

На правах рукописи



КРАПИВНЫХ ЕЛЕНА ВЛАДИМИРОВНА

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ
И СОЗДАНИИ АГРЕГАТОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЖРД БОЛЬШИХ ТЯГ

Специальность 05.07.05

«Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки
летательных аппаратов»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Химки – 2017

Работа выполнена в АО «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко»

Научный руководитель: доктор технических наук
Громыко Борис Михайлович

Официальные оппоненты: **Ягодников Дмитрий Алексеевич**,
доктор технических наук, профессор,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Московский государственный
технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский
университет)», заведующий кафедрой
«Ракетные двигатели»

Кучкин Владимир Николаевич,
кандидат технических наук, доцент,
федеральное казенное предприятие
«Научно-испытательный центр ракетно-
космической промышленности»,
первый заместитель генерального директора по
испытаниям

Ведущая организация: акционерное общество «Государственный
ракетный центр имени академика
В.П. Макеева»

Защита состоится «04» декабря 2017 года в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д212.125.08, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) по адресу: 125993, Россия, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского авиационного института (национального исследовательского университета), http://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=83403.

Автореферат разослан «__» _____ 2017г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.125.08,
д.т.н., профессор



Зуев Юрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. *Агрегаты регулирования (стабилизаторы давления, дроссели и регуляторы) – это одни из основных агрегатов ЖРД. Они обеспечивают автоматическую работу двигателя и являются необходимой частью любого ЖРД как с вытеснительной, так и с насосной подачей топлива.*

С развитием ракетной техники возрастают требования к повышению технического уровня агрегатов гидropневмотопливных систем двигателей, в особенности к агрегатам регулирования жидкостных ракетных двигателей (ЖРД). Постоянное ужесточение эксплуатационных параметров, показателей надежности, предъявление высоких требований к быстрдействию, стойкости к вибрационным нагрузкам при возможно меньших массе и габаритах, увеличение срока службы и ресурсов изделий поставили перед разработчиками современных агрегатов регулирования ЖРД ряд проблемных вопросов, связанных с совершенствованием расчетов и конструирования этих агрегатов.

Создание современных агрегатов регулирования ЖРД – это комплексная задача, заключающаяся в изучении и анализе опыта проектирования, конструирования и создания уже существующих агрегатов, а также в теоретическом и экспериментальном исследовании физических процессов, происходящих в них.

Решение этой задачи возможно лишь путем создания основанных на принципах системности (системном подходе) специальных методик по проектированию агрегатов регулирования ЖРД с помощью широкого применения САПР-программ и различных сред программирования.

Вновь создаваемые или усовершенствованные методики должны в обязательном порядке подвергаться проверке посредством эксперимента. Так, например, проверка методик проектирования агрегатов регулирования ЖРД заключается в проведении модельных испытаний агрегатов, созданных с их помощью. Модельные испытания агрегатов регулирования ЖРД состоят из следующих этапов:

- цеховая настройка, которая необходима для настройки задающих элементов агрегатов регулирования;
- стендовые испытания на воде. В ходе этих испытаний происходит настройка агрегата на заданные выходные параметры, и снимаются его рабочие характеристики;
- испытания на воспроизводимость рабочих характеристик агрегата после испытаний на тряску и вибрацию, испытаний при положительных и отрицательных температурах ($\pm 50^{\circ}\text{C}$), определяющие работоспособность агрегата.

Полученные результаты модельных испытаний, подтвержденные положительными результатами испытаний агрегата регулирования в составе

двигателя, являются идентификаторами, обуславливающими правильность разработанной методики и принятых конструктивных решений, использованных при их создании.

Решению такой задачи и посвящена данная диссертационная работа. В ней с помощью вышеперечисленных математических инструментов, различного рода экспериментальных проверок и с использованием **системного подхода** был создан новый, единый и более оптимальный подход к проектированию такого агрегата регулирования, как одноступенчатый золотниковый стабилизатор давления (далее – СД) ЖРД больших тяг. Системный подход гарантирует более полное и целостное представление об этом агрегате, так как включает в себя теоретическое, конструктивное и экспериментальное его исследование, и позволяет изучать стабилизатор давления не только как самостоятельный элемент, но и как объект системы – двигателя.

Данный подход воплощен в методике и программе расчета СД. Они позволяют исследовать и анализировать влияние конструктивных параметров агрегата на его рабочие характеристики, описать СД как объект, находящийся в совокупности взаимодействующих объектов, то есть во взаимосвязи с двигателем (посредством определения влияния подводящих и отводящих магистралей СД и возмущения давлений них в системе гидропитания рулевых приводов ЖРД). Разработанный программно-математический комплекс апробирован на практике, его эффективность доказана экспериментально. Использование этого расчетного комплекса в дальнейшем упростит создание новых и модернизацию имеющихся конструкций золотниковых СД, а также будет способствовать сокращению сроков их разработки, уменьшит трудозатраты, связанные с освоением производства, повысит качество и надежность изделий.

Таким образом, использование системного подхода при проектировании и создании одноступенчатых золотниковых стабилизаторов давления ЖРД больших тяг является актуальной темой.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационного исследования является разработка методики и программы расчета одноступенчатого золотникового стабилизатора давления ЖРД больших тяг, основанных на системном подходе. Для достижения поставленной цели автором были решены следующие задачи:

1. Проведено исследование и анализ конструкций СД, а также других агрегатов регулирования ЖРД, применяемых в отрасли, и имеющих золотниковую конструктивную схему исполнения. Определены конструктивные общности этих агрегатов.

2. Разработана математическая модель расчета стабилизатора давления ЖРД, учитывающая влияние конструктивных параметров СД, гидравлических характеристик подводящих и отводящих магистралей в системе гидропитания рулевых приводов двигателя, возмущений давления в этих маги-

стралях, утечек через зазор между трущимися поверхностями золотниковой пары СД на его рабочие характеристики; составлена расчетная схема к ней.

3. Разработаны методические рекомендации по проектированию стабилизатора давления, которые позволят на основе принципов преемственности конструкций создавать новые конструкции СД, адаптированные под конкретные условия работы путем его модернизации (например, путем изменения, усовершенствования или улучшения конструктивных параметров основных элементов агрегата в зависимости от требований, предъявляемых к виду его рабочих характеристик).

4. Проведены расчетные (включая 3D - моделирование), исследовательские и опытно-конструкторские работы по определению влияния конструктивных параметров СД (профиля дросселирующих окон, пружины, площади чувствительного элемента) и гидравлических характеристик подводящих и отводящих магистралей агрегатов регулирования на его рабочие характеристики. Полученные экспериментальные данные проанализированы и сопоставлены их с расчетными значениями.

5. Разработанные конструкции СД внедрены в современные ЖРД (15Д285, РД191, РД181), проведена оценка эффективности их внедрения на двигатель.

Научная новизна. Разработаны методика и программа расчета стабилизатора давления ЖРД золотникового типа, основанные на системном подходе к его проектированию. Методика и созданная на ее основе программа апробированы на практике и позволяют проводить расчеты СД с учетом особенностей его конструкции (профиля дросселирующих окон, силовой характеристики пружин, площади чувствительного элемента), утечек компонента топлива через зазор в золотниковой паре СД, влияния гидравлических характеристик подводящих и отводящих магистралей в системе гидропитания рулевых приводов двигателя, возмущений давления в этих магистралях на рабочие характеристики СД. Также с помощью данной методики и программы можно проектировать новые конструкции СД и конструкции СД, адаптированные под заданные рабочие среды с разными характеристиками агрессивности, уровнями давлений, значениями расходов, температур путем модернизации их конструкции. Новизна данной методики заключается в том, что такой подход к проектированию одноступенчатых золотниковых СД ранее не использовался.

Таким образом, была сформулирована и достигнута цель по разработке методических рекомендаций и программы проектирования стабилизаторов давления ЖРД, основанных на системном подходе.

Агрегаты, созданные на основе разработанного системного подхода, внедрены и успешно эксплуатируются на мощных ЖРД – 15Д285, РД181 и РД191, что способствует дальнейшему развитию науки и техники ракетно-космического направления.

Теоретическая и практическая значимость диссертационного исследования. Разработанные методика и программа расчета СД, основанные на системном подходе к его проектированию, позволяют получать рабочие характеристики СД с учетом влияния конструктивных параметров агрегата, гидравлических характеристик подводящих и отводящих магистралей в системе гидропитания рулевых приводов двигателя, возмущений давления в этих магистралях, утечек компонента топлива по зазору между трущимися поверхностям подвижных соединений СД.

Программа расчета СД позволит оперативно решать вопросы, связанные со случаями его нештатной работы в составе двигателя при огневых испытаниях (например, с помощью этой программы была определена причина несоответствия величины выходного давления СД величине давления, требуемой по техническому заданию при огневых испытаниях двигателя РД191); оценить (еще до модельных испытаний агрегата на стенде) влияние отступлений от конструкторской документации на выходные параметры стабилизатора, что позволит оперативно принять решение о допуске агрегата к дальнейшим работам.

Приведенная в данной работе методика расчета конструктивных параметров СД частично может использоваться для расчета аналогичных конструктивных параметров дросселя и регулятора расхода (примеры, подтверждающие это, приведены далее).

Методология и методы диссертационного исследования. Методологической основой послужил опыт, накопленный в АО «НПО Энергомаш» по разработке агрегатов регулирования для современных маршевых ЖРД, представленный в трудах Громько Б. М., Кошелева И. М., Кириллова В.В., Карагизьяна А. Р., Бабкина В. П., Гунина А.Ф., Хренова И.И., Муравьева О.И. и др., а также опыт сторонних организаций – АО ББХА, АО «ВПК «НПО машиностроения», АО «СНТК им. Н. Д. Кузнецова», ЦИАМ им. Баранова и др. – по разработке и аналитическому исследованию агрегатов регулирования.

При проведении данного диссертационного исследования использовались методы экспериментально-теоретического содержания: эксперимент, анализ, синтез и моделирование, а также логические методы – индукция и дедукция, которые использовались при обсуждении и анализе промежуточных результатов экспериментальной обработки СД.

Основные положения, выносимые на защиту.

Методика и программа расчета СД ЖРД больших тяг, основанные на системном подходе.

Результаты расчетных и экспериментальных исследований по определению влияния конструктивных параметров СД и гидравлических характеристик подводящих и отводящих магистралей на его рабочие характеристики.

Результаты испытаний разработанных с использованием системного подхода СД в составе двигателя.

Достоверность диссертационного исследования подтверждается:

- сходимостью проектных, расчетных и экспериментальных данных;
- применением фундаментальных исследований, а также численного моделирования при составлении методики и программы расчета СД;
- проведением комплекса успешных испытаний разработанных стабилизаторов, дросселей и регулятора расхода с использованием аттестованной аппаратуры и квалифицированного персонала.

Апробация результатов диссертационного исследования. Результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались: на V и VI Международном межотраслевом молодежном научно-техническом форуме «Молодежь и будущее авиации и космонавтики», в докладе «Разработка системного подхода к проектированию и созданию агрегатов регулирования ЖРД больших тяг и исследования влияния конструктивных параметров на работоспособность», автор Цыганова (Крапивных) Е.В. и в докладе «Влияние гидравлических характеристик подводящих и отводящих магистралей на статические характеристики и работоспособность стабилизатора давления ЖРД», автор Крапивных Е.В., 26 ноября 2013 г. и 18-21 ноября 2014 г., соответственно; на VI Всероссийской конференции по проблемам новых технологий, посвященной 90-летию со дня рождения академика В. П. Макеева, в докладе «Выбор конструктивных параметров стабилизаторов давления ЖРД, обеспечивающих постоянство давления», авторы: Гребнев М.Ю., Громыко Б.М., Крапивных Е.В., Теленков А.И.А., 14-16 октября 2014 г.

Личное участие автора заключается в следующем:

1. Сформулированы методические рекомендации по разработке СД ЖРД и разработана методика расчета одноступенчатых золотниковых СД.
2. Разработаны и внедрены СД на двигателях РД181, РД191 и 15Д285.
3. С участием автора разработаны дроссель с «пологой» характеристикой для РД191 и регулятор расхода для форсированного на 10% РД191.
4. Разработана конструкторская документация на СД двигателей 15Д285, РД181.
5. Проведена экспериментальная отработка стабилизаторов давления двигателей 15Д285, РД181, РД191, дросселя РД191 и регулятора расхода двигателя РД191, форсированного на 10%.

Публикации. По теме диссертации автором опубликовано 6 научных работ, 4 из которых опубликованы в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК (из них 1 без соавторов).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложения. Она содержит 154 страниц основного текста и 22 страницы приложения, 75 рисунков, 8 таблиц,

список литературы, включающий 74 наименования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит общую характеристику диссертационной работы. В нем обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследований, отражены научная новизна и практическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** дано обоснование необходимости решения задач проектирования и создания агрегатов регулирования ЖРД больших тяг с помощью системного подхода на примере СД (рисунок 1). Описано применение, назначение и устройство СД ЖРД. Рассмотрены виды и принципы работы СД, указаны основные конструктивные параметры, оказывающее наибольшее влияние на его работоспособность. Проведен аналитический обзор СД, применяемых в отрасли. Приведены основные технические характеристики СД, используемых на мощных ЖРД, а также унифицированные СД разработки АО «НПО Энергомаш». Представлен аналитический обзор патентно-информационных материалов по проектированию, испытанию и эксплуатации агрегатов регулирования ЖРД. Описаны особенности и отличия разработанных на основе принципов преемственности СД для двигателей 15Д285 и РД181 от СД-прототипов. В качестве примера приведены конструкции золотниковых дросселя и регулятора расхода ЖРД больших тяг (рисунки 2, 3). Наличие общности в конструктивном исполнении и принципе действия позволяет утверждать о возможности использования одних и тех же методик при проектировании их конструктивных элементов, даже несмотря на различие в функциональном назначении данных агрегатов.

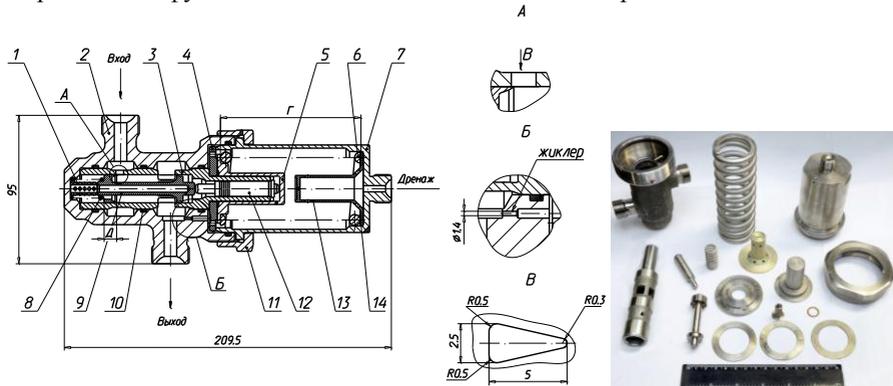


Рисунок 1 – СД ЖРД 15Д285 (в сборе и россыпью):

1, 13 – упор; 2 – корпус; 3 – направляющая; 4, 5 – опора; 6, 8 – пружина; 7 – крышка; 9 – золотник; 10 – кольцо уплотнительное; 11 – гайка; 12 – поршень; 14 – шайба регулировочная; *вид В* – дросселирующее окно; *вид Б* – жиклер

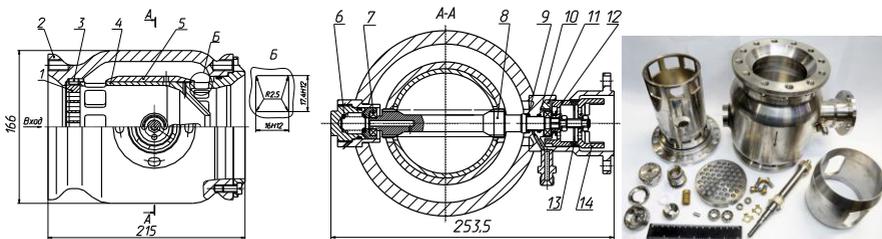


Рисунок 2 – Дроссель ЖРД РД191 (в сборе и россыпью):

1 – спрямляющая решетка; 2 – корпус; 3 – штифт; 4 – направляющая; 5 – рейка; 6 – пружина; 7 – подшипник; 8 – валик; 9, 10 – уплотнительные кольца; 11 – упор; 12 – полумфта; 13 – проставка; 14 – переходник; вид Б – дросселирующее окно

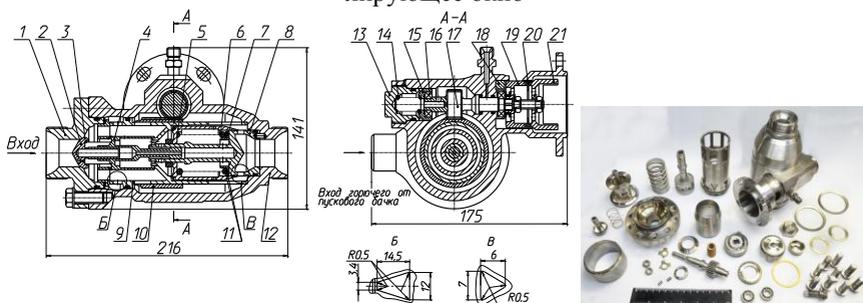


Рисунок 3 – Регулятор расхода ЖРД РД191 (в сборе и россыпью):

1 – крышка; 2 – грибок; 3, 6, 14 – пружина; 4, 8, 9 – направляющая; 5, 10 – рейка; 6 – пружина; 7, 15 – опора; 11 – шайбы; 12 – корпус; 13 – заглушка; 16 – подшипник; 17 – валик; 18 – упор; 19 – полумфта; 20 – проставка; 21 – переходник, вид Б, В – дросселирующее окно

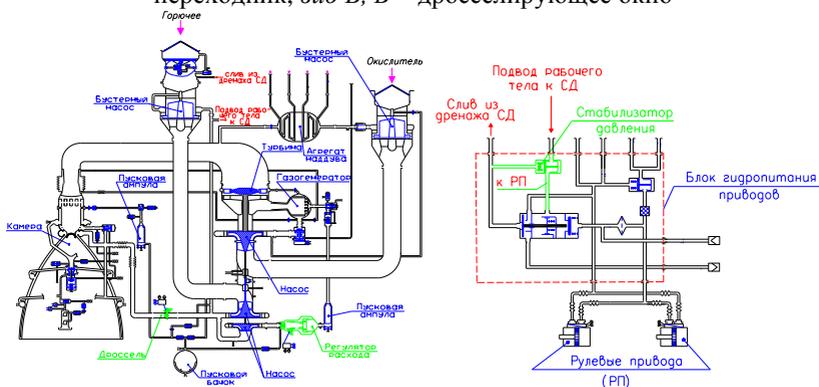


Рисунок 4 – Принципиальная пневмогидравлическая схема двигателя РД181 и место в ней блока гидрпитания рулевых приводов

СД (рисунок 1) устанавливается в гидравлической системе питания рулевых приводов качания камеры сгорания (КС) ЖРД, которая представлена на рисунке 4 и служит одновременно для понижения уровня давления рабочего тела, поступающего из насоса, и автоматического поддержания требуемого уровня давления рабочего тела, необходимого для стабильной работы приводов.

Принцип работы СД. В исходном положении поршень 12 с золотником 9 усилием пружины 6 через опору 5 прижат к упору 1. При поступлении рабочего тела на вход в стабилизатор, оно через дросселирующие окна В в направляющей 3 заполняет внутреннюю полость стабилизатора и своим давлением воздействует на эффективную площадь поршня 12. Усилие, развиваемое золотником 9 с поршнем 12, от этого воздействия, преодолевает усилие пружины 6 и золотник с поршнем занимает положение, при котором наступает равновесие сил, воздействующих на них. При изменении входного давления изменяется выходное давление, из-за чего нарушается указанное равновесие, и золотник с поршнем перемещаются. При перемещении золотник 9 изменяет площадь проходного сечения окон в направляющей 3 так, что давление на выходе из стабилизатора становится равным давлению настройки. Величина выходного давления зависит от площади поршня и усилия пружины и при гидроиспытаниях настраивается на заданное значение путем подбора толщины регулировочных шайб 14.

Регулировка усилия пружины СД с помощью шайб обеспечивает высокую надежность его работы при больших динамических нагрузках, воздействующих на конструкцию в процессе эксплуатации в составе двигателя. Применение других способов регулировки (например, с помощью регулировочного винта) в таких условиях эксплуатации может привести к сбою его настройки и, как следствие, отказу агрегата, так как заведомо никакой из существующих способов контроля не обладает высокой надежностью.

Основные особенности конструкции СД. Для избежания разрыва контакта между деталями и ограничения перемещения пары «поршень – золотник» при резких изменениях расхода в стабилизаторы установлены дополнительная пружина 8 и опора 5.

С целью обеспечения минимального расхода через стабилизатор введен канал с жиклером (рисунок 1), соединяющий полость выходного штуцера с дренажом. При работе СД на малом расходе проходная площадь дросселирующих окон соразмерима с площадью зазора между золотником и направляющей. Поэтому для уменьшения влияния утечек через зазор на величину расхода в конструкции был предусмотрен жиклер, отводящий часть расхода, подаваемого на вход в стабилизатор, в дренаж, который необходим для слива утечек рабочего тела по подвижному соединению «поршень – направляющая» из внутренней полости крышки 7. Для уменьшения гидродинамической силы рабочая кромка золотника выполняется острой с минимальным углом

конуса, определенным из прочностного расчета. Таким образом, через дроселирующие окна протекает суммарный расход к потребителю и в дренаж, а положение золотника обеспечивает однозначное открытие окон.

Для золотниковой пары используется нержавеющая сталь (например, сталь 42Х11МЗФ-Ш) повышенной твердости, что уменьшает вероятность заклинивания при попадании в зазоры твердых частиц, которые в этом случае разрушаются твердыми рабочими поверхностями.

СД, разработанные в НПО Энергомаш, с диаметром проходного сечения от 8 до 18 мм, использующиеся в составе двигателей больших тяг, таких как РД171М РД180, РД191, РД181, 15Д285 и имеющие массу до 2 кг при максимальном длинном размере 210 мм, выполнены по *одноступенчатой* золотниковой схеме и функционируют при подаче на вход давления до 650 кгс/см², обеспечивая постоянство выходного давления от 60 до 270 кгс/см², выдерживают перепад давления (разница между входным и выходным давлением) на золотниковой паре до 600 кгс/см² в диапазоне заданных расходов от 0,09 до 4 кг/с. Такое конструктивное исполнение стабилизатора является оригинальным решением и позволило, за счет простоты его конструкции сочетающейся с минимальными габаритами, обеспечить высокий уровень надежности агрегата. Несмотря на то, что режимы работы СД являются кавитационными, следов воздействия кавитации в проточной части агрегата не возникает.

Для диагностики работы стабилизатора давления в составе двигателя в процессе контрольно-технологических испытаний и при летных испытаниях производится непрерывная запись давлений на входе и выходе из СД, а также в дренажном трубопроводе. На рисунке 5, в качестве примера, приведена типовая запись давлений до СД (параметр ДГПН-1) и после него (параметр ДГДРП) при его работе в составе двигателя РД180.

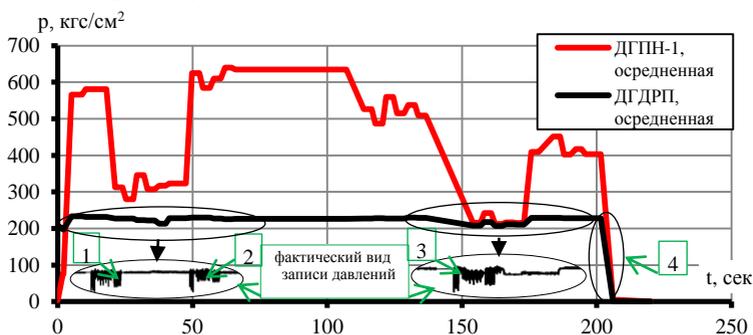


Рисунок 5 – Типовая запись входных и выходных давлений СД РД180

Представленные на этом рисунке участки 1, 2, 3 – это участки с качанием КС. На этих участках происходит «перекладка» привода из одного

положения в другое по сигналу системы управления в результате чего происходит отклонение КС в требуемое положение. Падение давления на этих участках характеризуется резким увеличением расхода через СД. Участок 4 – это участок, на котором стабилизатор перестает выполнять свои функции, ввиду падения входного давления до нерасчетных значений, и работает как шайба с постоянным гидросопротивлением.

В конце главы сделаны выводы по состоянию разработок стабилизаторов давления для ЖРД в отрасли и о необходимости создания методики и программы расчета СД золотникового типа, основанной на системном подходе к его проектированию.

Во **второй главе** изложены методические рекомендации к проектированию одноступенчатых золотниковых СД ЖРД больших тяг, методика и инженерная программа их расчета, разработанные на основе системного подхода к проектированию этих агрегатов. Код программы расчета СД представлен в приложении к диссертационной работе. Также представлены расчетная схема течения рабочего тела в СД и схема подвода и отвода гидромагистралей СД в системе гидроснабжения рулевых приводов двигателя, использовавшиеся при составлении математической модели и программы расчета СД.

Основными техническими параметрами стабилизатора давления, определяющими его конструктивное исполнение, являются значения давления на входе и выходе из СД, а также диапазон расходов, на которых он должен работать.

Основными конструктивными параметрами СД являются дросселирующие окна и пружина. Профиль окна определяет величину понижения давления, а пружина – это задающий элемент, который необходим для настройки СД на требуемые уровни выходных давлений. Более подробно остановимся на расчете дросселирующих окон.

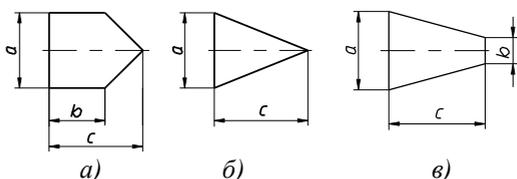


Рисунок 6 – Варианты исполнения профиля дросселирующего окна в направляющей СД (а, б) и регуляторе расхода (в)

Форма дросселирующих окон СД может быть как простой (рисунок б), так и сложной (рисунок 7) в зависимости от требований предъявляемым к условиям его работы.

Уравнения, которыми описывается вид характеристик, обеспечиваемый каждым из представленных на рисунке 6 окон, подробно изложены в методике расчета СД.

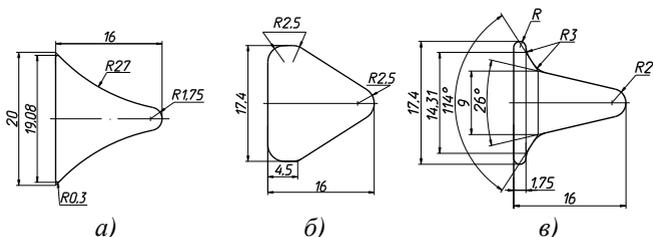


Рисунок 7 – Варианты исполнения профиля окна в направляющих дросселя горячего РД191:

а) – профиль №1, б) – профиль №2, в) – профиль №3

Также во второй главе приведены примеры, демонстрирующие возможность использования при разработке СД методик проектирования дросселирующих окон различных профилей других агрегатов регулирования. На примере дросселя (рисунок 2) с помощью аналитического и трехмерного моделирования было проведено расчетное исследование по определению влияния профиля дросселирующих окон сложной формы на их рабочие характеристики. Цель этих расчетов заключалась не только в подборке расчетным путем более «пологой» характеристики дросселя по сравнению с имеющейся его характеристикой, позволяющей исключить накопление ошибки в алгоритме настройки двигателя, но и в определении оптимального вида этой характеристики, а также в экспериментальной проверке предложенных методов расчета. В ходе данных работ были определены геометрические параметры трех расчетных профилей окон дросселя (рисунок 7), обеспечивающие законы изменения перепадной характеристики дросселя, представленные на рисунке 8.

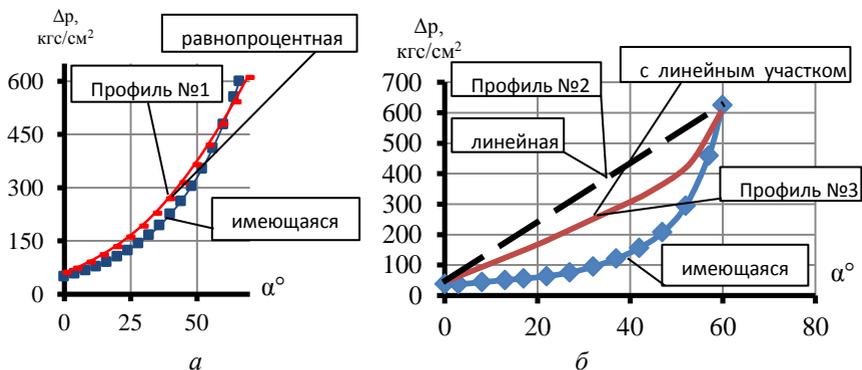


Рисунок 8 – Характеристики дросселя, использованные при аналитическом (а) и трехмерном (б) моделировании

На рисунке 9 приведены результаты трехмерного расчета дросселя, а

именно: абсолютное давление и распределение скорости рабочего тела при положении валика, соответствующего 0° и 64° по шкале полумуфты (см. рисунок 2), которые наглядно демонстрируют, как изменяются давление и скорость потока компонента при перемещении рейки дросселя из одного крайнего положения в другое, т.е. при открытых и закрытых дросселирующих окнах.

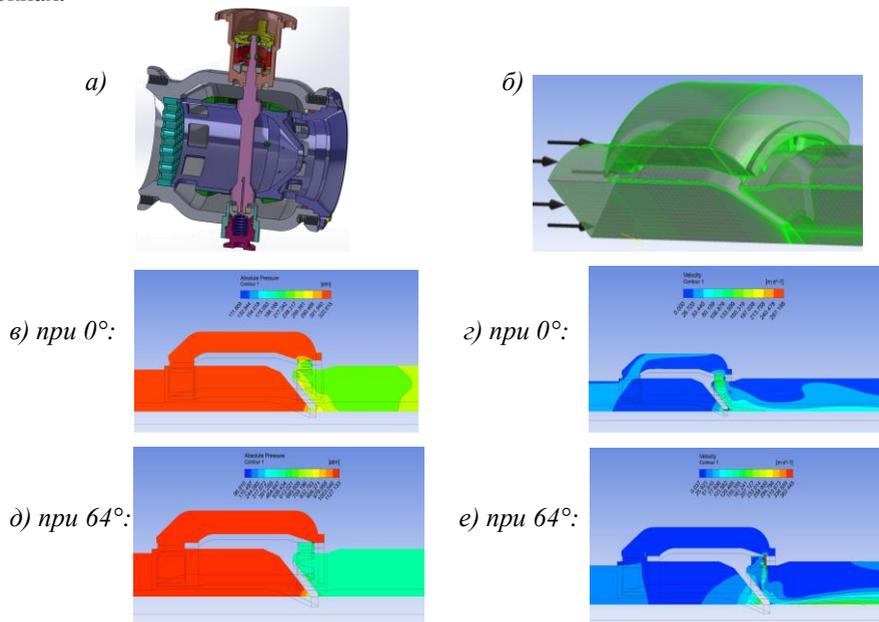


Рисунок 9 – Абсолютное распределение давления (в, д) и распределение скорости (г, е) при открытых (в, г) и закрытых (д, е) дросселирующих окнах: а – трехмерная геометрическая модель и б – сеточная модель дросселя РД191

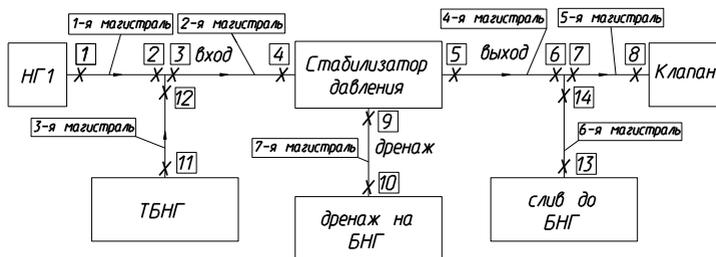


Рисунок 10 – Расчетная схема подвода и отвода гидромагистралей СД

На рисунках 10, 11 представлены расчетные схемы, использованные при составлении математической модели и инженерной программы расчета СД ЖРД. Это схема подвода и отвода гидромагистралей СД в системе

двигателя (рисунок 10) и расчетная схема течения рабочего тела в СД (рисунок 11).

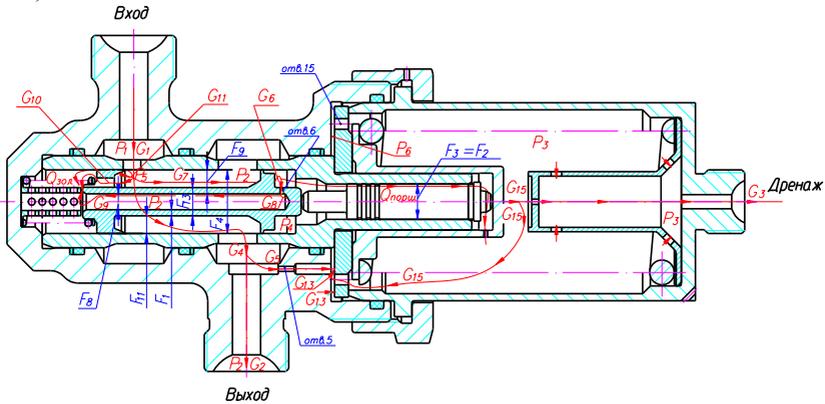


Рисунок 11 – Расчетная схема течения рабочего тела в СД

Основные уравнения математической модели СД ЖРД:

– уравнение подвижных частей СД (см. рисунки 1, 11):

$$m \cdot \frac{du}{dt} + e \cdot u + k_2 \cdot (h + x_{n2}) - k_1 \cdot (h + x_{n1}) = (F_4 + F_5(h)) \cdot p_2 - (F_4 - F_3) \cdot p_4 - F_{14} \cdot p_3 - F_5(h) \cdot p_5 + (F_{14} - F_2) \cdot p_6, \quad (1)$$

где h – перемещение золотника 9;

u – скорость перемещения подвижных частей стабилизатора;

m – масса движущихся частей стабилизатора;

e – коэффициент вязкого трения золотника 9;

k_1, k_2 – жесткость пружины 8 и 6, соответственно;

x_{n1}, x_{n2} – предварительное поджатие пружины 8 и 6, соответственно;

$F_4, F_5, F_3, F_{14}, F_2$ – площади;

p_2, p_3, p_4, p_5, p_6 – давления.

– уравнение движения рабочего тела через внутренние отверстия СД:

$$p_i = p_i - \xi_i \cdot G_i \cdot |G_i| - j_i \cdot \frac{dG_i}{dt}, \quad (2)$$

$$j_i = \frac{l_i}{\frac{\pi}{4} \cdot d_i^2}, \quad \xi_i = \frac{1}{2 \cdot \gamma \cdot \left(\mu_i \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_i^2 \right)^2}, \quad (3)$$

где i – индекс, обозначающий конкретное отверстие;

μ_i – коэффициент расхода конкретного отверстия;

d_i, l_i – диаметр и длина конкретного отверстия;

G_i – весовой расход через конкретное отверстие.

– балансы расходов:

$$G_4 = G_2 + G_3, \quad (4)$$

$$G_6 = \gamma \cdot (F_4 - F_3) \cdot u - \frac{V_4}{c_4^2} \cdot \frac{dp_4}{dt}, \quad (5)$$

$$G_3 = G_{14} - G_{15} - \frac{V_3}{c_3^2} \cdot \frac{dp_3}{dt}, \quad (6)$$

$$G_5 = G_{13} - G_{15} + \frac{V_6}{c_6^2} \cdot \frac{dp_6}{dt}, \quad (7)$$

$$G_{14} = \gamma \cdot F_{14} \cdot u, \quad (8)$$

$$G_{13} = \gamma \cdot (F_{14} - F_2) \cdot u, \quad (9)$$

$$G_6 = G_8 + G_9, \quad (10)$$

$$G_8 = \gamma \cdot F_8 \cdot u, \quad (11)$$

$$G_7 = \gamma \cdot (F_4 - F_{13}) \cdot u, \quad (12)$$

$$G_{12} = G_{10} + G_9, \quad (13)$$

$$G_{11} = \gamma \cdot F_{11} \cdot u, \quad (14)$$

$$G_{12} = \gamma \cdot F_9 \cdot u, \quad (5)$$

$$G_1 = G_4 + G_7 + G_{10} - G_{11} + \frac{V_2}{c_2^2} \cdot \frac{dp_2}{dt} + G_{\text{зол.}} + G_{\text{порш.}}, \quad (16)$$

где V_2 – объем емкости под давлением p_2 ;

c_2 – эквивалентная скорость звука в объеме V_2 .

– уравнения движения в магистралях с учётом сжимаемости рабочего тела (жидкости), т.е. с учётом акустических волн:

1. Уравнение сохранения массы:

$$\frac{\partial \rho \cdot F}{\partial t} + \frac{\partial \rho \cdot u \cdot F}{\partial x} = 0, \quad (17)$$

где ρ – массовая плотность рабочего тела;

F – проходная площадь;

2. Уравнение сохранения импульсов (уравнение Ньютона)

$$\frac{\partial \rho \cdot F}{\partial t} + \frac{\partial (p + \rho \cdot u^2) \cdot F}{\partial x} = \varphi + p \cdot \frac{\partial F}{\partial x}, \quad (18)$$

где φ – потери на трение;

p – давление (статическое).

3. Уравнение состояния рабочего тела:

$$\frac{\partial p}{\partial \rho} = c^2. \quad (19)$$

В заключительной части главы сформированы следующие **методические рекомендации**, которыми необходимо руководствоваться при разработке СД для ЖРД:

– выбор схемы агрегата зависит от условий его работы. Для двигателей ЖРД больших тяг оптимальной для стабилизаторов давления является золотниковая схема, так как она, в отличие от других конструктивных схем

способна выдерживать высокие значения перепадов давления рабочего тела (до ~ 600 кгс/см²), относительно проста в изготовлении, в ней практически отсутствует трение, имеет меньшее количество дополнительных требований к параметрам чувствительных элементов, по сравнению с мембранной схемой, исключает возникновение гидравлического удара при закрытии, менее чувствительна к загрязнителям рабочего тела в отличие от СД клапанного типа;

- необходимо проводить целый комплекс расчетов: расчет его основных конструктивных параметров, утечек и влияния гидравлических характеристик отводящих и подводящих магистралей СД для исключения ошибок при настройке агрегата;

- в зависимости от требований, предъявляемых к СД (уровня входных, выходных давлений и расходов), профиль его дросселирующих окон может быть сложной или простой формы;

- расчет пружины – задающего и самого нагруженного элемента СД – должен основываться на жестких требованиях к стабильности ее силовой характеристики, допускам формы и геометрическим параметрам пружины, что позволит исключить возникновение дополнительных напряжений в пружине при ее эксплуатации и обеспечить высокую точность настройки агрегата;

- величина зазоров в золотниковой паре должна выбираться с учетом физико-механических свойства материала, из которого она изготавливается, и расчета деталей золотниковой пары. Расход компонента через зазоры не должен превышать величины минимального расхода через СД.

В **третьей главе** изложены результаты обработки разработанных СД и результаты экспериментальных исследований по определению влияния конструктивных параметров и гидравлических характеристик подводящих и отводящих магистралей СД на его рабочие характеристики. Приведены особенности автономных испытаний СД и результаты испытаний СД в составе двигателей РД181, РД191. Представлены результаты апробации программы расчета СД на практике, а также результаты исследования по определению влияния профиля дросселирующих окон на рабочие характеристики агрегатов регулирования на примере дросселя и регулятора расхода РД191. Изложены результаты трехмерного расчета СД 15Д285.

На рисунке 12 представлена упрощенная схема и фото гидравлического стенда, на котором проводились испытания стабилизаторов. Данный стенд позволяет воспроизводить широкий диапазон давлений на входе в стабилизатор – до 550 кгс/см². Рабочее тело на стенде – вода. Необходимый уровень давления на входе в стабилизатор обеспечивается центробежным насосом. Фактический расход воды через СД измеряется по показаниям расходомера.

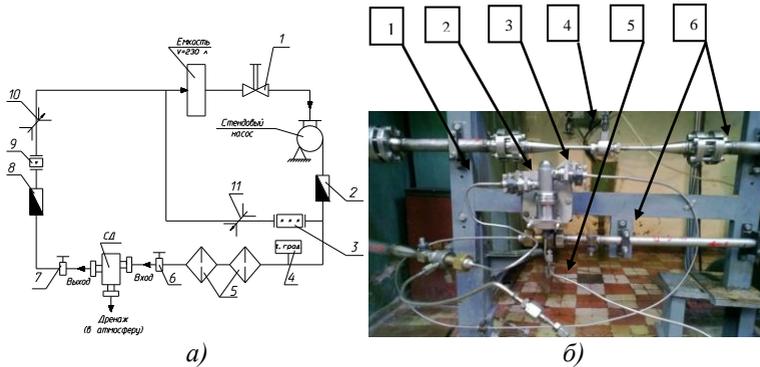


Рисунок 12 – Упрощенная схема и фото гидравлического стенда:
 а) *схема стенда*: 1 – вентиль; 2, 8 – расходомер; 3 – блок жиклеров; 4 – термометр сопротивления; 5 – фильтр; 6, 7 – кольцевая камера; 9 – жиклер; 10, 11 – дроссель;
 б) *фото стенда*: 1 – выходная магистраль; 2 – СД; 3 – входная магистраль; 4 – расходомер; 5 – дренажная магистраль; 6 – стендовые трубопроводы

На рисунке 13 приведен вид рабочих характеристик СД, определяемых при проведении модельных испытаний. Рабочая характеристика СД – это зависимость выходного давления ($p_{\text{вых}}$) от входного ($p_{\text{вх}}$) при различных расходах (G).

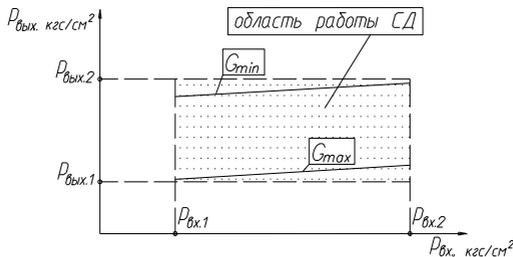


Рисунок 13 – Характеристики одноступенчатого СД золотникового типа

В ходе испытаний были получены характеристики стабилизатора давления для следующих схем подключения подводящих и отводящих магистралей:

- 1) без подводящих и отводящих магистралей в стендовой обвязке;
- 2) с входной и выходной магистралью;
- 3) с дренажной магистралью;
- 4) с входной, выходной и дренажной магистралью.

Проводились также испытания СД в расширенном диапазоне входных давлений и расходов, а также испытания на воспроизводимость его ха-

рактических после испытаний на тряску, вибрацию и воздействия отрицательных и положительных температур ($\pm 50^{\circ}\text{C}$).

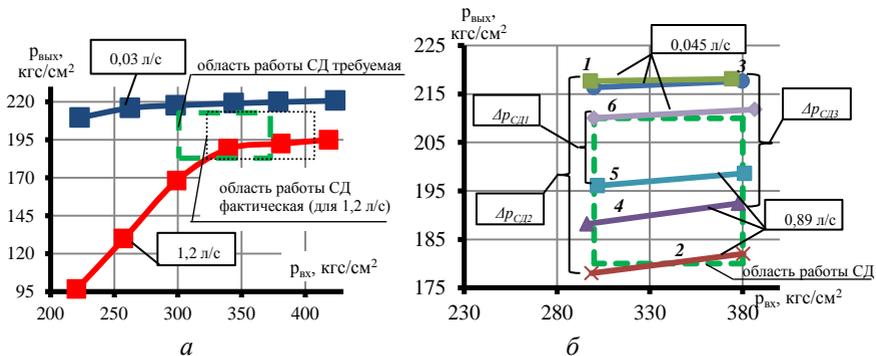


Рисунок 14 – Экспериментальные характеристики СД, полученные при испытаниях с подводящими и отводящими магистралями: *а* – в расширенном диапазоне давлений и расходов; *б* – в сравнении с характеристиками СД, полученными при испытаниях без них:

1, 2 – СД с входной ($d_{y \text{ вх}}=6$ мм), выходной ($d_{y \text{ вых}}=6$ мм) и дренажной ($d_{y \text{ дренаж}}=4$ мм) магистралями; 3, 4 – СД с входной ($d_{y \text{ вх}}=6$ мм), выходной ($d_{y \text{ вых}}=8$ мм) и дренажной ($d_{y \text{ дренаж}}=4$ мм) магистралями; 5, 6 – СД без подводящих и отводящих магистралей

На рисунке 14б приведены основные результаты испытания СД с подводящими и отводящими магистралями в сравнении результатами, полученными без них. В рамках данных испытаний проводился дополнительный эксперимент, цель которого заключалась в определении влияния внутреннего диаметра выходного трубопровода с 6 до 8 мм на характеристики СД, при условии неизменности его длин и геометрических размеров входного и дренажного трубопроводов.

Из рисунка видно, что подводящие и отводящие магистрали существенно образом влияют на характеристики СД:

- наличие этих магистралей приводит к увеличению диапазона выходных давлений между рабочими характеристиками СД ($\Delta P_{\text{СД}}$) при сравнении с диапазоном выходных давлений между рабочими характеристиками СД ($\Delta P_{\text{СД}}$), полученными без подводящих и отводящих магистралей;

- значение внутреннего диаметра выходного трубопровода влияет на величину диапазона выходных давлений между рабочими характеристиками СД: чем больше диаметр выходного трубопровода, тем меньше потери давления в нем и тем меньше диапазон выходных давлений между характеристиками СД;

- увеличение внутреннего диаметра выходного трубопровода не сказывается на уровне выходного давления, полученного на малых расходах.

Результаты испытаний СД на воспроизводимость его рабочих характеристик, полученных при нормальных условиях окружающей среды, после испытаний в условиях, которые максимально приближены к условиям работы этого агрегата на двигателе, т.е. после температурных испытаний и испытаний на тряску и вибрацию, показали, что работоспособность СД после воздействия таких условий не изменилась и характеристики СД воспроизводятся на уровнях выходных давлений, полученных до проведения этих испытаний.

Результаты испытаний СД с подводными и отводящими магистралями в расширенном диапазоне давлений и расходов, представленные на 14а рисунке, показали (при сравнении с рисунком 14б характеристики 3, 4) что:

- рабочие характеристики СД, полученные при расходах 0,045 и 0,03 л/с, располагаются на одном уровне выходного давления (~ 219 кгс/см²). Объясняется это тем, что при таких малых расходах площадь проточной части дросселирующих окон очень мала (т.е. окна практически закрыты) и агрегат работает на утечках через зазор между элементами золотниковой пары, значение которого постоянно, поэтому уменьшение расхода не приводит к изменению уровня выходного давления;
- рабочие характеристики СД, полученные при расходе 1,2 л/с, по уровню выходного давления располагаются выше на ~ 4 кгс/см², чем характеристики, полученные при расходе 0,89 л/с. Кроме этого, фактическая область работы СД при расходе 1,2 л/с сместилась в сторону более высоких входных давлений.

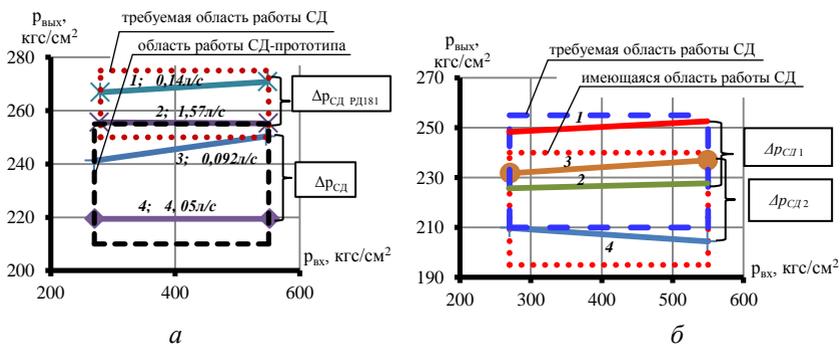


Рисунок 15 – Сравнительный график результатов испытаний СД:

- а – СД - прототип ($d_{норм.}=10$ мм) (3, 4) и СД РД181 ($d_{норм.}=9,5$ мм) (1, 2);
- б – СД РД191 имеющейся (3, 4) и СД РД191 измененной конструкции (1, 2)

На рисунке 15 приведены результаты испытаний по определению влияния площади чувствительного элемента и силовой характеристики пружины на характеристики СД. Из них видно, что уменьшение площади чувствительного элемента приводит к увеличению уровня выходного давления

как на малых, так и на больших расходах, и уменьшению диапазона между характеристиками – Δp_{CD} , а уменьшение усилия пружины приводит к эквидистантному снижению уровня выходных давлений.

На рисунке 16 представлены результаты исследований по определению влияния профиля дросселирующих окон на рабочие характеристики дросселя двигателя РД191, а конкретно, виды рабочих характеристик, полученные в ходе его модельных испытаний с тремя вариантами исполнения этих окон, в сравнении с расчетными.

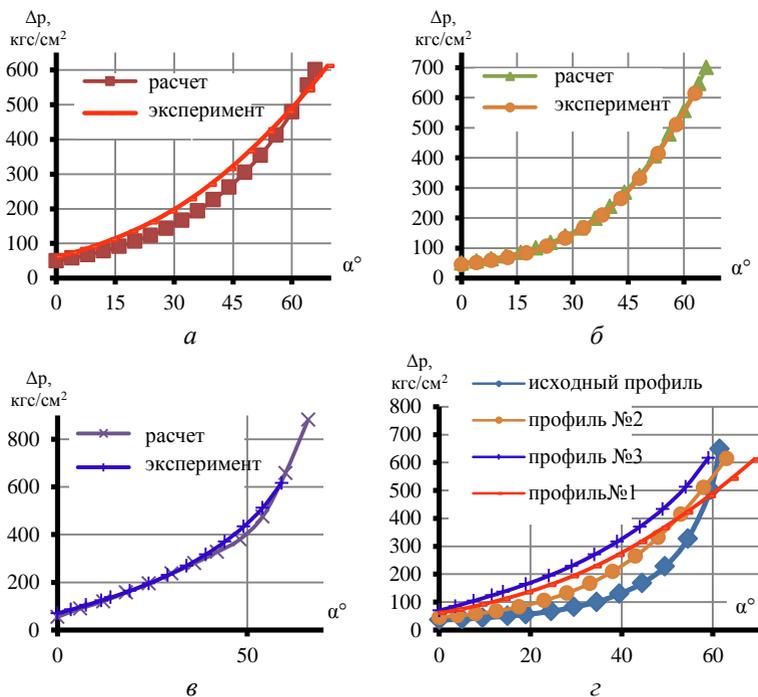


Рисунок 16 – Расчетные и экспериментальные характеристики дросселя горячего двигателя РД191:

a, б, в – сравнение расчетных и экспериментальных характеристик; *з* – экспериментальные характеристики в сравнении с имеющейся характеристикой (см. рисунок 8)

Из рисунка 16 видно, что наибольшая сходимость расчетных и экспериментальных значений у характеристики, обеспечиваемой профилем окна №2. Относительное расхождение значений не более 1,25%. Но эта характеристика не решает поставленной задачи, так как в диапазоне стационарных режимов работы двигателя, она имеет большую крутизну, в отличие от харак-

теристик, обеспечиваемых профилями окон №2 и №3. Несмотря на то, что сходимость расчетных и экспериментальных характеристик, обеспечиваемых профилями окон №2 и №3, меньше и составляет ~ 6...13%, вид этих характеристик близок к линейным в диапазоне стационарных режимов (до $\Delta p \approx 300$ кгс/см²) работы двигателя.

В целом полученные результаты работ, представленные на рисунке 16, доказали эффективность предложенных методик и используются при расчете профилей окон агрегатов регулирования.

На рисунке 17 приведены, в качестве примера, результаты испытаний разработанных СД в составе двигателей РД181 и РД191. Как видно результаты испытаний – положительны, СД обеспечили требуемый уровень выходного давления на двигателях.

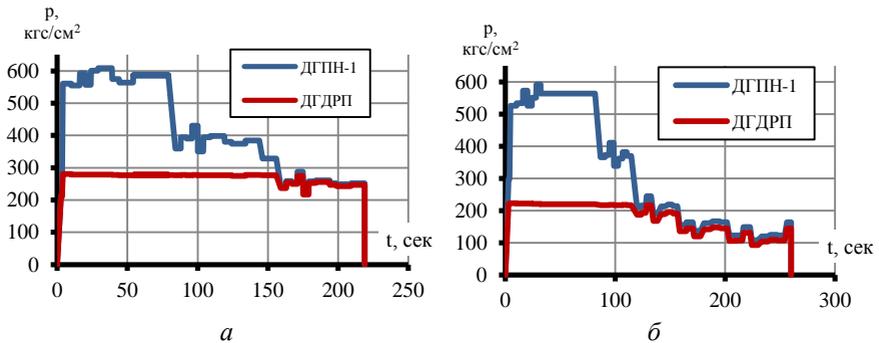


Рисунок 17 – Результаты огневых испытаний СД в составе двигателя РД181 (а), РД191 (б)

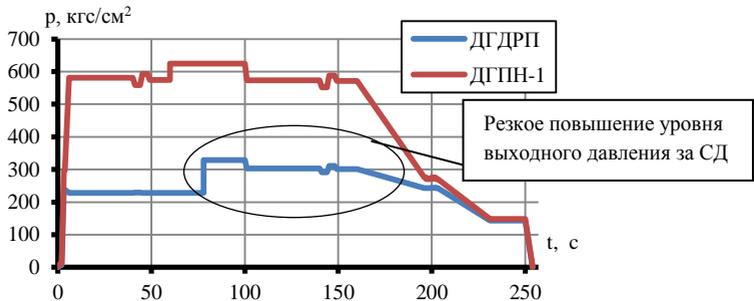
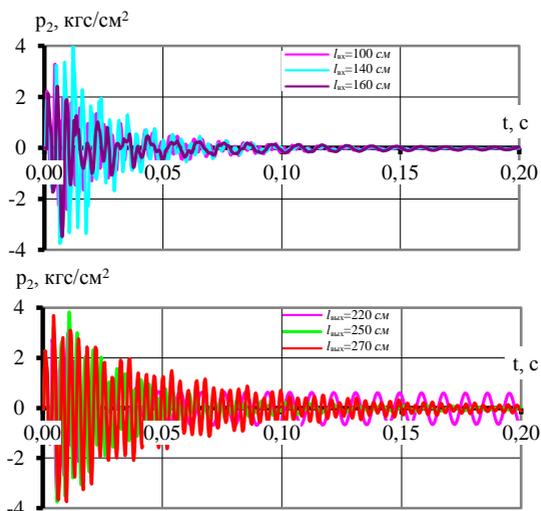
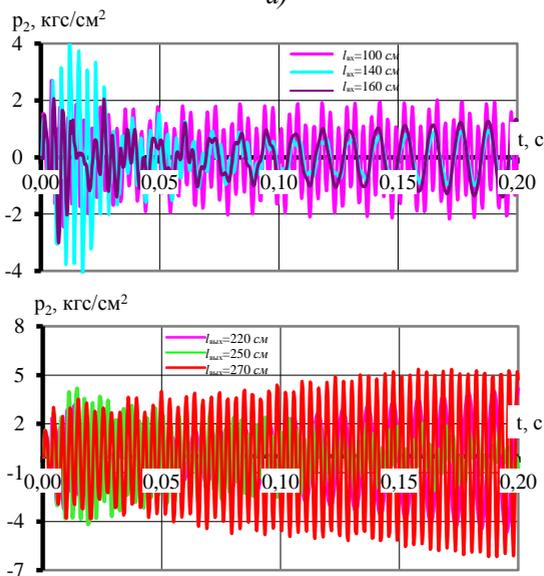


Рисунок 18 – Случай нештатной работы СД в составе РД191

Программа расчета СД апробировалась при определении причин нештатной работы СД РД191 (см. рисунок 18). Результаты расчетов, проведенных с ее помощью, представлены на рисунке 19.



а)



б)

Рисунок 19 – Динамический переходный процесс с учетом акустических волн в магистралях СД при перепаде давления на жиклере 180 (а) и 60 (б) кгс/см² и изменении длины входной ($l_{вх}$) и выходной ($l_{вых}$) магистрали

Расчеты переходных динамических процессов проводились при воз-

мушении давления в месте отбора (т.е. за насосом горючего первой ступени) скачком (вида $a=A_0 \cdot \cos \omega t \cdot e^{-t/\Delta t}$). Варьировался перепад на выходном жиклере (рисунок 10, шайба 7), длина входной и выходной магистрали.

По результатам этого расчета было определено, что для обеспечения устойчивости процесса стабилизации необходимо уменьшить сопротивление входного жиклера, снизив перепад на нем до 60 кгс/см^2 . Данное условие было выполнено и возникновение автоколебаний на частоте около 300 Гц в дальнейшем было исключено. Об этом свидетельствуют результаты последующих испытаний двигателя РД191, представленные в диссертации.

Далее на рисунках 20 – 23 представлены результаты трехмерных расчетов процесса стабилизации СД 15Д285. Проверка результатов расчетов осуществлялась по экспериментальным данным (рисунок 20), полученным в ходе модельных испытаний стабилизатора на воде.

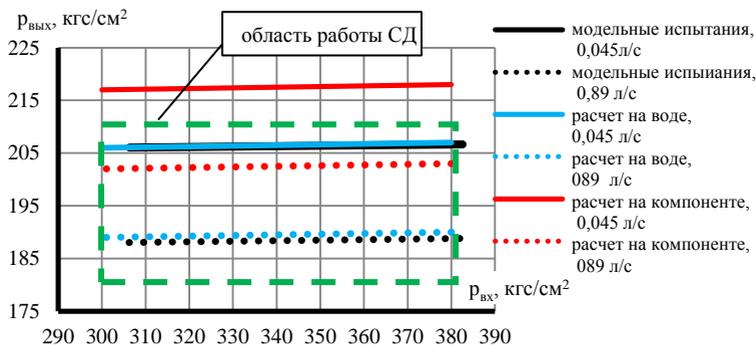


Рисунок 20 – Результаты модельных испытаний и трехмерных расчетов СД

На рисунке 20 представлены результаты трехмерных расчетов СД на компоненте – НДМГ (при давлении в дренаже 12 кгс/см^2 , которое возникает в дренажной полости СД при его работе в составе двигателя) и на воде (при давлении в дренаже 1 кгс/см^2 , которое имеет место быть при штатных модельных испытаниях СД) в сравнении с результатами штатных модельных испытаний СД (т.е. без подводящих и отводящих магистралей).

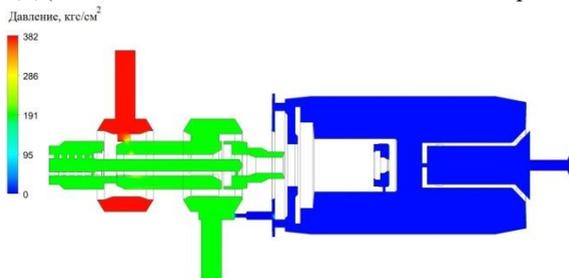


Рисунок 21 – Распределение давления в СД

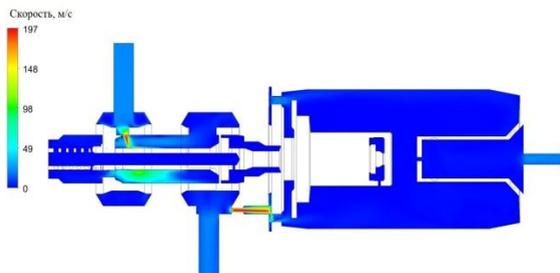


Рисунок 22 – Скорость воды в СД

На рисунках 21 и 22 показаны распределение давления в стабилизаторе и характерные скорости воды соответственно при давлении на входе 380 кгс/см^2 , расходе на выходе $0,89 \text{ л/с}$ и давлении на дренаже в 1 кгс/см^2 .

Динамическая вязкость воды в расчетах постоянна и равна $0,0008899 \text{ Па}\cdot\text{с}$. Давление насыщенного пара – 3574 Па . Плотность водяного пара – $0,02308 \text{ кг/м}^3$. Стенки с прилипанием.

Граничные условия при расчетах на компоненте идентичны условиям при расчетах с водой за исключением давления на дренаже, которое в этом случае равно 12 кгс/см^2 . Динамическая вязкость компонента для модели постоянна и равна $0,0005460 \text{ Па}\cdot\text{с}$.

По результатам расчетов получено следующее:

- результаты расчета соответствуют данным полученным в ходе штатных модельных испытаний СД (при давлении в дренаже 1 кгс/см^2) и входе модельных испытаний с подводящими и отводящими магистралями (при давлении в дренаже 12 кгс/см^2);

- характеристики стабилизатора зависят, в основном, от расхода на выходе из стабилизатора и давления на дренаже. При малых расходах основной поток поступает на дренаж, поэтому течение зависит только от перепада давлений на входе и на дренаже.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе использования системного подхода при проектировании и создании агрегатов регулирования ЖРД больших тяг на примере стабилизатора давления автором:

1. Проведено исследование и анализ конструкций агрегатов регулирования ЖРД (стабилизатора давления, дросселя и регулятора расхода), применяемых в отрасли, и имеющих одну конструктивную схему – золотниковую. Указаны конструктивные общности этих агрегатов.

2. На основе системного подхода разработана математическая модель расчета СД и составлена к ней расчетная схема течения рабочего тела в стабилизаторе давления с учетом подводящих и отводящих в системе гидро-

питания рулевых приводов двигателя.

3. Разработаны методика и программа расчета одноступенчатого СД ЖРД золотникового типа, основанная на системном подходе к его проектированию, и позволяющая проводить статические расчеты и расчеты динамических переходных процессов с учетом акустических волн в магистралях, учитывать особенности конструкции СД (профиль дросселирующих окон, силовые характеристики пружин и т.д.), влияние гидродинамических характеристик подводящих и отводящих магистралей в системе гидропитания рулевых приводов двигателя и утечки через рабочие поверхности золотниковой пары СД на его рабочие характеристики. Данный программно-математический комплекс, учитывающий перечисленные параметры, ранее не использовался при проектировании и создании одноступенчатых золотниковых СД ЖРД больших тяг.

4. Программа расчета СД апробирована на практике при определении причин нештатной работы СД РД191. Правильность проведенных расчетов подтверждена положительными результатами последующих огневых испытаний СД в составе двигателя РД191.

5. Разработаны методические рекомендации по проектированию СД ЖРД, которые на основе принципов преемственности позволяют создавать новые конструкции агрегата, адаптированные под конкретные условия работы путем его модернизации (например, путем изменения, усовершенствования или улучшения конструктивных параметров основных элементов агрегата в зависимости от требований, предъявляемых к виду его рабочих характеристик).

6. Разработана КД на СД 15Д285, РД181 – чертежи и технические условия для проведения модельных испытаний.

7. Проведены расчетные (включая 3D - моделирование), исследовательские и опытно-конструкторские работы по определению влияния конструктивных параметров СД (профиля дросселирующих окон, пружины, площади чувствительного элемента) и гидравлических характеристик подводящих и отводящих магистралей СД на их рабочие характеристики.

8. По результатам трехмерных расчетов получено распределение параметров течения (давления, скорости) по проточной части стабилизатора, в том числе значение давления на выходе из стабилизатора, расход на дренаже, смещение золотника и гидродинамические значения сил на подвижных элементах стабилизатора для нескольких вариантов граничных условий для воды и компонента. Результаты расчета соответствуют данным полученным в ходе штатных модельных испытаний СД и входе модельных испытаний с подводящими и отводящими магистралями.

9. Положительные результаты экспериментальной отработки стабилизаторов давления 15Д285, РД181, РД191, дросселя РД191 и регулятора расхода для двигателя РД191М подтвердили правильность использованных

при их проектировании теоретических расчетов и принятых конструкторских решений.

10. Полученные с использованием системного подхода результаты экспериментальных исследований одноступенчатых золотниковых СД ЖРД больших тяг, включающие в себя исследования по определению влияния конструктивных параметров и гидродинамических характеристик подводящих и отводящих магистралей СД, актуальны, так как дают более полное и целостное представление об этих агрегатах, и представляют практический интерес при проектировании новых и модернизации внедренных агрегатов регулирования ЖРД.

11. Использование системного подхода при проектировании СД ЖРД больших тяг позволит повысить эффективность проведения научно-исследовательских работ и опытно-конструкторских работ при создании новых образцов СД и модернизации внедренных, а также качество результатов разработок.

12. Результатом использования системного подхода, раскрытого в данной работе, стал спроектированный, изготовленный и прошедший испытания на двигателе одноступенчатый золотниковый стабилизатор давления 15Д285. Такой подход и оригинальное конструктивное решение позволило создать в кратчайшие сроки и с минимальными затратами агрегат, сочетающий в себе простоту конструкции с минимальными габаритами, и обладающий высоким уровнем надежности. Результаты, полученные в ходе создания СД 15Д285, использовались при модификации СД двигателя РД191 и разработке СД двигателя РД181. Конструкции указанных СД внедрены и успешно эксплуатируются в современных ЖРД: 15Д285, РД191, РД181.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные труды, опубликованные в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:

1. Крапивных Е.В. Влияние гидравлических характеристик подводящих и отводящих магистралей на статические характеристики и работоспособность стабилизатора давления ЖРД [Электронный ресурс]. – Журнал «Труды МАИ». – 2015 – №80. – <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=56924>.

2. Громыко Б.М., Кошелев И.М., Крапивных Е.В. Разработка математической модели стабилизатора давления.// Труды НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко. – 2015г. – №32. – С.75 – 90.

3. Громыко Б.М., Крапивных Е.В., Теленков А.А., Тюрин А.А. Экспериментальная оценка влияния конструктивных параметров стабилизатора давления на его статические характеристики и работоспособность.// Труды НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко. – 2015 – №32. – С.181 – 197.

4. Бабкин В. П., Громыко Б. М., Крапивных Е. В., Ромасенко Е. Н., Теленков А. А. Разработка конструкции дросселя горючего для двигателя РД191 с пологой характеристикой. // Труды НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко – 2016 – №33. – С.204 – 216.

**Другие научные труды, опубликованные по теме диссертации.
Статьи в сборниках и трудах конференций:**

1. Цыганова (Крапивных) Е.В. Разработка системного подхода к проектированию и созданию агрегатов регулирования ЖРД больших тяг и исследования влияния конструктивных параметров на работоспособность. // Сборник аннотаций работ V Международного межотраслевого молодежного научно-технического форума «Молодежь и будущее авиации и космонавтики – 2013» – Москва, 2013., С.5 – 8.

2. Гребнев М. Ю., Громыко Б. М., Крапивных Е. В., Теленков А. А. Выбор конструктивных параметров стабилизаторов давления ЖРД, обеспечивающих постоянство давления. // Сборник материалов VI Всероссийской конференции по проблемам новых технологий, посвященной 90-летию со дня рождения академика В. П. Макеева – Миасс, 2014, С.31 – 41.