На правах рукописи

КОЗЛОВ АНДРЕЙ ЛЬВОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АВИАЦИОННЫХ РОТОРНО-ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ РАБОТЕ НА МАЛОЗОЛЬНЫХ И БЕЗЗОЛЬНЫХ МОТОРНЫХ МАСЛАХ

Специальность: 2.4.7 – Турбомашины и поршневые двигатели

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2026

Работа выполнена в Федеральном автономном учреждении «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова»

Научный руководитель:	**Дутов Андрей Владимирович,** доктор технических наук, генеральный директор ФГБУ «НИЦ «Институт имени Н.Е. Жуковского».
Официальные оппоненты:	**Стрижак Павел Александрович**, доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН, профессор Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики ФГАУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» **Алтунин Виталий Алексеевич**, доктор технических наук, профессор кафедры теплотехники и энергетического машиностроения ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ»
Ведущая организация:	ФГУП «НАМИ»

Защита диссертации состоится «23» декабря 2026 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.331.17 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: г. Москва, 2-я Бауманская, д.5, стр.1, ГК, Зал Учёного Совета МГТУ им. Н.Э. Баумана.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.331.17, также просим отправлять электронные копии отзывов на электронную почту kharit@bmstu.ru.

Автореферат разослан «_____» _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, к.т.н., доцент. Харитонов С.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Развитие беспилотных авиационных систем, легкой авиации и гибридных силовых установок формирует потребность в малоразмерных авиационных двигателях в диапазоне мощностей от 50 до 500 л.с. Для таких силовых установок определяющее значение имеют удельная масса, габариты, топливная экономичность, возможность длительной работы на переменных режимах и сохранение работоспособности при эксплуатации в составе гибридной энергетической системы.

Роторно-поршневые двигатели (РПД), реализующие цикл Ванкеля, являются перспективным типом тепловых двигателей для беспилотных авиационных систем, легкой авиации и гибридных силовых установок благодаря высокой удельной мощности, малым габаритам, меньшему уровню вибраций и высокой частоте вращения. Эти преимущества позволяют рассматривать РПД как основу типоразмерного ряда авиационных двигателей и энергоустановок мощностью от 50 до 500 л.с.

Вместе с тем применение РПД в авиации ограничивается ресурсом пар трения и сложностью обеспечения стабильной работы масляной системы в условиях высоких температур и большой высотности полета, что определяется уровнем эксплуатационных свойств масла. Масло в РПД одновременно смазывает подшипники и уплотнения ротора, охлаждает элементы двигателя и частично попадает в камеру сгорания, вследствие чего влияет не только на трибологические процессы, но и на рабочий процесс двигателя.

Попадание масла в камеру сгорания является конструктивно обусловленным фактором, влияющим на нагарообразование и детонационную стойкость рабочего процесса РПД. Необходимость снижения коксо- и нагарообразования позволяют считать малозольные масла для двухтактных и четырехтактных двигателей как наиболее перспективные для применения в авиационных РПД.

Эксплуатационные примеси в маслах: авиационный бензин Avgas 100LL, кислородсодержащие добавки, вода, в том числе морская, а также долив свежего масла оказывают влияние на эксплуатационные свойства масла, включая вязкость, противоизносные свойства, коксо- и осадкообразование, коррозионную агрессивность, а также вспениваемость.

Для определения потенциала улучшения эксплуатационных показателей РПД за счёт подбора моторного масла необходимо проведение комплексного исследования. Оно должно интегрировать анализ закономерностей трансформации физико-химических и эксплуатационных характеристик масла при термическом окислении в присутствии эксплуатационных загрязнений, оценку воздействия масла на параметры воспламенения и сгорания топлива; а также исследование характеристик узлов масляной системы двигателя.

Таким образом, актуальность диссертационной работы определяется необходимостью получения экспериментальных и расчетных данных, позволяющих оценивать эксплуатационные характеристики авиационных

роторно-поршневых двигателей при применении малозольных (и беззольных) моторных масел.

Степень разработанности темы. Вопросы теории и практики разработки роторно-поршневых двигателей рассмотрены в работах отечественных и зарубежных ученых. Известны работы зарубежных ученых и специалистов Шимидзу Р., Киношита Н., Ногучи Н., Токуда С., Зарадник Ф., Кренн С., Любич Г., Бейфусс Б. Среди российских и советских ученых отметим В.С. Бениовича, Г.Д. Апазиди, А.М. Бойко, Е.А. Григорьева, В.П. Смирнова, Г.Н. Злотина, Е.А. Федянова, Е.П. Кочерова, В.А. Кононова, В.В. Окорочкова, В.М. Окорочковой, К.П. Ивановой, И.В. Зиновьева, И.В. Симукова.

Несмотря на то, что проведено большое количество исследований в области повышения надежности эксплуатации и ресурса авиационных РПД, взаимосвязь между деградацией моторных масел, работоспособностью элементов маслосистемы и параметрами рабочего процесса авиационного РПД при использовании малозольных и беззольных масел недостаточно раскрыта.

Целью работы является повышение эксплуатационных характеристик авиационных роторно-поршневых двигателей за счет научно-обоснованного выбора моторного масла.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи:**

1. Определить свойства без- и малозольного моторных масел М-5з/20 АЭРО и АЭРО 2Т при наличии долива свежего масла, а также добавок бензина Avgas 100LL, технической и морской воды в широком диапазоне температуры и времени окисления.
2. Исследовать характеристики элементов маслосистемы авиационного РПД с применением без- и малозольных моторных масел.
3. Исследовать влияние моторных масел и кислородсодержащих компонентов на воспламеняемость и характеристики горения топливовоздушных смесей бензина Avgas 100LL.
4. Определить детонационную стойкость топливомасловоздушных смесей при работе РПД-100Т.
5. Обосновать марку моторного масла, обеспечивающего наибольшее повышение эксплуатационных характеристик РПД.

Объектом исследования являются узлы маслосистемы авиационного роторно-поршневого двигателя, работающей на малозольных и беззольных моторных маслах.

Предмет исследования. Физико-химические и эксплуатационные свойства беззольных и малозольных моторных масел при термическом окислении в условиях маслосистемы РПД, а также влияние моторных масел и кислородсодержащих компонентов на характеристики воспламенения и горения топлива (рабочий процесс авиационного РПД).

Научная новизна.

1. Установлены температурные закономерности изменения свойств масел М-5з/20 АЭРО и АЭРО 2Т в широком диапазоне параметров функционирования масляной системы РПД, позволяющие прогнозировать эксплуатационную пригодность масла.

2. Установлены зависимости рабочих температур и времени наработки масел в РПД, при которых достигаются заданные значения показателей свойств без- и малозольного моторных масел М-5з/20 АЭРО и АЭРО 2Т, при наличии долива свежего масла и эксплуатационных примесей. Эти зависимости позволяют оценить характеристики элементов и работоспособность маслосистемы РПД в целом.

3. Установлено влияние добавок моторных масел М-5з/20 АЭРО и АЭРО 2Т, а также метил-трет-бутилового эфира и этанола на самовоспламеняемость, нагарообразование и полноту сгорания топливовоздушных и топливомасловоздушных смесей на базе бензина Avgas 100LL в условиях камеры сгорания авиационного РПД. Полученные данные позволили оценить детонационную стойкость топливомасловоздушных смесей.

4. Определены бездетонационные индикаторные диаграммы РПД при работе на топливомасловоздушных смесях бензина Avgas 100LL и моторных масел М-5з/20 АЭРО и АЭРО 2Т.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Экспериментальные данные (расширенный банк данных) по свойствам без- и малозольных моторных масел М- 5з/20 АЭРО и АЭРО 2Т с учетом эксплуатационных факторов в диапазоне температур 150 - 190 °С позволяют расширить возможности проектирования масляных систем РПД.

2. Определены значения периода индукции самовоспламенения, нагарообразования и полноты сгорания топливомасловоздушных смесей бензина Avgas 100LL и моторных масел М- 5з/20 АЭРО и АЭРО 2Т, а также топливовоздушных смесей с добавками метил-трет-бутилового эфира, этанола и технической воды в зависимости от их концентраций.

3. Расчетная модель рабочего процесса РПД-100Т может применяться для оценки влияния состава топливомасловоздушной смеси на параметры цикла с целью сокращения объема стендовых испытаний.

4. Научно-обоснован и экспериментально подтвержден выбор моторного масла, обеспечивающий снижение удельного расхода бензина в РПД.

Методология и методы исследования.

Физико-химические и эксплуатационные свойства масел, включая период индукции воспламенения, полноту сгорания и нагарообразование, а также стендовые испытания элементов маслосистемы и двигателя РПД-100Т определены аттестованными экспериментальными методами исследования. Численное моделирование рабочего процесса в РПД- 100Т выполнено с применением валидированных расчетных методов. Методология исследования заключается в комплексном применении методов определения

физико-химических и эксплуатационных свойств масел в условиях лабораторного оборудования и экспериментальных установок, расчетного метода прогнозирования степени термической деградации масел, а также моделирования рабочего процесса камеры сгорания РПД.

Положения, выносимые на защиту:

1. Сведения о свойствах без- и малозольного моторных масел М-5з/20 АЭРО и АЭРО 2Т с учетом эксплуатационных факторов в широком диапазоне температур и времен окисления.
2. Рабочие параметры маслосистемы РПД (время наработки и температура), в которых соблюдается кондиционность масел с учетом эксплуатационных факторов.
3. Зависимости характеристик воспламенения и горения топливомасловоздушной смеси бензина Avgas 100LL с добавками моторных масел, воды и кислородсодержащих компонентов.
4. Оценка детонационной стойкости топливомасловоздушных смесей Avgas 100LL с маслами АЭРО 2Т и М-5з/20 АЭРО при работе РПД.

Личный вклад соискателя.

1. Соискателем проведены исследования свойств без- и малозольного моторных масел М-5з/20 АЭРО и АЭРО 2Т в широком диапазоне температуры и времени окисления, а также при наличии долива свежего масла и добавок бензина Avgas 100 LL и воды.
2. Исследованы характеристики воспламенения и горения топливомасловоздушных смесей бензина Avgas 100LL с моторными маслами М-5з/20 АЭРО и АЭРО 2Т, кислородсодержащими компонентами и воды.
3. Проведено численное моделирование рабочего процесса в РПД-100Т на топливомасловоздушных смесях бензина Avgas 100LL с моторными маслами.
4. Исследованы характеристики элементов маслосистемы РПД: степень износа зубчатого зацепления, время засорения фильтра тонкой очистки, а также мощность откачивающего насоса с регулируемым числом оборотов в зависимости от эксплуатационных свойств масел, в том числе с добавками эксплуатационных примесей.
5. Выбран тип моторного масла, обеспечивающий снижение удельного расхода топлива РПД.

Кроме того, соискателем обеспечено применение на практике всех основных научных результатов работы.

Степень достоверности полученных результатов работы.

Достоверность и аргументированность полученных результатов достигаются за счёт применения стандартизованных и аттестованных методик, использования поверенной измерительной аппаратуры и испытательных стендов, а также контроля параметров термического окисления и состава изучаемых смесей. Дополнительно экспериментальные данные обрабатываются с учётом погрешности измерений, подтверждается воспроизводимость испытаний, а расчётные величины верифицируются путём

сопоставления с опытными индикаторными диаграммами и результатами замеров давления во впускном и выпускном трактах РПД-100Т.

Апробация результатов работы.

Основные материалы диссертации апробированы на Международном форуме двигателестроения (МФД-2024) (г. Москва, 23–25 октября 2024 г.); Научно-техническом конгрессе по двигателестроению (НТКД-2024) (г. Москва, 23-26 ноября 2024 г.); Международной научно-технической конференции имени Н.Д. Кузнецова (г. Самара, 18–20 июня 2025 г.); XXI научно-технической конференции по аэроакустике (г. Суздаль, 21-26 сентября 2025 г.); Международной научно-технической конференции по авиационным двигателям ICAM 2025 (г. Москва, 1-3 декабря 2025 г.), XV Евразийском международном форуме (г. Москва, 29-30 января 2026 г.), II Межотраслевом форуме по современным технологиям и контролю качества моторных топлив (г. Москва, 16-17 июня 2026 г.), Томском международном энергетическом форуме (г. Томск, 24-27 июня 2026 г.), XVI Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (AMMAI-26) (г. Кременки, 7-11 сентября 2026 г.), Всероссийской конференции «LXI Научные чтения, посвященные разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского» (г. Калуга, 15-17 сентября 2026 г.), XVIII Всероссийском симпозиуме по горению и взрыву (г. Суздаль, 20-25 сентября 2026 г.), на научно-технических советах ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова» (2022-2026 гг.).

Публикации. По теме диссертации были опубликованы 3 научные статьи в журналах, индексируемых международной реферативной базой Scopus, 2 статьи в отраслевых научно-технических журналах, 3 статьи в сборниках научных трудов.

Структура и объем диссертации

Диссертация включает введение, четыре главы, заключение, список обозначений и список используемой литературы из 171 наименований. Общий объём работы составляет 165 страниц машинописного текста, в том числе 15 таблиц, 41 рисунок и 3 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении приведено краткое описание основных структурных элементов диссертации, отраженных в разделе «Общая характеристика работы» автореферата.

В первой главе диссертации приведен анализ 135 литературных источников по вопросу повышения эксплуатационных характеристик авиационных РПД, эксплуатируемых с применением моторных масел различного типа.

Приведен анализ условий применения авиационных РПД, особенностей их рабочего процесса, масляной системы и требований к моторным маслам, включая характерные рабочие температуры масла.

Установлено, что конструктивно обусловленное попадание масла в камеру сгорания РПД снижает детонационную стойкость и повышает нагарообразование топливомасляной смеси. Недостаточный уровень стойкости к осадкообразования снижает ресурс фильтра тонкой очистки.

Высокая вспениваемость приводит к повышенному расходу, ускоренному окислению, ухудшению трибологических и теплофизических свойств масла, а также снижает надежность откачивающего насоса.

Детонационная стойкость топливовоздушных и топливомасловоздушных смесей может характеризоваться величиной периода индукции воспламенения. Период индукции воспламенения может быть повышен путем добавки кислородсодержащих компонентов: спиртов и эфиров.

На основании анализа установлено, что масло для авиационного РПД должно обладать высокими термоокислительной стабильностью и трибологическими свойствами, стойкостью к пенообразованию, низкими зольностью, коррозионной агрессивностью к металлам и воздействием на уплотнительные резины, а также малой склонностью к нагарообразованию и допустимым влиянием на детонационную стойкость топливовоздушной смеси.

В процессе эксплуатации РПД компенсация расхода масла осуществляется посредством долива свежего масла. В маслосистему возможно попадание топлива и воды, в том числе морской. Наличие эксплуатационных примесей и добавление свежего масла оказывают влияние на эксплуатационные свойства масла в маслосистеме и на ресурс двигателя в целом.

Сформулирован перечень задач, направленных на анализ характеристик без- и малозольных масел в широком интервале температур и времени наработки, в том числе с учётом эксплуатационных факторов. Предусматривается оценка воздействия указанных масел на элементы масляной системы и рабочий процесс РПД.

Во второй главе представлены результаты определения свойств без- и малозольного моторных масел АЭРО 2Т и М-5з/20 АЭРО с учетом эксплуатационных факторов в широком диапазоне температур и времён окисления.

Порядок действий при определении изменения свойств масел в условиях их окисления аналогичен методу определения термоокислительной стабильности авиационных масел по ГОСТ 23797. Окисление масел и их смесей со свежим маслом, бензином и водой проведено при температурах 150 °С, 170 °С и 190 °С. Долив бензина и воды осуществлялся перед началом окисления и каждые 10 часов. Определение показателей свойств масел проводилось перед окислением и каждые 10 часов до и после добавки свежего масла, бензина или воды.

Экспериментально получены данные по кинематической вязкости, кислотному числу, осадкообразованию, коррозионной агрессивности, противоизносным свойствам, вспениваемости и совместимости с уплотнительной резиной марки НО-68-1 малозольных и беззольных масел АЭРО 2Т и М-5з/20 АЭРО в интервале температур окисления 150 °С - 190 °С при наличии долива свежего масла, а также добавок бензина Avgas 100LL, дистиллированной и морской воды.

Долив 30 % масс. свежего масла каждые 10 часов частично восстанавливает уровень эксплуатационных свойств и увеличивает время работоспособности на 50 ± 8 % для масла М-5з/20 АЭРО и на 26 ± 4 % для масла АЭРО 2Т (рисунок 1).

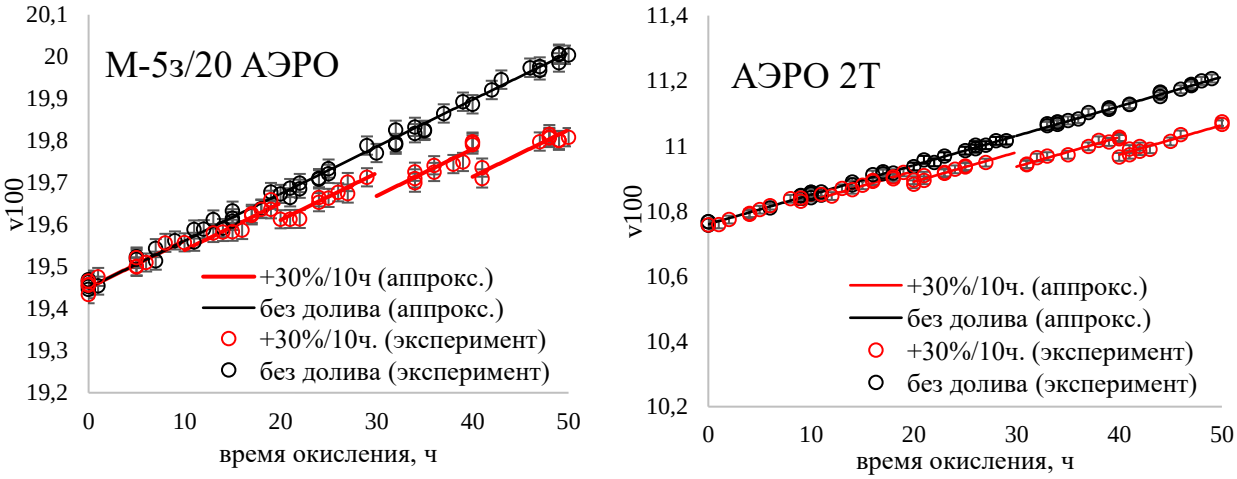


Рисунок 1 – Изменение вязкости масел М- 5з/20 АЭРО и АЭРО 2Т при окислении

Топливо снижает вязкость и противоизносные свойства топливомасляных смесей. Стойкость к термическому окислению топливомасляных смесей так же снижается. При содержании Avgas 100LL, равном 2 % масс., снижение времени достижения предельно допустимых значений свойств масла М-5з/20 АЭРО составляет 11 ± 4 %, масла АЭРО 2Т – 15 ± 5 % при температуре окисления 150 °С. При добавке 1 % масс. дистиллированной воды потеря массы медной пластинки повышается на 90 ± 10 % при добавке того же количества морской воды потеря массы медной пластинки повышается на 270 ± 30 %. При температуре окисления 150 °С заданные значения свойств масел М-5з/20 АЭРО и АЭРО 2Т достигаются быстрее на 10 ± 2 % и 14 ± 2 %, соответственно.

Изменение показателей свойств масел описано автором аппроксимационными зависимостями, учитывающими температуру и время окисления. Коэффициенты детерминации составляют не менее 0,995, а расхождение расчетных и экспериментальных значений не превышает ± 5 % в пределах 50 часов окисления.

На основе обобщения экспериментальных данных по свойствам масел и допустимых значений свойств (заданных), при которых масла являются кондиционными, получены зависимости периода работы масла в маслосистеме от его температуры (рисунок 2). Учтены эксплуатационные факторы.

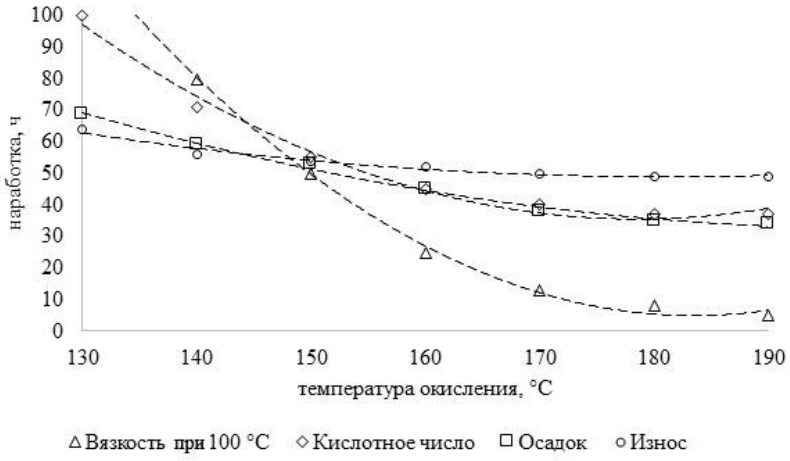


Рисунок 2 – Зависимость времени наработки масла АЭРО 2Т от температуры масла в маслосистеме

Показано, что при повышении температуры в маслосистеме время достижения предельно допустимых значений сокращается. При температуре 170 °С масло М-5з/20 АЭРО сохраняет больший запас работоспособности по сравнению с маслом АЭРО 2Т. Для обеспечения ресурса 50 ч расчетные температуры, при которых показатели свойств не превышают предельно допустимых значений, составляют 158 °С для масла М-5з/20 АЭРО и 152 °С для масла АЭРО 2Т.

Банк данных по свойствам масел дополнен экспериментальными значениями свойств масел М- 5з/20 АЭРО и АЭРО 2Т с учетом эксплуатационных факторов.

Третья глава посвящена исследованию масляной системы РПД при работе на без- и малозольном маслах М-5з/20 АЭРО и АЭРО 2Т. Оценено влияние эксплуатационных факторов. Стендовые испытания элементов маслосистемы РПД позволили оценить влияние эксплуатационных свойств масла на состояние узла трения, засорение фильтра тонкой очистки и потребную мощность откачивающего насоса.

Показано, что добавка 2,5 - 5 % масс. Avgas 100LL повышает износ узла трения (контрольной шестерни зубчатого зацепления) на 15 - 20 % при работе на масле М-5з/20 АЭРО и на 14 - 18 % при работе на масле АЭРО 2Т. Износ и изменение параметров профиля поверхности узла трения возрастает пропорционально содержанию топлива, что указывает на снижение устойчивости защитной масляной пленки.

Добавка воды в количестве 1 - 2 % масс. к маслу М-5з/20 АЭРО повышает износ контрольной шестерни на 40 - 55 % и на 35 – 42 % при работе на масле АЭРО 2Т. Обводнение маслосистемы оказывает большое влияние на снижение ресурса узлов трения.

Увеличение перепада давления использовано как критерий засорения фильтрующего элемента вследствие повышения осадкосодержания в масле (рисунок 3). Добавка Avgas 100LL сокращает расчетное время работоспособности фильтра тонкой очистки на 28 - 50 % при работе на масле

М-5з/20 АЭРО и на 24 - 36 % при работе на масле АЭРО 2Т. Добавка воды сокращает время работоспособности фильтра на 16 - 28 % для масла М-5з/20 АЭРО и на 12 % для масла АЭРО 2Т.

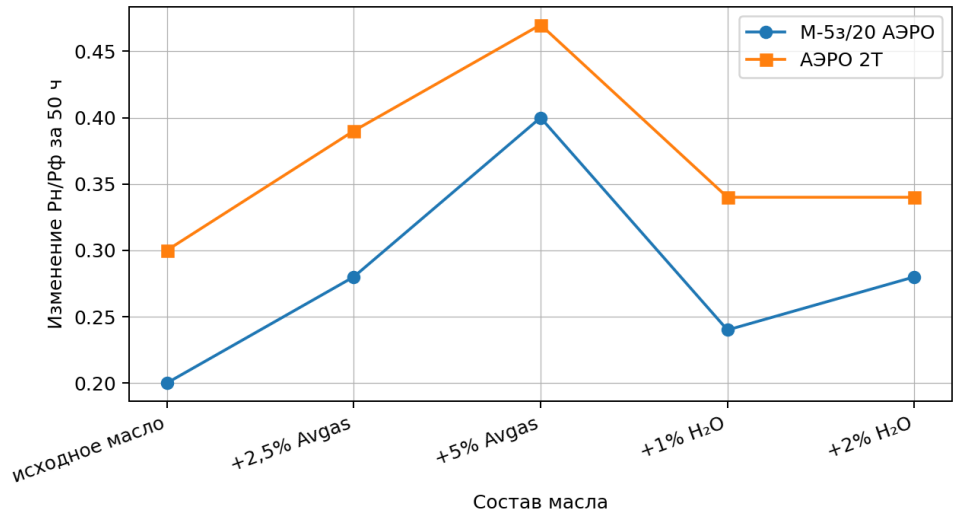


Рисунок 3 – Изменение перепада давления на фильтре тонкой очистки после 50 ч испытаний при 150 °С

Добавка 5 % масс. топлива Avgas 100LL к маслу М-5з/20 АЭРО повышает потребную мощность откачивающего насоса на 7,8 %, добавка 2 % масс. воды повышает мощность откачивающего насоса на 15,6 % при кратности откачки K_p = 2. При кратности откачки K_p = 4 влияние эксплуатационных факторов отсутствует, что объясняется высоким газосодержанием масла.

Показано влияние эксплуатационных примесей в масле на ресурс откачивающего насоса масляной системы РПД, а также значимость режима откачки для устойчивости циркуляции масловоздушной смеси и выбора запаса по производительности насосного агрегата.

Четвертая глава содержит результаты исследования влияния масел М- 5з/20 АЭРО и АЭРО 2Т, а также воды, этанола и метил-трет-бутилового эфира (МТБЭ) на характеристики воспламенения и горения топливомасловоздушных смесей, а также оценку детонационной стойкости топливомасловоздушных смесей.

Показано, что добавка моторного масла снижает период индукции воспламенения Avgas 100LL и уменьшает стойкость смеси к самовоспламенению на ударной трубе. При добавке 10 % мол. масел М-5з/20 АЭРО и АЭРО 2Т период индукции воспламенения в области 600 – 900 К снижается на 50 - 70 %, что подтверждает необходимость учета влияния масла при оценке детонационной стойкости РПД.

Установлено, что кислородсодержащие компоненты оказывают противоположное влияние на ПИВ: 10 % мол. этанола повышает ПИВ Avgas 100LL на 66 %, а 10 % мол. МТБЭ — на 140 % в области 600 - 900 К. Добавка дистиллированной воды в количестве 10 % мол. снижает ПИВ на 5 - 15 %, что указывает на необходимость учета воды как эксплуатационной примеси.

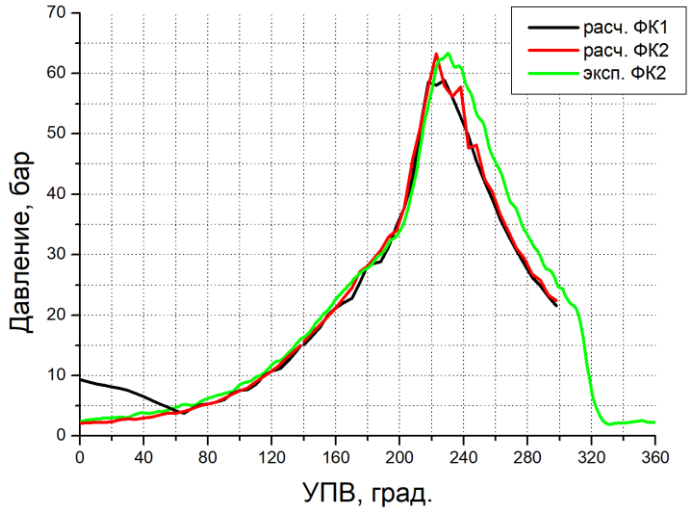
Для оценки полноты сгорания и нагарообразования использовалась камера сгорания испарительного типа. Установлено, что в диапазоне коэффициентов избытка воздуха α = 0,8 - 2 смесь на основе Avgas 100LL характеризуется ростом коэффициента полноты сгорания от 0,80 до 0,95. Добавка 5 - 10 % об. масла М-5з/20 АЭРО снижает полноту сгорания Avgas 100LL на 35 - 40 %, а добавка масла АЭРО 2Т — на 45 - 50 %. Влияние кислородсодержащих компонентов существенно слабее: МТБЭ снижает полноту сгорания примерно на 1 %, а этанол повышает ее на 1 - 2 %.

Экспериментально установлено, что добавка 5 - 10 % об. масла М- 5з/20 АЭРО повышает нагарообразование Avgas 100LL на 120 - 360 %, а добавка масла АЭРО 2Т — на 87 - 330 %. Моторное масло оказывается одним из ключевых факторов образования углеродистых отложений в РПД, и это должно учитываться при выборе масла и оценке ресурса двигателя.

Оценка детонационной стойкости топливомасловоздушной смеси в камере сгорания РПД проведена с помощью численного моделирования рабочего процесса двигателя РПД-100Т.

Для расчета рабочего процесса использована модель горения с явным выделением фронта пламени с методом частиц, валидированная по результатам стендовых испытаний двигателя РПД-100Т. Модель воспроизводит основные особенности изменения давления в рабочей камере и может применяться для оценки влияния добавок моторных масел на горение топливовоздушной смеси (рисунок 4).

Оценка влияния добавок масел АЭРО 2Т и М-5з/20 АЭРО выполнена путем сопоставления расчетных зависимостей средней и максимальной температуры в предпламенной зоне и давления в камере сгорания РПД от угла поворота выходного вала.



УПВ – угол поворота вала.

Рисунок 4 – Расчетные и измеренные индикаторные диаграммы

Сравнение этих зависимостей показывает, что добавка 1 % масс. масел изменяет температурные зависимости, однако максимальные температуры цикла не превышают температуру, соответствующую переходу к высокотемпературному механизму окисления. Поэтому вероятность предпламенного самовоспламенения и детонации для рассмотренных режимов двигателей типа РПД-100Т оценивается как крайне низкая.

Результаты стендовых испытаний натурного двигателя РПД-100Т показали, что применение масла АЭРО 2Т обеспечило снижение нагарообразования в камере сгорания. Это увеличило время наработки двигателя в 5 раз в сравнении с маслом М-5з/20 АЭРО до достижения предельного отклонения удельного эффективного расхода топлива от проектных значений.

Заключение

Выполнено комплексное исследование, включающее анализ условий работы масляной системы РПД, экспериментальное изучение закономерностей деградации масел, оценку влияния эксплуатационных примесей на воспламенение и горение топливомасловоздушных смесей, расчетное моделирование рабочего процесса в камере сгорания РПД-100Т и стендовые испытания элементов маслосистемы. Полученные результаты позволили выбрать тип масла для авиационного РПД, обеспечивающий наибольшее снижение удельного расхода топлива. В работе решена научно-техническая задача, связанная с повышением характеристик авиационного роторно-поршневого двигателя при применении моторных масел АЭРО 2Т и М-5з/20 АЭРО.

1. Получены экспериментальные данные по свойствам масел М-5з/20 АЭРО и АЭРО 2Т при доливе свежего масла, а также при попадании бензина Avgas 100LL, технической и морской воды в диапазоне температур окисления 150 - 190 °С. Масло М-5з/20 АЭРО характеризуется более высоким запасом работоспособности (на 52 % при 170 °С) в сравнении с маслом АЭРО 2Т по совокупности вязкостных, противоизносных, пенообразующих и коррозионных показателей. Для масла АЭРО 2Т при повышенных температурах запас по времени достижения предельных значений ниже, что ограничивает область его применения в маслосистеме РПД.

Долив свежего масла частично восстанавливает уровень свойств рабочей смеси (долив 30 % масс. свежего масла повышает работоспособность масла М-5з/20 АЭРО на 50 ± 8 %, масла АЭРО 2Т на 26 ± 4 % при температуре окисления 150 °С), однако не является эквивалентом полной замены масла, поскольку продукты окисления и загрязнения остаются в системе. Добавка бензина Avgas 100LL в масла приводит к изменению вязкостных и смазывающих характеристик, ускоряет достижение предельных значений показателей (добавка 2 % масс. Avgas 100LL ускоряет достижение заданных значений свойств масел М-5з/20 АЭРО и АЭРО 2Т на 11 ± 4 % и 15 ± 5 %, соответственно) и ухудшает смазывающие свойства. Попадание воды, особенно морской, повышает коррозионный износ металлических материалов маслосистемы (потеря массы медной пластинки при добавке 1 % масс.

технической и морской воды повышается на 90 ± 10 % и 270 ± 30 %, соответственно) и повышает скорость деградации масел (добавка 1 % масс. технической и морской воды снижает время достижения заданных значений свойств масел М-5з/20 АЭРО и АЭРО 2Т на 10 ± 2 % и 14 ± 2 %, соответственно, при температуре окисления 150 °С). Учет эксплуатационных примесей является обязательным условием корректного прогнозирования работоспособности масла и элементов масляной системы авиационного РПД.

2. Исследованы характеристики маслосистемы РПД в стендовых условиях при работе на маслах М-5з/20 АЭРО и АЭРО 2Т. Работоспособность маслосистемы РПД-100Т оценивалась по совокупности показателей: износу узла трения, засорению фильтра тонкой очистки и устойчивости циркуляции.

Показано, что добавка Avgas 100LL снижает ресурс маслосистемы в большей степени за счет повышения скорости деградации масла и засорения фильтра тонкой очистки. Добавка воды в большей степени повышает износ узла трения. Устойчивость циркуляции масла, оцениваемая по мощности откачивающего насоса, выше при добавке воды (на 15,6 %), чем при добавке Avgas 100LL (на 7,8 %). С повышением кратности откачки влияние эксплуатационных примесей на устойчивость циркуляции снижается.

3. Добавка моторных масел М-5з/20 АЭРО и АЭРО 2Т снижает период индукции воспламенения Avgas 100LL и, тем самым, уменьшает стойкость топливомасловоздушной смеси к самовоспламенению. Наиболее выраженный эффект зафиксирован в области 600 - 900 К при добавке 10 % мол. масла, где снижение ПИВ составляет 50 - 70 %. Добавка технической воды оказывает умеренное, но также неблагоприятное влияние на стойкость к самовоспламенению. В отличие от моторных масел и воды, кислородсодержащие компоненты — этанол и МТБЭ — увеличивают ПИВ Avgas 100LL, что указывает на потенциальную возможность повышения стойкости топливомасловоздушной смеси к самовоспламенению при соответствующем подборе состава.

Добавка 5 - 10 % об. масла М-5з/20 АЭРО снижает полноту сгорания Avgas 100LL на 35 - 40 %, а добавка масла АЭРО 2Т — на 45 - 50 %. При этом добавка масла М-5з/20 АЭРО повышает массу нагара на 120 - 360 %, а добавление масла АЭРО 2Т — на 87 - 330 %. Полученные данные подтверждают, что попадание масла в камеру сгорания является одним из определяющих факторов образования отложений, что учтено при выборе масла.

4. Установлено, что добавка моторного масла в топливовоздушную смесь изменяет характер горения и температурное состояние предпламенной зоны. Добавка масла приводит к изменению скорости распространения фронта пламени и снижению детонационной стойкости рабочего процесса. Это согласуется с экспериментальными данными по уменьшению ПИВ и увеличению нагарообразования при наличии масла в смеси. Оценка рабочего процесса РПД-100Т выполнена с учетом фактического состава топливовоздушной смеси, включая наличие масла в рабочей камере.

5. На основе результатов исследования физико-химических и эксплуатационных свойств масел АЭРО 2Т и М-5з/20 АЭРО, их влияния на характеристики воспламенения и горения Avgas 100LL, а также на характеристики элементов маслосистемы РПД выбрано масло АЭРО 2Т для применения в двигателях типа РПД-100Т. Применение масла АЭРО 2Т обеспечило снижение удельного расхода топлива двигателя РПД-100Т в 5 раз в сравнении с маслом М-5з/20 АЭРО при равной наработке. Эффект достигнут за счет снижения нагарообразования в камере сгорания.

Полученные результаты подтверждают достижение поставленных целей диссертационной работы и могут быть использованы при создании специальных масел для авиационных РПД.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Kozlov A.L. Changes in the performance properties of motor oils during thermal oxidation in the oil system of an aircraft rotary piston engine // Technical Physics Letters. 2026. Vol. 52. No. 7. P. 407-412. DOI: 10.1134/S1063785026700847. (0,55 п.л.)
2. Vyalikov D.V., Stupenkov M.I., Kozlov A.L. Features of Three-Dimensional Thermal State Modeling of a Rotary Piston Engine // Technical Physics. 2026. Vol. 71. No. 9. P. 673-679. DOI: 10.1134/S1063784226700532. (0,63 п.л./0,21 п.л.)
3. Effect of engine oils on self-ignition of a air-fuel mixture in the combustion chamber of a rotary piston engine/ Kozlov A.L. [et al] // Journal of Experimental and Theoretical Physics. 2026. Vol. 143. No. 1. P. 1-6. DOI: 10.1134/S1063776126700135. (0,5 п.л./0,125п.л.)
4. Козлов А.Л., Васильков Н.Д., Калитка В.С. Расчет силовой установки летательного аппарата вертикального взлета и посадки для межрегиональной перевозки грузов и пассажиров // Авиационные двигатели. 2025. № 2. С. 17–26. (0,84 п.л./0,28 п.л.)
5. Козлов А.Л., Ступеньков М.И., Касько А.А. Профилирование торцевых окон и определение их коэффициентов расхода в роторно-поршневом двигателе // Авиационные двигатели. 2025. №. 4 (29). С. 11–22. (0,75 п.л./0,25 п.л.)
6. Современная энергетическая установка на основе роторно-поршневого двигателя/ Козлов А.Л. [и др.] // Международная научно-техническая конференция по авиационным двигателям ICAM 2025: сборник тезисов / Государственный научный центр РФ «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова». М.: ЦИАМ им. П. И. Баранова. 2025. С. 171–174. (0,3 п.л./0,06 п.л.)
7. Перспективы применения композиционного электрохимического покрытия на основе никеля с добавлением частиц карбида кремния для деталей из алюминия и его сплавов/ Козлов А.Л. [и др.] // Международная научно-техническая конференция по авиационным двигателям ICAM 2025: сборник тезисов / Государственный научный центр РФ «Центральный

институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова». М.: ЦИАМ им. П. И. Баранова. 2025. С. 1126–1128. (0,24 п.л./0,048 п.л.)

8. Исследования изменения эксплуатационных свойств моторных масел в условиях авиационного роторно-поршневого двигателя/ Козлов А.Л. [и др.] // Материалы LXI Научных чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского. Часть 1. Изд-во: «Эйдос». 2026. – С. 316 – 317. (0,13 п.л./0,03 п.л.)