

На правах рукописи



Щуровский Юрий Михайлович

**Исследование особенностей построения и выбора характеристик
регулируемых электроприводных систем смазки ГТД**

Специальность 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели
и энергоустановки летательных аппаратов»

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в государственном научном центре Российской Федерации, федеральном автономном учреждении «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Гуревич Оскар Соломонович

Официальные оппоненты: **Кретинин Геннадий Валентинович**, доктор технических наук, профессор, ОКБ им. А. Люльки – филиал ПАО «ОДК-УМПО», главный специалист по перспективным разработкам

Вавилов Вячеслав Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», доцент кафедры «Электромеханика»

Ведущая организация: Акционерное общество «ОДК-Авиадвигатель»

Защита состоится 06 декабря 2021 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.08, созданного на базе ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»:

<https://mai.ru/upload/iblock/5dd/zw8um70qhx7a9r0b76aum75cx1r9gwcw/02-SHCNurovskiy-Dissertatsiya.pdf>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.125.08,
доктор технических наук, профессор

Зуев Юрий Владимирович



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Применение электрических технологий в системах газотурбинного двигателя (ГТД) рассматривается как перспективное направление улучшения их характеристик (мировой тренд). Реализация такого подхода связана с построением систем ГТД с электрическим приводом агрегатов, что позволит в итоге создать двигатель без коробки приводов агрегатов (КПА). Одной из систем этого двигателя является система смазки с электроприводными насосами, управление режимами которой становится дополнительной функцией цифровой системы автоматического управления ГТД. Применение электроприводных насосов позволит повысить качество смазки и ресурс подшипников опор роторов ГТД, обеспечить его надежный запуск при минусовой температуре воздуха, снизить безвозвратные потери масла, улучшить диагностирование и ремонтпригодность системы и др.

Мощность электроприводов (а) для привода насосов ограничена, что принципиально отличает такие системы от традиционных систем с приводом насосов от КПА двигателя, которая является источником практически неограниченной мощности для вращения насосов и устраняет взаимовлияние контуров нагнетания и откачки рабочей среды из-за жёсткой связи частоты вращения насосов с частотой вращения роторов ГТД.

В стационарных энергетических установках проблема выбора параметров электроприводов для вращения насосов системы смазки решается путём неоправданного завышения их мощности, приводящего к увеличению массы электроприводных насосов, неприемлемому для авиационного применения.

Имеющиеся результаты экспериментальных исследований систем смазки ГТД с электроприводными насосами (ЭСС) показали сложность происходящих в ней гидро-, газодинамических процессов, их недостаточную изученность в части влияния двухфазности рабочей среды, как на характеристики системы смазки, так и на её работоспособность, в том числе и на отключение электроприводов из-за их ограниченной мощности.

В связи с этим, актуальными научно-техническими задачами при создании ЭСС являются выбор законов управления и параметров электрических приводов, исследование влияния двухфазности рабочей среды на характеристики системы смазки, разработка методов экспериментального и расчётного исследования.

Степень разработанности темы исследования

Диссертационная работа посвящена вопросам построения ЭСС ГТД. Для традиционных систем смазки с приводом от КПА имеется целый ряд исследований, выполненных известными учёными и специалистами: Демидовичем В.М., Равиковичем Ю.А., Митиным Б.М., Аксёновым Н.К., Петровым Н.И., Гришановым О.А., Тряновым А.Е. и др. В них рассматриваются вопросы определения требований к подаче масла в двигатель, теплоподвода в масло в опорах роторов, влияния расстояния и угла установки масляных форсунок на теплосъём, выбора насосов и т.д. В то же время количество работ по ЭСС весьма ограничено.

Известны лишь некоторые схемные решения ЭСС для двигателей демонстраторов, однако нет работ, посвященных взаимосвязи физических

характеристик течения рабочей смеси и характеристик системы смазки и её устройств, таких как насосы и электроприводы. Перечисленные неизученные вопросы являются предметом исследования в настоящей диссертационной работе.

Объектом исследования является система смазки авиационного ГТД с регулируемым электроприводом насосов в тракте нагнетания жидкого масла в подшипники опор роторов, откачки из них масловоздушной смеси в маслобак и воздушно-масляной смеси в суфлёры.

Предметом исследования являются система смазки ГТД с электроприводными насосами, методы её экспериментального исследования и математического моделирования, законы управления электроприводными насосами, исследование влияния двухфазности рабочей среды на характеристики системы и выбор параметров электрических приводов.

Целью работы является разработка принципов построения, методов исследования и выбора характеристик ЭСС ГТД, что позволит разработать такие системы в обеспечение создания электрифицированного ГТД и «электрического» самолёта с двигателем реактивной тяги.

Задачи работы:

1. Анализ состояния и перспектив развития электроприводных систем смазки.
2. Определение принципов и схемного построения ЭСС ГТД.
3. Экспериментальное исследование влияния двухфазности рабочей среды на работу системы смазки и выбор характеристик электроприводов.
4. Создание методики выбора характеристик электроприводов ЭСС.
5. Разработка динамической математической модели ЭСС с учётом двухфазности рабочей среды.
6. Математическое моделирование для исследования и выбора характеристик системы смазки на установившихся и переходных режимах работы двигателя.
7. Разработка демонстрационной электроприводной системы смазки (ДЭСС).
8. Испытания и валидация ДЭСС.

Новизна результатов исследований

1. Принципы и схемное построение ЭСС для ГТД магистральных самолётов.
2. Особенности влияния двухфазности рабочей среды на характеристики ЭСС.
3. Методика выбора характеристик электропривода насосов ЭСС с учётом двухфазности рабочей среды, полётного цикла летательного аппарата, возможности работы электропривода в режиме перегрузки.
4. Динамическая математическая модель ЭСС, учитывающая влияние двухфазности рабочей среды на характеристики системы.
5. Способы управления электроприводными насосами системы смазки.

Практическая значимость результатов исследований

Разработанные методы построения, расчётного и экспериментального исследования систем смазки ГТД с учётом двухфазности рабочей среды, позволяют на этапе проектирования осуществлять исследования, необходимые для определения требований и выбора характеристик системы и её аппаратуры. Эффективность методов подтверждена при разработке и испытаниях демонстрационной системы смазки.

Результаты работы позволяют выполнить разработку систем смазки для перспективных электрифицированных ГТД, осуществить выбор их характеристик и конструкционных параметров, сократить сроки на предпроектные исследования и затраты на доводку системы.

Методология и методы исследования

Результаты работы получены при комплексном использовании расчётных и экспериментальных методов исследования. При этом структуры и карта течений двухфазных потоков определены разработанным методом визуально-спектрального анализа, динамические характеристики гидравлических трактов ЭСС исследованы методом задания возмущений по подаче насосов, а величина объёмного газосодержания - методом отсечки.

Разработанная динамическая математическая модель ЭСС базируется на уравнениях Навье-Стокса в одномерной постановке и теории двухфазного гомогенного течения. Она верифицирована по результатам испытаний на автономном и полунатурном стендах.

Достоверность результатов исследования основывается на:

- корректном использовании математических методов описания работы системы смазки;
- высоком уровне разработанной для проведения исследований математической модели системы и её идентификации;
- экспериментальных исследованиях на аттестованных стендах;
- удовлетворительной сходимости результатов численных расчётов и экспериментальных исследований;
- проверке полученных решений в испытаниях разработанной демонстрационной электроприводной системы смазки.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Принципы и схемное построение электроприводной системы смазки для ГТД магистральных самолётов.
2. Описание влияния на характеристики ЭСС двухфазности рабочей среды в гидравлических трактах системы.
3. Методика выбора характеристик электроприводов ЭСС.
4. Динамическая математическая модель гидравлических процессов в агрегатах системы смазки с учётом двухфазности рабочей среды.
5. Способы управления электроприводными насосами системы смазки.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы были доложены и обсуждены на:

- Международном семинаре «Проблемы авиационного двигателестроения» МАКС-2013 (Москва, 2013 г.);
- Международной молодёжной конференции «XII Королёвские чтения» (Самара, 2013 г.);
- Внутренней научно-практической конференции молодых ученых и специалистов ЦИАМ (Москва, 2014 г.);
- Научно-техническом конгрессе по двигателестроению (НТКД) при международном форуме двигателестроителей (МФД): НТКД-2014 (Москва, 2014 г.), НТКД-2016 (Москва, 2016 г.), НТКД-2018 (Москва, 2018 г.);

- Конгрессе международного совета по авиационным наукам (ICAS): ICAS-2014 (Санкт-Петербург, 2014 г.), ICAS-2016 (Тэджон, Южная Корея, 2016 г.);
- Международной научно-технической конференции (НТК) «Динамика и виброакустика машин 2014» (Самара, 2014 г.);
- Всероссийской НТК молодых ученых и специалистов «Новые решения и технологии в газотурбостроении» (Москва, 2015 г.);
- Международном аэрокосмическом конгрессе IAC'15 (Москва, 2015 г.);
- Всероссийской НТК «Авиадвигатели XXI века» (Москва, 2015 г.);
- Международной НТК «Проблемы химмотологии: от эксперимента к математическим моделям высокого уровня» (Москва, 2016 г.);
- Всероссийском молодёжном конкурсе научно-технических работ и проектов «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики» (Москва, 2016 г.);
- Международном симпозиуме по воздушно-реактивным двигателям (ISABE): ISABE-2017 (Манчестер, Великобритания, 2017 г.), ISABE-2019 (Канберра, Австралия, 2019 г.);
- НТК «Климовские чтения-2018. Перспективные направления развития авиадвигателестроения» (Санкт-Петербург, 2018 г.);
- Всероссийской НТК молодых ученых и специалистов «Авиационные двигатели и силовые установки» (Москва, 2019 г.).

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано 25 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 4 работы, получены 2 патента на полезную модель.

Вклад автора в проведенное исследование

В теоретическую часть работы: описание течения сжимаемой двухфазной смеси в трубопроводах и заполнения двухфазным потоком межзубовых впадин шестерённого насоса, определение структуры течения смеси в трубопроводах гидравлического тракта откачки систем смазки с шестерённым насосом.

В расчётную часть: формирование состава модулей динамической математической модели электроприводной системы смазки, их математическое описание, программирование и проведение расчётов.

В экспериментальную часть: личное участие в постановке и проведении экспериментальных исследований электроприводных насосов и системы смазки в целом, обработке экспериментальных данных и анализе результатов испытаний.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка условных обозначений, списка литературы из 139 наименований и приложения. Основное содержание работы изложено на 131 странице (включает 54 рисунка, 13 таблиц и 2 приложения).

Благодарности

Автор выражает искреннюю признательность и благодарность научному руководителю д-р техн. наук Гуревичу О.С., канд. техн. наук Гулиенко А.И. за помощь на всех этапах выполнения диссертации; инженерам Чернышову В.И., Малинкину В.В., Кустовой И.В., а также сотрудникам стендов ФАУ «ЦИАМ им. П.И.Баранова».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, определен объект и предмет исследования, приведены цель и основные задачи исследования, отражена научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, обоснована достоверность результатов исследования.

В первой главе дано описание рабочего процесса в системе смазки. Выполнен обзор схем систем смазки с приводом насосов от КПА и с электрическим приводом, методов экспериментального исследования, математических моделей. В обзоре показано, что для авиационных ГТД рассматриваются схемы, в которых все насосы располагаются на одном валу с электроприводом или схемы с отдельным вращением индивидуальным электроприводом нагнетающего и откачивающих насосов. В системах смазки демонстрационных ГТД и газотурбинных установок насосы вращаются, как правило, индивидуальными электроприводами.

Обозначены преимущества ЭСС относительно систем смазки с приводом от КПА, которые заключаются в: улучшении качества смазки подшипников на всех режимах работы двигателя, повышении их ресурса и надёжности запуска при минусовой температуре воздуха, снижении безвозвратных потерь масла и др.

Сформулированы задачи исследования.

Во второй главе сформулированы принципы построения ЭСС ГТД для магистральных самолётов, которые заключаются в:

- использовании электрического привода насосов;
- регулировании производительности насосов изменением частоты вращения электроприводов во всех трактах системы смазки;
- раздельном управлении частотой вращения насосов в трактах системы смазки: нагнетания, откачки и суфлирования;
- управлении режимами работы системы от САУ двигателя;
- компенсации отказов путём реконфигурации системы.

Отказоустойчивость ЭСС обеспечивается за счёт использования бесконтактного многофазного (5-6 фаз) электродвигателя, двухканального блока управления, вибродиагностики трансмиссии, резервирования датчиков положения ротора, взаимозаменяемости электроприводных насосов и других средств.

На базе этих принципов предложено схемное построение ЭСС для ТРДД магистральных самолётов (рисунок 1) и дано её описание. В предложенной системе нагнетающий насос и суфлёр приводятся индивидуальными электроприводами, в тракте откачки один электропривод обеспечивает вращение насосов, откачивающих масловоздушную смесь из КПА и опор компрессоров низкого (КНД) и высокого давления (КВД), а другой - вращение насосов, откачивающих масловоздушную смесь из опор турбин высокого (ТВД) и низкого давления (ТНД).

При работе двигателя масло из маслобака 1 по трубопроводу поступает в нагнетающий насос 2 с электроприводом 3 и, минуя масляный фильтр 4, проходит воздушно-масляный 6 и топливомасляный 7 теплообменники. Топливомасляный теплообменник имеет клапан перепуска 8. Затем масло поступает через фильтр «последнего шанса» 9 на смазку и охлаждение опор и зубчатых передач.

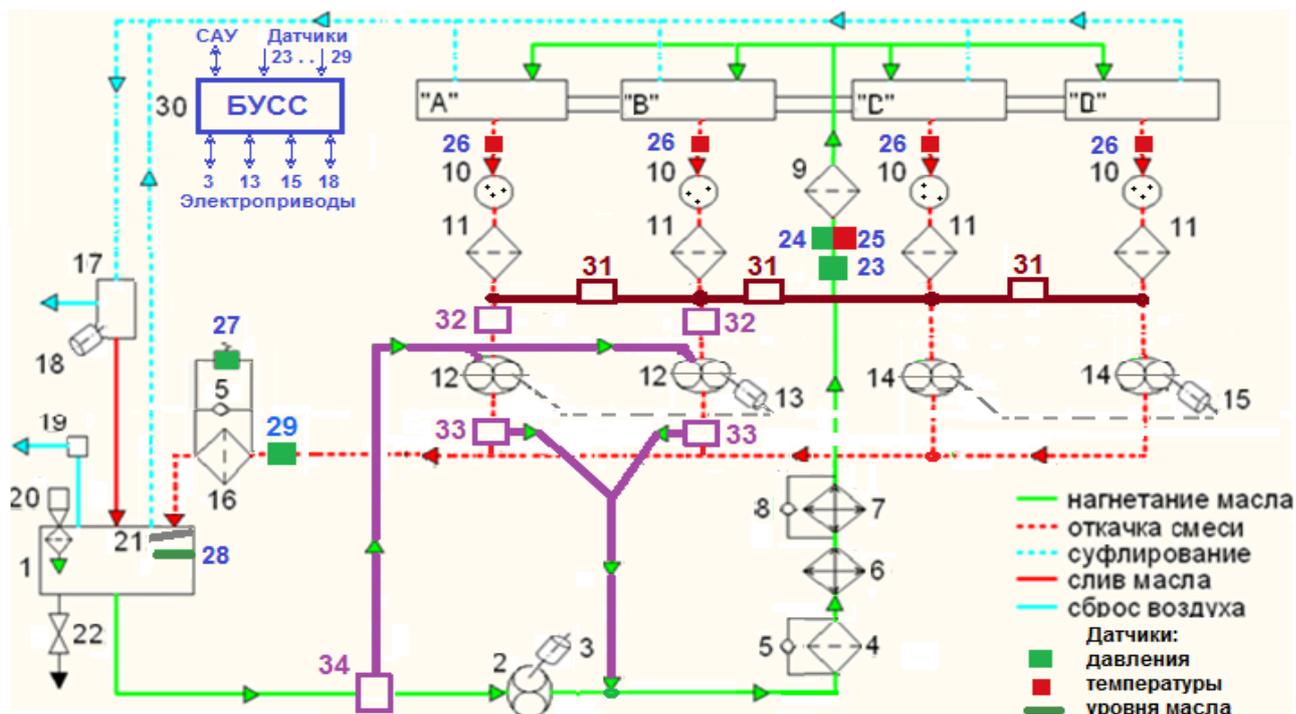


Рисунок 1. Схема отказоустойчивой электроприводной системы смазки ТРДД

Из опор “А” и “В” двигателя (условно «холодная» часть) масловоздушная смесь откачивается насосами 12 с электроприводом 13, а из опор “С” и “D” (условно «горячая» часть) – насосами 14 с электроприводом 15. Во входных штуцерах откачивающих насосов размещены магнитные сигнализаторы стружки 10 и защитные фильтры 11. Из них смесь поступает в фильтр 16 и далее в статический воздухоотделитель 21 и маслобак 1. В маслобаке имеется предохранительный клапан 19, который перепускает излишки воздуха на срез сопла. Для наземного обслуживания системы смазки предусмотрена заправка через заливную горловину 20 маслобака 1 и слив масла через кран 22. Фильтры 4 и 16 имеют клапаны перепуска 5. Внутренние полости опор и маслобака суфлируются через центробежный суфлер 17 с электроприводом 18 и баростатическим клапаном. В суфлере частицы масла отделяются из смеси и отводятся в маслобак, а воздух по наружному трубопроводу стравливается на срез сопла.

Система содержит следующие средства измерения и контроля: датчики давления 24, 29; датчики температуры 25, 26; датчик уровня масла в баке 28; сигнализатор минимального уровня давления масла 23 и сигнализатор максимального перепада на фильтре 27.

Отказ одного из электроприводов откачивающих насосов парируется переводом на режим увеличенной частоты вращения другого электропривода откачивающих насосов и открытием отсечных клапанов 31 на всех перемычках. В случае отказа нагнетающего насоса 2 в БУСС формируются команды на изменение режима работы электроприводов откачивающих насосов 13, 15 и на перекоммутацию клапанов 31...34. Функции нагнетающего насоса будет выполнять блок насосов 12 с электроприводом 13, а функции откачки – блок насосов 14 с электроприводом 15. Для обеспечения работоспособности ЭСС с возможностью реконфигурации при отказах потребуется 2-3х кратный запас по производительности насосов.

В третьей главе представлены результаты экспериментальной части работы на автономном стенде по исследованию влияния двухфазности рабочей среды на характеристики узлов ЭСС. Приведено описание стенда, использованных средств измерений, методики и объекта испытаний.

Определены расходная и мощностная характеристики электроприводного насоса при перекачке двухфазной среды. На рисунке 2 показано как при практически неизменных величинах объёмного расхода насоса Q_n и давлений на его входе $P_{вх}$ и выходе P_n происходит увеличение его гидравлической мощности $N_{изм}$, которое связано с увеличением газосодержания на входе в насос. Расчётные значения мощности $N_{расч}$ определены по формуле для насоса, перекачивающего жидкость: $N_{расч} = Q_n \Delta P / \eta$, где ΔP – перепад давления на насосе; η – КПД насоса. Газосодержание определялось методом отсечки потока и косвенно расчётом из уравнения для гомогенной скорости звука в смеси, которая определена экспериментально по переходному процессу при гидроударе.

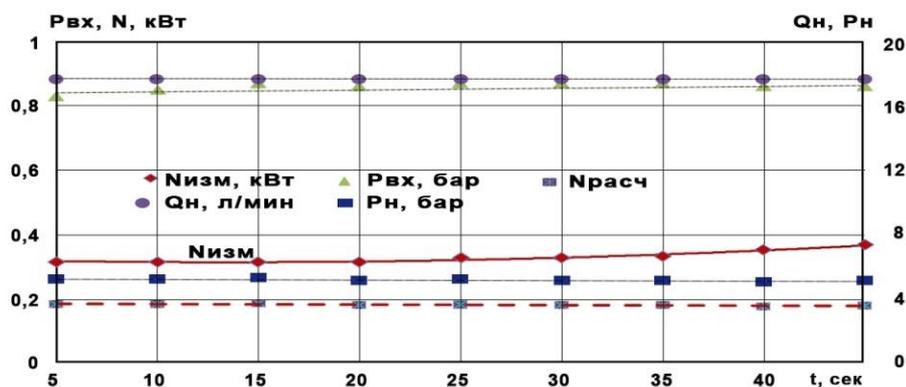


Рисунок 2. Изменение гидравлической мощности насоса с увеличением газосодержания в перекачиваемой среде

Для оценки влияния двухфазности рабочей среды на динамические свойства гидравлических трактов системы разработан метод, который заключается в проведении испытаний с заданием возмущения по производительности насоса, а не по давлению на его входе или выходе. На рисунке 3 показаны экспериментальные переходные процессы по давлению за насосом, который работал в режиме нагнетания масла или откачки двухфазной смеси. В режиме нагнетания (рисунок 3.а) на 139.5 секунде осуществлялось скачкообразное изменение прокачки насоса с минимальной на максимальную, а в режиме откачки (рисунок 3.б) – на 5 секунде переход с минимальной прокачки на максимальную и на 20 секунде обратно.

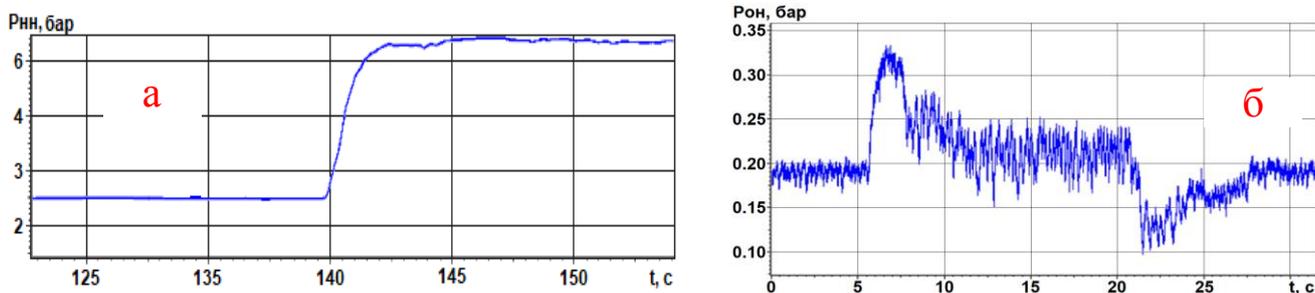


Рисунок 3. Переходные процессы по давлению на выходе насоса при скачкообразном изменении его производительности
а) режим нагнетания масла; б) режим откачки двухфазной смеси

Анализ процессов, представленных на рисунке 3, показал:

- в режиме нагнетания жидкого масла переходные процессы имеют аperiodический характер, время переходных процессов определяется, в основном, инерционными свойствами электропривода и составляет ~ 2 с;

- в режиме откачки двухфазной смеси переходные процессы имеют колебательный характер со значительным забросом параметров и временем переходного процесса равным ~ 10 с из-за изменения объёмного газосодержания и сжатия масловоздушной смеси.

На базе диаграмм структур потока двухфазной смеси в горизонтальных трубах Мамаева В.А. и Гужова А.И. определены характерные для работы системы смазки ГТД структуры потока: на рабочих режимах двигателя (от МГ до взлётного) формируется дисперсная структура течения, а на начальном этапе режимах запуска и конечного останова – расслоенная структура.

Разработан метод визуально-спектрального анализа течения двухфазной смеси при экспериментальных исследованиях ЭСС, который заключается в использовании фото-, видеосъёмки в прозрачных вставках трубопровода при малых выдержках и соответствующим освещении для контроля состояния смеси, а для увеличения информативности визуализации используются данные о спектре давления с датчика, который расположен за насосом далее по потоку. Достоинство метода в том, что он бесконтактный и не вносит изменений в исследуемое течение.

По результатам экспериментальных исследований установлено, что в тракт откачки поступает устойчивая масловоздушная смесь, которая обладает свойствами упругой сплошной среды. Это обосновывается, во-первых, фактом изменения цвета смеси вследствие уменьшения/увеличения размера газовых пузырьков без их коалесценции при повышении/снижении давления в тракте прокачки, что демонстрируют кадры течения смеси на входе и выходе насоса (рисунок 4а), снятые с момента включения насоса до его выхода на максимальный режим. На рисунке 4а в верхней части кадра располагается трубопровод на выходе насоса, а в нижней – на его входе. А во-вторых, низкой скоростью звука в смеси - 24.5 м/с, которая определена по колебательному переходному процессу давления с периодом 0.41 с при гидроударе в трубопроводе длиной 2.5 м на входе в насос (рисунок 4б). В книге «Одномерные двухфазные течения» Г. Уоллиса показано, что такая величина скорости звука характерна для гомогенной смеси.

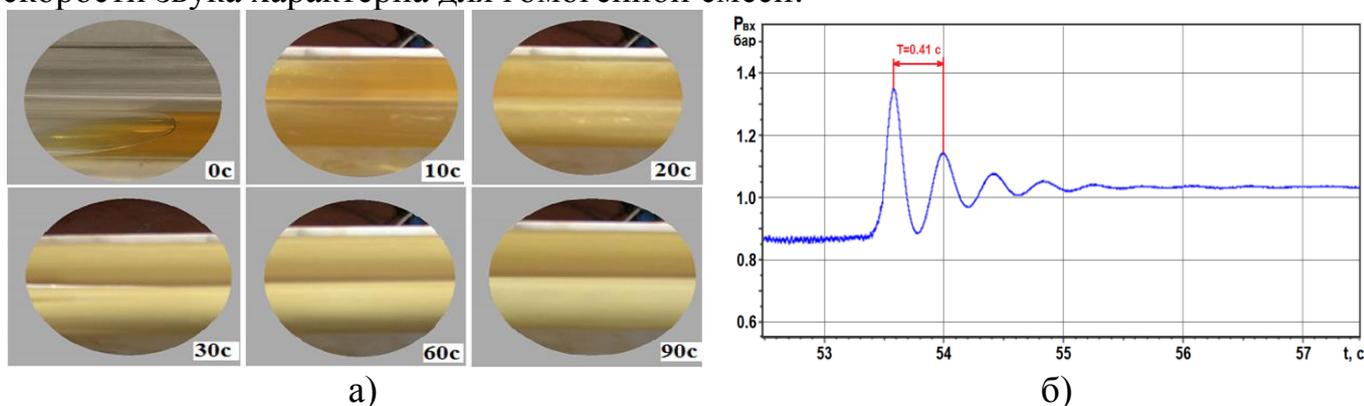


Рисунок 4. Результаты экспериментального исследования свойств рабочей среды
а) видеокдры смеси при выходе на режим; б) переходный процесс при гидроударе

В четвертой главе представлена разработанная методика выбора характеристик электроприводов ЭСС. Согласно этой методике мощность электропривода для насосов ЭСС выбирается применительно к наиболее длительному участку полётного цикла, а на кратковременных его участках, таких как режим взлёта, набор высоты, где требуется большая мощность, обеспечивается работа электропривода в режиме перегрузки по мощности.

Сформированы требования к характеристикам электроприводов ЭСС для ГТД магистральных самолётов:

- частота вращения электропривода (с учётом резервирования):
 - нагнетающего шнекошестерённого насоса 3000...10000 об/мин,
 - откачивающего шнекоцентробежного насоса 20000...30000 об/мин,
 - откачивающего шнекошестерённого насоса 10000...15000 об/мин,
 - суфлёра не ниже 25000 об/мин;
- кратность изменения частоты вращения 1 : 4;
- коэффициент перегрузки по мощности 2...3;
- время работы в режиме максимальной перегрузки 3...5 мин;
- время изменения частоты вращения от минимума до максимума 3...5 сек;
- удельная масса электроприводов не более 0.7 кг/кВт.

Для ЭСС предлагается использовать регулируемые электроприводы вентильного типа с постоянными магнитами, которые по сравнению с электрическими машинами другого типа имеют меньшую массу, более широкий диапазон регулирования по частоте вращения и допускают большие коэффициенты перегрузки по мощности.

По оценкам разработчиков систем смазки ГТД, переход на электроприводные насосы с удельной массой 0.5...0.7 кВт не приведёт к увеличению массы системы. Основное уменьшение массы, по сравнению с традиционной системой, реализуется за счет упрощения конструкции КПА. В работе приведены примеры существующих вентильных электроприводов, показывающих возможность достижения требуемых характеристик при существующих технологиях.

В пятой главе приведен обзор существующих математических моделей системы смазки, из которого следует, что они, как правило, позволяют рассчитывать только установившиеся режимы, а использование программных комплексов, типа ANSYS Fluent, CFX, STAR-CD, Flow-3D, COMSOL, OpenFoam и др., для практических расчётов гидравлических процессов в ЭСС требует больших вычислительных ресурсов и времени расчёта.

В связи с этим, разработана динамическая математическая модель ЭСС в сосредоточенных параметрах, которая позволяет рассчитывать как установившиеся, так и переходные режимы работы. Для описания течения в её гидравлических трактах использована гомогенная модель, что обосновано исследованиями характерных структур потоков и свойствами рабочей среды, изложенные в гл.3.

Модель системы смазки построена по модульному принципу. В качестве типового модуля используется конечный физический элемент, который представляет собой часть пневмогидравлической схемы системы, выполняющий определенные функции. Для моделирования система разбивается на набор модулей.

На рисунке 5 показана расчётная схема ЭСС применительно к пневмогидравлической схеме экспериментальных исследований системы на полунатурном стенде ЦИАМ с имитатором масляной полости.

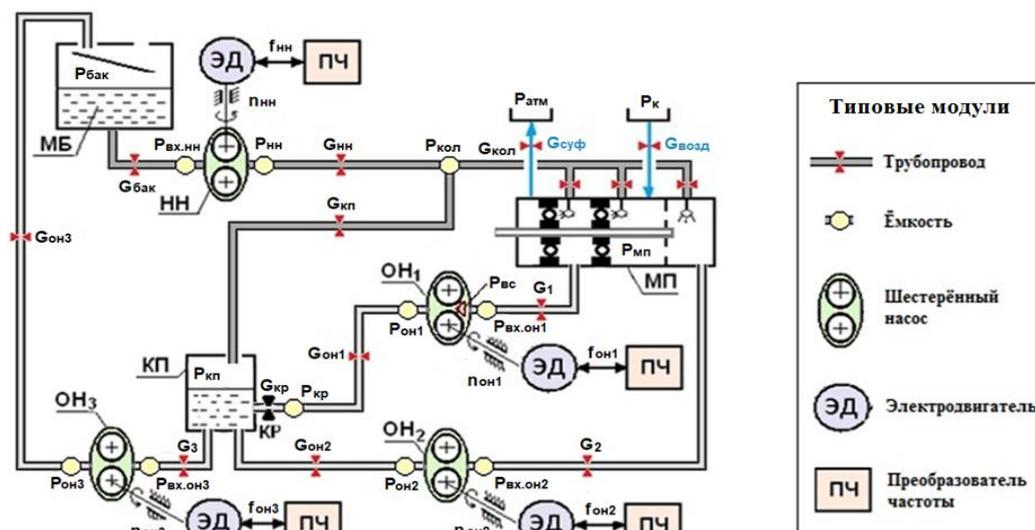


Рисунок 5. Типовая расчётная схема

МБ – маслобак, НН – нагнетающий насос, ОН – откачивающие насосы, ЭД – электродвигатели, ПЧ – преобразователи частоты сети, МП – масляная полость, КП – картер коробки приводов агрегатов, КР – настроечный кран.

В качестве основных модулей используется: трубопровод, акустическая ёмкость, масляная полость, шестерённый насос, электродвигатель, преобразователь частоты и др. При исследованиях систем смазки в составе ГТД с дополнительными агрегатами, например, теплообменниками, электроприводными насосами другого типа и т.д., они и их математическое описание в виде модулей, могут быть добавлены в разработанную математическую модель системы.

Участок трубопровода отражает течение инерционной сжимаемой двухфазной смеси в одномерной постановке (в сосредоточенных параметрах). В этом модуле производится расчёт расхода смеси, который реализуется под действием перепада давлений на концах участка, а также температуры и массового газосодержания смеси на выходе из участка. Распределенные потери давления на трение сосредотачиваются на границе участка и суммируются с местными потерями давления.

Акустическая ёмкость отражает сжимаемость среды. В ёмкостях происходит слияние потоков рабочей среды и изменение термодинамических характеристик потока (плотности, вязкости и др.) в зависимости от параметров состояния, которые считаются постоянными по объёму и изменяются во времени. Производится расчет величин параметров состояния - давления, температуры, газосодержания и др. Ёмкости на расчётной схеме устанавливаются в местах разветвления потоков, в местах с повышенной сжимаемостью рабочей среды (например, из-за наличия воздуха) и там, где требуется рассчитать величину давления.

В элементе **масляной полости** осуществляется расчёт давления, температуры и газосодержания с подводом в полость масла и воздуха, отводом воздушно-масляной смеси в систему суфлирования и масловоздушной смеси в тракт откачки.

Шестерённый насос как модуль описывается расходной характеристикой в виде зависимости объёмной производительности насоса от частоты вращения вала и перепада давлений на насосе. Рассчитываются также температура и массовое газосодержание рабочей среды на выходе из насоса, потребляемая им мощность с учётом утечек по торцевым, радиальным зазорам и др. Учитываются явления, связанные с неполным заполнением межзубового пространства в зоне всасывания.

Асинхронный электропривод представлен механической характеристикой, которая отражает зависимость частоты вращения ротора от нагрузки. Кроме момента и частоты вращения вала, в этом элементе также рассчитывается ток в статорной обмотке и электрическая мощность электропривода, с использованием экспериментальных данных по КПД и коэффициенту мощности $\cos\varphi$.

В расчётной схеме объём маслобака представлен модулем, в котором давление принято постоянным и равным атмосферному.

Система уравнений математической модели системы смазки решается методом прямого расчёта без итераций, что существенно уменьшает время счёта на ЭВМ. Для численного интегрирования использовался метод Эйлера с шагом 0.000025 с.

Ниже приведены базовые уравнения для модулей, которые выведены в работе.

1. Уравнение расчёта течения двухфазной сжимаемой смеси под действием приложенного перепада давлений с учётом её инерционности, потерь давления на трение по длине трубопровода и на местных сопротивлениях.

В работе представлен последовательный вывод этого уравнения из уравнений количества движения Навье-Стокса, неразрывности и состояния для случая безвихревого осесимметричного одномерного теплоизолированного изоэнтропического течения вязкой двухфазной смеси в трубопроводе с абсолютно жёсткими стенками:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dv}{dt} = f_x - \frac{1}{\rho_{см}} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} + \left(\frac{\zeta}{\rho_{см}} + \frac{v_{см}}{3} \right) \frac{\partial}{\partial x} \operatorname{div} v + v_{см} \Delta v_x \\ \frac{\partial \rho_{см}}{\partial t} + \rho_{см} \operatorname{div} v = 0 \\ \rho_{см.2} = \rho_{см.1} \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{1/k_3} \end{array} \right.$$

где v – средняя скорость потока по сечению, м/с; f_x – проекция вектора ускорения, вызванного действием массовых сил, на ось «х» (продольную ось трубопровода), м/с²; $v_{см}$ – кинематическая вязкость смеси, м²/с; $\rho_{см}$ – плотность смеси, кг/м³; k_3 – показатель изоэнтропы смеси; ζ – второй коэффициент вязкости; P_1, P_2 – давления на входе и выходе трубопровода, Па.

В математическом описании модуля трубопровода не рассматривается распространение волн давления, распределенные потери давления на трение сосредотачиваются на границе участка и суммируются с местными потерями давления, а двухфазная смесь представляется как сжимаемая смесь из однородной ньютоновской жидкости и идеального газа.

В результате получено уравнение:

$$\frac{l_{mp}}{F_1} \frac{dG_{см}}{dt} = \rho_{см.1} g \Delta h + P_1 \frac{k_3}{k_3 - 1} \left[1 - \beta^{\frac{k_3 - 1}{k_3}} \right] - \frac{\lambda_{mp} l_{mp}}{d_{mp}} \frac{G_{см}^2}{2 \rho_{см.1} F_1^2} - \left[\beta^{\frac{2}{k_3}} - \varepsilon^{-2} \right] \frac{G_{см}^2}{2 \rho_{см.1} F_2^2} \quad (1)$$

где $G_{см}$ – массовый расход смеси, кг/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; $\beta = P_2/P_1$; $\Delta h = l_{тр} \cdot \cos \theta$ – высота столба смеси, м; $l_{тр}$, $d_{тр}$ – длина и диаметр трубопровода, м; F_1 , F_2 – площадь сечения на входе и выходе из трубопровода, м²; $\varepsilon = F_1/F_2$; $\lambda_{тр}$ – коэффициент трения трубопровода.

В левой части уравнения (1) коэффициент при производной расхода отражает инерционные свойства трубопровода, 1-й член в правой части – гидростатический напор Δh , 2-й – действие массовых сил от давлений P_1 и P_2 , 3-й – потери давления в трубопроводе, 4-й – потери давления в выходном сечении.

Можно показать, что известные уравнения стационарного течения несжимаемой жидкости и изоэнтропически сжимаемого газа в горизонтальных суживающихся каналах и соплах являются частными случаями уравнения (1).

А) Для случая стационарного течения несжимаемой жидкости в горизонтальных суживающихся трубах и каналах в левой части уравнения (1) пропадает нестационарный член и 1-й член в правой части. Из условия несжимаемости следует равенство плотностей во всех сечениях. Тогда учитывая, что для жидкости показатель изоэнтропы $k_3 \gg 1$, уравнение (1) примет вид:

$$0 = P_1 - P_2 - \frac{\lambda_{mp} l_{mp}}{d_{mp}} \frac{G^2}{2 \rho_1 F_1^2} - \left[1 - \varepsilon^{-2} \right] \frac{G^2}{2 \rho_1 F_2^2}$$

После преобразований получим уравнение для массового расхода жидкости:

$$G = \frac{1}{\sqrt{\frac{\lambda_{mp} l_{mp}}{d_{mp}} + \Sigma \zeta_m}} \varepsilon F_2 \sqrt{2 \rho_1 \Delta P} = \mu F_2 \sqrt{2 \rho_1 \Delta P}$$

где $\Sigma \zeta_m = \varepsilon^2 - 1$ – суммарный коэффициент потерь давления на местных сопротивлениях, сосредоточенных на границе трубопровода; μ – коэффициент расхода.

Б) Случай изоэнтропически сжимаемого течения газа через сопло на докритическом режиме, как правило, рассматривают в условиях $v_2 < v_{кр}$ и $P_2 = P'$, где P' – давление внешней среды, куда истекает газ; и принимают $v_1 = 0$. Используя уравнения неразрывности и состояния газа, уравнение (1) можно записать в виде:

$$0 = P_1 \frac{k}{k-1} \left[1 - \left(\frac{P'}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] - \frac{\lambda_{mp} l_{mp}}{d_{mp}} \frac{G^2}{2 \rho_1 F_2^2} \left(\frac{P'}{P_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \frac{G^2}{2 \rho_1 F_2^2} \left(\frac{P'}{P_1} \right)^{\frac{2}{k}}$$

После преобразований получим уравнение для массового расхода газа:

$$G = \mu F_2 \sqrt{2 \rho_1 P_1 \frac{k}{k-1} \left(\frac{P'}{P_1} \right)^{\frac{2}{k}} \left[1 - \left(\frac{P'}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}$$

2. Уравнения формирования и течения масловоздушной и воздушно-масляной смеси в масляной полости опор роторов ГТД.

Процесс образования в масляной полости (МП) двухфазных сред представлен как результат распределения поступающих в МП жидкого масла и воздуха по нескольким условным зонам МП: зоне диспергирования, всплытия, откачки. В

процессе функционирования системы смазки объём зон изменяется. Количество масла и воздуха, поступающие в разные зоны определяется по эмпирическим коэффициентам. В зоне всплытия формируется воздушно-масляная смесь, а в зоне откачки – масловоздушная смесь. В разных зонах рабочая среда отличается как по термодинамическим свойствам, структуре, газосодержанию, так и по скорости течения. В верхнюю часть полости смесь поступает со скоростью всплытия пузырей, а в нижнюю - скоростью отсасываемой в тракт откачки. Низкая скорость поступления масловоздушной смеси на выход МП, ведущий в тракт откачки, вместе с инерционностью трубопровода, соединяющего МП с входом откачивающего насоса, формируют запаздывание поступления масловоздушной смеси на вход откачивающего насоса, исчисляемое секундами.

3. Уравнения заполнения двухфазной рабочей средой межзубовых впадин на входе шестеренного насоса.

Полнота заполнения межзубовых впадин определяется расходами, входящими в зону всасывания, и временем пребывания впадин в зоне. В случае, неполного заполнения принимается, что газовая фаза смеси изотермически расширяется, заполняя оставшуюся часть объёма.

Объём жидкой фазы в межзубовом пространстве $V_{зап}$ рассчитывается как:

$$V_{зап} = \sum_{i=t-\Delta t_{зап}}^t \left(\frac{G_{м.вх}}{\rho_{м.вс}} + \frac{G_{м.ут} + G_{м.з.о}}{\rho_{м.шн}} \right)_i \cdot \Delta t_{инт}, \quad 0 \leq V_{зап} \leq V_{ен} \quad (2)$$

где $V_{вп}$ – объём межзубовых впадин, м³; $G_{м.вх}$, $G_{м.ут}$, $G_{м.з.о}$ – массовые расходы масла на входе в насос, утечек и в запертом объёме, кг/с; t – время, с; $\Delta t_{зап}$, $\Delta t_{инт}$ – время пребывания межзубового объёма в зоне всасывания и время интегрирования, с; $\rho_{м.вс}$, $\rho_{м.шн}$ – плотность масла в зоне всасывания и на выходе из насоса, кг/м³.

Время пребывания $\Delta t_{зап}$ – это время, за которое впадина с окружной скоростью шестерни $U_{окр}$ проходит зону всасывания с длиной дуги $L_{вс}$, обычно составляющую 48...60 градусов, тогда:

$$\Delta t_{зап} = L_{вс} / U_{окр} \quad (3)$$

$$L_{вс} = \pi D_{ш} \cdot (48...60) / 360 \quad (4)$$

$$U_{окр} = \pi D_{ш} n_n / 60 \quad (5)$$

где $D_{ш}$ – диаметр шестерни насоса, м; n_n – частота вращения вала насоса, об/мин.

Давление в незаполненной части впадин $P_{вп}$ рассчитывается как результат расширения газовой фазы смеси от начального давления в зоне всасывания $P_{вс}$:

$$P_{ен} = (P_{вс} - \Delta p_{вс}) \cdot \frac{V_{зап}}{V_{ен}} \geq P_{пар} \quad (6)$$

где $\Delta p_{вс}$ – потери давления, Па; $P_{пар}$ – минимальное значение давления в зоне заполнения, которое принято равным давлению насыщенных паров, Па.

Потери давления $\Delta p_{вс}$ от входа в насос до периферии зубьев шестерён, включают в себя потери: на увеличение скорости потока от скорости во входном патрубке до окружной скорости головок зубьев шестерён; на преодоление действия центробежных сил; потери на входных кромках шестерён, на расширение и перемешивание потоков в зоне всасывания и др.

Используя полученное давление в зоне всасывания, определяется объёмное газосодержание и свойства (плотность и др.) смеси, перекачиваемой насосом.

4. Уравнение потребляемой насосом гидравлической мощности N_H :

$$N_H = \frac{G_H}{\eta_H} \frac{k_3}{k_3 - 1} \frac{P_{ex}}{\rho_{см.вх}} \left(\beta_H^{\frac{k_3}{k_3 - 1}} - 1 \right) \quad (7)$$

где G_H – массовый расход насоса, кг/с; η_H – КПД насоса; k_3 – показатель изоэнтропы смеси; $\beta_H = P_{вых}/P_{вх}$ – отношение давлений на выходе насоса и его входе; $\rho_{см.вх}$ – плотность на входе в насос, кг/м³.

Зависимости для $\rho_{см}$ и k_3 имеют вид:

$$\rho_{см} = (1 - \alpha) \rho_{жс} + \alpha \rho_{г}, \quad 1/k_3 = (1 - \alpha) / k_{жс} + \alpha / k_{г}$$

где α – объёмное газосодержание; $\rho_{ж}$, $\rho_{г}$ – плотность жидкости и газа, кг/м³; $k_{ж}$, $k_{г}$ – показатель изотропы жидкости и газа.

Учитывая, что $k_{ж} \gg k_{г}$, можно принять $1/k_3 \approx \alpha/k_{г}$ и записать уравнение (7) как:

$$N_H = \frac{G_H}{\eta_H} \frac{k_2}{k_2 - \alpha_{ex}} \frac{P_{ex}}{\rho_{см.вх}} \left(\beta_H^{k_2 - \alpha_{ex}} - 1 \right) \quad (8)$$

Можно показать, что уравнение (8) в предельных случаях вырождается в известные уравнения расчёта мощности:

- насоса при перекачке жидкости ($\alpha_{вх} = 0$) $N_H = G_H \Delta P / (\eta_H \rho_{вх})$

- компрессора при перекачке газа ($\alpha_{вх} = 1$) $N_H = G_H A / \eta_H$

где $A = P_{вх} / \rho_{вх} \cdot k / (k - \alpha_{вх}) \cdot ((\beta^{(k - \alpha_{вх}) / k}) - 1)$ – удельная работа сжатия, Дж/кг.

Выполнена верификация математической модели по переходным процессам давления в тракте нагнетания (давление за нагнетающим насосом P_{HH}) и откачки (давление на входе в насос P_1 ; давление на выходе - P_{OH1} ; давление перед краном $P_{кр}$), полученные при испытаниях ЭСС на автономном стенде (см. рисунок 6). В таблице 1 приведена погрешность расчёта установившихся и переходных режимов работы.

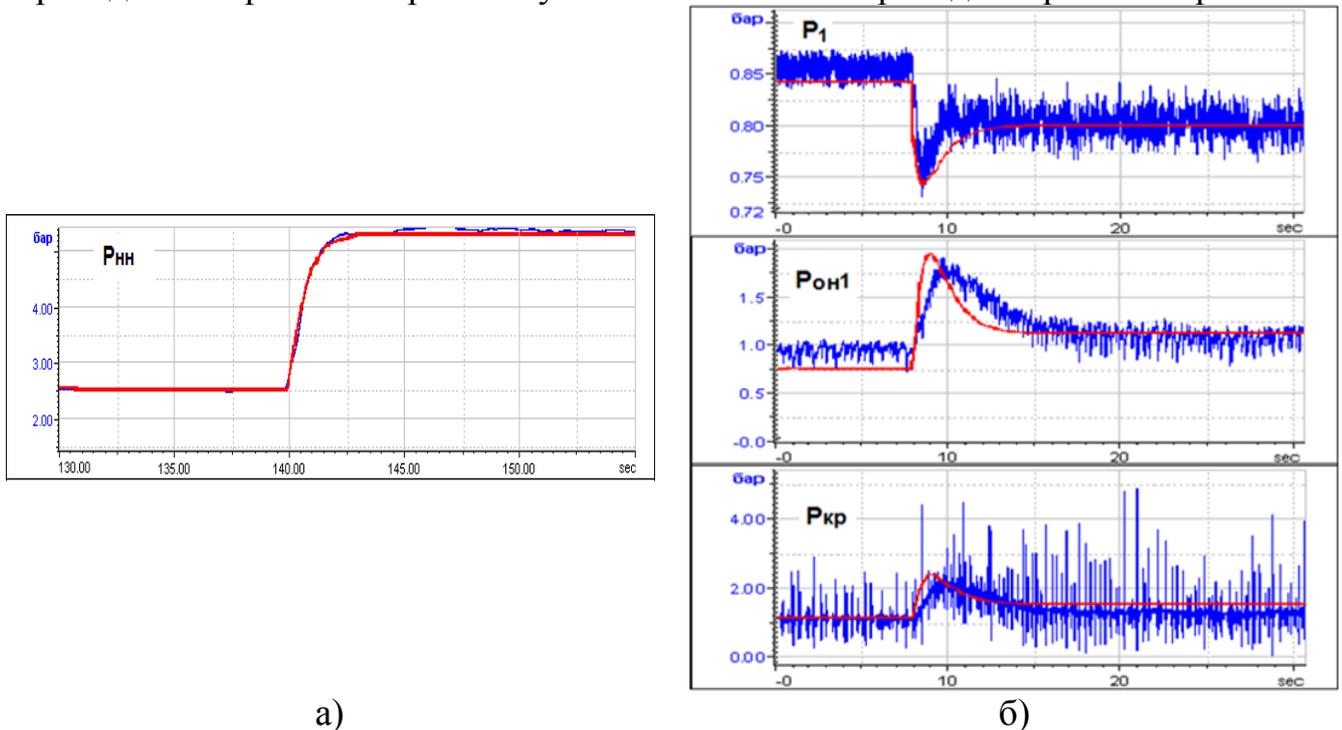


Рисунок 6. Верификация математической модели по переходным процессам
а) в тракте нагнетания; б) в тракте откачки

Таблица 1. Результаты верификации

	Время переходного процесса, с		Заброс, %		Погрешность расчета, %
	эксп.	расч.	эксп.	расч.	
Давление на выходе НН, $P_{\text{нн}}$	1.9	1.9	-	-	2.75
Давление на входе в ОН, P_1	2.06	3.06	-8.75	-7.5	1.65
Давление на выходе ОН, $P_{\text{он}}$	9.1	8.2	72.7	77.3	11.7
Давление перед краном, $P_{\text{кр}}$	9.1	8.2	69.2	60	12.8

В шестой главе приведено описание разработанной демонстрационной электроприводной системы смазки с электроприводными откачивающими и нагнетающим шестерёнными маслонасосами. Привод насосов от индивидуальных асинхронных электродвигателей с преобразователями частоты электросети, которые позволяют изменять частоту вращения ротора насосов в 10 раз.

Математическое моделирование работы ДЭСС на полунатурном стенде (см. рисунок 5), показало, что электроприводные насосы должны обеспечить на установившихся режимах следующие параметры:

- подачу нагнетающего насоса 10...18 л/мин;
- давление за нагнетающим насосом 2.17...5.31 бар;
- откачку масловоздушной смеси из масляной полости 5.6...15 л/мин, а из полости уплотнения 3.2...9 л/мин;
- давление за откачивающими насосами 1.0275...1.207 бар;
- изменение частоты вращения насосов в диапазоне 290...914 об/мин;
- мощность электропривода нагнетающего насоса 240...435 Вт; мощность откачивающих насосов 77.5...535.5 Вт.

Расчётно показано, что прокачка электроприводными насосами двухфазной смеси на режиме работы с неполным заполнением межзубовых впадин шестерён во время их пребывания в зоне всасывания сопровождается увеличением гидравлической мощности насоса, а, следовательно, и тока в обмотках электродвигателя.

На основе проведенных исследований выбраны следующие законы управления и контроля электроприводами системы смазки ГТД:

- электропривод нагнетающего насоса изменением частоты вращения поддерживает постоянное давление масла на входе в двигатель с коррекцией по режимам его работы и по температуре масла на выходе из подшипниковых опор;
- электропривод откачивающих насосов должен обеспечивать опережающую откачку масла из масляных полостей при запуске двигателя, а также откачку масла после его останова; остальное время работы подача откачивающих насосов кратна подаче масла в полость с коэффициентом $k_{\text{он}}$ равным 1.5...2;
- электропривод центробежного суфлёра перед запуском выводится на режим 50% частоты вращения, а затем его частота вращения изменяется пропорционально частоте вращения ротора КВД.

В таблице 2 представлены законы управления агрегатами ЭСС и время их включения/отключения при работе в составе ГТД.

Таблица 2. Законы управления ЭСС

Агрегат	Параметр управления	Закон управления	Включение	Выключение
Нагнетающий насос	Давление за насосом	$n_{\text{НН}} = f(P_{\text{НН.зад}})$ Запуск: $P_{\text{НН.зад}} = f(n_{\text{КВД}}, T_{\text{М}})$ Взлёт: $P_{\text{НН.зад}} = f(n_{\text{КВД}}, T_{\text{М}})$ КР: $P_{\text{НН.зад}} = f(n_{\text{КВД}}, T_{\text{Т.дв.}}, T_{\text{М}})$ Останов: $P_{\text{НН.зад}} = f(n_{\text{КВД}})$	В процессе запуска	При останове
Откачивающий насос	Частота вращения НН	на режим ~50% $n_{\text{ОН}} = f(n_{\text{НН}})$	До запуска	После останова
Суфлёры	Частота вращения КВД	Запуск на режим ~50% $n_{\text{суф}} = f(n_{\text{КВД}})$	До запуска	После останова

Разработан алгоритм защиты электроприводов от перегрузки по току, сущность которого заключается в осуществлении контроля тока в силовых обмотках электроприводов и, в случае достижения предельно допустимого значения тока, производится снижение частоты вращения электропривода. При этом в зоне всасывания увеличивается время пребывания межзубовых впадин, они успевают заполниться смесью и, в итоге, всасывающая способность насоса улучшается.

Управление частотой вращения электроприводов осуществляется селективированием по минимуму сигналов, поступающих из контуров управления производительностью насоса и защиты электропривода от перегрузки по току, обеспечивая меньшую из задаваемых ими частот вращения.

В седьмой главе изложены результаты испытания ДЭСС на стендах ЦИАМ: полунатурном стенде с имитатором масляной полости и натурном стенде с двигателем-демонстратором электрических технологий АИ-25ТЛ.

Методом визуально-спектрального анализа течения смеси в тракте откачки экспериментально подтверждены характерные для работы системы смазки ГТД структуры потока – дисперсный и расслоенный.

На основе анализа временных записей и спектров давлений вверху и внизу масляной полости уточнены уравнения расчётного модуля полости при различных частотах вращения ротора подшипников.

Сходимость результатов расчёта и испытаний ДЭСС на полунатурном стенде с имитатором масляной полости на установившихся режимах составила: по объёмным расходам смеси – до 6.3 %; по давлениям на выходе насосов – до 6 %; по мощности электроприводов – до 15 %.

На рисунке 7а приведены результаты испытаний ДЭСС на полунатурном стенде в условиях имитации приёмности двигателя-демонстратора – переход от МГ (подача масла $Q_{\text{НН}} = 14$ л/мин при давлении $P_{\text{НН}} = 3.5$ бар) на Мах ($Q_{\text{НН}} = 18$ л/мин, $P_{\text{НН}} = 5$ бар). Процессы в системе смазки имеют аperiодический характер.

Отмечено, что на режимах работы ДЭСС с прокачкой масловоздушной смеси с максимальным (в условиях стенда) объёмным газосодержанием (45...50%) имели место случаи отключения электропривода откачивающего насоса по сигналу «перегрузка по току» из-за увеличения гидравлической мощности насоса.

На рисунке 7б представлены расчётно-экспериментальные процессы при срабатывании защиты от отключения электропривода откачивающего насоса в момент времени 24.5 с, где $I_{расч}$, $I_{эксп}$ – расчётное и экспериментальное значение тока в обмотках электропривода; $P_{он.расч}$, $P_{он.эксп}$ – расчётное и экспериментальное значение давления за насосом; $\alpha_{ВП}$ – расчётное значение объёмного газосодержания в межзубовых впадинах шестерён на входе в насос.

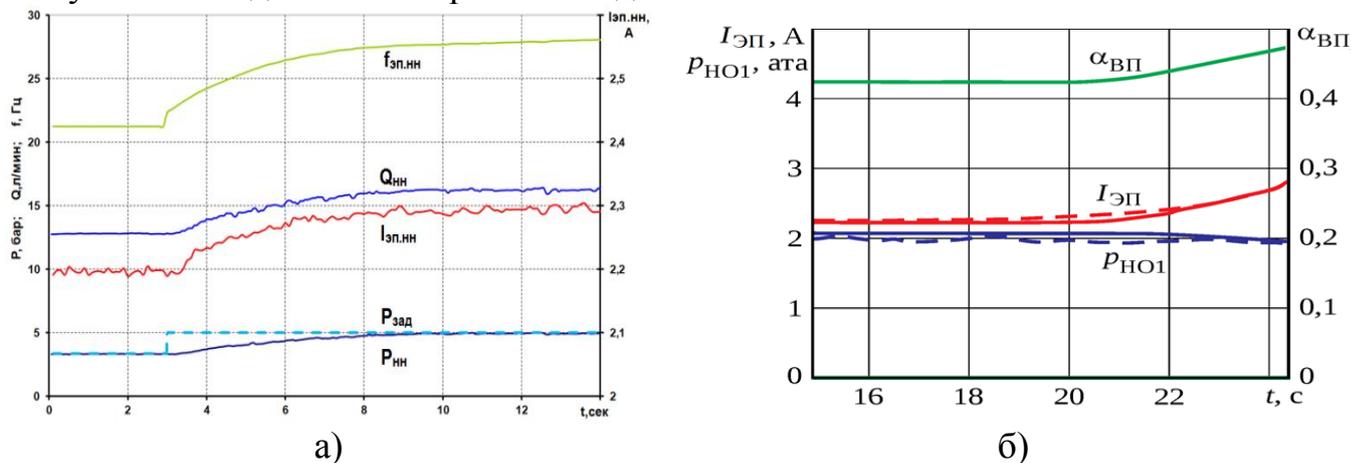


Рисунок 7. Результаты исследований ДЭСС на полунатурном стенде

а) Сравнительные характеристики способов управления;

б) Расчётные и экспериментальные процессы при срабатывании защиты ЭД

На рисунке 8 представлены результаты испытаний тракта нагнетания ДЭСС в составе двигателя-демонстратора АИ-25ТЛ. Подача масла в двигатель обеспечивалась штатной системой смазки на запуске и режиме малого газа до 122 с, после чего выполнено переключение на подачу масла от ДЭСС. В момент переключения отмечен кратковременный провал давления за нагнетающим насосом. Показано, что ДЭСС обеспечивает требуемую подачу масла в двигатель.

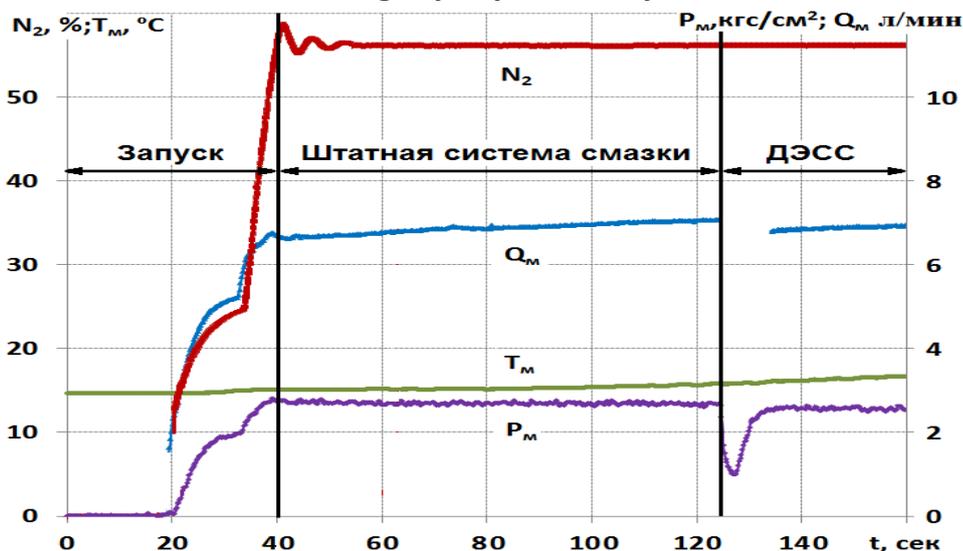


Рисунок 8. Выход и работа на МГ двигателя-демонстратора со штатным и электроприводным нагнетающим насосом

Испытания на полунатурном стенде с имитатором масляной полости и на двигателе-демонстраторе показали, что ДЭСС обеспечивает расходы и давления по тракту нагнетания, необходимые для работы двигателя-демонстратора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен анализ состояния и перспектив развития систем смазки газотурбинных двигателей, который показал, что применение электроприводной системы смазки (ЭСС) позволит повысить качество смазки, улучшить температурное состояние системы, сократить время подготовки двигателя к полёту, повысить надёжность запуска при низких температурах наружного воздуха и др.
2. Определены принципы построения электроприводной системы смазки ТРДД, в которой для вращения нагнетающего насоса и суфлёра используются отдельные электроприводы, а в тракте откачки один электропривод обеспечивает вращение насосов, откачивающих масловоздушную смесь из КПА и опор КНД и КВД, а другой – масловоздушную смесь из опор ТВД и ТНД.
3. Экспериментальными исследованиями показано, что существенное влияние на работу агрегатов систем смазки оказывает наличие воздуха в масле (двухфазность рабочей среды), особенно, в тракте откачки, где газосодержание составляет до 70%.
Установлено, что при регулировании частоты вращения откачивающего насоса, двухфазность приводит к увеличению его потребной гидравлической мощности и, следовательно, электрической мощности электропривода и возможности выключения электропривода вследствие достижения током в его силовых обмотках предельно допустимой величины.
4. Разработана методика выбора характеристик электропривода, основанная на учёте полётного цикла ГТД, двухфазности рабочей среды, возможности перегрузки привода по току, динамических свойств системы, обеспечения требуемой надёжности и минимальной массы системы.
5. Выполнено экспериментальное исследование течения двухфазной смеси, в результате которого показано, что она обладает свойствами упругой сплошной среды.
6. Для исследования характеристик ЭСС впервые разработана её динамическая математическая модель, учитывающая двухфазность рабочей среды, на основе результатов экспериментальных исследований течения.
7. Выполнена верификация математической модели ЭСС по результатам экспериментальных исследований, показавшая возможность выполнения расчётов сложных процессов в ЭСС с приемлемыми погрешностями: не хуже 6% на установившихся режимах и 15% на переходных режимах работы.
8. Выполнено математическое моделирование работы ЭСС, в результате которого определены способы управления её электроприводами.
9. Разработана демонстрационная электроприводная система смазки (ДЭСС), в которой реализованы принципы и характеристики ЭСС, полученные в результате проведенных расчётных и экспериментальных исследований.
10. Испытания демонстрационной электроприводной системы смазки на полунатурном стенде с имитатором масляной полости и на двигателе-демонстраторе показали, что система обеспечивает необходимые подачу и давление рабочей жидкости.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях и публикации, приравненные к ним

1. Гулиенко А.И., Яновский Л.С., Щуровский Ю.М., Молоканов А.А. Математическое моделирование масляной полости опоры газотурбинного двигателя // *Авиационная промышленность*. 2019. № 1. С. 25–34.
2. Гулиенко А.И., Щуровский Ю.М. Экспериментальное исследование свойств масловоздушной смеси систем смазки ГТД // *Вестник Московского авиационного института*. 2018. Т. 25. № 3. С. 124–133.
3. Гулиенко А.И., Щуровский Ю.М. Исследование гидродинамических процессов в системе смазки газотурбинного двигателя // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. 2015. Т. 14. № 3, Ч. 1. С. 250–261.
4. Щуровский Ю.М. Особенности математического моделирования системы смазки газотурбинных двигателей // *Труды МАИ*. 2017. № 92. URL: http://mai.ru/upload/iblock/d53/shchurovskiy-_rus.pdf (дата обращения 28.08.2021).
5. Патент на полезную модель №135365 РФ, МПК F02C 7/00. Система смазки газотурбинного двигателя / Гуревич О.С., Гулиенко А.И., Щуровский Ю.М. Заявитель и правообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова». – № 2013126442/06; заяв. 10.06.2013; опубл. 10.12.2013; Бюл. № 34 – 2с.
6. Патент на полезную модель №152854 РФ, МПК G01N 9/36. Устройство для измерения истинного объёмного газосодержания газожидкостной смеси в трубопроводной сети / Гулиенко А.И., Щуровский Ю.М. Заявитель и правообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова». – №2015105484/28; заяв. 18.02.2015; опубл. 20.06.2015; Бюл. № 17 – 2с.

Другие публикации

7. Gurevich O.S., Gulienko A.I., Shchurovsky Y.M. Physico-matematical model of oil chamber in bearing supports of GTE rotor. XXIV International Symposium of Air Breathing Engines, ISABE-2019, Canberra, Australia, September 22–27, 2019. 13 p.
8. Щуровский Ю.М. Построение и выбор характеристик электроприводной системы смазки ГТД // *Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов «Авиационные двигатели и силовые установки»* (Москва, 28-30 мая 2019 г.). Сборник тезисов докладов. М.: ЦИАМ им. П.И. Баранова, 2019. С. 271-273.
9. Gurevich O.S., Gulienko A.I., Shchurovsky Y.M. Investigation of architecture and characteristics of oil system with electrically driven pumps for gas turbine engine // XXIII International Symposium of Air Breathing Engines (ISABE-2017), Manchester, England, September 3–8, 2017. 10 p.

10. Щуровский Ю.М. Особенности математического моделирования систем смазки газотурбинных двигателей // 8-й Всероссийский молодёжный конкурс научно-технических работ и проектов «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики». (Москва, 14-18 ноября 2016 г.). Сборник аннотаций конкурсных работ. М.: «Люксор», 2016. С. 127-128.
11. Щуровский Ю.М. Математическое моделирование систем смазки двигателей // VI Международная научно-техническая конференция «Проблемы химмотологии: от эксперимента к математическим моделям высокого уровня». (Москва, 17-19 октября 2016 г.). Сборник избранных докладов. М.: «Граница», 2016. С. 134–141.
12. Гулиенко А.И., Яновский Л.С., Щуровский Ю.М., Молоканов А.А. Особенности рабочего процесса в масляной полости опор ротора газотурбинного двигателя // VI Международная научно-техническая конференция «Проблемы химмотологии: от эксперимента к математическим моделям высокого уровня». (Москва, 17-19 октября 2016 г.). Сборник избранных докладов. М.: «Граница», 2016. С. 38–46.
13. Shchurovskiy Y.M. Investigation of characteristics of the oil system with electrically driven pumps for gas turbine engine // 30th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS-2016), Daejeon, Korea, September 25–30, 2016. 9 p.
14. Гулиенко А.И., Щуровский Ю.М. Изучение течения в гидравлическом тракте системы смазки и его влияния на выбор характеристик // Научно-технический конгресс по двигателестроению, НКТД-2016 (Москва, 19-21 апреля 2016 г.). М.: «АССАД», 2016. С. 358-362.
15. Яновский Л.С., Гулиенко А.И., Молоканов А.А., Щуровский Ю.М. и др. Дисперсные системы «масло/воздух» и «воздух/масло» при работе маслосистем двигателей летательных аппаратов // III Всероссийская молодежная конференция «Успехи химической физики». Сборник тезисов докладов. М.: «Граница», 2016. 12 с.
16. Щуровский Ю.М., Гулиенко А.И. Исследование характеристик демонстрационной электроприводной системы смазки ГТД // Всероссийская научно-техническая конференция «Авиадвигатели XXI века». (Москва, 24-27 ноября 2015 г.). Сборник тезисов докладов. М.: ЦИАМ им. П.И. Баранова, 2015. С. 911–913.
17. Щуровский Ю.М., Гулиенко А.И. Особенности математического моделирования систем смазки ГТД // Всероссийская научно-техническая конференция «Авиадвигатели XXI века». (Москва, 24-27 ноября 2015 г.). Сборник тезисов доклада. М.: ЦИАМ им. П.И. Баранова, 2015. С. 913-915.
18. Яновский Л.С., Гулиенко А.И., Молоканов А.А., Щуровский Ю.М. и др. Влияние вспениваемости масел на характеристики электроприводной системы смазки авиационных ГТД «электрических» летательных аппаратов // 8-й Международный аэрокосмический конгресс IAS'15. (Москва, 28-31 августа 2015 г.). Сборник тезисов докладов. М.: «АИР Москва», 2015. С. 135-136.
19. Щуровский Ю.М., Гулиенко А.И. Динамические характеристики системы смазки с электрическим приводом насосов // Всероссийская научно-техническая

конференция молодых ученых и специалистов «Новые решения и технологии в газотурбостроении». Сборник тезисов докладов. М.: ЦИАМ им. П.И. Баранова, 2015. С. 66-67.

20. Гулиенко А.И., Яновский Л.С., Щуровский Ю.М., Молоканов А.А. Исследование течения масловоздушной смеси в электроприводной системе смазки перспективных ГТД // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 10. С. 35–42.
21. Яновский Л.С., Гулиенко А.И., Молоканов А.А., Щуровский Ю.М. и др. Влияние вспениваемости масел на характеристики электроприводной системы смазки авиационных ГТД самолетов нового поколения // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 8. С. 43–48.
22. Гулиенко А.И., Щуровский Ю.М. Математическая модель гидродинамических процессов в системе смазки ГТД // Динамика и виброакустика машин: сборник докладов второй Международной НТК. (Самара, 15-17 сентября 2014 г.). Самара: СГАУ им. С.П.Королёва, 2014. С. 183–194.
23. Gurevich O., Gulienko A., Schurovskiy U. Demonstration Systems of the «Electric» Gas Turbine Engine // 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS-2014), St. Petersburg, Russia, September 7–12, 2014. 6 p.
24. Гулиенко А.И., Щуровский Ю.М. Математическая модель гидродинамических процессов в системе смазки газотурбинного двигателя // Динамика и виброакустика машин. 2014. Т. 1. № 2. С. 24–33.
25. Щуровский Ю.М. Методический подход к математическому моделированию систем смазки ГТД // Международная молодёжная научная конференция «XII Королёвские чтения». (Самара, 1-3 октября 2013 г.). Сборник трудов. Самара: СГАУ им. С.П.Королёва, 2013. Т. 1. С. 85.