

*На правах рукописи*



УДК: 681.518.3+621.391.08+  
+ 629.7.036.5–63: 620.1+  
+ 004 + 004.891.3] (043.3)

**ЧУБАРОВ Олег Юрьевич**

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ  
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ  
СИСТЕМЫ ОГНЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ  
ДВИГАТЕЛЕЙ МАЛОЙ ТЯГИ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ДИАГНОСТИКИ  
НЕИСПРАВНЫХ СОСТОЯНИЙ**

Специальность 05.11.16 – Информационно-измерительные  
и управляющие системы (авиационная и ракетно-космическая техника)

**Автореферат**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва – 2012

Работа выполнена на кафедре «Приборы и измерительно-вычислительные комплексы» ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ).

**Научный руководитель:**

кандидат технических наук, доцент Князева Валентина Валентиновна

**Официальные оппоненты:**

Оболенский Юрий Геннадьевич, доктор технических наук, профессор, начальник отделения автоматических и дистанционных систем управления Инженерного центра «ОКБ им. А.И. Микояна»

Воробьев Алексей Геннадиевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Ракетные двигатели» ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ)

**Ведущая организация:**

ОАО «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко»

Защита диссертации состоится 14 мая 2012 г. в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного Совета Д212.125.11 в ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАИ.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью организации, просьба направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

Автореферат разослан « \_\_\_ » апреля 2012 г.

**Учёный секретарь**  
**диссертационного совета,**  
**канд. техн. наук, доцент**



**Ю.В. Горбачёв**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В минувшие десятилетия ведущими отечественными организациями, специализирующимися на создании ракетно-космической техники, создан ряд жидкостных ракетных двигателей малой тяги (ЖРД МТ), используемых в качестве исполнительных органов реактивной системы управления космических аппаратов относительно центра масс или в качестве автономных вспомогательных двигателей для маневрирования, ускорения или торможения космического аппарата. Создание такого класса двигателей было бы невозможным без новейших достижений науки и техники, которые, в свою очередь, стимулируются высокими требованиями, предъявляемыми к функционированию и ресурсу ЖРД МТ. Важную роль в обеспечении этих требований занимает проведение многочисленных огневых испытаний экспериментального ЖРД МТ с помощью автоматизированной информационно-измерительной и управляющей системы (ИИиУС). ИИиУС представляет собой совокупность средств измерений, объединённых общим алгоритмом функционирования и предназначенных для автоматического получения информации от двигателя и подсистем испытательного комплекса, её преобразования для непосредственного восприятия человеком, использования для управления режимами работы двигателя, а также для передачи, обработки и представления измерительной информации в требуемой форме.

Основными направлениями совершенствования ИИиУС в настоящее время являются модернизация структуры и разработка новых алгоритмов и методик обработки данных, применение которых непосредственно ведёт к снижению материальных и временных затрат на проведение испытаний двигателя.

Самыми дорогостоящими и опасными как на этапе проектирования, так и на этапе отработки ЖРД МТ, являются огневые испытания.

Многочисленные, чрезвычайно затратные, аварийные исходы огневых испытаний, сопровождающиеся разрушением материальной части двигателей и огневых стендов, диктуют необходимость анализа измеряемых параметров двигателя и стенда, регистрируемых на различных носителях. Определение причин развития нештатных ситуаций во всех случаях завершается разработкой и реализацией мероприятий, предотвращающих повторение аварийного исхода, с практически незамедлительным подтверждением их эффективности или ошибочности при очередном пуске. Поэтому крайне важно своевременно вычислить неисправность и место её возникновения в системе. Для этого существуют различные методы функциональной диагностики, которые позволяют производить оценку состояния технических систем как по результатам натурных испытаний, так и в процессе их функционирования. Однако, до сих пор нет достаточно эффективных систем, которые позволяют определять слабо выраженные неисправности в ходе самих испытаний для предотвращения разрушения материальной части двигателя и огневого стенда.

Система диагностики неисправных состояний, включённая в состав автоматизированной ИИиУС, может стать эффективной в том случае, если она в мельчайших

особенностях настроена на исследуемый двигатель, его конструктивные, статические и динамические характеристики.

Работы в области разработки алгоритмов и методик диагностики неисправных состояний ЖРД ведутся как в России, так и за рубежом. Известны теоретические и практические результаты, полученные Гликманом Б.Ф., Коломенцевым А.И., Лихачёвым В.Я., Мартиросовым Д.С., Rodney A. Martin, Mark A. Schwabacher. Однако, одной из актуальных и нерешённых на сегодняшний день задач остаётся предотвращение разрушения материальной части двигателя и огневого стенда за счёт применения автоматизированной ИИиУС с возможностью диагностики неисправных состояний на непрерывном режиме работы ЖРД МТ. Диагностика неисправных состояний на непрерывном режиме работы ЖРД МТ очень важна, так как только она позволяет определять слабо выраженные неисправности при проведении огневых испытаний ЖРД МТ. Системы, предназначенные для диагностики быстро развивающихся неисправностей, решить данную задачу не могут.

**Цель диссертационной работы** – предотвращение разрушения материальной части двигателя и огневого стенда при проведении огневых испытаний ЖРД МТ за счёт создания автоматизированной ИИиУС с возможностью диагностики слабо выраженных неисправностей на непрерывном режиме работы ЖРД МТ.

**Объектом исследования** в данной работе является автоматизированная ИИиУС огневых испытаний ЖРД МТ.

**Предмет исследования** – программно-алгоритмическое обеспечение автоматизированной ИИиУС огневых испытаний ЖРД МТ для диагностики возникших неисправных состояний.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решены следующие **научно-технические задачи**:

- разработана комплексная диагностическая модель описания неисправных состояний, возникающих в ходе проведения огневых испытаний ЖРД МТ, на основе модели работы двигателя и моделей учитываемых ИИиУС неисправностей;

- разработана структура автоматизированной ИИиУС огневых испытаний ЖРД МТ с возможностью аварийного останова двигателя и диагностики неисправных состояний;

- разработана структура подсистемы диагностики неисправных состояний автоматизированной ИИиУС огневых испытаний ЖРД МТ, которая позволяет распознавать возникшие неисправности на непрерывном режиме работы ЖРД МТ;

- разработано программно-алгоритмическое обеспечение автоматизированной ИИиУС огневых испытаний ЖРД МТ, позволяющее определять слабо выраженные неисправности в ходе самих испытаний для предотвращения разрушения материальной части двигателя и огневого стенда;

- разработана методика диагностики возникшего неисправного состояния на базе программно-алгоритмического обеспечения автоматизированной ИИиУС огневых испытаний ЖРД МТ с применением предварительного моделирования возможных неисправностей, позволяющая опознавать неисправные состояния на непрерывном режиме работы ЖРД МТ;

– полученные результаты подтверждены на основе натуральных экспериментов.

**Методы исследования**, применённые в работе, базируются на теории измерений, измерительных преобразователей и информационно-измерительных систем, теории функциональной диагностики, методах математического и имитационного моделирования сложных систем, методах экспериментальных исследований, методах стендовых и натуральных испытаний.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

– разработана комплексная диагностическая модель работы ЖРД МТ, предназначенная для воспроизведения номинального и неисправного режима работы и позволяющая определять состав диагностических признаков, необходимый для выявления слабо выраженных неисправностей;

– разработана структура автоматизированной ИИиУС огневых испытаний ЖРД МТ с возможностью контроля значений измеряемых параметров и подсистемы диагностики неисправных состояний, которая в отличие от существующих систем позволяет осуществлять опознание слабо выраженных неисправностей на непрерывном режиме работы ЖРД МТ;

– разработан алгоритм образования классов на основе комплексной диагностической модели и диагностики неисправных состояний, позволяющий выявить отказы измерителей по результатам проведения огневых испытаний на непрерывном режиме работы ЖРД МТ (в том числе и при слабо выраженных неисправностях);

– разработана методика диагностики неисправных состояний на непрерывном режиме работы ЖРД МТ (в том числе и при слабо выраженных неисправностях), реализующая алгоритмы образования классов неисправных состояний и диагностики неисправных состояний для случая отказов измерителей, применимая для реализации в автоматизированной ИИиУС огневых испытаний ЖРД МТ.

**Научные результаты**, выносимые на защиту:

– комплексная диагностическая модель работы ЖРД МТ, предназначенная для воспроизведения номинального и неисправного режима работы и позволяющая определять состав диагностических признаков;

– структура автоматизированной ИИиУС огневых испытаний ЖРД МТ с возможностью контроля значений измеряемых параметров и подсистемы диагностики неисправных состояний на основе методов функциональной диагностики неисправных состояний на непрерывном режиме работы ЖРД МТ для распознавания слабо выраженных неисправностей;

– новое алгоритмическое обеспечение, базирующееся на модификации методов функциональной диагностики и вторичных признаков и позволяющее проводить эффективную диагностику неисправных состояний по результатам проведения огневых испытаний экспериментального ЖРД МТ;

– новая методика диагностики неисправных состояний, позволяющая, в отличие от существующих, выявлять на непрерывном режиме работы экспериментального ЖРД МТ в ходе проведения огневых испытаний слабо выраженные неисправ-

ности на основе разработанного алгоритмического обеспечения и тем самым предотвращать разрушение материальной части двигателя.

**Практическая значимость** полученных в диссертационной работе результатов состоит в:

– создании программного обеспечения, реализующего полученные научные результаты и позволяющего проводить диагностику неисправных состояний на непрерывном режиме работы ЖРД МТ;

– использовании автоматизированной ИИиУС огневых испытаний ЖРД МТ с возможностью диагностики неисправных состояний на непрерывном режиме работы ЖРД МТ, позволяющей снизить количество огневых испытаний, повысить их эффективность, а также снизить материальные затраты на разработку и доводку экспериментального ЖРД МТ.

**Внедрение и реализация.** Основные результаты диссертационной работы внедрены при выполнении научно-исследовательских работ в научной лаборатории «Жидкостные ракетные двигатели малых тяг» факультета №2 «Двигатели летательных аппаратов» МАИ и в учебный процесс кафедры 303 «Приборы и измерительно-вычислительные комплексы» МАИ, что подтверждается соответствующими актами о внедрении.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается корректным применением математических методов и экспериментальной проверкой полученных результатов на разработанной автоматизированной ИИиУС огневых испытаний ЖРД МТ.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы представлены и обсуждены на VII международном научно-техническом семинаре «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации» (Украина, г. Алушта, 2007 г.), V и VII межрегиональных научно-практических конференциях студентов и аспирантов «Инновационные технологии в экономике, информатике и медицине» (г. Пенза, 2008, 2010 гг.), Всероссийской конференции молодых ученых и студентов «Информационные технологии в авиационной и космической технике-2008» (г. Москва, 2008 г.), XXXIV и XXXV Международных молодежных научных конференциях «Гагаринские Чтения» (г. Москва, 2008, 2009 гг.), Всероссийской олимпиаде студентов «Авиация и авиационная техника» (г. Москва, 2010 г.), Научно-практической конференции студентов и молодых учёных МАИ «Инновации в авиации и космонавтике – 2010» (г. Москва, 2010 г.).

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы полностью отражены в 6-ти статьях (две из которых – в рецензируемых журналах), 5-ти трудах и тезисах докладов международных, всероссийских и межрегиональных конференций и семинаров, а также зарегистрированы в государственном Реестре программ для ЭВМ.

**Структура и объём диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованных источников и одного приложения. Общий объём работы составляет 169 страниц, включая 55 рисунков и 17 таблиц. Список использованных источников содержит 106 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** даётся общая характеристика работы, обоснована её актуальность, сформулированы основная цель и вытекающие из неё задачи исследования, указаны объект, предмет и методы исследования, отражены научная новизна и практическая значимость диссертационной работы. Кратко излагается содержание работы по главам.

**Первая глава** диссертационной работы посвящена анализу современных автоматизированных ИИиУС огневых испытаний ЖРД МТ и методов диагностики неисправных состояний. Рассмотрены особенности огневых испытаний ЖРД МТ, выделены основные достоинства и недостатки существующих на сегодняшний день автоматизированных ИИиУС огневых испытаний ЖРД МТ, проведён анализ существующих методов функциональной диагностики и возможности их применения.

Огневые испытания ракетных двигателей (в том числе и ЖРД МТ) обладают тремя главными особенностями, связанными как со спецификой процессов, происходящих в этих двигателях, так и с условиями их эксплуатации: кратковременностью, повышенной опасностью и высокой стоимостью.

В связи с этим возникают требования высокой информативности испытаний и рационального их планирования, позволяющие получить полные данные о двигателе за кратчайшее время с помощью специализированного программно-аппаратного комплекса огневых испытаний на базе автоматизированной ИИиУС.

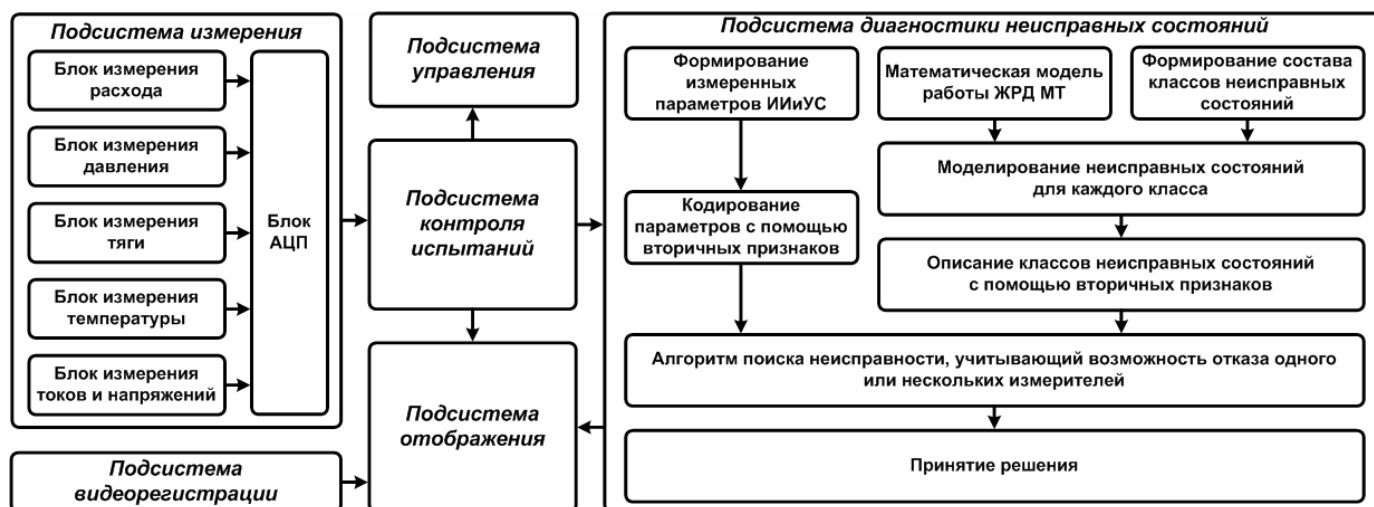
Существующие на сегодняшний день автоматизированные ИИиУС огневых испытаний ЖРД МТ, обладают одним общим недостатком – отсутствием системы диагностики неисправных состояний, применение которой существенно снижает материальные и временные затраты на отработку и исследование экспериментального ЖРД МТ за счёт выявления слабо выраженных неисправностей и предотвращения разрушения материальной части двигателя и огневого стенда. Система диагностики неисправных состояний строится на основе методов функциональной диагностики.

На основе проведённого анализа для распознавания возникшей неисправности с использованием автоматизированной ИИиУС в диссертации выбран метод с использованием предварительного моделирования неисправностей, основанный на использовании кодов-признаков. При этом неисправные состояния требуется описывать с применением качественных признаков, образующихся кодированием измеренных сигналов, а возникшую неисправность относить к одному из возможных классов неисправных состояний. Сформулированы основные требования к автоматизированной ИИиУС огневых испытаний ЖРД МТ и определены её функциональные характеристики.

Во **второй главе** диссертационной работы поставлена задача создания ИИиУС с подсистемой диагностики неисправных состояний, которая в отличие от существующих систем позволяет осуществлять опознание слабо выраженных неисправностей на непрерывном режиме работы ЖРД МТ, и разработана её структура.

Автоматизированная ИИиУС выполняет функции формирования и выдачи

управляющих воздействий, измерения контролируемых параметров, а также общего управления процессом проведения испытаний. В состав разработанной автоматизированной ИИиУС входят подсистемы измерения, управления, контроля испытаний, отображения, видеорегистрации, диагностики неисправных состояний (рис. 1).



**Рис. 1.** Структурная схема автоматизированной ИИиУС  
огневых испытаний ЖРД МТ

В результате аварийного воздействия, которое приводит к физическим неисправностям двигателя, на нём появляются первичные признаки неисправностей. Первичные признаки отражают либо физические изменения характеристик агрегатов, либо изменение внешних факторов. Величина первичной неисправности  $x_k$  показывает, во сколько или на сколько изменилась характеристика агрегата по отношению к её номинальному значению.

Каждому сочетанию первичных признаков соответствуют определенные значения измеренных сигналов  $y_i^{(m)}, m=1,2,\dots,M$  на выходе автоматизированной ИИиУС огневых испытаний ЖРД МТ. Данные сигналы используются в качестве исходной информации для диагностики состояния двигателя.

Особенности сигналов, позволяющие различать неисправности, – это вторичные признаки. Они образуются кодированием измеренных сигналов по некоторому правилу. Именно эти признаки и используются при решении задачи функциональной диагностики. Все возможные неисправные состояния объединяются в конечное число классов, и задача диагностики зафиксированного на двигателе неисправного состояния состоит в отнесении этого состояния к одному из заранее установленных классов  $D_i, i=1,2,\dots,N$ .

Для описания классов неисправных состояний разработана комплексная диагностическая модель работы ЖРД МТ, которая служит как для воспроизведения работы двигателя на номинальном режиме, так и для воспроизведения неисправных состояний, возникающих в ходе проведения огневых испытаний (рис. 2).

Сформировано правило и разработан алгоритм образования классов неисправных состояний, основанный на моделировании возможных неисправностей с помощью комплексной модели, а также разработан алгоритм диагностики неисправных состояний, позволяющий выявить отказы измерителей по результатам



проведения огневых испытаний. На их основе разработана методика диагностики неисправных состояний на непрерывном режиме работы ЖРД МТ для реализации её в подсистеме диагностики неисправных состояний, входящей в состав автоматизированной ИИиУС.

Классы неисправных состояний формируются по следующему алгоритму. Исходя из анализа диагностических признаков, выбираются параметры  $y_i^{(m)}$  для описания классов неисправных состояний и определяются пределы их допустимых значений  $y_{i\max}^{(m)}, y_{i\min}^{(m)}$  при номинальном режиме работы ЖРД МТ.



Рис. 2. Комплексная диагностическая модель работы ЖРД МТ

Для каждого класса неисправных состояний  $D_i$  строятся функции  $y_i^{(m)} = f(x_k)$  на основе разработанной комплексной модели. Неисправные состояния класса  $D_i$  воспроизводятся с шагом изменения величины первичной неисправности  $\Delta x = x_1 - x_0 = \dots = x_k - x_{k-1}$ . На рис. 3 приведён пример зависимостей выбранных параметров  $y_i^{(m)}$  от значений величин неисправностей на диапазоне изменения первичного признака  $[x_0, x_7]$ .

Для образования конкретного класса неисправных состояний определяются точки пересечения  $x^*$  графиков функций  $y_i^{(m)} = f(x_k)$  с пределами допустимых значений  $y_{i\max}^{(m)}, y_{i\min}^{(m)}$ . На рис. 4 приведён пример образования класса неисправных состояний.

Формирование вторичных признаков  $p_{i,s}^{(m)}, s = 1, 2, \dots, (S - 1)$  ( $S$  – число точек пересечения) на соответствующих диапазонах изменения первичных признаков осуществляется **по правилу**:

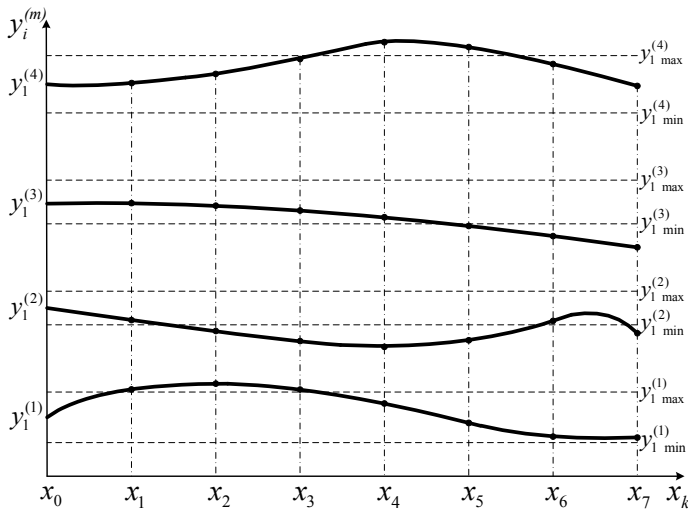
$$p_{i,s}^{(m)} = \begin{cases} 1, & y_i^{(m)}(x_s) > y_{i\max}^{(m)}; \\ 0, & y_{i\max}^{(m)} \geq y_i^{(m)}(x_s) \geq y_{i\min}^{(m)}; \\ -1, & y_i^{(m)}(x_s) < y_{i\min}^{(m)}, \end{cases}$$

где  $y_i^{(m)}(x_s)$  – значение сигнала  $y_i^{(m)}$  в конкретной точке  $x_s$ .

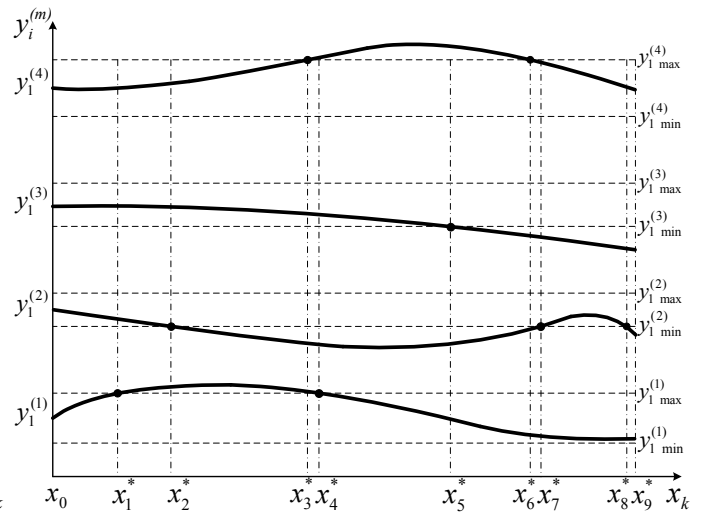
На основе полученных вторичных признаков  $p_{i,s}^{(m)}$  для каждого класса  $D_i$  формируется таблица предварительного описания классов. Окончательная таблица

описания классов неисправных состояний состоит только из уникальных вторичных признаков (все повторяющиеся вторичные признаки объединяются в один).

Предложенный алгоритм позволяет достаточно полно описать возможные классы и подклассы неисправных состояний при огневых испытаниях ЖРД МТ.



**Рис. 3.** Пример зависимостей выбранных параметров  $y_i^{(m)}$  от величин первичных неисправностей  $x_k$



**Рис. 4.** Пример образования класса неисправных состояний

Методика диагностики неисправных состояний с использованием этого алгоритма состоит в следующем. Допустим, в случае появления нештатной ситуации в ходе проведения огневых испытаний ЖРД МТ на непрерывном режиме его работы, необходимо распознать предъявленное к опознанию неисправное состояние  $d$ , описываемое вторичным признаком  $P = (P^{(1)}, P^{(2)}, \dots, P^{(M)})$ . При работе методики в реальных условиях могут возникнуть следующие ситуации.

*Ситуация 1.* Если возникшая на двигателе неисправность  $d$  принадлежит одному подклассу  $D_{i,s}$  класса  $D_i$ , то решение записывается в виде:

$$d \in D_{i,s}, \text{ если } P \in \{p_{1,1}, \dots, p_{N,(T-1)}\}. \quad (1)$$

Если в результате выполнения процедуры опознавания состояние  $d$  отнесено к конкретному классу  $d \in D_{i,s}$ , то результат следует считать окончательным и достоверным.

*Ситуация 2.* Предъявленное к опознанию неисправное состояние отнесено не к конкретному классу, а к некоторому подмножеству классов. Данное подмножество содержит помимо остальных и тот класс, к которому в действительности принадлежит состояние  $d$ . Тогда решение записывается в виде:

$$d \in D_{l,s}, \text{ если } P \in \{p_{1,1}, \dots, p_{N,(T-1)}\}, \quad (2)$$

где  $D_{l,s}$  – подмножество классов неисправных состояний, к которому отнесено состояние  $d$ ;  $l$  – обозначение класса,  $l = 1, 2, \dots, L$ ;  $L$  – число классов в  $D_{l,s}$ .

*Ситуация 3.* При попытке идентификации неисправного состояния  $d$  не формируются результаты (1) или (2). Тогда результатом является:

$$P \notin \{p_{1,1}, \dots, p_{N,(T-1)}\}. \quad (3)$$

Результат (3) возможен в следующих случаях:

– множество классов  $D_i$  неполное и описание множества классов не содержит эталонные образы одного или нескольких классов, к которому в действительности и принадлежит  $P = (P^{(1)}, P^{(2)}, \dots, P^{(M)})$ ;

– произошёл отказ одного или нескольких измерителей.

Первый случай исключим, так как он относится к неотлаженной системе поиска неисправных состояний. Вероятность второго случая весьма велика, так как вероятность отказа современных измерителей на порядок больше вероятности отказа двигателя, поэтому результат (3) связан с отказом одного или нескольких измерителей.

Алгоритм диагностики неисправных состояний, позволяющий выявить отказы измерителей для ситуации, соответствующей (3), состоит в следующем. Выдвигается предположение о неисправности измерителя, по показаниям которого формируется первый элемент  $P^{(1)}$ . Из таблицы классов неисправных состояний удаляется первый столбец, а из признака  $P$  – первый элемент. В результате формируется новый признак  $P_1 = (P^{(2)}, P^{(3)}, \dots, P^{(M)})$ . Сформированный признак  $P_1$  последовательно сравнивается с описаниями подклассов изменённой таблицы классов неисправных состояний.

Если при сравнении  $P_1$  с описанием классов изменённой таблицы идентифицирован результат (3), то принимается решение об исправности измерителя, формирующего код  $P^{(1)}$ . Удалённый столбец таблицы неисправных состояний и элемент  $P^{(1)}$  восстанавливаются.

Алгоритм работает до тех пор, пока сформированный признак  $P_e$  ( $e$  – номер удалённого элемента) не будет идентифицирован с определенным подклассом.

Если при удалении измерителя, формирующего код  $P^{(m)}$ , формируется решение (1) или (2) и  $P^{(m)}$  в описании не последний, то алгоритм продолжает работу до тех пор, пока не будет проверен случай удаления элемента  $P^{(M)}$ .

Если при последовательном удалении столбцов из таблицы классов неисправных состояний не обнаруживается решение (1) или (2), следует приступить к попарному удалению столбцов и поиску для каждого случая решения (1) или (2).

Решение является окончательным, если найден единственный элемент, удаление которого позволяет идентифицировать признак  $P$  в соответствии с (1) или (2). Измеритель, соответствующий удалённому элементу, является неисправным. Также возможен случай, когда найдены два и более элемента, при удалении каждого из которых признак  $P$  идентифицируется с одним из подклассов таблицы классов неисправных состояний. Окончательным решением является подмножество полученных подклассов, а несколько удалённых элементов соответствуют нескольким неисправным измерителям.

В **третьей главе** диссертации разработано программно-алгоритмическое обеспечение, реализованное в составе автоматизированной ИИиУС огневых испытаний ЖРД МТ. Обобщённая блок-схема алгоритма диагностики неисправных состояний, основанного на разработанных во второй главе алгоритмах, представлена на рис. 5.

Разработанные алгоритмы реализованы в форме программного обеспечения (ПО) «Модуль диагностики неисправных состояний для испытаний ЖРД МТ», примеры главного окна и окна с выводом окончательной таблицы классов неисправных состояний представлены на рис. 6.

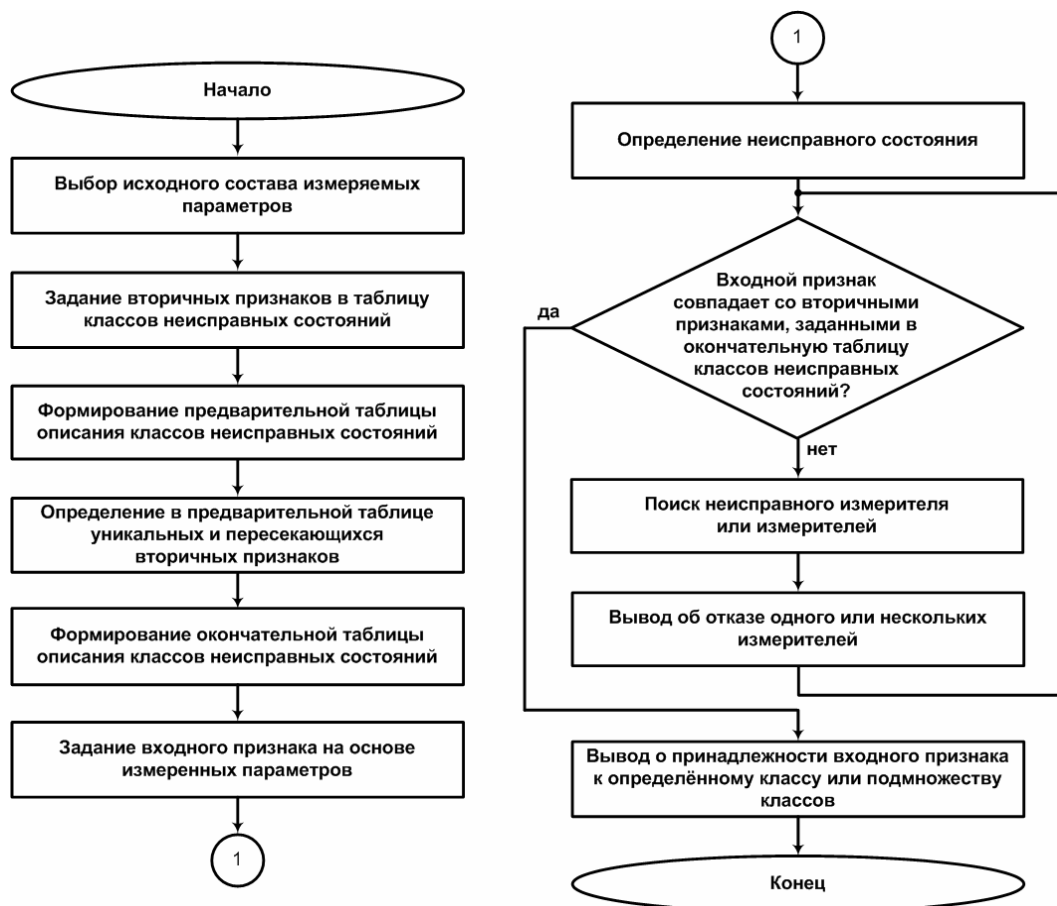


Рис. 5. Обобщённая блок-схема алгоритма диагностики неисправных состояний

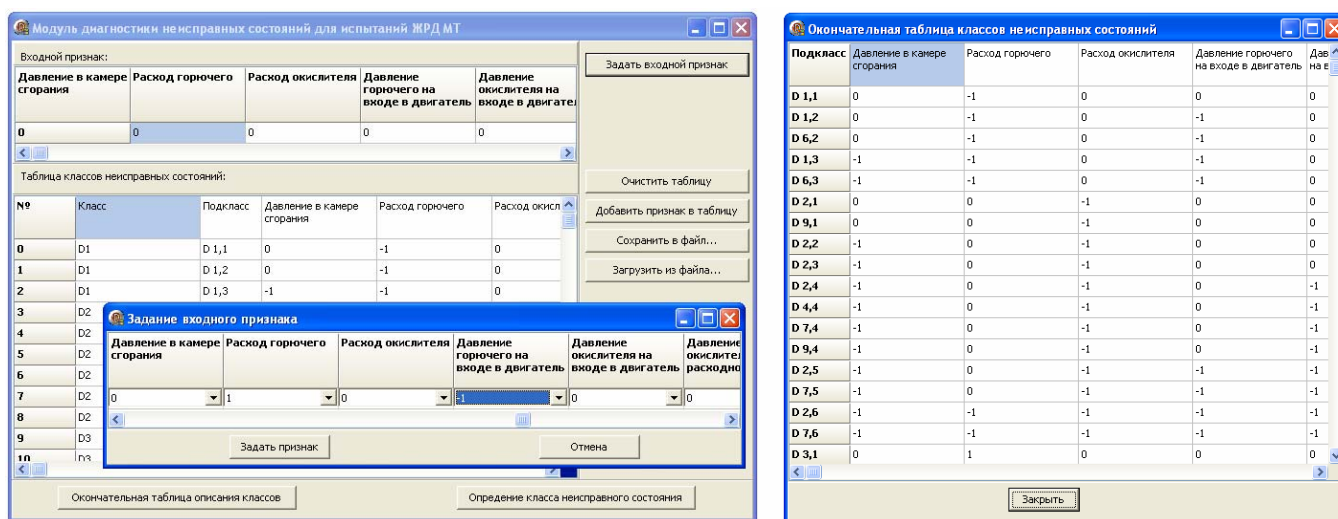


Рис. 6. ПО «Модуль диагностики неисправных состояний для испытаний ЖРД МТ»

ПО «Модуль диагностики неисправных состояний для испытаний ЖРД МТ» реализует созданные алгоритмы и позволяет обнаруживать в описании классов заданное для опознания неисправное состояние и принимать решение о принадлежности этого состояния к тому или иному классу, либо выявлять отказы измерителей. ПО разработано на языке программирования *Delphi* из пакета *Embarcadero RAD Studio XE* и зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2011618958 от 16.11.2011).

В четвёртой главе диссертации представлены:

– результаты тестирования разработанного программно-алгоритмического обеспечения;

– программно-аппаратный комплекс для обработки и исследований экспериментальных ЖРД МТ на экологически чистых компонентах топлива для реализации разработанных алгоритмов;

– результаты натурных испытаний опытного образца ДМТ МАИ-500;

– оценка материальных затрат на проведение огневых испытаний для обработки экспериментального ЖРД МТ.

Проведено тестирование разработанного программно-алгоритмического обеспечения, включающее 400 экспериментов, в ходе которого задавались для распознавания различные входные признаки, описывающие слабо выраженные неисправности. Тестирование полностью подтвердило его работоспособность и корректность диагностики неисправных состояний.

С помощью программно-аппаратного комплекса для обработки и исследований перспективных ЖРД МТ на экологически чистых компонентах топлива в научной лаборатории «Жидкостные ракетные двигатели малых тяг» факультета №2 «Двигатели летательных аппаратов» МАИ проведены испытания опытных образцов двигателей ДМТ МАИ-200 (работающих на керосине и кислороде), ДМТ МАИ-200-1П, ДМТ МАИ-500 (работающих на высококонцентрированной перекиси водорода (ВПВ) и керосине). Огневые испытания двигателей проводились в четыре этапа: настроечные испытания, испытания по «квадрату», ресурсные испытания и демонстрационные испытания. Эти испытания подтвердили возможность обнаружения слабо выраженных неисправностей в ходе самих испытаний. Так, при проведении серии из 17-ти ресурсных испытаний экспериментального двигателя ДМТ МАИ-500 выявлены две неисправности, при которых были произведены своевременные остановки двигателя, предотвратившие разрушения материальной части двигателя и огневого стенда.

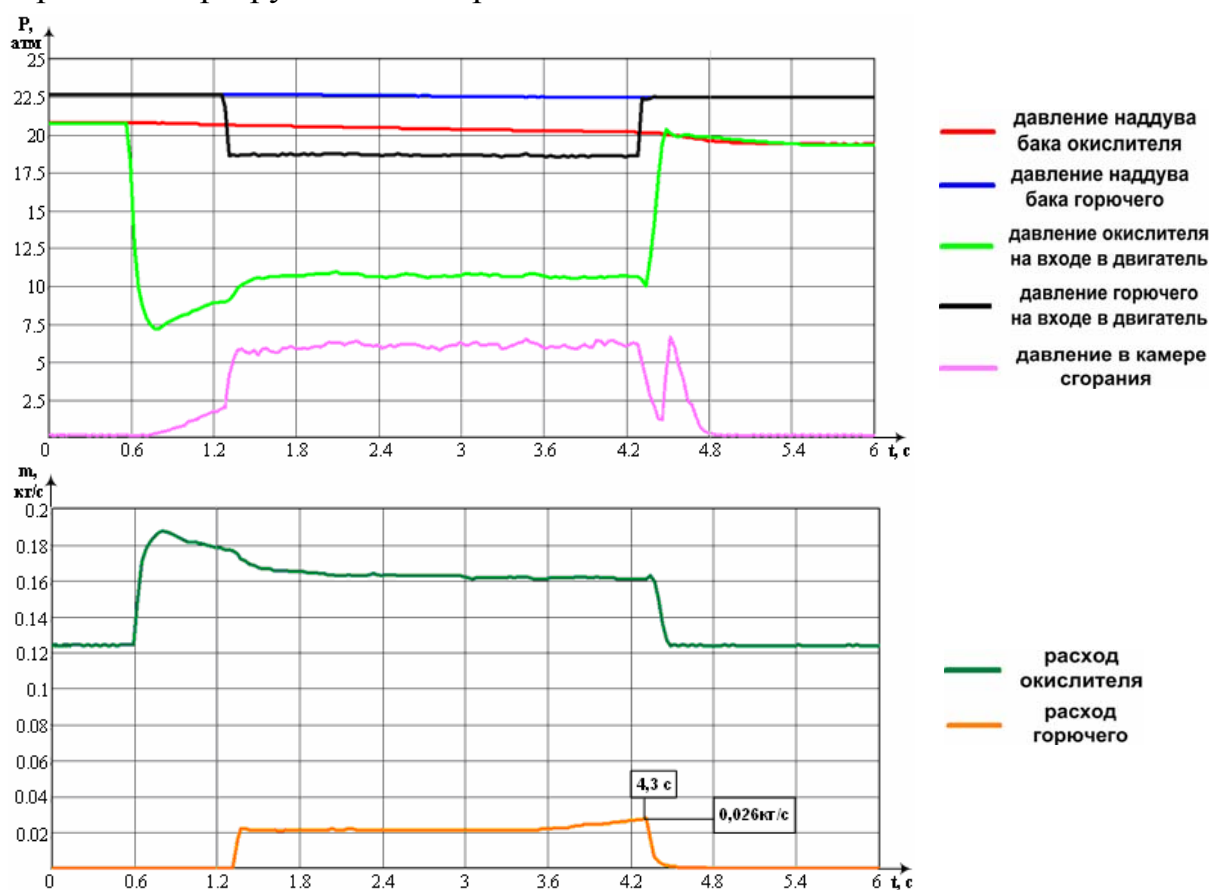


Рис. 7. Результаты испытаний опытного образца ДМТ МАИ-500

На рис. 7 в качестве примера представлены графики изменения давлений и расходов компонентов топлива во времени. Автоматизированная ИИиУС выявила, что расход горючего превысил допустимый предел ( $m=0,026$  кг/с в момент времени  $t=4,3$  с). Подсистеме диагностики неисправных состояний были заданы соответствующие входные значения по полученным измеренным параметрам. В результате опознания неисправного состояния выявлена утечка горючего на участке магистрали горючего «клапан – форсунки камеры сгорания». При визуальном осмотре ДМТ МАИ-500 и испытательного стенда обнаружена эта неисправность.

Подсистема диагностики, входящая в состав автоматизированной ИИиУС, принимала верные решения в ходе проведения ресурсных испытаний, что подтвердило адекватность и работоспособность разработанной методики диагностики неисправных состояний. Её применение позволило снизить материальные затраты на проведение огневых испытаний в 1,3 – 1,4 раза.

В **приложении** к диссертации проведён поверочный расчёт подтвердивший экономию при отработке экспериментального ЖРД МТ ДМТ МАИ-500.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

В диссертационной работе получены следующие основные выводы и результаты.

1. Поставлена и решена задача предотвращения разрушения материальной части двигателя и огневого стенда при проведении огневых испытаний ЖРД МТ за счёт создания автоматизированной ИИиУС с возможностью диагностики слабо выраженных неисправностей на непрерывном режиме работы ЖРД МТ.

2. Разработана комплексная диагностическая модель работы ЖРД МТ, предназначенная для воспроизведения номинального и неисправного режима работы и позволяющая определять состав диагностических признаков, необходимый для выявления слабо выраженных неисправностей.

3. Разработана структура автоматизированной ИИиУС огневых испытаний ЖРД МТ с возможностью контроля значений измеряемых параметров и подсистемы диагностики неисправных состояний, которая в отличие от существующих систем позволяет осуществлять опознание слабо выраженных неисправностей на непрерывном режиме работы ЖРД МТ.

4. Разработаны алгоритмы диагностики неисправных состояний, базирующиеся на модификации методов функциональной диагностики и вторичных признаков и позволяющие проводить эффективную диагностику неисправных состояний по результатам проведения огневых испытаний экспериментальных ЖРД МТ. Алгоритмы реализованы в форме ПО «Модуль диагностики неисправных состояний для испытаний ЖРД МТ», зарегистрированного в Реестре программ для ЭВМ (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2011618958 от 16.11.2011).

5. Разработана методика диагностики неисправных состояний, позволяющая для непрерывного режима работы экспериментальных ЖРД МТ в ходе огневых

испытаний выявлять на основе разработанного алгоритмического обеспечения слабо выраженные неисправности и тем самым предотвращать разрушение материальной части двигателя и огневого стенда.

6. Проведено тестирование разработанного ПО, включавшее 400 экспериментов, которые полностью подтвердили его работоспособность по диагностике слабо выраженных неисправных состояний на непрерывном режиме работы ЖРД МТ.

7. Проведена серия из 17-ти ресурсных испытаний для исследования экспериментального двигателя ДМТ МАИ-500, в ходе которых было выявлено два случая возникновения слабо выраженных неисправностей. Разработанная подсистема диагностики неисправных состояний на непрерывном режиме работы ЖРД МТ успешно их опознала, и удалось избежать разрушения материальной части двигателя.

8. С использованием разработанной автоматизированной ИИиУС, входящей в состав программно-аппаратного комплекса огневых испытаний ЖРД МТ, проведены испытания опытных образцов двигателей ДМТ МАИ-200, ДМТ МАИ-200-1П, ДМТ МАИ-500. Применение разработанной автоматизированной ИИиУС с возможностью диагностики неисправных состояний на непрерывном режиме работы ЖРД МТ в составе программно-аппаратного комплекса позволило снизить материальные затраты в 1,3 – 1,4 раза на проведение огневых испытаний при их отработке.

9. Результаты диссертационной работы внедрены в научно-исследовательскую работу научной лаборатории «Жидкостные ракетные двигатели малых тяг» факультета №2 «Двигатели летательных аппаратов» и использованы в учебном процессе кафедры 303 «Приборы и измерительно-вычислительные комплексы» МАИ, что подтверждается соответствующими актами.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *В рецензируемых журналах и изданиях*

**1. Неретин Е.С., Чубаров О.Ю.** Информационно-измерительная и управляющая система огневых испытаний жидкостных ракетных двигателей малой тяги // Труды МАИ. – Выпуск №41. – 2010. (Идентификационный номер НТЦ «Информрегистр» 0421000009\0126). – Режим доступа: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=23806> – 30.03.2012.

**2. Чубаров О.Ю.** Методика и программно-алгоритмическое обеспечение системы огневых испытаний жидкостных ракетных двигателей малой тяги // Вестник МАИ. – 2012. – т. 19, №1. – с. 115–122.

### *В других изданиях*

**3. Баланин Д.А., Донцов С.И., Корнеев А.К., Неретин Е.С., Фокин Е.А., Чубаров О.Ю.** Разработка архитектуры, аппаратного и программно-алгоритмического обеспечения информационной измерительно-управляющей системы испытаний жидкостных ракетных двигателей малой тяги ДМТ МАИ-200 и ДМТ МАИ-500 // Инновационные технологии в экономике, информатике и медицине. VII Межрегиональная научно-практическая конференция студентов и аспирантов.

Сборник статей. – Пенза: Пензенская государственная технологическая академия, 2010. – с. 111–113.

**4. Князева В.В., Осипов В.Г., Чубаров О.Ю.** Модернизация микропроцессорного измерительно-управляющего блока «МИУБ» на основе возможностей современной элементной базы // Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации: труды XVI Международного научно-технического семинара. Сентябрь 2007 г., Алушта. – Тула.: Изд-во ТулГУ, 2007. – с. 114.

**5. Неретин Е.С., Кирпичёв К.Ю., Чубаров О.Ю.** Система испытания приводов качания жидкостных ракетных двигателей РД-170, РД-171, РД-180, РД-191 // XXXV ГАГАРИНСКИЕ ЧТЕНИЯ. Научные труды Международной молодежной научной конференции. – М.: МАТИ, 2009. Т. 2. – с. 225–226.

**6. Неретин Е.С., Чубаров О.Ю., Баланин Д.А., Фокин Е.А., Донцов С.И.** Автоматизированный стенд огневых испытаний жидкостных ракетных двигателей малой тяги // Научно-практическая конференция студентов и молодых учёных МАИ «Инновации в авиации и космонавтике – 2010». Сборник тезисов докладов. – СПб.: Мастерская печати, 2010. – с. 42.

**7. Неретин Е.С., Чубаров О.Ю.** Информационно-измерительная и управляющая система приводов качания для испытательного стенда жидкостного ракетного двигателя РД-171 // Сборник статей V Межрегиональной научно-практической конференции студентов и аспирантов «Инновационные технологии в экономике, информатике и медицине». – Пенза: ПГТА, 2008. – с. 96–98.

**8. Фокин Е.А., Неретин Е.С., Чубаров О.Ю.** Информационно-измерительная и управляющая система экспериментальной отработки жидкостных ракетных двигателей малой тяги ДМТ МАИ-200 и ДМТ МАИ-500 // Всероссийская олимпиада студентов «Авиация и авиационная техника». – М.: ОАО «Объединенная авиастроительная корпорация», 2010 – с. 475–482.

**9. Чубаров О.Ю.** Аппаратная часть информационно-измерительной и управляющей системы приводов качания для огневых испытаний двигателя РД-171 // Всероссийская конференция молодых ученых и студентов «Информационные технологии в авиационной и космической технике – 2008». Тезисы докладов. – М.: МАИ-ПРИНТ, 2008. – с. 32–33.

**10. Чубаров О.Ю.** Модернизация аппаратной части информационно-измерительной и управляющей системы приводов качания для испытательного стенда ракетного двигателя РД-171 // XXXIV Гагаринские чтения. Научные труды Международной молодежной научной конференции. – М.: МАТИ, 2008. Т. 2. – с. 109–110.

**11. Чубаров О.Ю.** Модуль диагностики неисправных состояний для испытаний жидкостных ракетных двигателей малой тяги. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2011618958. Заявка №2011617162 от 23.09.2011. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 16.11.2011.

**12. Чубаров О.Ю.** Система управления стендом огневых испытаний жидкостных ракетных двигателей малой тяги ДМТ МАИ-200 и ДМТ МАИ-500 // Инновационные технологии в экономике, информатике и медицине. VII Межрегиональная научно-практическая конференция студентов и аспирантов. Сборник статей. – Пенза: Пензенская государственная технологическая академия, 2010. – с. 109–110.



Чубаров Олег Юрьевич  
Исследование и разработка автоматизированной информационно-измерительной  
и управляющей системы огневых испытаний жидкостных ракетных двигателей малой тяги  
с возможностью диагностики неисправных состояний  
Автореф. дисс. на соискание учёной степени кандидата техн. наук.

Подписано в печать 30.03.2012.  
Усл. печ. л. 1,0.  
Тираж 100 экз. Заказ №512/03  
Отпечатано в типографии «Реглет»  
119526, г. Москва, Страстной бульвар, 6/1  
(495) 978-43-34; [www.reglet.ru](http://www.reglet.ru)