инженерно-физические проблемы авиационной и космической техники. -1999г. С. 99-100.

54. Коломенцев, А.И. Увеличение глубины диагностирования сложных технических систем при использовании метода структурного исключения [Текст] / А.И. Коломенцев, Ли Джиавел //Вестник МАИ. -2000.-т.7. -№2. –С. 15-22.

55. Коломенцев, А.И. Методы функциональной диагностики ДЛА. Учебное пособие [Текст] / А.И. Коломенцев, Д.С. Мартиросов / -М.: МАИ, 2002. - 112 с.

56. Комаров, А.А. Надёжность гидравлических систем [Текст] / А.А.Комаров. -М.: Машиностроение, 1969. - 235 с.

57. Комаров, А.А. Трубопроводы и соединения для гидросистем [Текст] / А.А. Комаров, В.И. Сапожников / -М.: Машиностроение, 1967. -231 с.

58. Кривошеев, И. А. Автоматизация системного проектирования авиационных двигателей: дис. ... д-ра техн. наук: 05.07.05 [Текст]/ Кривошеев Игорь Александрович. - Уфа, 2000. - 485 с.

59. Латышев А.В. Применение методов идентификации для диагностирования непрерывных объектов [Текст] / А.В. Латышев // Автоматика и телемеханика. -1984. -№ 12. -С. 118-123.

60. Лихачёв, В.Я. Техническая диагностика пневмогидравлических систем ЖРД [Текст] / В.Я. Лихачёв, А.С. Васин, Б.Ф. Гликман. -М.: Машиностроение, 1983. - 204с

61. Львовский, Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул [Текст] / Е.Н. Львовский. -М.: Высшая школа, 1988. - 238 с.

62. Мартиросов, Д.С. Диагностирование неисправностей трубопроводов методом структурного исключения [Текст] / Д.С. Мартиросов, А.И. Коломенцев, Ли Джиавел. // Авиационная техника. -2001. №3. –С. 25-31.

63. Мартиросов, Д.С. Диагностирование технического состояния ЖРД на основе математических моделей рабочих процессов и измеряемых параметров методом структурного исключения: дис. ... д-ра техн. наук: 05.07.05 [Текст] /. - Химки, 1997. - 225 с.

64. Мартиросов, Д.С. Диагностирование технического состояния мощных ЖРД методом контурной увязки медленноменяющихся параметров: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.05 [Текст] / Мартиросов Давид Суменович - Химки, 1988. – 221с.
65. Мартиросов, Д.С. Функциональная диагностика ЖРД. Теория, модели, методы, эксперимент [Текст] / Д.С. Мартиросов. -М.: МАИ, 2021.-164с.
66. Мартиросов, Д.С. Функциональная диагностики в режиме реального масштаба времени [Текст] / Д.С. Мартиросов, А.И. Коломенцев // Авиационно-космическая техника и технология. - 2012. -№ 7(49). – С. 197-201.
67. Мартиросов, Д.С. Диагностирование сложных технических систем на основе математических моделей физических процессов и измеряемых параметров методом структурного исключения [Текст] / Д.С. Мартиросов. – М.: МАИ, 1998. – 56 с.
68. Мартиросов, Д.С. Задачи функциональной диагностики жидкостных ракетных двигателей по медленноменяющимся параметрам [Текст] / Д.С. Мартиросов, Л.В. Подорванова // Сборник статей XVII международной научно – практической конференции «Eurasian Science». –М.: «Научно – издательский центр «Актуальность.РФ». -2018. -С.95-97.
69. Мартиросов, Д.С. Способ оценки предельно достигаемой точности определения параметров элементов ЖРД при их функциональной диагностики [Текст] / Д.С. Мартиросов, С.А. Синьков //Труды НПО Энергомаш. - 2005. - № 23. -С. 151-160.
70. Мартиросов, Д.С. Сравнение эффективности систем функциональной диагностики и аварийной защиты жидкостного ракетного двигателя при огневых испытаниях [Электронное издание] / Д.С. Мартиросов, Е.А. Гемранова, С.С. Каменский и др. // Тезисы докладов 23-ей Международной конференции «Авиация и космонавтика", Москва, 18-22 ноября 2024г. – М. «Перо», – 2024. – С. 59.
71. Мартиросов, Д.С. Применение системы функциональной диагностики и системы аварийной защиты жидкостного ракетного двигателя при огневых испытаниях [Текст] / Д.С. Мартиросов, Е.А. Гемранова, С.С. Каменский и др. // «Вестник машиностроения» – М.: «Инновационное машиностроение», 2024 – №11

том 103 – С. 898 – 901.

72. Марцинковский, В.А. Насосы атомных электростанций [Текст] / В.А. Марцинковский, П.Н. Ворона, / -М.: Энергоатомиздат. -1987г. -96 с.

73. Мироновский, Л.А. Функциональное диагностирование динамических систем (обзор) [Текст] / Л.А. Мироновский // Автоматика и телемеханика. -1980. - № 8. -С. 96-121.

74. Мостеллер, Ф. Анализ данных и регрессия [Текст] / Ф.Мостеллер, Д.Тьюки / -М.: Финансы и статистика, -1982. - 319 с.

75. Основы технической диагностики [Текст] / Под ред. П.П. Пархоменко. -М.: Энергия, -1976. - 464с.

76. Патент № 2750875 Российская Федерация, МПК G05B 17/02 (2006.01). Способ локализации неисправности жидкостного ракетного двигателя при огневом испытании [Текст] / Левочкин П.С., Мартиросов Д.С., Каменский С.С.; заявитель и патентообладатель АО «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко». -№ 2020124591; заявл. 24.07.2020; опубл. 05.07.2021. -4 с.

77. Патент № 2749497 Российская Федерация, МПК F02K 1/00 (2006.01), G06F 17/18 (2006.01), G05B 17/00 (2006.01). Способ коррекции математической модели жидкостного ракетного двигателя [Текст] /Левочкин П.С., Мартиросов Д.С., Каменский С.С.; заявитель АО «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко». -№ 2020108712; заявл. 28.02.2020; опубл. 11.06.2021. -6 с.

78. Патент № 2750874 Российская Федерация, МПК G01M 15/14 (2006.01), G05B 17/02 (2006.01), F02K 9/42 (2006.01). Способ контроля характеристик агрегатов жидкостного ракетного двигателя при огневом испытании [Текст] / Левочкин П.С., Мартиросов Д.С., Каменский С.С.; заявитель АО «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко». -№ 2020124589; заявл. 24.07.2020; опубл. 05.07.2021. -6 с.

79. Патент № 2758781 Российская Федерация, МПК G01M 15/14 (2006.01), G06F 17/18 (2006.01), F02K 9/96 (2006.01). Способ контроля технического состояния жидкостного ракетного двигателя на переходных режимах стендового испытания [Текст] / Левочкин П.С., Мартиросов Д.С., Каменский С.С.; заявитель

АО «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко». -№ 2020124590; заявл. 24.07.2020№; опубл. 01.11.2021. -5 с.

80. Патент № 2774006 Российская Федерация, МПК G01M 15/14 (2006.01). Способ контроля технического состояния жидкостного ракетного двигателя [Текст] / Левочкин П.С., Мартиросов Д.С., Каменский С.С.; заявитель АО «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко». -№ 2021121112; заявл. 16.07.2021; опубл. 14.06.2022. -6 с.

81. Патент № 2781738, Российская Федерация МПК G01M 15/14 (2022.02).., F02K 9/96 (2022.02). Способ функционального диагностирования жидкостного ракетного двигателя при огневом испытании [Текст] / Левочкин П.С., Мартиросов Д.С., Каменский С.С.; заявитель АО «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко».-№ 2020133230; заявл. 09.10.2020; опубл. 11.04.2022. -2 с.

82. Патент № 2654310, Российская Федерация МПК F02K 9/96 (2006.01), G05B 23/02 (2006.01). Способ и устройство контроля параметра ракетного двигателя [Текст] / Роме А., Ле Конидек С., Маликов Д., Газань Ж.; заявитель Сафран Эркрафт Энджинз. -№ 2016143197; заявл. 02.04.2015; опубл. 17.05.2018. - 20 с.

83. Патент № 2018900 Российская Федерация МПК G05B 23/00(1990.01),F15C 5/00(1990.01). Способ контроля и диагностики пневмогидравлического объекта [Текст] / Васин А.С., Венгерский Э.В., Шилкин С.Н., Розколуца А.И., Липсон А.Э.; заявитель ГП-НПО «Техномаш». -№ 4834505/24; заявл. 05.06.1990; опубл. 30.08.1994. 7 с.

84. Патент № 2133952, Российская Федерация МПК G01M 15/00(1995.01). Способ контроля и диагностирования состояния пневмогидравлического объекта [Текст] / Васин А.С., Венгерский Э.В., Малиновский А.Ю., Усов Г.Л., Шостак А.В.; заявитель ГП «НПО Техномаш». № 98107312/06; заявл. 16.04.1998; опубл. 27.07.1999. -14 с.

85. Патент № 2393450 Российская Федерация МПК G01M 15/14 (2006.01), F02K 9/96 (2006.01). Способ контроля и диагностирования жидкостного ракетного двигателя [Текст] / Елисеев В.В., Булатов М.С., Шостак А.В., Венгкрский Э.В.,

Васин А.С., Усов Г.Л., Ермолов М.И.; заявитель ФГУП «НПО «Техномаш». - №2009110514/06; заявл. 25.03.2009; опубл. 27.06.2010 -6 с.

86. Патент № 2800833 Российская Федерация МПК F02K 9/38 (2023.05). Способ адаптивной настройки контролируемых параметров системы аварийной защиты жидкостного ракетного двигателя на первое огневое испытание [Текст]/ И.Б. Давыдов, И.С. Барашков, Е.А. Гемранова; заявитель АО «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко». №2022127287; заявл. 20.10.2022; опубл. 28.07.2023. - 9 с.

87. Петров, В.Н. Методика и программа расчёта вспомогательного гидравлического тракта насоса окислителя ТНА двигателя РД191 с учётом термодинамических процессов [Текст] / В.Н. Петров, Н.П. Полетаев, Л.Е. Стернин и др. // ТО инв.769-84-2006, -Химки, -2006. -15с.

88. Писсанецки, Дж. Технология разреженных матриц [Текст] / Дж. Писсанецки. М.: Мир, 1988. - 344с

89. Плетнёв, И.Л. Эффективность и надёжность сложных систем [Текст] / И.Л. Плетнёв, А.И. Рембеза, Ю.А. Соколов, В.А. Чалый-Прилуцкий. –М.: Машиностроение, 1977. - 216с.

90. Рудинский, А. В. Экспериментально-теоретическое исследование и разработка электрофизического метода диагностики ракетных двигателей: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.05 [Текст] / Рудинский Александр Викторович. – М., 2015. - 142с.

91. Самарский, А.А. Численные методы [Текст] / А.А. Самарский, А.В. Тулин. -М.: Наука, 1989. - 432 с.

92. Сафарбаков, А.М. Основы технической диагностики [Текст] / А.М. Сафарбаков, А.В. Лукьянов, С.В. Пахомов. -Иркутск: ИрГУПС, -2007. -217с.

93. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021667684 Программа диагностирования технического состояния жидкостного ракетного двигателя в процессе огневых испытаний [Текст] / Е.А. Гемранова, Д.С. Мартиросов; заявитель АО «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко». - №2021660304; заявл.30.06.2021;опубл. 01.11.2021 -2с.

94. Тирский А.А. Разработка и исследование автоматизированной системы функционального контроля и диагностирования ЖРД: дисс. ...канд. техн. наук: 05.07.07 [Текст] / Тирский Андрей Альбертович – М., 2001. – 200с
95. Троп, Д. Методы идентификации систем [Текст] / Д.Троп, -М.: Мир, 1979. - 304 с.
96. Чапцов, Р.П. Об одном алгоритме распознавания постепенных отказов САР [Текст] / Р.П. Чапцов, А.С. Боков, Г.А. Никитин // «III Всес. совещ. по технической диагностике». -М.: Наука, -1975. - С. 220-222.122
97. Кавитационные характеристики высокооборотных шнеко – центробежных насосов [Текст] / В.Ф. Чебаевский, В.И. Петров. – М.: Машиностроение, 1973. - 152с
98. Шалобанов, С.В. Методы диагностирования линейных непрерывных систем управления: учебное пособие / С.В. Шалобанов, А.В. Кочетов. -Хабаровск: Изд-во ХГТУ. 1994. -58с.
99. Шевяков, А.А. Теория автоматического управления ракетными двигателями [Текст] / А.А. Шевяков, В.М. Калнин, Н.В. Науменкова, В.Г. Дятлов. -М.: Машиностроение, 1978. -288 с.
100. Шумский, А.Е. Диагностирование параметрических ошибок в динамических объектах методом проверки гипотез [Текст] / А.Е. Шумский // Автоматика и телемеханика. -1992. -№10.-С. 171-177.
101. Шумский, А.Е. Поиск дефектов в нелинейных системах методом функционального диагностирования [Текст] / А.Е.Шумский // Автоматика и телемеханика. -1991. -№ 12. -С. 148-155.
102. Яблочко, М.А. Адаптивные алгоритмы аварийной защиты ЖРД [Текст] / М.А. Яблочко // Космическая техника и технологии -2014. -№4(7). –С. 43-46.
103. Ягодников, Д. А. Экспериментально-теоретическое исследование и разработка электрофизических методов контроля и диагностики ЖРД [Текст] / Д. А. Ягодников, А. Н. Бобров, В. М. Аникеев, Л. А. Филимонов, // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». - 2009. - № 3. С.66-76.
104. Cha, J. Fault Detection and Diagnosis Algorithms for Transient State of an

Open-cycle Liquid Rocket Engine using Nonlinear Kalman Filter Methods / J. Cha, S. Ko, S. Park [et al]. *Acta Astronautica*, -2019, 163: -P.147-156.

105. Das, Case Study on Bearing Fault Diagnosis in Liquid Rocket Engine Using Envelope Detection Technique / Das, Debanjan [et al]. *Advances in Mechanical and Materials Technology*. Springer, Singapore, -2022. –P. 357-366.

106. Demyanenko, Yu. V. Turbopump Assemblies for Hydrogen-oxygen Liquid Propellant Rocket Engines / Yu. V. Demyanenko, A. I. Dmitrenko, V. K. Pershin // Boost. 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit Fort Lauderdale, FL, P. 2004-3685.

107. Demyanenko, Yu. V. Investigation of the Performance of a Thrust Balance Device for a Centrifugal Pump Rotor / Yu. V. Demyanenko, A. I. Dmitrenko, V. K. Pershin, D. Yu. Grebennikov // 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. P. 2004-3689.

108. Ezell, W. Health Monitoring of Reusable Rocket Engines / W. Ezell, S. Barkhoudarian & G. Cross // *SAE Transactions*. -1992.101, -P.175–182.

109. Gear, CW. Differential-algebraic equation index transformations / CW. Gear, // *SIAM, J. Sci. Stat. Comp.*, -1988. -P. 39-47.

110. Kawatsu, K. Model-based Fault Diagnostics in an Electromechanical Actuator of Reusable Liquid Rocket Engine / K. Kawatsu, S. Tsutsumi, M. Hirabayashi [et al]. // *AIAA Scitech 2020 Forum*, Orlando, FL, -2020.

111. Koppen – Seliger, B. Fault detection and isolation in technical process with neural network / B. Koppen – Seliger, P.M. Frank // 34th conf. on Decision and Control—1995.

112. Lozano-Tovar, P. C. Dynamic models for liquid rocket engines with health monitoring application / P. C. Lozano-Tovar. Massachusetts Institute of Technology. -1998.

113. Meyer, C.M. Rocket engine failure detection using system identification techniques/ C.M. Meyer, J.F. Zakrajsek // *NASA Contractor Report 185259*. AIAA-90 -1993. -18 p.

114. Moshiri, B. Fault Detection and Isolation with RBF Neural Network / B

Moshiri, S A Jazbi// IFAC Proceedings Volumes -1997. -Volume 30. -Issue 25. -P.91-96

115. Song Zheng-yu, The survey of launch vehicle long distance fault diagnosis technique / Song Zheng-yu //Journal of Astronautics. -2016. -№ 37(2). -P.135-144.

116. Song, Ye Thrust Fault Diagnosis of Launch Vehicle Engine Based on Linear-Quadratic Receding Horizon Algorithm / Ye Song, Chen Xi, Xiong Cunping // Astronautical Systems Engineering Technology. -2020. -№ 4(06). –P. 29-37.

117. Zhang, J. Fault Simulation and Experimental Study on High-Thrust LOX/LH2 Rocket Engine / J. Zhang, G. Yanbo, L. Zhongshu, W. Weibin // Journal of Deep Space Exploration. -2021. -№ 8(4). P. 389-398.

118. Zhengyu, S. LM-8: the pioneer of long march rocket series on the innovations of commercialization and intelligence / S.Zhengyu, W. U. Yitian, X. U. Shanshu [et al] // Journal of Deep Space Exploration. -2021. -№8(1). –P.3-16.

119. Zhengyu, S. Prospects of sea launches for Chinese cryogenic liquid-fueled medium-lift launch vehicles / S. Zhengyu, Zhifeng Xie, Limin Qiu [et al] // Chinese Journal of Aeronautics. -2021. -№34(1). –P 424-437.

120. Zheng, D.Y. Transient Characteristics of High-Thrust Oxygen/Hydrogen Rocket Engine / D.Y. Zheng, H.Y. Wang, J.Hu // Journal of Propulsion Technolgy. -2021. -№42(08). –P. 1761-1769.