

И. А. Кривошеев, В. А. Целищев, А. Б. Бачурин, Е. В. Стрельников

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ КОМБИНИРОВАННОГО РДТТ МНОГОКРАТНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ

Обобщены и систематизированы накопленные на протяжении длительного периода в УГАТУ (УАИ) научно-практические результаты по проектированию РДТТ многократного включения с комбинированной электрогидравлической системой управления модулем тяги посредством управления площадью поверхности горения твердого топлива и площадью критического сечения сопла. *Ракетный двигатель твердого топлива; система управления; поверхность горения; камера сгорания; сопло; рулевая машина; гашение*

С 1967 г. в УАИ развивается научная школа в области управления модулем и вектором тяги РДТТ. Становление и развитие этой школы связано с выдающимся ученым Зайнуллой Гайфуллинным Шайхутдиновым. Под его руководством в институте была создана мощная экспериментальная база, организованы исследования вдува и впрыска в сверхзвуковую часть сопла, различные способы воздействия на поверхность горения, включая гашение и повторный запуск. Особенно активно экспериментальные и теоретические исследования велись в 1970–1990 гг. Целый ряд ученых УГАТУ (УАИ) стали кандидатами и докторами наук в области ракетных двигателей. Интересна предпосылка к проведению исследований. Например, первому из авторов данной статьи при поступлении в аспирантуру профессор З. Г. Шайхутдинов указал, что по гидравлическому методу управления поверхностью горения в РДТТ в зарубежной печати в то время было много открытых публикаций и патентов на эту тему и вдруг их не стало. Поэтому аспиранту ставится задача выяснить: либо этот метод неэффективен, либо эффективен настолько, что работы по нему засекретили. В итоге автору данной статьи удалось экспериментально и теоретически выявить условия реализации и характеристики РДТТ, управляемых гидравлическим и комбинированным способом, разработать математические модели, предложить ряд способов усовершенствования метода и сделать ряд изобретений. В процессе этой работы были получены результаты по гашению заряда, рентгенограммы погашенного заряда, подтверждающие результаты моделирования горения управляемого гидравлическим способом РДТТ. К сожалению, до сих пор не решен вопрос возможно-

сти публикации этих результатов в открытой печати, и они опубликованы автором лишь частично [4–12, 15–25, 27–32]. В тот период было обнаружено, что проводимые автором исследования пересекаются с интересными результатами, полученными в ГОС НИИАС и НИИ Прикладной математики при Томском политехническом институте (теперь университет). Именно это побудило автора перейти в область исследования глубокого регулирования РДТТ с изменением тяги до 50 раз, что, в свою очередь потребовало учета многочисленных и существенных нелинейностей, в том числе учета перехода закона горения (при больших давлениях) в линейный, а затем вновь в нелинейный, но со степенным показателем больше единицы и т. д. Параллельно исследовались сопла с подвижными центральными телами, с подвижной сверхзвуковой частью. Особенно интересные результаты получил И. М. Уракаев по плоскому поворотному соплу с подвижной полуограниченной сверхзвуковой частью, где организуется течение по схеме Прандтля-Майера. Объединение этих результатов позволило разработать твердотопливные установки, управляемые комбинированным способом для различных ЛА – от баллистических ракет до управляемых ПТУРС. В последнем случае предъявлялись особо жесткие требования к динамике систем, использовались проточные газовые усилители с командными механизмами типа «сопло-заслонка». На современном этапе полученный опыт позволил с использованием развиваемой в НИЛ САПР-Д УГАТУ технологии имитационного моделирования САМСТО создать универсальный программный комплекс (DVIGk), позволяющий моделировать одновременно ГТД, ДВС, РДТТ, ЖРД, ПуВРД (пульсирующие ВРД) и их всевозможные комбинации (запуск ВРД крылатой

ракеты от ТТГГ, запуск ТНА ЖРД от ТТГГ и т. д.).

Второму из авторов данной статьи удалось исследовать исполнительные механизмы в системах управления соплами ракет, так называемые рулевые машины – их статику и динамику, особенности их рабочих процессов. Кроме того, используя и обобщая экспериментальные и теоретические результаты предшественников, удалось продолжить анализ статики и динамики РДТТ, управляемых различными способами и их комбинациями, разработать различные САУ ЛА на основе управляемых РДТТ [26, 33–50].

В настоящее время с участием молодых соавторов данной статьи продолжается моделирование рабочих процессов в управляемых РДТТ и их элементах.

Результаты исследований, проводимых в течение многих лет учеными УГАТУ–УАИ, а также анализ отечественных и зарубежных работ позволили сформировать современную методологию создания управляемых РДТТ для различных применений (в качестве маршевых, головных управляющих установок, различной размерности и т. д.).

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ИСПЫТАНИЙ И ДОВОДКИ УПРАВЛЯЕМЫХ РДТТ

Основные направления научных разработок в области ракетных двигателей:

- разработка высокоэффективных и отвечающих остальным (эксплуатационным, стоимостным и др.) требованиям ракетных топлив;
- создание конструкционных материалов, обладающих высокой удельной прочностью и другими необходимыми свойствами;
- создание высокоэффективных теплозащитных материалов;
- разработка теории горения топлив, обеспечение требуемых законов и устойчивости горения;
- разработка теории теплообмена в условиях РДТТ, обеспечение термостойкости конструкций;
- исследование вопросов течения продуктов горения твердых топлив в камере и сопле; разработка методов профилирования сопел;
- разработка теории нестационарных процессов работы РДТТ, обеспечение необходимых режимов воспламенения зарядов и выключения двигателя;

- разработка теории систем управления модулем и вектором тяги РДТТ;

- обеспечение стабильности характеристик двигателей при различных возмущающих воздействиях.

В современной ракетной технике широко используются ракетные двигатели и газогенераторы твердого топлива (РДТТ и ГГТТ), предназначенные для управления движением летательных аппаратов (ЛА), что объясняется простотой их эксплуатации, высокой надежностью и малой стоимостью твердотопливных энергосиловых систем. Дальнейшая конкурентоспособность РДТТ по сравнению с жидкостными ракетными двигателями зависит от того, как удастся решить проблему глубокого управления модулем тяги РДТТ. Надо отметить, что эта комплексная проблема решается разработкой схемных решений, технических и конструкторских элементов двигателя, созданием надежных и дееспособных систем автоматического управления.

В отличие от маршевых ракетных двигателей, сообщающих ЛА определенную кинетическую энергию, двигательные установки (ДУ) управления движением обеспечивают оптимальное распределение импульса тяги по траектории полета, изменение траектории и ориентацию ЛА в пространстве. Для ракетно-космической техники в настоящее время более приоритетными вопросами являются уже не проблемы дальности и максимального удельного импульса, а вопросы точности наведения головных частей, выполнения орбитального маневра. Гарантией требуемой точности является наличие на головной части ракеты корректирующей двигательной установки или нескольких установок, выполняющих различные задачи. Управление головными частями ракет по трем каналам – тангаж, рыскание и крен – требует реализации разных циклограмм тяги, где максимальный и минимальный уровни могут отличаться в 100–150 раз. Обеспечение такого широкого диапазона регулирования в РДТТ, особенно в жестких условиях нисходящей ветви траектории полета, является трудной и нереализуемой еще сегодня задачей. Известный способ управления тягой изменением минимального сечения сопла не позволяет получить регулирование тяги более чем в 3–5 раз.

В нашей стране над этой проблемой работали многие научные и проектно-конструкторские организации. Некоторые результаты исследований обобщены в трудах таких ученых, как

В. М. Бобылев, Б. Т. Ерохин, В. Г. Зезин, А. М. Липанов, В. И. Петренко, В. Л. Попов, В. Ф. Присняков, А. М. Русак, В. И. Феофилактов и др. [1, 2].

Результатом этих работ явилось создание опытных конструкций РДТТ, прошедших стендовую отработку: двигатель с регулируемым минимальным сечением сопла, двигатель раздельного снаряжения, двигатель с тепловым ножом, двигатель с гидравлическим регулированием поверхности горения и др.

В Уфимском авиационном институте в течение ряда лет исследовалась схема регулируемой двигательной установки с управлением поверхностью горения твердого топлива, так называемая гидравлическая схема управления величиной поверхности горения. Особенности процесса освобождения каналов в заряде, предварительно заполненных жидкостью, и процесса горения твердого топлива приводят к образованию конической поверхности горения и изменению местной скорости горения. Практическая реализуемость данного способа впервые подтверждена экспериментально В. М. Бобылевым и др. на модельных стендовых установках. Дальнейшие экспериментальные и теоретические разработки, выполненные в УАИ (УГАТУ), показали ограниченные возможности этого способа регулирования как по глубине изменения тяги, так и по характеристикам переходных процессов.

В проводимых коллективом исследованиях гидравлический способ регулирования модуля тяги получил дальнейшее развитие вследствие оснащения РДТТ специальной системой автоматического управления с двумя подсистемами: подсистемой регулирования давления в камере сгорания изменением минимального сечения сопла и подсистемой управления сливом жидкости из каналов заряда. Эта схема обладает рядом преимуществ перед другими обсуждаемыми техническими решениями: значительной глубиной регулирования, сравнительно простой схемой управления, низкими массогабаритными характеристиками, использованием существующих штатных топлив, высокой надежностью получения требуемой тяги, обеспечиваемой использованием ранее отработанных узлов и схем, удобством эксплуатации.

Совершенствование РДТТ было основано на улучшении энергетических, физико-механических и эксплуатационных характеристик топлив, а также снижении стоимости разработки и изготовления двигателей. Прорывы в области

совершенствования твердых топлив приблизили характеристики их удельного импульса, плотности, механических свойств и скорости горения к теоретически возможным, и поэтому в ближайшем будущем подобных прорывов в улучшении их характеристик не предвидится. Наибольший приоритет при создании новых РДТТ будут иметь поиск новых технических решений и использование перспективных конструктивных материалов.

Одним из таких перспективных технических решений может стать создание РДТТ многократного включения. Использование подобных двигателей будет способствовать увеличению дальности пуска ракет, повышению их скорости и маневренности на конечных участках полета.

ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ К РАЗРАБОТКЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ УПРАВЛЯЕМЫХ РДТТ МНОГОКРАТНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Работа по созданию теории проектирования РДТТ многократного включения с комбинированной электрогидравлической системой управления модулем тяги посредством управления площадью поверхности горения твердого топлива и площадью критического сечения сопла в Уфимском государственном авиационном техническом университете ведется более 25 лет. Изложить все аспекты разрабатываемой теории в рамках данной статьи, включая методы исследования и разрабатываемые новые методики расчета и проектирования, математические модели, ввиду значительного объема накопленного материала не представляется возможным. Ниже приведены некоторые результаты постановки и решения задач проектирования РДТТ с комбинированной системой управления модулем тяги.

Задача разработки системы автоматического управления РДТТ МВ

Особенностями задачи синтеза САУ РДТТ МВ являются специфические требования, свойственные беспилотным летательным аппаратам. При разработке принципиально новой системы регулирования учесть все факторы, влияющие на выбор оптимальной структуры САУ очень сложно из-за недостатка информации.

При формировании структурной схемы САУ в настоящее время аналитически можно определить только пределы точности регулиро-

вания по определенным регулирующим параметрам. Однако такие существенные показатели, как быстродействие, надежность, простота конструкции, массогабаритные характеристики качественному теоретическому анализу в настоящее время не поддаются. Особенно это характерно для регулируемых двигательных установок на твердом топливе, где вопросы оснащения их системами автоматического регулирования весьма сложны из-за слабой изученности самого РДУ как объекта управления.

В данном случае целесообразно идти путем разработки различных вариантов реализации структуры системы регулирования, обеспечивающих требуемое качество переходного процесса объекта регулирования и наибольшие возможности независимости ослабления статической и динамической составляющих ошибок от основных воздействий. Причем на стадии исследовательской работы желательно проработать несколько альтернативных вариантов [3].

Основной регулируемой величиной двигательной установки, выступающей в качестве объекта регулирования, является секундный массовый расход газов через сопло. Регулирующим воздействием является площадь управляемого дросселя в гидравлической системе регулирования площади поверхности регулирования твердого топлива за счет слива жидкости из каналов заряда. Двигательная установка в этом случае представляет собой разомкнутую систему регулирования, и организации обратной связи регулируемой координаты двигателя с регулирующим воздействием не представляется возможной. Поэтому качественно улучшить характеристики регулируемой двигательной установки (РДУ) можно лишь с использованием дополнительных регулирующих воздействий, управляющих дополнительными регулируемыми переменными.

Недостаточные возможности эффективного контроля координат, определяющих работу двигательной установки, ограничивают выбор дополнительных регулируемых переменных. Современные технические средства не позволяют, например, непосредственно измерять в процессе работы двигателя изменение как площади поверхности, так и скорости горения твердого топлива.

В качестве дополнительных регулируемых координат РДУ как объекта управления рекомендуется выбирать давление в камере сгорания и расход жидкости из гидросистемы управления площадью поверхности горения, а в качестве

вспомогательных регулирующих координат двигательной установки многократного включения могут быть скорость горения (охлаждения) твердого топлива и площадь критического сечения сопла.

Анализ динамики с гидрорегулированием площади поверхности горения показывает, что повышение ее быстродействия может быть достигнуто двумя способами:

- увеличением скорости формирования нового угла конуса поверхности горения, соответствующего новому установившемуся режиму;
- повышением запаса устойчивости системы регулирования в целом.

Таким образом, задачи повышения быстродействия и устойчивости тесно связаны между собой, т. е. вопрос повышения качества регулирования РДУ носит комплексный характер.

Для повышения качества переходного процесса в двигательной установке на твердом топливе многократного включения необходимо:

- обеспечить рациональный закон формирования поверхности горения при максимальной скорости ее деформирования;
- устранить возможность перерегулирования величины давления в камере сгорания;
- повысить точность выхода значений регулируемых параметров двигательной установки на установившийся режим.

На этапе выбора структурной схемы системы автоматического управления могут быть предложены различные варианты реализации САУ. Формирование принципиальной схемы выбранной структуры САУ обычно начинают с выбора исполнительных механизмов с учетом располагаемых источников энергии, условий работы, необходимых перестановочных усилий и моментов для перемещения регулирующих органов объекта регулирования.

Можно назвать два направления исследований сверхзвуковых сопел малой тяги для регулируемых твердотопливных установок [1, 4].

1. Экспериментальные и теоретические исследования процессов в сверхзвуковых соплах с центральным телом в качестве регулирующего органа:

- влияние профиля сопла и центрального тела на энергетические и расходные характеристики соплового блока;
- силовые и моментные воздействия на центральное тело и на его привод при перемещениях;

- структура течения в соплах с центральным телом при различных его положениях;
- регулируемые сопла внешнего расширения;
- особенности течения и тяговые характеристики;
- разработка методик расчета моментно-тяговых и расходных характеристик сопла с учетом трения и теплообмена с элементами конструкции и трехмерных эффектов в проточном тракте.

2. Экспериментальные и теоретические исследования оптимальных конструктивных схем сопловых блоков [1, 2, 4]:

- влияние конструкции соплового блока на расходно-тяговые характеристики сопел, входящих в состав блока;
- исследования силовых, моментных и расходных характеристик клапанов-регуляторов расхода различных конструктивных схем;
- разработка методов расчета расходных характеристик регуляторов расхода, силовых и моментных воздействий на привод регулирующего органа;
- выбор конструктивных схем приводов для центрального тела;
- исследование влияния характеристик привода на расходно-тяговые характеристики сопел с центральным телом;
- исследование влияния динамических параметров привода на его массогабаритные характеристики;
- исследование по обеспечению работоспособности привода в связи с его расположением в зонах с повышенным тепловым воздействием продуктов сгорания, истекающих из сопел;
- разработка методов расчета динамических и массогабаритных характеристик приводов;
- разработка математической модели сопловых блоков и регуляторов расхода в составе двигательной установки как составных частей комплексной математической модели ДУ.

На основе исследований рабочих процессов в регулируемом РДТТ предложена система автоматического управления объектом исследования, разработаны основы теории проектирования струйных гидравлических рулевых машин систем управления модулем и вектором тяги

РДТТ с методическим, математическим и компьютерным обеспечением [3].

При поведении исследований сформулированы и обоснованы следующие научные гипотезы:

1. Качественное изменение динамики РДТТ с гидрорегулированием поверхности горения твердого топлива возможно при оснащении ее САУ с двумя подсистемами управления: давлением в камере сгорания и расходом жидкости из каналов в заряде ТТ. Стабилизация давления в камере сгорания на максимально возможном уровне обеспечит максимальную скорость горения, а значит, максимальную скорость перестройки поверхности горения. Обратная связь по расходу в подсистеме управления сливом жидкости уменьшит статическую ошибку РДУ при выходе на установившийся режим. Разработаны новые схемы систем автоматического управления РДТТ (авт. св. № 1338510, № 1376666, № 1316340, № 1383917, № 1434875, № 1447003, № 1440004, № 1511633, № 1416161), разработаны их математические модели, адекватность которых подтверждена экспериментальными исследованиями.

2. Кавитационные процессы в рулевом приводе систем управления модулем и вектором тяги РДТТ комбинированной схемы, а именно, в струйной гидравлической рулевой машине (СГРМ), могут способствовать повышению эффективности его работы. Образование кавитационных зон в струйном гидрораспределителе на периферийных участках входной струи может затруднить истечение обратных струй при возрастании нагрузки. Разработан струйно-кавитационный способ регулирования гидропривода [5], (патент № 2116524), разработана математическая модель структуры кавитационных процессов, статических и динамических характеристик СГРМ, адекватность которых подтверждена экспериментальными исследованиями.

3. Гидродинамические характеристики высокоскоростных струйных элементов определяются не только частными случаями их работы (отсутствие нагрузки или максимальная нагрузка), но и при переменной нагрузке. Известные теоретические предпосылки и методики расчета СГРМ противоречивы, серийно выпускаемые СГРМ обладают непомерно большим разбросом характеристик и основаны на индивидуальной доводке. Разработаны теоретические основы и методология проектирования СГРМ (авт. св. № 1238477, № 1376666, патенты № 2125667,

№ 2116524, № 2131064), адекватность которых подтверждена экспериментальными исследованиями [6, 7].

Научные результаты, определяющие научную новизну:

- новый принцип обеспечения заданных характеристик РДТТ, основанный на оснащении двигательной установки с гидрорегулированием поверхности горения двумя подсистемами регулирования: давления в камере сгорания и расхода жидкости из каналов в заряде твердого топлива;

- результаты исследования влияния исполнительных механизмов и системы управления на характеристики РДТТ при управлении модулем и вектором тяги;

- математическая модель системы автоматического управления РДТТ с гидрорегулированием поверхности горения;

- обобщенная модель однокаскадной струйной гидравлической рулевой машины, учитывающая гидродинамические процессы в высоконапорном струйном гидрораспределителе при работе с изменяющейся нагрузкой;

- новый, струйно-кавитационный, способ регулирования гидропривода, позволяющий приблизить по характеристикам дроссельный способ регулирования к объемному способу, не ухудшая динамических характеристик, технологичность и стоимость изделий;

- новые экспериментальные и практические результаты по РДТТ, оснащенными струйными гидравлическими рулевыми машинами;

- обоснована целесообразность оснащения двигательной установки с гидрорегулированием поверхности горения двумя подсистемами регулирования: давления в камере сгорания и расхода жидкости из каналов в заряде;

- сформирована структура и произведен выбор рациональных значений параметров подсистем системы САУ РДУ, позволяющих сократить время переходного процесса более чем в 6 раз, уменьшить заброс регулируемого параметра также в 6 раз, снизив уровень ошибки на установившемся режиме до 4,5 % и улучшив массогабаритные характеристики ПС РДУ.

Исследование влияния САУ на динамические характеристики РДУ дало возможность установить:

- ошибка САУ на установившемся режиме определяется, прежде всего, статической ошибкой подсистемы регулирования расхода

слива и динамической ошибкой подсистемы регулирования давления;

- работа исполнительного механизма подсистемы регулирования слива зависит от качества переходного процесса подсистемы регулирования давления;

- охват исполнительного механизма подсистемы регулирования давления в камере сгорания обратной связью по положению благоприятно сказывается на точности ПС РР; переход подсистемы регулирования давления в камере сгорания на статический закон управления незначительно влияет на качество переходного процесса САУ РДУ;

- существует диапазон динамических параметров исполнительных механизмов САУ ПС РДУ, обеспечивающий нечувствительность качества переходного процесса одного регулятора от качества работы другого регулятора, т.е. обеспечивается автономность работы подсистем.

Статическая ошибка подсистемы регулирования может быть усреднена введением ПИ-регулятора в прямую цепь его исполнительного механизма, что позволяет уменьшить ошибку регулируемой величины САУ на установившемся режиме.

Задача разработки методики синтеза и анализа параметров исполнительного механизма привода центрального тела сопла РДТТ

Исходя из функций привода как исполнительного элемента системы управления модуля и вектора тяги ДУ и учитывая его непосредственную связь с конструкцией ДУ, можно сформулировать основные требования, предъявляемые к приводу и его элементам [1, 8–10]:

- минимизация массогабаритных характеристик;

- обеспечение требуемых скоростей и ускорений исполнительного органа;

- обеспечение качества регулирования в составе системы управления за счет высоких динамических свойств привода;

- ресурс и надежность привода должны обеспечить все испытания, проверки и функционирование во время полета летательного аппарата;

- минимизация стоимости и технологичность производства.

При выборе быстродействия рулевого привода следует исходить из требований, предъявляемых к нему как элементу системы регулирования модуля или вектора тяги ДУ, в которую он входит как внутренний замкнутый контур. Достаточно точно сформулировать требования к рулевому приводу можно только на основании тщательных исследований динамики и точности всей системы управления ДУ.

Опыт работ в области исполнительных механизмов РДТТ показывает, что наиболее перспективной схемой для исследования является электрогидравлический следящий привод со струйной гидравлической рулевой машиной [8–10].

Применения ЭГСП со струйными гидрораспределителями также требует создания методик расчета, основанных на широких теоретических и экспериментальных исследованиях.

Теоретический анализ подобных приводов затруднен из-за ряда специфических особенностей струйного гидрораспределителя:

- преобразование одного вида энергии в другой;
- наличие полуограниченных стенками потоков рабочей жидкости;
- взаимодействие как сопутствующих, так и встречных струй;
- сложность поля скоростей и давлений в струе;
- различные режимы течения в струйном гидрораспределителе;
- характер взаимодействия отклоняемой струи с обратными струями и с каналами приемной платы.

Экспериментальные исследования высоконапорных струйных гидроусилителей, несмотря на внешнюю простоту струйных элементов, затруднены их малыми размерами и исключительной сложностью явлений в проточной части: наличием эжекции, нескольких типов и форм кавитации и других.

Недостаток информации о закономерностях рабочего процесса и природе явлений в тракте жидкостных струйных элементов и связанные с этим трудности расчета и прогнозирования их выходных характеристик являются основными факторами, сдерживающими более широкое применение струйной техники в приводах и системах управления.

Новыми научными результатами, полученными в работе, являются разработанные методы и средства математического моделирования

СГРМ САУ РДТТ с учетом влияния стохастического характера изменения параметров, направленные на повышение качества проектирования и доводки рулевых приводов с СГУ [5–13]:

- разработаны методологические основы проектирования РП с СГРМ, содержащие методы, методики и соответствующее программное обеспечение, позволяющие повысить эффективность этапов проектирования изделий и сократить время разработки до 30–40 %;
- разработаны новые нелинейные математические модели СГРМ различных схем, в отличие от существующих позволяющие моделировать, исследовать и прогнозировать различные режимы работы СГРМ с возможностью учета технологического разброса параметров гистерезисных явлений, люфтов, трения, гидродинамического воздействия и других нелинейностей, доступных экспериментальному определению;
- разработан метод расчета статических и динамических характеристик одно- и двухкаскадных схем СГРМ;
- разработан и реализован метод идентификации характеристик СГРМ, позволяющий прогнозировать характеристики СГРМ с учетом влияния стохастического характера изменения параметров;
- разработаны новые способы коррекции СГРМ на гидромеханической и электронной элементной базе, выработаны рекомендации по целесообразности применения различных способов коррекции;
- проведена идентификация результатов экспериментальных исследований, проведена верификация результатов численного моделирования и идентификации статических и динамических характеристик.

В математической модели рулевого привода летательного аппарата специального назначения предложено использовать нелинейную модель люфта в механической передаче и эмпирическую модель гистерезиса характеристики управления электромеханического преобразователя, что позволило повысить достоверность результатов численного моделирования.

Решена обратная задача по влиянию нежесткости силовой проводки на изменение гидродинамического момента обратной струи, действующего на струйную трубку, вследствие чего уменьшается зона устойчивости рулевого привода. В результате проведенных исследований

были получены рекомендации по снижению гидродинамического момента обратной струи.

Предложен новый критерий устойчивости рулевого привода летательного аппарата, который был получен при анализе результатов численного моделирования и результатов экспериментальных исследований.

Разработана математическая модель динамики кавитационного пузырька в переменном поле давления высоконапорных струйных гидравлических устройств с чередованием участков стесненного и свободного течения жидкости с учетом влияния сил вязкости, сил поверхностного натяжения, содержания газа в пузырьке, близости границ твердой стенки и переменного поля давления.

Разработана нелинейная математическая модель классической СГРМ с учетом особенности струйно-кавитационных течений, определяющих получение эффекта стабилизации расхода, что позволило разработать нелинейную математическую модель струйно-кавитационной гидравлической рулевой машины (СКГРМ).

Разработаны численные трехмерные модели СКГРМ и устройства-прототипа – струйного стабилизатора расхода в пакете вычислительной гидродинамики Ansys CFX, что позволило качественно и количественно оценить влияние кавитационных процессов на характеристики струйных гидравлических устройств.

На основе численного и физического моделирования разработана методика расчета СКГРМ, в которой были использованы нелинейные уравнения динамики и сохранения, с учетом особенностей протекания кавитационных процессов при стабилизации расхода.

Разработанные методологические основы проектирования РП с СГРМ и программные продукты для их реализации позволяют повысить эффективность этапов проектирования изделий и снизить временные и финансовые затраты на их доводку и имеют практическую ценность, а именно, позволяют:

- определять конструктивные параметры, статические и динамические характеристики СГРМ при моделировании, проектировании и доводке с целью удовлетворения требований к энергетическим характеристикам, к показателям качества переходных процессов;
- рассчитывать статические и динамические характеристики СГРМ с учетом влияния стохастического характера изменения параметров по разным информационным массивам;

- осуществлять комплексные экспериментальные исследования характеристик СГРМ на основе разработанных методик идентификации и верификации;

- совершенствовать процесс доводки параметров и характеристик СГРМ применением устройств коррекции на гидромеханической и электронной элементной базе с использованием современных компьютерных технологий при проектировании серийных изделий.

Задача разработки математической модели комбинированного РДТТ с регулированием площади поверхности горения твердого топлива и площади критического сечения сопла как объекта регулирования

Двигательные установки на твердом топливе специального назначения с глубоким регулированием тяги должны надежно регулировать величину тяги в широком диапазоне (глубина регулирования тяги 50:1 и более).

Наиболее реальной основой для разработки РДУ с глубоким регулированием тяги могут служить схемы с регулируемыми параметрами $F_{кр}$ и S_T . Указанные способы, в конечном счете, различаются принципом регулирования расхода топлива. Так, при регулировании $F_{кр}$ расход топлива меняется за счет изменения скорости горения, которая в свою очередь зависит от давления в камере сгорания. Этим объясняется большая зависимость функции регулирования от чувствительности скорости горения топлива к давлению и температуре топлива. Отсюда вытекают ограничения топлив, пригодных для регулируемых РДУ.

В способе с изменяющейся площадью поверхности горения величина S_T непосредственно определяет расход топлива. Изменение же скорости горения вследствие изменения давления в камере сгорания при $F_{кр} = \text{const}$ лишь увеличивает эффект регулирования тяги. Поэтому зависимость эффективности этого метода от закона горения топлива слабее, а выбор топлив гораздо шире.

Серьезным недостатком способа регулирования $F_{кр}$ является то, что быстрое его изменение, необходимое для улучшения характеристик системы управления, вызывает появление нежелательных пиков тяги, направленных противоположно требуемому командой изменению тяги.

Уравнения динамики камеры сгорания РДТТ описывают изменение основных величин, характеризующих ее работу во времени, т. е. представляют зависимости различных парамет-

ров камеры сгорания на нестационарных режимах работы. Такими величинами являются, прежде всего, давление в камере сгорания, температура продуктов сгорания и др. Для определения закона изменения этих величин во времени на переходных режимах, а также их зависимости от внешних возмущающих воздействий и управляющих факторов, необходимо составить математическую модель камеры сгорания.

Остановимся на выборе математической постановки задач расчета внутрикамерных процессов основного участка работы РДУ. С математической точки зрения наиболее строгим подходом к решению этой задачи является рассмотрение всех существенных процессов (горения топлива, внутрикамерных процессов, газовой динамики, теплообмена в газоведах и т. д.) в нестационарной постановке. Однако из-за больших потребных ресурсов процессорного времени, решение такой задачи на современном этапе практически невозможно. Вместе с тем, различные рабочие процессы, определяющие уровень текущих расходно-тяговых характеристик, зачастую имеют неодинаковое время переходных процессов, т. е. протекают с разной скоростью. Это позволяет в ряде случаев (например, при рассмотрении РДТТ как объекта регулирования) пренебрегать нестационарностью некоторых из процессов, что понижает размерность модели и существенно уменьшает потребные ресурсы ЭВМ. Следовательно, выбор рациональной постановки задачи (учет нестационарности лишь существенных процессов) имеет решающее значение при моделировании характеристик основного участка работы РДТТ.

Кроме перечисленных выше факторов внутриваллистические параметры РДУ зависят еще и от скорости изменения среднеобъемных параметров в газоведах.

Анализ времени переходных процессов показывает, что для расчета параметров РДУ на основном режиме работы, исходя из соображений требуемой адекватности модели реальным процессам РДТТ, целесообразно рассматривать несколько расчетных случаев.

Расчет квазистационарного участка, т. е. когда регулирующие органы исполнительных механизмов неподвижны, либо времена их перемещения соизмеримы со временем релаксации площади горячей поверхности. Методика расчета в данном случае должна обеспечивать, по крайней мере, один из вариантов многоуровневой модели ПС РДТТ. Учет изменения свободного объема камеры сгорания и тепломассооб-

менных процессов, в том числе и в системе газораспределения, повышает уровень сложности модели.

Расчет переходных процессов РДТТ с учетом инерционности работы исполнительных механизмов. В данном случае методика расчета должна учитывать влияние системы газораспределения РДТТ при решении задач стабилизации и ориентации.

Осреднение газодинамических параметров по всему объему камеры, т. е. использование так называемого метода нульмерной баллистики, позволяет сформировать модель РДТТ, пригодную для рассмотрения его в качестве объекта регулирования.

На основе исследований рабочих процессов в регулируемой двигательной установке модель объекта исследования: РДТТ с регулируемой гидравлическим способом площадью поверхности горения твердого топлива и регулируемой площадью критического сечения сопла разработаны основы теории расчета объекта регулирования с методическим, математическим и компьютерным обеспечением. Разработана методика расчета квазистационарного участка, т. е. когда регулирующие органы исполнительных механизмов неподвижны, либо времена их перемещения соизмеримы со временем релаксации площади горячей поверхности. В данном случае должен обеспечиваться, по крайней мере, один из вариантов работы многоуровневой модели подсистем регулирования РДТТ. Учет изменения свободного объема камеры сгорания и тепломассообменных процессов, в том числе и в системе газораспределения, повышает уровень сложности модели. Приведен расчет переходных процессов РДТТ с учетом инерционности работы исполнительных механизмов. В данном случае методика расчета учитывает влияние системы газораспределения РДТТ при решении задач стабилизации и ориентации.

Осреднение газодинамических параметров по всему объему камеры, т. е. использование так называемого метода нульмерной баллистики, позволяет сформировать модель РДТТ, пригодную для рассмотрения его в качестве объекта регулирования. В общем виде модель РДТТ с глубоким регулированием модуля тяги как объекта управления описывается уравнениями: уравнения внутренней баллистики камеры сгорания ПС РДТТ; уравнение сохранения массы; уравнение сохранения энергии; уравнение изменения свободного объема камеры; уравнение закона горения топлива; уравнение состояния;

уравнение горячей поверхности; уравнение изменения площади поверхности горения твердого топлива [14].

Задача моделирования РДТТ с глубоким регулированием модуля тяги регулированием площади поверхности горения твердого топлива, оснащенного электрогидравлической САУ

Целью математического моделирования регулируемой гидравлическим способом РДУ является получение системы уравнений, описывающих работу структурно-подобных РДУ, дальнейшее исследование которой на ЭВМ позволяет решать задачи анализа и синтеза динамических параметров системы автоматического регулирования.

Задача моделирования САУ значительно упрощается, если нестационарную нелинейную модель объекта регулирования удастся с достаточной степенью точности заменить стационарной линейной моделью. Поэтому для упрощенного описания объекта регулирования и всей САУ предлагается подход, базирующийся на следующих положениях, рассматриваемых в качестве гипотезы:

- разрабатываемая (в строгом смысле нелинейная) система автоматического регулирования в ограниченном пространстве обладает линейными свойствами по отношению к медленным воздействиям;
- математическая модель объекта управления и модель всей САУ малочувствительна к слабым помехам, а также к изменениям неучитываемых малых постоянных времени, т. е. малых параметров;
- математическая модель разрабатываемой САУ малочувствительна к параметрическим возмущениям в виде изменения параметров объекта управления и регуляторов.

Задача расчета гашения РДТТ

К конструктивной особенности РДТТ следует отнести утопленный сопловой блок. Следствием этого является неизбежное наличие затененных для струй охладителя зон внутренней поверхности камеры сгорания. Не исключено, что часть поверхности камеры вообще не будет подвергаться непосредственному воздействию струй, а будет охлаждаться жидкостью, попадающей на нее в результате рикошета капель от других участков поверхности либо жидкостью, стекающей на данный участок поверхности с соседних [1, 2, 15, 16].

Кроме того, из результатов расчетных и экспериментальных исследований известно, что при впрыске охладителя в камеру сгорания рассматриваемого класса двигательных установок практически полностью отсутствует вторичное, то есть аэродинамическое дробление капель.

Для корректного расчета процессов гашения математическая постановка задачи должна максимально точно моделировать отмеченные выше особенности. Это требует, во-первых, применение трехмерных уравнений газовой динамики полидисперсной смеси продуктов сгорания топлива и объемного неизотермических капель охладителя для описания их течения. Во-вторых, дополнительной проработки потребует моделирование граничных условий при взаимодействии дисперсных частиц охладителя со стенками камеры сгорания и зарядом. Это касается, как механического взаимодействия, так и сопутствующих ему процессов теплообмена. Самостоятельного рассмотрения потребует при этом задача формирования пленки жидкости из отдельных капель и сфероидов, а также поведения пленки на орошаемых поверхностях особенно в условиях вдува с горячей поверхности заряда. Здесь должен учитываться возможный рикошет капель, брызгоунос с поверхности пленки за счет прорывающихся сквозь нее газов, возможный срыв целых участков пленки с поверхности при интенсивном вдуве, переход от пленочного режима теплообмена к пузырьковому и т. д. При интенсивном теплообмене требуется учет неоднородности температуры по толщине пленки. В случае срыва участков пленки необходимо проследить их дальнейшее движение и трансформацию для исключения потери этой массы жидкости из теплового баланса.

Отдельную сложную задачу представляет собой моделирование процессов погасанию топлива. Использование для этой цели критерияльных соотношений, связывающих факт погасания с плотностью орошения и удельным расходом охладителя, в данном случае, когда часть горячей поверхности не подвергается непосредственному воздействию истекающих из узла гашения струй, также как применение и классической феноменологической теории горения бесполезно. Без использования моделей горения, учитывающих реакции в газовой фазе, решение данной проблемы невозможно.

Таким образом, математическая модель гашения двигателя должна разрабатываться исхо-

дя из следующих допущений основных положений.

Для описания движения парагазожидкостной смеси в камере сгорания должны использоваться трехмерные уравнения газовой динамики полидисперсных объемно неизотермических капель и газовой фазы. При этом должны учитываться взаимодействие капель между собой и кинетика химических реакций в газовой фазе.

Модель взаимодействия жидкости со стенками камеры сгорания и зарядом должна описывать процесс образования пленки из отдельных капель с учетом их рикошета, брызгоуноса и срыва пленки с поверхности при интенсивном вдуве. Должно моделироваться растекание сил, в том числе и после окончания впрыска жидкости.

Должны моделироваться следующие режимы теплообмена жидкости и охлаждаемых поверхностей:

- режим орошения поверхностей одиночными каплями.
- режим неполного покрытия поверхности слоем жидкой пленки (существование жидкости в виде отдельных сфероидов),
- режим развитой пленки, то есть пленки, полностью покрывающей охлаждаемую поверхность; при этом должны моделироваться как пленочный, так и пузырьковый режимы охлаждения.

При срыве охлаждения в режиме существования сфероидов и режиме полностью развитой пленки должна учитываться неоднородность температуры пленки по ее толщине.

В случае срыва пленки с каких-либо участков поверхности должны моделироваться ее дальнейшее движение до момента достижения другой стенки, либо выноса в сопло.

Для определения момента погасания топлива должна использоваться модель горения, учитывающая тепловыделение за счет реакций, как в газовой, так и в конденсированной фазах.

Известно, что срыв пламени в работающем двигателе происходит и при внезапном сбросе давления, достигаемом, например, при вскрытии дополнительных отверстий в корпусе РДТТ. Для двигателя, имеющего регулируемое сопло, сброс давления может быть достигнут при внезапном (за минимальный промежуток времени) открытии сопла путем перемещения центрального тела. Такое техническое решение ставит, в свою очередь, задачи по исследованию течений в регулируемом сопле, усилий на централь-

ном теле, учет которых необходим для определения динамики быстродействующего привода.

В результате исследований при решении данной задачи:

- предложена математическая модель процессов тепломассообмена двухфазного потока в двигателях летательных аппаратов и численная реализация алгоритма ее решения на языке программирования Delphi;
- в структуре этой математической модели детализированы протекание процесса испарения капель с учетом формирования в них нестационарных температурных полей в области с подвижной во времени границей и механизм массообмена капель в зависимости от температуры их поверхности;
- на основе созданной математической модели процессов тепломассообмена двухфазных потоков проведен количественный и качественный анализ и установлена детальная картина распределения параметров тепломассопереноса, позволяющая рассчитать скорость спада и глубину падения давления в камере сгорания РДТТ, а также, в частности, влияние начальной температуры впрыскиваемой жидкости на длину пути испарения.

Задача расчета повторного (после гидрогашения) запуска РДТТ

К числу основных особенностей, сопровождающих повторный запуск маршевого двигателя, следует отнести:

- существенную неоднородность в условиях теплообмена на различных участках поверхности заряда при воздействии на нее струи, истекающей из узла запуска,
- ярко выраженный пространственный характер течения в камере сгорания маршевого двигателя при работе узла запуска,
- обеднение поверхностного слоя топлива окислителем вследствие воздействия охладителя при предшествующем запуску гашения,
- возможное наличие остатков охладителя в камере сгорания маршевого двигателя, если повторный запуск производится, например, в земных условиях.

Как видно, первые две особенности будут учтены, если для моделирования газодинамических процессов в камере сгорания МД при работе узла запуска использовать трехмерные уравнения динамик вязкого газа. Это позволит смо-

делировать взаимодействие истекающей из узла запуска горячей струи продуктов сгорания с поверхностью заряда.

Для учета факта вымывания окислителя из поверхности слоя заряда при его гашении может быть, в первом приближении, применена двухслойная модель топлива с инертным первым слоем. Условия воспламенения в этом случае должны контролироваться на стыке слоев топлива.

Что касается учета наличия остатков охладителя в камере сгорания перед запуском, то предшествующие исследования показали следующее. При срабатывании узла запуска происходит дробление этой жидкости. Получающаяся в результате поверхность теплообмена между жидкостью и газовой фазы достаточна для того, чтобы теплообмен проходил в равновесном режиме. То есть все тепло, поступающее из газовой фазы, тратится на испарение жидкости. Температура газовой фазы в камере сгорания при этом остается практически равной температуре насыщенных паров при данном давлении. Только после испарения всей жидкости происходит дальнейший рост температуры газовой фазы в камере сгорания. Изложенное выше позволяет использовать для моделирования остатков охладителя простейшую модель, например модель монодисперсных капель. Начальный диаметр капель при этом не имеет принципиального значения. Важно лишь, чтобы их размер был достаточен для поддержания равновесного режима испарения.

Разработана модель процессов взаимодействия струй узла запуска с поверхностью заряда и стенок камеры сгорания, а также модель возникающих при этом внутрикамерных течений с использованием трехмерных уравнений газовой динамики вязкого газа.

При моделировании теплообмена между пристенной струей и поверхностями заряда и стенок камеры сгорания учитываются конвективная и лучистая составляющие.

При расчете прогрева и воспламенения заряда учитываются вымывание окислителя из поверхностного слоя топлива в процессе предшествующего гашения.

Для моделирования запуска двигателя в условиях огневых стендовых испытаний учитываются возможное наличие остатков охладителя в камере сгорания после предшествующего гашения, например, с помощью простейшей модели монодисперсных капель.

На основе созданной математической модели процессов теплообмена двухфазных потоков впервые проведен количественный и качественный анализ и установлена детальная картина распределения параметров теплообмена, позволяющая рассчитать скорость спада и глубину падения давления в камере сгорания РДТТ, а также, в частности, влияние начальной температуры впрыскиваемой жидкости на длину пути испарения.

Задача разработки средств компьютерного моделирования электрогидравлических систем управления РДТТ МВ

Новыми научными результатами, полученными в работе, являются разработанные методы и средства математического моделирования САУ РДТТ с учетом влияния стохастического характера изменения параметров, направленные на повышение качества проектирования и доводки электрогидравлических систем управления [6, 7, 17, 18]:

- разработаны методологические основы проектирования системы автоматического управления РДТТ с «гидрорегулированием» поверхности горения;
- разработаны методологические основы проектирования РП с СГРМ, содержащие методы, методики и соответствующее программное обеспечение, позволяющие повысить эффективность этапов проектирования изделий и сократить время разработки до 30–40 %;
- разработаны новые нелинейные математические модели СГРМ различных схем, в отличие от существующих позволяющие моделировать, исследовать и прогнозировать различные режимы работы СГРМ с возможностью учета технологического разброса параметров гистерезисных явлений, люфтов, трения, гидродинамического воздействия и других нелинейностей, доступных экспериментальному определению;
- разработан метод расчета статических и динамических характеристик одно- и двухкаскадных схем СГРМ;
- разработан и реализован метод идентификации характеристик СГРМ, позволяющий прогнозировать характеристики СГРМ с учетом влияния стохастического характера изменения параметров;
- произведен анализ классических линейных методов моделирования гидромеханических устройств САУ ЛА;

- разработан комплекс нелинейных алгоритмических динамических моделей, алгоритмов и программ;
- построены обобщенных характеристик сложных гидромеханических устройств с использованием методов теории подобия;
- разработана технология проведения вычислительного эксперимента с использованием обобщенных переменных;
- произведена автоматизация вычислительного эксперимента путем создания программного комплекса (пакета прикладных программ).

Задача проведения натуральных экспериментов электрогидравлической системы управления РДТТ

При проведении экспериментальных исследований использовано оборудование лаборатории экспериментальных исследований гидросистем учебного научного инновационного центра «Гидропневмоавтоматика», оснащенной уникальными стендами, современными вычислительными средствами со специализированным программным обеспечением, офисной техникой и средствами мультимедиа, беспроводной локальной сетью, сервером центра с базой данных, программным обеспечением для сбора данных, их анализа, представления и управления (Lab VIEW). Уникальные экспериментальные стенды «Диагностика и идентификация гидросистем» и «Исследование статических и динамических характеристик гидравлических исполнительных механизмов» запущены в эксплуатацию в конце 2008 г. Стенды изготовлены Государственным ракетным центром «КБ им. академика В. П. Макеева» и компанией Hydac. Для адаптации стендов под данную работу произведена доработка оборудования, написано программное обеспечение для работы в автоматизированном режиме Lab VIEW.

На стенде «Диагностика и идентификация гидросистем» проводятся экспериментальных исследований электрогидравлических механизмов и регуляторов САУ РДТТ.

На стенде «Исследование статических и динамических характеристик гидравлических исполнительных механизмов» проводится исследование статических и динамических характеристик привода центрального тела сопла: элек-

трогидравлической рулевой машины со струйным гидроусилителем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны основные аспекты методологии проектирования системы управления РДТТ с комбинированной системой управления и многократным включением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гусаченко Л. К.** Возможность колебаний очень низкой частоты в полужамкнутом объеме // Горение и взрыв. М.: Наука, 1972. С. 100–103.
2. Исследование устойчивости и переходных процессов формирования в полужамкнутом объеме поверхности с местной увеличенной скоростью газообразования / Л. К. Гусаченко [и др.] // ФГВ. 1974. № 3. С. 354–362.
3. **Руднев А. П.** Низкочастотная устойчивость горения конденсированных систем с быстрогорящими элементами // ФГВ. 1976. № 6. С. 845–853.
4. **Шайхутдинов З. Г., Кривошеев И. А., Лиховских В. А.** Переходные процессы формирования поверхности горения в РДТТ с гидравлическим регулированием // Авиационная техника. Известия вузов. Казань, 1982. № 3. С. 55–62.
5. **Кривошеев И. А.** Экспериментальные исследования и моделирование динамических процессов в ракетных и комбинированных двигателях // Вопросы теории и расчета рабочих процессов тепловых двигателей: межвуз. науч. сб. Уфа, 2007, № 21. С. 16–28.
6. **Русак А. М., Кривошеев И. А.** Устойчивость рабочих процессов в регулируемых газогенераторах: Деп. отчет ВНИИЦ № гос. рег. 5289-В88. М.: Изд-во ВНИИЦ, 1988. 27 с.
7. **Кривошеев И. А., Буткин Н. С., Ахмедзянов Д. А.** Компьютерная среда для математического моделирования двигателей произвольных типов и схем // Приоритеты и возможности: Сб. трудов II конгресса двигателестроителей Украины с иностранным участием. Харьков: ХАИ, 1997. С. 59–60.
8. **Кривошеев И. А., Бушуев С. Ю.** Математическая модель расчета внутрибаллистических параметров газогенератора на твердом топливе при регулировании поверхности горения гидравлическим способом // XXX научн.-технич. конф. УАИ. Уфа: УАИ, 1980. С. 45–46.

9. **Русак А. М., Кривошеев И. А.** К вопросу об устойчивости и переходных процессах горения конденсированных систем с увеличенной местной скоростью газообразования в полузамкнутом объеме //XXX науч.-технич. конф. УАИ. – Уфа: УАИ, 1980. С. 44–45.
10. **Русак А. М., Кривошеев И. А., Герасимов А. С.** Статика и динамика РДТТ с глубоким регулированием тяги // Вопросы теории и расчета рабочих процессов тепловых двигателей: межвуз. науч. сб. Уфа: УАИ, 1980. Вып. 4. С. 9–19.
11. **Русак А. М., Кривошеев И. А.** Спец. тема // Современные проблемы двигателей и энергетических установок двигателей летательных аппаратов: Тезисы II Всесоюз. науч.-техн. конф. МАИ, 1980. С. 44
12. Разработка и исследование регулируемой двигательной установки / А. М.Русак [и др.] // Тр. IX чтений Ф. А. Цандера АН СССР. М., 1985. С. 10.
13. Теория автоматического управления / Под ред. академика А. А. Воронова. В двух частях. Ч. 1. Теория линейных САУ. Ч. II. Теория нелинейных и специальных САУ. М.: Высшая школа, 1986.
14. **Чуян Р. К.** Методы математического моделирования двигателей летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1988. 288 с.
15. К вопросу о разгрузке привода газораспределителей, работающих при высоких давлениях / З. Г. Шайхутдинов [и др.] //Авиационная техника. Известия вузов. Казань, 1977. № 1. С. 100–102.
16. Универсальные силовые характеристики регулирующего клапана с плоским срезом прямого и обратного типа / З. Г. Шайхутдинов [и др.] // Расчеты и проектирование специальных систем: тематич. сб. науч. тр. Челябинск: ЧПИ. 1978. № 1. С. 21–26.
17. Расчет силового воздействия полуограниченного плоского потока на вогнутую стенку / З. Г. Шайхутдинов [и др.] // Газодинамика двигателей летательных аппаратов: межвуз. сб. Казнь: КАИ, 1980. С. 58–61.
18. **Шайхутдинов З. Г., Кривошеев И. А.** Исследование твердотопливного газогенератора с гидравлическим регулированием поверхности горения // XXX науч.-техн. конф. УАИ. Уфа: УАИ, 1980. С. 39.
19. **Шайхутдинов З. Г., Русак А. М., Кривошеев И. А.** Спец. тема // Тезисы I межотрасл. семинара по вопросам регулирования твердотопливных двигательных установок. М.: ЦИАМ, 1981.
20. Система управления модулем тяги РДТТ: авт. св-во № 162721 от 05.08.1981 / З. Г. Шайхутдинов [и др.].
21. Ракетный двигатель твердого топлива: авт. св-во № 974849 от 14.07.1982 / З. Г. Шайхутдинов [и др.].
22. Ракетный двигатель твердого топлива: авт. св-во № 183179 от 07.01.1983 / З. Г. Шайхутдинов [и др.].
23. Ракетный двигатель твердого топлива: авт. св-во № 1902500 от 5.07.1983 / З. Г. Шайхутдинов [и др.].
24. Ракетный двигатель твердого топлива: авт. св-во № 1077394 от 01.10.1983 / З. Г. Шайхутдинов [и др.].
25. Ракетный двигатель твердого топлива: авт. св-во № 201358 от 28.03.1984 / З. Г. Шайхутдинов [и др.].
26. **Шевяков А. А.** Автоматика авиационных и ракетных силовых установок. М.: Машиностроение, 1970. 583 с.
27. **Кривошеев И. А.** Автоматизация проектирования двигателей на стадии ОКР. Технология и средства функционального проектирования. М: Машиностроение, 2010. 274 с.
28. **Кривошеев И. А.** Моделирование динамических процессов в ракетных и комбинированных двигателях // Информационные технологии в науке, проектировании и производстве: матер. 11 Всерос. науч.-технич. конфер. Н. Новгород: МВВО АТН РФ, 2004. С. 10.
29. **Кривошеев И. А., Ахмедзянов Д. А.** Математическое моделирование динамических систем с использованием открытой технологии МетаСАПР (Framework) // 4 Всерос. науч. internet-конфер. «Компьютерное и математическое моделирование в естественных и технических науках». Тамбов: ТГУ, 2002. Вып. 16. С. 30–32.
30. **Кривошеев И. А.** Моделирование динамических процессов в ракетных и комбинированных двигателях // Компьютерное моделирование и информационные технологии в науке, инженерии и образовании: сб. матер. Междун. науч. конфер. Пенза: РИО ПГСХА, 2003. С. 96–102.
31. **Кривошеев И. А., Ахмедзянов Д. А.** Создание универсальной методики моделирования сложных динамических объектов // XXIII Росийск. шк. по проблемам науки и технологий. Екатеринбург: Ур.О РАН. 2003. С. 328–330.
32. **Кривошеев И. А., Ахмедзянов Д. А.** Моделирование динамических процессов в сложных системах. Уфа: УГАТУ, 2003. 99 с.
33. Управляемые энергетические установки на твердом ракетном топливе / Под общ. ред. М.

И. Соколовского и В. И. Петренко. М.: Машиностроение, 2003. 464 с.

34. Регулируемые твердотопливные двигательные установки: Методы расчета рабочих процессов, экспериментальные исследования / А. М. Русак [и др.]. Уфа: Даурия, 1996. 296 с.

35. **Русак А. М., Целищев В. А.** Система автоматического регулирования двигательной установки на твердом топливе // Ракетно-космическая техника. 1994. Сер. XIV. Вып. 2(38). С. 62–74.

36. Экспериментальные и теоретические исследования в регулируемых соплах с центральным телом / В. А. Целищев [и др.] // Вестник УГАТУ, 2010. Т. 14. № 5 (40). С. 52–61.

37. **Целищев Д. В.** Гидравлическая машина со струйно-кавитационным регулированием // Вестник УГАТУ, 2006. Т. 7. №2 (15). С. 160–165.

38. Струйные гидравлические рулевые машины / В. А. Целищев [и др.]. Уфа: УГАТУ, 2002. 284 с.

39. Идентификация и адаптивное управление струйными гидравлическими рулевыми машинами / В. А. Целищев [и др.]. М.: МАИ, 2007. С. 282.

40. **Целищев В. А., Кириллов Ю. К., Феофилактов В. И.** Выбор основных энергетических характеристик рулевых приводов органов управления баллистических ракет // Ракетно-космическая техника. Серия XIV, Вып. 3, 1996. С. 35–50.

41. **Целищев В. А.** Вопросы развития рулевых приводов баллистических ракет // Ракетно-космическая техника. Сер. XIV, Вып. 3, 1996. С. 51–69.

42. **Целищев Д. В., Целищев В. А.** Состояние и проблемы разработки струйных гидравлических рулевых машин // Вестник УГАТУ, 2004. Т. 5, № 2 (10). С. 89–98.

43. Применение эмпирических зависимостей в математической модели струйной гидравлической рулевой машины / Ш. Р. Галлямов [и др.] // Вестник УГАТУ. 2007. Т. 9. № 6 (24). С. 56–66.

44. Исследование гидравлического рулевого привода летательного аппарата / Ш. Р. Галлямов [и др.] // Вестник УГАТУ. 2008. Т. 11. № 2 (29). С. 56–74.

45. Численное моделирование потоков в струйно-золотниковом гидроусилителе / Ш. Р. Галлямов [и др.] // Вестник УГАТУ. 2008. Т. 11. № 2 (29). С. 55–60.

46. **Бушуев С. Ю., Русак А. М., Целищев В. А.** РДТТ как объект регулирования // Рабочие процессы в низкотемпературных ТТ генераторах: сб. тр. ЧПИ, 1986. С. 28–36.

47. **Целищев В. А., Смородинов А. П.** Управляемый ракетный двигатель твердого топлива многократного включения // Вестник УГАТУ. 2004. Т. 5. № 2 (10). С. 82–87.

48. **Целищев В. А., Смородинов А. П.** Ракетный двигатель твердого топлива многократного включения с двумя подсистемами регулирования // Вестник УГАТУ. 2010. Т. 14, № 1 (36). С. 3–10.

49. Влияние нерастворенного воздуха на рабочие характеристики гидромеханического привода летательного аппарата / А. А. Коева [и др.] // Вестник УГАТУ. 2010. Т. 14, № 1 (36). С. 11–19.

50. **Петров П. В., Сунарчин Р. А., Целищев В. А.** Технология проведения вычислительного эксперимента применительно к гидромеханическому следящему приводу // Вестник УГАТУ, 2008. Т. 10, № 1 (26). С. 30–35.

ОБ АВТОРАХ

Кривошеев Игорь Александрович, декан факультета авиац. двигателей, проф., науч. рук. НИЛ САПР-Д. Дипл. инженер-механик (УГАТУ, 1976). Д-р техн. наук по тепл. двигателям летательн. аппаратов (2000). Иссл. в обл. инф. техн. в двигателестроении

Целищев Владимир Александрович, проф. каф. прикл. гидромеханики. Дипл. инженер-механик по гидравлическ. машинам (УГАТУ, 1982). Д-р техн. наук по тепловым двигателям (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. систем автоматики летательн. аппаратов и двигательных установок.

Бачурин Александр Борисович, магистрант той же каф. Иссл. в обл. системам гидравлическ. и пневматическ. приводов.

Стрельников Евгений Владимирович, магистрант той же каф. Иссл. в обл. системам гидравлическ. и пневматическ. приводов.