

Государственный научный центр
Федеральное государственное унитарное предприятие
«Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова»

На правах рукописи



Ежов Василий Михайлович

РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА
ДЛЯ СОЗДАНИЯ СМАЗОЧНЫХ И ГИДРАВЛИЧЕСКИХ МАСЕЛ НОВОГО
ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Специальность 05.07.10 – Инновационные технологии
в аэрокосмической деятельности

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Яновский Леонид Самойлович

Москва – 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Глава 1 Обзор работ в области разработки авиационных смазочных и гидравлических масел.....	8
1.1 Назначение, условия применения масел, основные требования к их качеству.....	8
1.2 Ассортимент и классификация российских и зарубежных смазочных и гидравлических масел.....	14
1.3 Физико-химические и эксплуатационные свойства смазочных и гидравлических масел.....	23
1.4 Проблемы применения современных смазочных и гидравлических масел на изделиях авиатехники.....	32
1.5 Методы создания и исследования авиационных масел.....	36
Выводы по Главе 1.....	43
Цель работы и решаемые задачи.....	44
Глава 2 Разработка расчетно-экспериментального комплекса методов по созданию авиационных масел.....	47
2.1 Выбор структуры расчетно-экспериментального комплекса по созданию авиамасел.....	47
2.2 Постановка задачи оптимизации.....	49
2.3 Выбор метода оптимизации составов опытных образцов.....	52
2.4 Разработка метода исследования вспениваемости авиационных масел в лабораторных условиях в расширенном интервале температур.....	56
2.5 Разработка метода исследования вспениваемости авиационных масел в демонстрационной электроприводной системе смазки ГТД.....	68
2.6 Разработка комплексного метода оценки работоспособности авиационных масел в условиях, приближенных к реальным условиям эксплуатации.....	80
2.7 Разработка системы сравнительной оценки уровня физико-химических и эксплуатационных свойств авиационных масел.....	93
Выводы по Главе 2.....	98
Глава 3 Исследования в обеспечение создания смазочных и гидравлических масел нового поколения для авиационной техники.....	101
3.1 Разработка технических требований к смазочным и гидравлическим маслам нового поколения.....	101
3.2 Обоснование выбора базовых масел и присадок для авиационных масел.....	110
3.3 Обоснование выбора высокотемпературного антиокислителя.....	114
3.4 Выбор присадки для снижения вспениваемости масел.....	119
Выводы по Главе 3.....	124
Глава 4 Результаты исследования смазочных и гидравлических масел нового поколения.....	126
4.1 Оптимизация составов опытных образцов новых масел.....	126
4.2 Результаты квалификационных исследований опытных образцов новых масел.....	131
4.3 Результаты исследования вспениваемости новых масел в лабораторных	

условиях в расширенном интервале температур.....	137
4.4 Расчет вязкости новых масел в зависимости от температуры.....	139
4.5 Результаты исследования вспениваемости новых масел на демонстрационной электроприводной системе смазки ГТД.....	143
4.6 Результаты исследования работоспособности опытных образцов новых масел на редукторном стенде Ш-3.....	148
4.7 Разработка рекомендаций к применению новых масел в изделиях авиатехники.....	156
4.8 Результаты сравнения уровня физико-химических и эксплуатационных свойств новых масел.....	159
Выводы по главе 4.....	161
Заключение.....	163
Список сокращений и условных обозначений.....	167
Библиографический список используемой литературы.....	168
Приложение А. Методика оценки воздействия масел на конструкционные и уплотнительные материалы	181
Приложение Б. Бюллетень № 200.7.0.0554.04 Руководство по технической эксплуатации (РЭ). Уточнение текста в связи с применением масла АСМО-200 (СТО 07548712-001-2014) производства АО «НПЦ Спецнефтьпродукт» в главном редукторе ВР-24	197
Приложение В. Бюллетень № 200.7.0.0555.04 Уточнение РЭ двигателей ТВЗ-117 всех модификаций, ВК-2500 всех моделей в части применения масла АСМО-200 по СТО 07548712-001-2014 производства АО «НПЦ Спецнефтьпродукт»	199
Приложение Г. Бюллетень № 200.7.0.0556.04 Руководство по технической эксплуатации (РЭ). Уточнение текста в связи с применением масла АСМО-200 (СТО 07548712-001-2014) производства АО «НПЦ Спецнефтьпродукт» в главном редукторе ВР-14	201

ВВЕДЕНИЕ

Создание перспективных летательных аппаратов (ЛА) с реактивными двигателями (РД) нового поколения требует принятия оптимальных конструктивных технологических решений и создания или выбора новых материалов, топлив, смазочных и гидравлических масел уже на ранних стадиях проектирования. Это позволяет заметно сократить цикл создания перспективных ЛА и РД, снизить затраты на отработку ЛА и РД, что особенно значимо как в настоящий период, так и, по-видимому, в будущем. Создание вышеуказанных материалов, особенно смазочных и гидравлических масел, представляет собой весьма длительный и трудоёмкий процесс, и его сокращение является актуальной задачей.

Обеспечение надежной и безопасной эксплуатации современной и перспективной авиатехники с газотурбинными двигателями (ГТД) требует высококачественных смазочных и гидравлических масел.

Методы создания авиационных масел, применяемые в настоящее время, не изменились за последние 50 лет. Они характеризуются большим объемом лабораторных исследований физико-химических и эксплуатационных свойств опытных образцов, что обуславливает высокие стоимость и продолжительность создания новых масел. Кроме того, длительность исследований обусловлена несовершенством методов исследования. Эти методы не подвергались ревизии длительное время.

Отсутствуют автоматизированные методы определения оптимальных составов опытных образцов. Экспертная оценка составов опытных образцов усложняется вследствие значительного количества показателей качества и количества присадок, содержание которых варьируется.

Недостаточный уровень качества существующих авиационных масел обуславливает проблемы при их эксплуатации. Известны случаи закоксовывания масляных полостей опор роторов теплонагруженных ГТД вследствие недостаточной термоокислительной стабильности масел. Недостаточная

стойкость к пенообразованию приводит к «дымлению» авиационных ГТД. Низкий уровень пожаробезопасности гидравлических масел приводит к пожарам.

Созданием масел занимались Бартко Р.В., Винс В.В., Горячев В.В., Гришин Н.Н., Данилов А.М., Малышева Е.В., Меджибовский А.С., Назарова Т.И., Розанова Н.Л., Спиркин В.Г., Фукс И.Г., Хурумова А.Ф., Цветков О.Н., Школьников В.М., Яновский Л.С. и другие российские и зарубежные ученые.

Объектом исследования является расчетно-экспериментальный комплекс методов по созданию авиационных масел, а также созданные опытные образцы маловязкого масла ВАСМО-225 и унифицированного масла АСМО-200 для авиационных ГТД, а также масла АСГИМ для гидравлических систем летательных аппаратов (ЛА).

Научная новизна результатов заключается в следующем:

1. Усовершенствован расчетно-экспериментальный метод создания оптимизированных составов авиационных масел нового поколения, основанный на методе безусловной оптимизации содержания присадок в базовом масле.
2. Обосновано применение и определена оптимальная концентрация кремнийорганической присадки, равная 0,005 % масс., для улучшения пенообразующих характеристик масел.
3. Показано, что введение кремнийорганической присадки в концентрации 0,005 % масс. позволяет не только улучшить пенообразующие свойства масел, но и снизить потери мощности электроприводов системы смазки ГТД.
4. Определены значения вязкости новых масел расчетным путем интервале температур от минус 60 до 225°C.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Созданы оптимальные рецептуры масел нового поколения: для ГТД и редукторов вертолётов масло АСМО-200 и масло ВАСМО-225, обладающие пониженной склонностью к коксо- и пенообразованию, а также масло АСГИМ, обладающее повышенной пожаробезопасностью, для гидравлических систем ЛА.

2. Модернизирован стенд Ш-3 для оценки работоспособности масел в условиях, приближенных к реальным условиям эксплуатации ГТД, путем введения нового блока оценки совместимости масел с конструкционными и уплотнительными материалами.

3. Разработан метод оценки качества масел для авиационных ГТД и редукторов вертолётов, включающий совместную оценку термоокислительной стабильности, трибологических и вязкостно-температурных характеристик, а также совместимости с конструкционными и уплотнительными материалами.

4. Разработан новый метод оценки пенообразующих свойств масел, позволяющий моделировать условия работы масла в перспективных авиационных двигателях с электроприводом маслосистемы.

5. Определены вязкостно-температурные характеристики новых масел в интервале температур от минус 60 до 225°C. Для расчета вязкостно-температурных характеристик новых масел рекомендована формула Вальтера.

6. Создана электронная база данных по физико-химическим и эксплуатационным свойствам новых масел, являющаяся основой для разработки новых перспективных масел, а также для расчетов при проектировании маслосистем ГТД.

7. Разработаны рекомендации к применению опытных образцов масел в ГТД. Даны заключения для внедрения масел нового поколения: АСМО-200 – для ГТД и редукторов вертолётов, ВАСМО-225 – для двухконтурных турбореактивных двигателей (ТРДД), АСГИМ – для гидравлических систем ЛА.

Методы исследования. В работе использованы экспериментальные методы исследования физико-химических и эксплуатационных свойств авиационных смазочных и гидравлических масел, метод математической оптимизации, а также теоретические и статистические методы анализа информации.

Положения, выносимые на защиту:

1. Расчетно-экспериментальный комплекс по созданию новых масел, обеспечивающий получение оптимизированных составов и снижение объема экспериментальных исследований. Комплекс может быть применен для создания

масел для других областей применения (наземная и морская техника, энергетика и другие).

2. Оптимизированные составы масел нового поколения на основе компонентов отечественного производства: ВАСМО-225 для ТРДД (особые условия эксплуатации), АСМО-200 для турбореактивных двигателей (ТРД), ТРДД, турбовинтовых двигателей (ТВД) и турбовальных двигателей (ТВад), а также главных редукторов вертолётов, АСГИМ для гидравлических систем ЛА.

3. Метод оценки работоспособности масел для авиационных ГТД и редукторов вертолётов в условиях, максимально приближенных к реальным условиям работы масла в двигателе.

4. Метод оценки вспениваемости масел, позволяющий моделировать условия работы масла в перспективных авиационных ГТД.

5. Метод снижения вспениваемости авиационных масел.

6. Вязкостно-температурные характеристики новых масел.

Степень достоверности полученных результатов работы. Достоверность полученных в диссертации научных положений, выводов и рекомендаций обеспечена применением современных методов математического моделирования, аттестованных измерительных средств, а также апробированных методик измерений и обработки данных, анализом погрешности измерений и воспроизводимостью результатов испытаний.

Глава 1 Обзор работ в области разработки авиационных смазочных и гидравлических масел

1.1 Назначение, условия применения масел, основные требования к их качеству

Смазочные и гидравлические масла являются конструктивными элементами ГТД и гидравлических систем современных и перспективных ЛА. Для обеспечения надежной работы узлов ГТД и ЛА масла должны обладать высоким уровнем эксплуатационных свойств.

Основными функциями смазочных масел в части обеспечения работоспособности авиационных силовых установок являются смазка и охлаждение узлов трения. Гидравлические масла передают механическую энергию к исполнительным агрегатам, однако смазка и охлаждение элементов гидравлической системы также входит в их основные функции [5].

В авиационных ГТД масло смазывает подшипники качения опор ротора, трущиеся детали контактных уплотнений опор ротора, подшипники и шестерни центрального привода и коробки приводов агрегатов (КПА). Кроме того, масло используется для смазки коробок самолетных агрегатов (КСА), гидроприводов (ГП), приводов постоянных оборотов (ППО), электрогенераторов, турбостартеров, подшипников турбохолодильников и других узлов и агрегатов ЛА. В ТВД тяжелонагруженный редуктор также смазывается маслом. Смазка главного редуктора вертолетов часто осуществляется единым маслом, смазывающим турбокомпрессорную часть двигателя и свободную турбину.

Подшипники качения ротора ГТД, а также шестерни редукторов ТВД и главных редукторов вертолетов работают в наиболее тяжёлых условиях.

Радиальные и осевые усилия на подшипники трансмиссии высоки, особенно на взлётном и чрезвычайном режимах работы ГТД. Осевые нагрузки достигают 5900 кгс, радиальные – 5600 кгс [2,3].

Контактные напряжения в подшипниках авиационных двигателей могут достигать 300 кгс/мм^2 [99]. Контактные напряжения сжатия на зубьях шестерен

наиболее нагруженных коробок приводов агрегатов различных двигателей находятся в пределах 125 - 145 кгс/мм² [97]. В редукторах ТВД и вертолетов максимальные расчетные контактные напряжения достигают и более значительных величин [2,3].

Главный редуктор вертолета предназначен для передачи крутящего момента от двух двигателей на вал несущего винта и, через промежуточный редуктор, на рулевой (хвостовой) винт. Нагрузки, передаваемые редуктором, зависят от режимов работы двигателя. Для редуктора ВР-14 передаваемая мощность от двигателя на взлетном режиме может достигать 1543,5 МВт (2100 л.с.), на номинальном режиме – 2529,6 МВт (1860 л.с.), а на крейсерском - 1213 МВт (1650 л.с.). При этом контактные напряжения наиболее нагруженных сателлитных шестерен в этом редукторе составляют 123,4 кгс/мм², 118,9 кгс/мм² и 114,85 кгс/мм², соответственно [1, 35].

Для смазки трущихся узлов ГТД с открытой маслосистемой («смазка на выброс») достаточно ~ 3-5 % [78] масла от подаваемого в узел трения при традиционной циркуляционной системе смазки [1]. Остальное количество масла требуется для охлаждения узлов трения.

Источниками тепла в опорах ротора являются трение в подшипниках и уплотнениях, внешний теплопровод через стенки масляных полостей, теплоподвод по валу двигателя и воздух, проникающий в масляные полости в процессе наддува уплотнений [1].

В теплонапряженных ГТД при дозвуковых скоростях полета температуры подшипников ротора и стенок масляных полостей превышают 300°С, при сверхзвуковых скоростях значения температур ещё выше [2].

Температура масла на выходе из современных теплонапряженных ГТД гражданской авиации достигает 165°С, военной – 225°С [2].

Самолетные гидropередачи обеспечивают управление рулями и элеронами, подъемом и выпуском шасси, закрылками и воздушными тормозами, управление узлами силовой установки, вооружения, радиотехнического оборудования, торможения колес, а также гидropневматическими амортизаторами шасси. Их

работоспособность обеспечивается единой рабочей жидкостью – гидравлическим маслом [89].

Давление в гидравлической системе составляет порядка 200 атмосфер, температура может колебаться от минус 60°C до 100-150°C и выше. Кратковременно давление гидравлического масла может достигать 1000 атмосфер [4].

Кроме смазки и охлаждения масло выполняет ряд других функций. Оно выносит абразивные частицы износа трущихся поверхностей и окисления масла из узла трения, защищает контактирующие с маслом поверхности двигателя от атмосферной коррозии, может использоваться в качестве рабочей жидкости в регуляторе оборотов и шага воздушного винта, а также в командно-топливных агрегатах [1].

Высокая температура масла и деталей двигателя, соприкасающихся с маслом, может вызвать существенные изменения физико-химических и эксплуатационных свойств масла, образование значительного количества отложений продуктов окисления его в маслосистеме двигателей. Образование отложений может привести к забивке фильтров тонкой очистки масла и форсунок, подводящих масло к трущимся деталям подшипниковых узлов опор ГТД [93]. Стойкость масел к изменению свойств под воздействием высокой температуры определяется их термической и термоокислительной стабильностью [88].

Эксплуатация авиационных ГТД производится в различных климатических условиях. Смазочное масло должно обеспечивать надежный запуск двигателя в условиях низких температур окружающего воздуха [94]. По техническим требованиям надежный запуск двигателя должен производиться при температурах до минус 40°C (без подогрева масла) [2]. Масло должно прокачиваться насосами при этих условиях.

Прокачиваемость масла при низких температурах определяется его вязкостью при низкой температуре. Подача масла к узлам трения обеспечивается при вязкости масла не более 3000 – 5000 мм²/с [2, 3, 70].

Одновременно вязкость определяет несущую способность масла. При

гидродинамическом режиме трения прочность масляной пленки, предотвращающей износ сопряженных поверхностей, пропорциональна вязкости масла. Для обеспечения работоспособности узлов трения масла должны обладать достаточным уровнем вязкости [5].

В процессе работы в авиационном ГТД масло контактирует с различными конструкционными материалами. В авиационных ГТД используются легированные стали, сплавы алюминия, магния, меди (бронзы, латуни), гальванические покрытия на сталях и сплавах (фосфатирование, кадмирование, серебрение и т.п.), а также уплотнительные материалы [4].

Таким образом, масла в авиационных ГТД работают в широком диапазоне температур, при различных режимах трения, высоких нагрузках и скоростях относительного перемещения трущихся деталей, в контакте с различными конструкционными и уплотнительными материалами, в условиях высокой аэрации [98].

Масла для современных ГТД должны обладать высокой термоокислительной и термической стабильностью, хорошими смазывающими и пусковыми свойствами, низкой агрессивностью к конструкционным и уплотнительным материалам. Кроме того, масла должны обладать высокой температурой вспышки, малой вспениваемостью и т.д.

Масла должны иметь широкую сырьевую базу, вырабатываться по доступной технологии и из отечественного сырья, а также не обладать высокой токсичностью.

Масла для авиационных гидравлических систем должны обладать оптимальным уровнем вязкости, высокими вязкостно-температурными свойствами в широком диапазоне температур, стойкостью к окислению и антипенными свойствами. Масла также должны обладать достаточным уровнем трибологических характеристики и быть совместимыми с конструкционными и уплотнительными материалами узлов и агрегатов гидравлической системы [4]. Масла, загущенные полимерными присадками, должны обладать достаточно высокой стойкостью к механической и термической деструкции [9].

Вязкостные и низкотемпературные свойства для гидравлических масел особенно важны, так как определяют температурный диапазон эксплуатации гидросистем ЛА и оказывают решающее влияние на выходные характеристики гидропривода. При выборе вязкости гидравлического масла важно знать тип насоса. Разработчик насоса рекомендует значения вязкости: максимальное, минимальное и оптимальное. Максимальное – это наибольшая вязкость, при которой насос в состоянии прокачивать масло. Значение зависит от мощности насоса, диаметра и протяженности трубопровода. Минимальное – это та вязкость при рабочей температуре, при которой гидросистема работает достаточно надежно. Если вязкость уменьшается ниже допустимой, растут объемные потери (утечки) в насосе и клапанах, соответственно, падает мощность и ухудшаются условия смазывания. Пониженная вязкость гидравлического масла вызывает наиболее интенсивное проявление усталостных видов изнашивания контактирующих деталей гидросистемы. Повышенная вязкость значительно увеличивает механические потери привода, затрудняет относительное перемещение деталей насоса и клапанов, делает невозможной работу гидросистем в условиях пониженных температур.

Гидравлические масла должны обладать высокой антиокислительной и химической стабильностью. Она характеризует стойкость масла к окислению в процессе эксплуатации под воздействием температуры и усиленного барботажа масла воздухом при работе насоса. Окисление масла приводит к изменению его вязкости (как правило, к повышению) и к накоплению в нем продуктов окисления, образующих осадки и лаковые отложения на поверхностях деталей гидросистемы, что затрудняет ее работу.

В гидросистемах машин и механизмов присутствуют детали из разных металлов: разных марок стали, алюминия, бронзы, которые могут подвергаться коррозионно-химическому изнашиванию. Коррозия металлов может быть электрохимической, возникающей обычно в присутствии воды, и химической, протекающей под воздействием химически агрессивных сред (кислых соединений, образующихся в процессе окисления масла) и под воздействием

химически-активных продуктов расщепления присадок при повышенных контактных температурах поверхностей трения.

Гидравлические масла не должны оказывать влияние на уплотнительные материалы, контактирующие с ними длительное время. Рабочие температуры масла в современных гидравлических системах достаточно высоки. Резиновые уплотнения могут быстро разрушаться, поэтому гидравлические масла должны быть совместимы с ними в течение заданного ресурса.

В состав авиационных гидравлических систем входят форсированные гидравлические насосы. Обеспечение их работоспособности требует достаточного уровня трибологических свойств масел.

При работе циркулирующих гидравлических масел недопустимо пенообразование. Оно нарушает подачу масла к узлу трения и, насыщая масло воздухом, интенсифицирует его окисление, ухудшая отвод тепла от рабочих поверхностей, вызывает кавитационные повреждения деталей, перегрев гидропривода и его повышенный износ.

В составе гидравлических масел крайне нежелательно наличие механических примесей [87] и воды [86]. Вследствие весьма малых зазоров рабочих пар гидросистем (особенно, оснащенных аксиально-поршневыми механизмами) наличие загрязнений может привести не только к износу элементов гидрооборудования, но и к заклиниванию деталей. Для очистки рабочей жидкости от загрязнений в гидросистемах применяют фильтры различных типов. Даже незначительное количество (0,05-0,1 %) воды отрицательно влияет на работу гидросистем [77]. Вода, попадающая в гидросистему с маслом или в процессе эксплуатации, ускоряет процесс окисления масла, вызывает гидролиз гидролитически неустойчивых компонентов масла (в частности, присадок — солей металлов). Продукты гидролиза присадок вызывают электрохимическую коррозию металлов гидросистемы. Вода способствует образованию шлама неорганического и органического происхождения, который забивает фильтр и зазоры оборудования, тем самым, нарушая работу гидросистемы.

Масла, загущенные полимерными присадками, должны обладать

достаточно высокой стойкостью к механической и термической деструкции; для масел, эксплуатируемых в гидросистемах речной и морской техники, особенно важна влагостойкость присадок и малая эмульгируемость [9].

1.2 Ассортимент и классификация российских и зарубежных смазочных и гидравлических масел

В ранних отечественных ТРД применялись маловязкие минеральные масла. Начиная с 50-х годов, были разработаны, испытаны и допущены к применению минеральные масла марок МК-8, МК-8П, МК-6, МС-6, МС-8П и МС-8РК [91].

Самые технически совершенные масла на минеральной основе работоспособны до температуры 150 °С включительно [74]. Этого не достаточно для обеспечения работоспособности современных и перспективных ГТД, поэтому применяются синтетические масла, работоспособные при температурах до 200°С включительно [63].

Для смазки ТРД разработано масло 36/1 на основе смеси эфиров диэтиленгликоля и пентаэритрита. Масло 36/1 содержит в качестве антиокислительной присадки 0,5% масс. параоксидифениламина и противозадирную присадку 2-меркаптобензтиазол («каптакс»).

Присадка «каптакс» обуславливает потенциальную возможность образования осадков в маслосистеме двигателей вследствие её окисления кислородом воздуха при повышенных температурах. Продукт окисления дитиобензтиазол («альтакс») обладает худшей растворимостью в основе масла и при низких температурах может выпадать в осадок [5].

В настоящее время масла 36/1, 36/1К, 36/1 Ку, 36/1 Ку-А, разработанные на основе масла 36/1 не применяются.

На основе сложных эфиров диизооктилового спирта и себациновой кислоты разработано масло ВНИИ НП 50-1-4ф, обладающее хорошими низкотемпературными свойствами и термостабильное до 175-180°С. Позже

термоокислительная стабильность масла ВНИИ НП 50-1 -4ф была улучшена за счет дополнительного введения в состав масла новой антиокислительной присадки, а введение в состав масла антикоррозионной присадки способствовало снижению коррозионной агрессивности масла. Масло ВНИИ НП 50-1-4у работоспособно до 200°C [1].

На основе синтетических углеводородов разработано масло ИПМ-10, которое применяется в теплонапряженных ТРД и во вспомогательных агрегатах ЛА. Масло ИПМ-10 вырабатывается на основе смеси полиальфаолефинового масла со сложным эфиром себаценовой кислоты и диизооктилового спирта (ДОС) с добавками комплекса присадок.

Масло ИПМ-10 термостабильно до температуры 200°C и является основной маркой масла для теплонапряженных двигателях военной и гражданской авиации, а также для смазки турбокомпрессорной части двигателей некоторых вертолетов.

Недостатком масла ИПМ-10 является чувствительность масла к перегреву в горячих зонах двигателей, вызывающая образование повышенных количеств отложений в маслосистемах изделий [2].

Для работы в короткоресурсных авиационных ТРД высокой тепловой напряженности было разработано масло ВТ-301 на основе фторорганосилоксанов. Масло ВТ-301 обладает высокой термоокислительной стабильностью (до 250-280°C), уникальными низкотемпературными свойствами, не агрессивно к большинству конструкционных авиационных материалов. К недостаткам масла ВТ-301 следует отнести сравнительно невысокие противоизносные свойства, низкую теплоёмкость, сложность технологии изготовления и высокую стоимость вследствие дороговизны кремнийорганической основы и сложности технологии производства [1].

До появления синтетических масел ТВД, имеющие общую маслосистему с редуктором винта, смазывались смесями маловязких минеральных масел (типа МК-8) с высоковязкими остаточными маслами МС-20 (или МК-22) в соотношениях 25:75, 50:50 и 75:25 [5].

Известно [1], что маслосмеси в целом обладают невысокими

эксплуатационными свойствами. Они не обеспечивают запуска изделий в зимнее время без подогрева, готовятся на месте без достаточного контроля качества, термоокислительная стабильность их недостаточна [95].

Взамен применяемых маслосмесей разработаны единые загущенные масла МН-7,5 и ВНИИ НП-7. Масло МН-7,5 изготавливается на минеральной основе, содержит загущающую, антиокислительную, противозадирную, противоизносную присадки. Масло МН-7,5 характеризуется склонностью к образованию твердых продуктов окисления [1]. Синтетическое масло ВНИИ НП-7 разработано на основе загущенного октолом эфира диизооктилового спирта и себаценовой кислоты.

Масло МН-7,5 было доработано, новая марка получила название МН-7,5у. Масло является унифицированным маслом для всех типов ТВД старых выпусков с температурой масла на выходе из двигателя до 150°C [2].

Для смазки турбокомпрессорной части силовых установок вертолетов применяются те же марки масел, что и для ТРД. Требования к маслам для ТРД справедливы к маслам для ГТД вертолетов. Требования к маслам для редукторов вертолетов примерно те же, что и к маслам для ТВД [80].

Наличие двух отдельных маслосистем позволяет применять различные марки масел для смазки силовой установки и редуктора. Однако, применение унифицированных масел является более перспективным решением, облегчающим обслуживание вертолетов [5].

Разработаны унифицированные масла Б-3В и ЛЗ-240, сочетающие свойства маловязких масел для ТРД и масел с высокой смазывающей способностью для ТВД. Основой масел является эфир пентаэритрита и синтетических жирных кислот фракции C₅-C₉. Масло Б-3В содержит в своем составе антиокислительную и противозадирную присадки, обладает высокой смазывающей способностью. Недостатком масла Б-3В является склонность к образованию осадков вследствие окисления противозадирной присадки «каптакс». Масло термостабильно до 200°C, однако высокая коррозионная агрессивность его к медным и магниевым сплавам при повышенных температурах ограничивают температурные пределы

его применения [7, 10, 13].

Масло ЛЗ-240 превосходит масло Б-3В по термоокислительной стабильности, обладает меньшей коррозионной агрессивностью и не содержит в своем составе присадки «каптакс». По остальным показателям масла ЛЗ-240 и Б-3В близки. Масло работоспособно до 200°C.

Развитие авиационных смазочных масел сопровождался ростом термоокислительной стабильности. Переход к новым базовым маслам позволил повысить температурный предел применения [116].

ЦИАМ была предложена классификация (таблица 1.1) авиационных масел по поколениям на основе допустимых рабочих температур в объеме масла и в тонком слое [1].

Таблица 1.1 – Классификация масел для ГТД по температуре

Наименование показателя	Группа масел				
	I	II	III	IV	V
Максимальная рабочая температура масла, °С:					
- на выходе из двигателя	150	200	250	300	350
- в тонком слое на стенках полостей	250	300	350	400	450
Термоокислительная стабильность масла в объеме по ГОСТ 23797 при температуре, °С	150	200	250	300	350

В соответствии с ОСТ 1.00148 «Масла для авиационных газотурбинных двигателей. Порядок назначения» товарные масла для авиационных ГТД классифицируются в соответствии с областью применения и максимальной рабочей температуре (таблице 1.2) [102].

В гидравлических системах ЛА применяются рабочие жидкости на основе минеральных компонентов, эфиров фосфорной кислоты и кремнийорганической жидкости. Наибольшее распространение получило гидравлическое масло АМГ-10 на нефтяной основе из-за низкой стоимости и малой токсичности [42, 62].

Таблица 1.2 – Номенклатура отечественных марок масел для авиационных ГТД

Основная марка масла		Дублирующая марка масла		Область применения (тип двигателя)
Марка масла, нормативно-технический документ	Максимальная рабочая температура, °С	Марка масла, нормативно-технический документ	Максимальная рабочая температура, °С	
МС-8РК ТУ 38.1011181-88	150	МС-8П ОСТ 38.01163-78	150	ТРД старых типов
ИПМ-10 ТУ 38.1011299-90	200	ВНИИ НП 50-1-4у ТУ 38.401-58-12-91	200	Теплонапряженные ТРД
ЛЗ-240 ТУ 301-04-010-92	200	Б-3В ТУ 38.1-1295-85	175	ГТД и редукторы вертолетов новые ТВД, ТВВД
МН-7,5у ТУ 38.101722-85	150	СМ-4,5 СМ-11,5	125	ТВД старых типов
ВТ-301 ТУ 38.101657-85	250	-	-	Специальные ГТД

Масло АМГ-10 применяется в интервале температур окружающей среды от минус 60 до 55°С [92]. Его вязкость составляет 10 мм²/с при температуре 50° С, масло окрашено в красный цвет. Оно вырабатывается на основе глубокодеароматизированной низкозастывающей фракции, получаемой из продуктов гидрокрекинга смеси парафинистых нефтей, и состоящей из нафтеновых и изопарафиновых углеводородов. Температура выкипания керосиновой фракции находится в пределах 210 – 320°С [83]. Загущается высокомолекулярным полимером — виниполом, подобно тому, как получают загущенные смазочные масла. Этим достигается достаточно высокий уровень вязкости при положительных температурах в сочетании с полой вязкостно-температурной характеристикой и очень низкая температура застывания масла (ниже минус 70°С) [76, 77].

Смазывающая способность масла АМГ-10 вполне достаточна для предотвращения износа гидроустройств. Для обеспечения стабильности в течение длительного срока службы (2-3 года) из нефтяной основы масла АМГ-10 удалены непредельные углеводороды и добавляется антиокислительная присадка [14, 53, 58].

Основным недостатком масла АМГ-10 является его низкая

пожаробезопасность. Пожаробезопасность характеризуется эксплуатационным свойством «температура вспышки в открытом тигле» и не превышает 90 °С для масла АМГ-10 [51]. Кроме того, при эксплуатации гидравлических систем на масле АМГ-10 происходит снижение его вязкости из-за постепенной деструкции («размола») загущающей присадки. Это приводит к слишком грубой работе механизмов, перетеканию внутри гидроустройств или к внешней утечке. При снижении вязкости ниже 8 мм²/с требуется замена масла [52, 57].

При высоких температурах применяется термостабильное кремнийорганическое масло 7-50С-3 [96]. Кремнийорганические масла превосходят нефтяные по вязкостно-температурным характеристикам и термостабильности.

Недостатками кремнийорганических гидравлических масел являются низкие смазывающие свойства и теплоёмкость, а также высокая стоимость сырья [58].

Гидравлическое масло НГЖ-4у является синтетическим взрывопожаробезопасным маслом на основе эфиров фосфорной кислоты. Масло НГЖ-4у является эрозионностойким, содержит присадки улучшающие его вязкостные, антиэрозионные, антиокислительные свойства [61]. Работоспособно в интервале температур от минус 55 до 125 °С при рабочих давлениях 21 МПа [84]. Имеет температуру самовоспламенения 650-670 °С, медленно горит в пламени, но не поддерживает горение и не распространяет пламя, в отличие от нефтяных масел типа АМГ-10. Несовместимо со многими уплотнительными материалами [59, 60].

За рубежом основной объем авиационных смазочных материалов в настоящее время производится международными корпорациями Exxon Mobil, Eastman, Shell и Nycos [1-3].

Требования к качеству зарубежных масел устанавливаются спецификациями. В отличие от отечественного подхода, зарубежные спецификации представляют единый на все марки масел стандарт в рамках определенной области применения. Зарубежные спецификации предусматривают

определенные требования к физико-химическим и эксплуатационным свойствам масел, не ограничивают состав, за исключением запрета на использование металлорганических соединений титана и ограничения содержания ортоизомера в трикрезилфосфате (не более 1 %) при его использовании в составе композиции масла для улучшения смазывающей способности, и не привязаны к конкретной марке масла или его производителю [79]. Спецификации могут утверждаться на уровне ведомств государства или компаний-производителей авиатехники.

Спецификации регулярно пересматриваются, вносятся изменения в нормы на отдельные показатели качества масел и методы исследования.

В настоящее время наиболее широко применяются авиационные синтетические масла, отвечающие требованиям военных спецификаций США: MIL-PRF-7808 и MIL-PRF 23699. Масла по спецификации MIL-PRF 23699 являются основными для авиационных ГТД [117]. Масла по спецификации MIL-PRF-7808 применяются в арктических условиях или при отсутствии основных масел. Применение масел по спецификации MIL-PRF-7808 имеет ряд ограничений (ресурс и прочее).

Сравнительно недавно разработан и внедрен гражданский аналог спецификации MIL-PRF 23699 – спецификация SAE AS 5780, отличающийся ужесточением требованиям к коксообразованию масел.

Также известны спецификации на масла для авиационных ГТД Англии и Франции [1, 2, 3].

Зарубежные минеральные масла для авиационных ГТД выпускаются по спецификациям MIL-PRF-6081D (США), DEF STAN 91-99 (взамен DERD 2490) (Англии), Air 3516/A и Air 3515/B (Франция).

Фирма Mobil Oil Co по требованиям спецификации MIL-PRF-6081D производит масло Avrex M Turbo 201/1010, фирма Shell - Aeroshell Turbine Oil 2, фирма Nuco - Turbonucoil 3516 (отвечает также требованиям спецификации Air 3516/A). По требованиям спецификации DEF STAN 91-99 фирма Shell вырабатывает масло AeroShell Turbine Oil 3, фирма Nuco - Turbonucoil 280p (спецификация Франции Air 3515/B) [1].

Указанные масла, как правило, не содержат специального комплекса присадок для повышения эксплуатационных характеристик или содержат незначительные количества присадок - антиокислительной и депрессорной. В некоторые масла вводится стеариновая кислота для улучшения смазывающих свойств в ущерб антикоррозионным свойствам масла [69].

Ряд зарубежных фирм с целью обеспечения эксплуатации поставляемой за рубеж российской авиатехники освоили производство минеральных масел, содержащих в своем составе комплекс различных функциональных присадок, и аналогичных по качеству отечественным маслам МК-8П, МС-8П и МС-8РК [84].

Фирма Shell производит масло Aeroshell Turbine Oil 3SP, фирма Nycosol - Turbonycosol 321. В Китае достаточно давно производится масло HP-8 (№ 8), не уступающее по качеству отечественному маслу МС-8П [85].

В связи с различными климатическими условиями стран в спецификациях отражены различные точки зрения на вязкостно-температурные характеристики синтетических масел.

Масла для американских двигателей должны обеспечивать запуск при температуре минус 54°С. Поэтому в США на всех типах газотурбинных двигателей применялись синтетические масла на основе диэфиров с вязкостью 3 мм²/с при 100°С и 13000 мм²/с при температуре минус 54°С, отвечающие требованиям военной спецификации MIL-L-7808, в то время как на английских двигателях применялись загущенные масла на той же основе с вязкостью 7,5 мм²/с при 100°С и порядка 13000 мм²/с при минус 40°С, отвечающие требованиям спецификации DEF STAN 91-98 [2].

Развитие авиационных ГТД потребовало применение смазочных масел, работающих при температурах 200°С и выше, обладающих более высокими термоокислительной стабильностью и несущей способностью, а также меньшей испаряемостью по сравнению с диэфирными маслами.

Требования на эти масла были отражены в спецификациях MIL-L-23699 и DEF STAN 91-100. Требованиям этих спецификаций соответствуют масла, разрабатываемые на основе эфиров неопентиловых полиолов [1].

Спецификация MIL-PRF-7808 предусматривает выпуск двух сортов масел - с вязкостью при 100°C > 3 мм²/с (grade 3) и > 4 мм²/с (grade 4). Спецификация MIL-PRF-23699 предусматривает выработку четырех сортов масел с вязкостью > 5 мм²/с при 100°C: стандартного сорта масла (STD) и масла с повышенными защитными свойствами (C/J) вследствие введения специальных ингибиторов коррозии, высокотермостабильного сорта масла (HTS) и сорта масла на основе высококачественных эфиров (EE).

По английской спецификации DEF STAN 91-101 вырабатываются два сорта масла: OX-27 (для авиационных ГТД) и OX-28 (для судовых ГТД, с ужесточением требований по совместимости с уплотнительными материалами при сохранении на том же уровне, что и для OX-27, требований по термостабильности, коррозионной агрессивности и низкотемпературным свойствам). Кроме DEF STAN 91-101, в Англии утверждено несколько обновленных спецификаций на синтетические масла для авиационных ГТД:

- DEF STAN 91-94 (взамен DERD 2468) - на масла с вязкостью > 3 мм²/с при 100°C;

- DEF STAN 91-98 (взамен DERD 2487) - на загущенные масла с вязкостью ~7,5 мм²/с при 100°C;

- DEF STAN 91-100 (также взамен DERD 2497) - на масла с вязкостью > 5 мм²/с при 100°C, обладающие повышенной несущей способностью [1].

Французская спецификация Air 3514/A предусматривает выработку синтетических масел с вязкостью > 3 мм²/с при 100°C.

За рубежом разработаны и промышленно выпускаются гидравлические масла на основе синтетических углеводородов, превосходящие минеральные масла по ряду показателей. Гидравлические масла на основе синтетических углеводородов выпускаются по спецификации MIL-PRF-83282, они более термостабильны, обладают повышенной температурой вспышки (температура вспышки 205 °C), и, как следствие, более пожаробезопасны [34]. Спецификация MIL-PRF-87257 – для масел на основе синтетических углеводородов, обладающих улучшенными низкотемпературными свойствами и вязкостно-температурными

характеристиками в сравнении с маслами по MIL-PRF-83282.

Масла на углеводородной основе наиболее широко распространены, обладают меньшей стоимостью в сравнении с маслами на основе эфиров фосфорной кислоты и кремнийорганической жидкости [15].

Таким образом, российские масла для авиационных ГТД можно классифицировать по области применения: маловязкие масла применяются в ТРД и ТРДД, унифицированные масла – для ГТД и редукторов вертолетов, а также маслосмеси и загущенные масла – для ТВД. Кроме того, масла могут быть классифицированы по температурному режиму работы: до 150°C – масла I поколения (на минеральной основе), до 200°C – масла II поколения (на синтетической основе) и до 225°C – масла III поколения (на синтетической основе). В России организовано промышленное производство масел I и II поколения, производство масел III поколения отсутствует.

Гидравлические масла в соответствии с условиями применения разработаны и производятся на минеральной основе, а также на основе кремнийорганической жидкости и эфиров фосфатов. Наиболее широко применяется минеральное масло АМГ-10. Гидравлические масла на основе синтетических углеводов, как следующий технический этап развития минеральных гидравлических масел, в России не разработаны.

1.3. Физико-химические и эксплуатационные свойства смазочных и гидравлических масел

Для обеспечения работоспособности узлов и агрегатов ЛА в течение заданного ресурса смазочные и гидравлические масла должны обладать высоким уровнем физико-химических и эксплуатационных свойств. Требования к основным эксплуатационным характеристикам для синтетических смазочных масел отечественного и зарубежного производства в обобщенном виде приведены в таблицах 1.3 и 1.4 [1-3].

Таблица 1.3 – Требования к основным физико-химическим и эксплуатационным свойствам синтетических масел для авиационных ГТД

Показатели	Марки масел			
	ИПМ-10	ВНИИ НП 50-1-4у	Б-3В	ЛЗ-240
Вязкость кинематическая, мм ² /с: при 200°С при 100°С при минус 40°С	- ≥3,0 ≤3000	- ≥3,2 ≤2700	- ≥5,0 ≤12500	- ≥4,8 ≤12500
Кислотное число, мг КОН на 1 г масла	≤0,10	≤0,25	4,40÷5,50	≤0,5
Температура вспышки (в открытом тигле), °С	≥190	≥204	≥235	≥235
Температура застывания, °С	не выше минус 50	не выше минус 60	не выше минус 60	не выше минус 58
Термоокислительная стабильность по ГОСТ 23797 при температуре, °С - вязкость кинематическая после окисления, мм ² /с: при 100°С - 40°С - кислотное число после окисления, мг КОН/г - массовая доля осадка, не растворимого в изооктане, % - изменение массы пластинок от коррозии после окисления, г/м ² : сталь ЦХ-15 сплав АК-4 медь М1 (М2)	200 ≤ 5,0 ≤5000 ≤8,0 ≤0,10 Отс. Отс. ± 1,0	200 ≤3,7 - ≤4,5 ≤0,15 ± 1,0 ± 1,0 ± 4,0	200 ≤6,0 ≤20000 0,7÷2,0 ≤0,10 Отс. Отс. -60	200 ≤6,0 ≤20000 ≤1,5 ≤0,10 Отс. Отс. Отс.
Трибологические характеристики, определяемые на ЧШМ по ГОСТ 9490 при 20±5°С: - критическая нагрузка, кгс - показатель износа при осевой нагрузке 20 кгс, мм	≥71 ≤0,35	≥75 ≤0,45	≥89 ≤0,45	≥89 ≤0,50

Термоокислительная стабильность масел определяется по изменению свойств образца после окисления в течение 50 часов. Окисление проводится при максимальной рабочей температуре масла. Для маловязких масел ИПМ-10, ВНИИ НП 50-1-4У и унифицированных масел Б-3В, ЛЗ-240 температура составляет

200°C.

После окисления вязкость маловязких масел при температуре минус 40 °С не должна превышать 5000 мм²/с, унифицированных – 20000 мм²/с. Количество осадка не должно превышать для маловязких масел 0,15% масс., для унифицированных – 0,10% масс. Коррозия допускается на медной пластинке в размере не более 4,0 г/м² для маловязких масел и не более 60 г/м² для унифицированных. При этом высокое значение коррозии унифицированных масел обусловлено наличием присадки «каптакс» в составе масла Б-3В. В случае исключения этой присадки из состава масла, коррозия на медной пластинке должна отсутствовать для унифицированных масел.

Вязкость исходных маловязких масел при температуре минус 40°C не должна превышать 3000 мм²/с, для унифицированных – 12500 мм²/с. Вязкость маловязких масел при 100°C не должна быть ниже 3 мм²/с, унифицированных – 4,8 мм²/с.

Критическая нагрузка, определяемая на ЧШМ, для маловязких масел не должна быть ниже 71кгс, для унифицированных масел – 89кгс. Диаметр пятна износа маловязких масел не должен превышать 0,45мм, для унифицированных масел – 0,50мм.

Температура вспышки масел не должна быть значительно ниже их максимальной температуры работы.

За рубежом промышленно производятся маловязкие масла, аналогичные по свойствам российским маслам ИПМ-10 и ВНИИ НП 50-1-4У, по спецификациям MIL-PRF-7808L (grade 3), Air 3514/A, DEF STAN 91-94 (таблица 1.4).

Значения основных физико-химических и эксплуатационных свойств зарубежных маловязких масел II поколения сопоставимы с российскими товарными маслами. Исследованные масла зарубежного производства работоспособны при температуре 200°C за исключением масел AeroShell Turbine Oil 390 и Turbonucoil 13В.

Значения вязкости при температуре минус 40°C масел зарубежного производства не превышают 2840 мм²/с. Вязкость при температуре 100°C

находится в интервале от 3 до 4 мм²/с. Температура застывания масел не выше 60°С.

Таблица 1.4 – Физико-химические и эксплуатационные свойства зарубежных синтетических масел (данные ЦИАМ)

Наименование показателя	Масла зарубежных фирм					
	Shell	Mobil Oil Co		Exxon	NyCo	
	AeroShell Turbine Oil 390	Mobil Avrex S Turbo 256	Mobil Turbo 319A-2	Exxon Turbo Oil 2389	Turbonycoil 13B	Turbony coil 210A
Кинематическая вязкость, мм ² /с: при 100°С при минус 40°С	3,87 2145	3,32 2206	3,78 2840	3,23 2000	3,30 2030	3,61 2510
Температура застывания, °С	минус 60	ниже минус 60	ниже минус 60	ниже минус 60	ниже минус 60	минус 65
Температура вспышки в открытом тигле, °С	220	226	228	214	206	197
Термоокислительная стабильность в объеме масла по ГОСТ 23797-79 при температуре, °С: - кинематическая вязкость, мм ² /с при 100°С при минус 40°С	175/200 3,90/4,38 2400/3560	200 3,64 2820	200 4,0 3320	200 3,52 2520	200 5,03 9440	200 3,89 2515
- кислотное число, мг КОН/г	0,82/11,0	1,98	0,70	0,98	6,68	0,26
- массовая доля осадка не растворимого в изооктане, %	0,02/0,33	0,05	0,04	0,04	0,27	0,01
- коррозия на пластинах после окисления, мг/см ² сталь ШХ-15 сплав АК-4 медь М1 (М2)	0/0 0/0 0/0,7	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0
Трибологические характеристики, определяемые на ЧШМ при 20°С по ГОСТ 9490-75: - критическая нагрузка, кгс - показатель износа, мм	50 0,36	90 0,35	70 0,28	80 0,60	56 0,55	76 0,28

Температура вспышки образцов зарубежных масел находится на уровне или чуть выше максимальной рабочей температуры (200°С).

Вязкость при температуре минус 40°С образцов масел зарубежного производства после окисления не превышает 3500 мм²/с за исключением масла

Turbonycoil 13B. Вязкость при температуре 100°C окисленных образцов не превышает 4,4 мм²/с, за исключением масла Turbonycoil 13B. Количество осадка, не растворимого в изооктане, для всех образцов не превышает 0,05 % масс.

Результаты исследования трибологических характеристик масел зарубежного производства отечественным методом на ЧШМ показывают отсутствие единой направленности значений диаметра пятна износа и критической нагрузки. В большинстве своём трибологические характеристики зарубежных масел ниже характеристик российских масел.

Спецификация MIL-PRF-7808 включает категорию высокотермостабильных масел – grade 4. В настоящее время требованиям спецификации MIL-PRF 7808 grade 4 отвечает только масло Turbonycoil 400. Значения его основных эксплуатационных свойств приведены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Физико-химические и эксплуатационные свойства масла Turbonycoil 400.

Наименование показателя	Turbonycoil 400
Кинематическая вязкость, мм ² /с: при 100°C -40°C	4,02 4450
Температура застывания, °C	-60
Температура вспышки в открытом тигле, °C	239
Термоокислительная стабильность в объеме масла при 225°C: - кинематическая вязкость, мм ² /с при 100°C - 40°C - кислотное число, мг КОН/г - массовая доля осадка не растворимого в изооктане, % - коррозия на пластинах после окисления, мг/см ² сталь ШХ-15 сплав АК-4 медь М1	4,65 5147 1,85 0,03 0 0 -0,32
Трибологические характеристики, определяемые на ЧШМ при 20°C по ГОСТ 9490-75: - критическая нагрузка, кгс - показатель износа, мм	50 0,29

Вязкость при температуре минус 40°С масла Turbonucoil 400 составляет 4450 мм²/с. Температура застывания не превышает минус 60 °С.

Температура вспышки масла Turbonucoil 400 составляет 239°С.

Термоокислительная стабильность масла определена при температуре 225°С. Вязкость при температуре минус 40°С окисленного образца составляет 5147 мм²/с, при температуре 100°С – 4,65 мм²/с. Количество осадка, нерастворимого в изооктане – 0,03 % масс. Коррозия на меди составляет 0,32 мг/см².

Критическая нагрузка для масла Turbonucoil 400 составляет 50 кгс, диаметр пятна износа – 0,29 мм.

Значения основных физико-химических и эксплуатационных свойств зарубежных унифицированных масел II поколения, выработанных по спецификациям MIL-PRF-23699F, DOD-L-85734, DEF S'TAN 91-101, находятся на уровне российских масел ЛЗ-240 и Б-3В (таблица 1.6).

Вязкость масел при температуре минус 40 °С не превышает 12500 мм²/с. Температуре застывания не выше минус 56°С.

Температура вспышки зарубежных масел не ниже 240 °С.

Термоокислительная стабильность определена при температуре 200°С. Вязкость при температуре минус 40°С окисленных образцов масел не превышает 16000 мм²/с. Вязкость при температуре 100°С окисленных образцов не превышает 5,7 мм²/с. Количество осадка, нерастворимого в изооктане, не превышает 0,03 % масс. Коррозия на медной пластинке не превышает 1,8 мг/см².

Трибологические характеристики зарубежных масел, определенные на ЧШМ, значительно ниже, чем для российских масел. Критическая нагрузка не превышает 56 кгс, диаметр пятна износа составляет 0,65 мм.

Зарубежные унифицированные масла, выработанные по спецификации MIL-PRF-23699 HTS, по классификации ЦИАМ относятся к маслам III поколения (таблица 1.7).

Таблица 1.6 – Физико-химические и эксплуатационные свойства зарубежных синтетических масел на основе эфиров полиолов

Наименование Показателя	Масла зарубежных фирм	
	Shell	Mobil Oil Co
	AeroShell Turbine Oil 500	Mobil Jet Oil II
Кинематическая вязкость, мм ² /с: при 100°С -40°С	5,19 10460	5,06 12330
Температура застывания, °С	-62	-56
Температура вспышки в открытом тигле, °С	240	248
Термоокислительная стабильность в объеме при температуре, °С кинематическая вязкость, мм ² /с: при 100°С при минус 40°С - кислотное число, мг КОН/г - массовая доля осадка, нерастворимого в изооктане, % - коррозия на пластинах после окисления, мг/см ² : сталь ШХ-15 сплав АК-4 медь М1 (М2)	200 5,66 13220 0,32 0,03 0 0 -1,8	200 5,57 15550 0,52 0,01 0 0 0
Трибологические Характеристики на ЧШМ: Критическая нагрузка, кгс Показатель износа, мм	56 0,65	56 0,40

Термоокислительная стабильность зарубежных масел III поколения определена при температуре окисления 225°С. Вязкость при температуре минус 40°С окисленных образцов не превышает 28500 мм²/с. Для масла Turbonucoil 525-2А этот показатель составляет 12320 мм²/с. Вязкость при 100 °С окисленных образцов не превышает 6,9 мм²/с. Кислотное число – не более 2,26 мг КОН/г. Количество осадка, нерастворимого в изооктане, - не более 0,03 % масс. Коррозионная агрессивность на медную пластинку масел Aeroshell Turbine 555 и Mobil Jet Oil 254 составляет 5 и 3 мг/см², соответственно.

Таблица 1.7 – Термоокислительная стабильность зарубежных синтетических масел III поколения на основе эфиров полиолов

Наименование Показателя	Масла зарубежных фирм				
	Shell		Mobil Oil Co	Exxon	NyCo
	Aeroshell Turbine 555	Aeroshell Turbine 560	Mobil Jet Oil 254	Exxon Turbo Oil 2380	Turbonycoil 525-2A
Термоокислительная стабильность в объеме при температуре, °С	225	225	225	225	225
кинематическая вязкость, мм ² /с: при 100°С	6,88	6,61	6,44	6,0	5,67
- 40°С	28460	16440	24650	15290	12320
- кислотное число, мг КОН/г	2,26	1,3	1,78	1,56	0,78
массовая доля осадка, нерастворимого в изооктане, %	0,025	0	0,03	0,03	0,03
- коррозия на пластинах, мг/см ² : сталь ШХ-15	0	0	0	0	0
сплав АК-4	0	0	0	0	0
медь М1 (М2)	-5,0	0	-3	0	0

Основные физико-химические и эксплуатационные свойства гидравлических масел отечественного и зарубежного производства на углеводородной основе приведены в таблице 1.8 [5, 14, 15, 20].

Зарубежные гидравлические масла на основе синтетических углеводородов обладают рядом преимуществ в сравнении с минеральными маслами.

Отсутствие в их составе легколетучей фракции обеспечивает температуру вспышки, равную 214°С для масла FH-2 и 170°С для масла FH-42 [59].

В состав зарубежных гидравлических масел, выработанных по спецификациям MIL-PRF-83282 и MIL-PRF-87257, не входят загущающие присадки. В процессе эксплуатации масла не происходит снижения вязкости, но для обеспечения техники, эксплуатируемой в различных климатических условиях, применяются различные гидравлические масла, подходящие по вязкостно-температурным характеристикам [58].

Масло FH-2 (MIL-PRF-83282) обладает вязкостью, равной 10,5 мм²/с при температуре 50°С и 6946 мм²/с при температуре минус 50°С.

Таблица 1.8 – Свойства гидравлических масел на основе углеводородов

Наименование показателей	АМГ-10	FH-2 Спецификация MIL-PRF-83282	FH-42 Спецификация MIL-PRF-87257
	Результат	Результат	Результат
Вязкость кинематическая, мм ² /с (сСт) при 50 °С, при 40 ⁰ С при минус 40 °С при минус 50 °С, при минус 54 ⁰ С	10,1 - - 965 1512	10,50 14,27 2112 6946 -	5,23 6,78 441 1374 2258
Температура застывания, °С	-70	Ниже минус 65	Ниже минус 65
Температура вспышки в открытом тигле, °С не ниже	93	214	170
Термоокислительная стабильность и коррозионная активность при 125°С, в течение 100ч. и расходе воздуха 5 л/час: - внешний вид - изменение кинематической вязкости при 50°С, % не более - увеличение кислотного числа, мг КОН на 1 г масла, не более -весовой показатель коррозии металлов, мг/см ² не более медь М-1 сталь 30ХГСА алюминий Д-16 магний МЛ-5	Однородная прозрачная жидкость без осадка 10,68 0,01 Отсутствие Отсутствие Отсутствие Отсутствие	Однородная прозрачная жидкость без осадка 10,5 0,024 Отсутствие Отсутствие Отсутствие Отсутствие	Однородная прозрачная жидкость без осадка 5,26 0,022 Отсутствие Отсутствие Отсутствие Отсутствие
Трибологические характеристики на ЧШМ: диаметр пятна износа (Ди), мм, при температуре 20±5°С	0,5	0,39	0,35
Устойчивость к механической деструкции на УЗДН: уменьшение кинематической вязкости при 50 ⁰ С, за время испытаний, %: - 50 мин, не более	39,5	0,2	0,2

Масло FH-42 разработано для применения в условиях крайнего севера и обладает высокими вязкостно-температурными характеристиками. Его вязкость при температуре минус 50°С составляет 1374мм²/с, однако вязкость масла при

температуре 50°C составляет 5,23 мм²/с.

Окисление образцов зарубежных гидравлических масел показало практически отсутствие повышения вязкости и кислотного числа. Коррозия на пластинках-катализаторах отсутствует.

Диаметр пятна износа зарубежных масел не превышает 0,39 мм.

Таким образом, характеристики отечественных смазочных масел II поколения по отношению к зарубежным маслам находятся на одном уровне.

Однако за рубежом разработаны смазочные масла III поколения для ТРД (ТРДД), а также ГТД и редукторов вертолетов, превосходящие отечественные товарные масла по термоокислительной стабильности. Масла III поколения работоспособны при температуре 225°C и обладают низким осадкообразованием.

Зарубежные гидравлические масла на основе синтетических углеводородов превосходят отечественное масло АМГ-10 по температуре вспышки, термоокислительной стабильности и трибологическим характеристикам.

1.4. Проблемы применения современных смазочных и гидравлических масел на изделиях авиатехники

Характерной тенденцией при совершенствовании рабочего процесса в перспективных газотурбинных двигателях как дозвуковых, так и сверхзвуковых ЛА является значительный рост температуры газа перед турбиной, независимо от конструктивной схемы двигателя [125]. Для ГТД гражданских дозвуковых самолетов и вертолетов это сопряжено с увеличением оптимальной степени повышения давления компрессора (π_k), и, следовательно, с ростом температуры воздуха перед камерой сгорания [25, 43].

Сверхзвуковые самолеты, несмотря на умеренные оптимальные π_k , также будут иметь высокую температуру воздуха на входе в камеру сгорания из-за большой температуры торможения набегающего сверхзвукового потока. Уже

современные авиационные ГТД имеют температуру воздуха за компрессором на уровне 700°C и температуру газов перед турбиной порядка 1500°C [2].

Совершенствование авиационных ГТД сопровождается ростом теплонапряженности и приводит к увеличению количества тепла, отдаваемого в масло [126]. Поэтому одним из основных, постоянно действующих, требований к качеству масла является повышение его термоокислительной стабильности (ТОС). Высокий уровень термоокислительной стабильности масла обеспечивает повышение предельной допустимой температуры его применения без ухудшения прочих показателей качества.

Уровень ТОС характеризует максимальная рабочая температура масла, являющаяся его температурой на выходе из двигателя, при которой оно сохраняет свои эксплуатационные свойства в заданных пределах в течение ресурса.

Температура масла на выходе из современных двигателей ЛА военной авиации составляет $200\text{-}225^{\circ}\text{C}$. В ближайшей перспективе эта величина будет только расти [1, 48].

При проведении стендовых ресурсных испытаний перспективного ТРДД на режимах с высокими параметрами рабочего процесса зафиксирована температура масла на выходе из двигателя порядка $225\text{-}227^{\circ}\text{C}$ [26, 110].

Современные товарные масла на основе синтетических компонентов работоспособны при температуре 200°C (масла II поколения) и могут применяться с перегревом в самой горячей части двигателя не более, чем на 20°C [102].

Применение масел с недостаточной термоокислительной стабильностью приводит к быстрой деградации его эксплуатационных свойств: повышаются вязкость, коррозионная агрессивность, склонность к образованию пены, образуются нерастворимые осадки [2].

Рост вязкости затрудняет запуск двигателя в условиях низких температур окружающей среды без средств технического подогрева.

Окисленные масла обладают повышенными пенообразующими свойствами. Высокая вспениваемость масел препятствует разделению масло-воздушной

смеси. Масло-воздушная смесь с высоким содержанием воздуха затрудняет передачу тепла от нагретых элементов в масло и от масла в охлаждающий агент – топливо или воздух. Повышение содержания кислых продуктов окисления компонентов масла приводит к росту коррозионной агрессивности.

Образование высокотемпературных отложений приводит к лакообразованию и закоксовыванию трубопроводов малого диаметра, каналов теплообменника и поверхностей горячих элементов маслосистемы [1, 92].

Все эти процессы приводят к снижению межремонтного ресурса двигателя, повышению стоимости владения авиатехникой, а также снижению надежности и безопасности полетов в целом.

Повышенное пенообразование, кроме ухудшения теплофизических свойств масла, может вызывать «дымление» авиационных ГТД приводящее к повышению расхода масла, повышающее заметность ЛА.

В случае повышенной склонности масла к пенообразованию суфлирующее устройство не обеспечивает полного разделения масло-воздушной смеси. В выхлопной патрубке двигателя вместе с воздухом попадает масло. В потоке выхлопных газов при температуре около 400°С масло испаряется. Наблюдается облако сизого дыма [17].

Источником попадания воздуха в масло являются уплотнения масляных полостей. Во избежание попадания масла в тракт ГТД масляные полости наддуваются воздухом, отобранном из компрессора, тем самым, давление в предмасляных полостях становится выше, чем в масляных. Через уплотнения воздух попадает в масляные полости и вместе с маслом откачивается насосами в виде масло-воздушной смеси [18, 23]. Масло-воздушная смесь разделяется суфлирующим устройством, после чего воздух удаляется в атмосферу через выхлопной патрубок.

Случаи «дымления» авиационных ГТД зафиксированы в Афганистане, Египте, Индии, Перу и других странах [18].

Для исключения случаев нештатной работы маслосистем авиационных ГТД, вызванных повышенными пенообразующими свойствами масла, необходимы

масла, не склонные к образованию пены.

Значительной проблемой применения гидравлических масел на минеральной основе является их высокая пожароопасность. Узлы и агрегаты гидравлической системы часто располагаются вблизи горячих элементов ЛА. При повреждении гидросистемы самолета попадание масла на горячие детали двигателя вызывает его воспламенение, что может привести к пожару. Опасность усугубляется тем, что выброс масла происходит под высоким давлением.

Длительное воздействие высокой температуры (более 150°С) вызывает появление твердого осадка (такого же, как в топливах). Попадание частиц его в зазоры золотниковых и других регулирующих устройств может привести к отказам в работе гидроприводов, в зазоры силовых узлов — к их преждевременному износу, а отложение на фильтрах — к замедлению срабатывания гидромеханизмов [76, 87].

Для масел, загущенных полимерной присадкой, характерна особенность применения. Как уже было упомянуто, присадка склонна к механической деструкции, что приводит к снижению вязкости масла. При значительном снижении вязкости требуется замена масла [51, 52]. Для снижения частоты замены требуется загущенных масла с повышенной стойкостью к механической деструкции присадки.

Широко применяемое в гидравлических системах гражданской авиатехники отечественное минеральное гидравлическое масло АМГ-10 по ГОСТ 6794-75[40], технически устарело. Существенными недостатками масла являются его огнеопасность и недостаточная для перспективных самолетов термостабильность.

Для применения в гидросистемах ЛА современной и перспективной авиационной техники и повышения надежной эксплуатации авиационной техники необходима разработка гидравлического масла на синтетической основе с улучшенными устойчивостью к механической деструкции и пожаробезопасностью.

1.5. Методы создания и исследования авиационных масел

Работа по созданию авиационных масел состоит, как правило, из нескольких этапов: лабораторные исследования по выбору оптимального состава опытного масла, исследования уровня качества производства опытного масла в промышленных условиях и мероприятия по внедрению опытного масла в эксплуатацию (испытания на серийных изделиях авиатехники, летные испытания, эксплуатация под наблюдением).

Лабораторные исследования направлены на получение состава нового масла, обеспечивающего требуемый уровень физико-химических и эксплуатационных свойств. Объём лабораторного образца должен обеспечить определение основных показателей качества.

Целью квалификационных испытаний является определение уровня эксплуатационных свойств масла, выработанного в условиях промышленного производства. При этом объём методов исследования значительно шире, чем при лабораторных исследованиях и включает модельные исследовательские стенды.

Мероприятия по внедрению масла в эксплуатацию (стендовые, летные испытания, эксплуатация под наблюдением) направлены на оценку работоспособности серийных изделий (двигателя, ЛА) авиатехники с применением нового масла, установления ресурса и ограничений применения.

После получения положительных результатов испытаний на всех этапах новая марка масла может быть вписана в руководство по эксплуатации [33, 38].

Этап получения рационального состава начинается с выбора базового масла и присадок, исходя из технических требований к маслу и известных свойств компонентов. Экспериментально определяется зависимость значений основных показателей качества от концентраций присадок. Определяется рациональный состав масла, обеспечивающий наилучшее значение целевого, наиболее важного, показателя и достаточный уровень контролируемых показателей. При этом очень важно правильно оценить взаимодействие применяемых присадок между собой,

поскольку сочетания последних по-разному влияют на свойства готового масла.

С использованием такого, эмпирического, подхода создано подавляющее большинство современных масел [16]. К недостаткам этого подхода относится то, что не всегда разработчику удастся в полной мере оценить чрезвычайно большой объем информации о ранее проведенных экспериментах. При таком подходе отсутствует возможность объективного прогнозирования наилучших составов масел. Отсутствует, как правило, база данных о составе и свойствах опытных образцов.

Создание новых масел невозможно без определения уровня качества лабораторных образцов экспериментальными методами исследования. Точные и информативные методы исследования обеспечивают связь между составом образца и его свойствами. В условиях дефицита финансирования большой объем экспериментальных исследований требует снижения их трудоёмкости, что необходимо для повышения оперативности создания новых масел.

Жесткие требования, предъявляемые к качеству применяемых в авиационных ГТД и гидравлических системах масел, обуславливают и требования к объему и номенклатуре методов лабораторных исследований и испытаний авиамасел, на основании результатов которых решается вопрос о возможности применения их в изделиях авиатехники. Номенклатура показателей качества смазочных масел устанавливается стандартом ГОСТ 4.24-84.

Технические требования зафиксированы в нормативно-технической документации (НТД) - спецификациях на конкретные марки масел, отражающих требования к основным физико-химическим и эксплуатационным свойствам масел. В объеме методов спецификации на масло оценивается качество товарного продукта. Оценка качества масел проводится в контрольных лабораториях изготовителя масел и фиксируется представителем Заказчика. Это способствует обеспечению высокого и стабильного качества вырабатываемых масел. Товарные масла изготавливаются из сырья и с применением технологических процессов, использовавшихся при выработке опытного образца масла, прошедшего с положительными результатами государственные приемочные испытания.

Требования к качеству разрабатываемого (опытного) масла определяются также нормами квалификационных методов оценки эксплуатационных свойств масел. В случае отсутствия норм метода опытное масло сравнивается с образцом сравнения. Квалификационные методы предназначены для получения достаточно полной информации об основных физико-химических и эксплуатационных свойствах и возможностях данного масла выполнять в процессе применения те функции, которые на него возлагаются [1, 33].

В НТД на масла для газотурбинных двигателей должны быть указаны не менее 12 показателей качества, а при проведении испытаний опытного масла в объеме этапа лабораторных исследований должно быть оценено около 30 показателей качества масла [68]. Показатели качества оцениваются при помощи стандартных методов исследования и специальных квалификационных методов. Методы исследования авиационных смазочных и гидравлических масел различаются.

Перечни методов, применяемых при лабораторных исследованиях масел для авиационных ГТД и гидравлических систем, приведены в таблицах 1.9 и 1.10 [1, 33].

При создании опытных образцов, как правило, определяются наиболее важные показатели качества, а для измерения их значений выбираются наименее трудоёмкие, но достаточно информативные методы. Для смазочных и гидравлических масел важными показателями является вязкостная характеристика, термоокислительная стабильность и трибологические свойства.

Из приведенных в таблицах 1.8 и 1.9 показателей качества масел для авиационных ГТД 20 показателей оцениваются стандартными методами, остальные - с помощью оригинальных квалификационных методов. Первые 16 показателей, как правило, входят в НТД на конкретную марку того или иного товарного масла, остальные - используются в дополнение к ним при исследованиях новых опытных смазочных масел при разработке и постановке на производство, а также при квалификационных испытаниях и т.п. [38, 39].

Таблица 1.9 – Перечень методов, применяемых при исследованиях масел для авиационных ГТД и редукторов вертолетов

Наименование показателей качества	Метод оценки
Плотность	ГОСТ 3900
Вязкость кинематическая	ГОСТ 33
Температура застывания	ГОСТ 20287
Температура вспышки в открытом тигле	
Кислотное число	ГОСТ 4333
Содержание механических примесей	ГОСТ 5985, ГОСТ 11362
Массовая доля воды	ГОСТ 6370
Массовая доля золы	ГОСТ 2477
Массовая доля серы	ГОСТ 1461
Содержание водорастворимых кислот и щелочей	ГОСТ 1431, ГОСТ 19121
Термоокислительная стабильность (в объеме масла)	ГОСТ 6307
Трибологические характеристики на четырехшариковой машине трения	ГОСТ 23797; методы, указанные в НТД на масло
Испаряемость продувкой воздуха	ГОСТ 9490
в чашечках	ОСТ 38.01440-92 ГОСТ 20354
Коксуемость	ГОСТ 8852,
Цвет на колориметре ЦНТ	ГОСТ 19932
Степень чистоты	ГОСТ 20284
Фракционный состав методом испарения	ГОСТ 12275
Термоокислительная стабильность (в тонком слое)	ГОСТ 8674
Вспениваемость	ГОСТ 23175
Защитные свойства в камере Г-4 и при погружении в электролит	ГОСТ 21058
Работоспособность масел на редукторной установке Ш-3	ГОСТ 9.054 (методы 1 и 4)
Склонность масел к образованию высоко-температурных отложений на приборе «наклонная плита»	Квалификационный метод
Склонность масел к образованию высоко-температурных отложений на установке ВЦМ	Квалификационный метод
Стойкость масел к воздействию кислорода воздуха при высоких температурах на установке УКМ-1М	Квалификационный метод
Коррозионная агрессивность масел по методу ВИАМ (100-часовая методика)	Квалификационный метод
Консервационные свойства	Квалификационный метод
Совместимость масел и масел с присадками	Квалификационный метод
Гигроскопичность (для синтетических масел на основе эфиров)	Квалификационный метод
Гидролитическая стабильность (для синтетических масел на основе эфиров)	Квалификационный метод
Содержание присадок с помощью тонкослойной хроматографии	Квалификационный метод
Стабильность вязкости масел, содержащих полимерные присадки (на диспергаторе УЗДН)	Квалификационный метод
Воздействие масел на уплотнительные резины	Квалификационный метод
Прогнозирование сроков хранения	Квалификационный метод

Таблица 1.10 – Перечень методов, применяемых при исследованиях масел для гидравлических систем ЛА

Наименование показателей качества	Метод оценки
Плотность	ГОСТ 3900
Вязкость кинематическая	ГОСТ 33
Температура застывания	ГОСТ 20287
Температура вспышки: в открытом тигле в закрытом тигле	ГОСТ 4333
Температура начала кипения	ГОСТ 2177
Кислотное число	ГОСТ 5985
Содержание механических примесей	ГОСТ 10577
Массовая доля воды	ГОСТ 2477
Содержание водорастворимых кислот и щелочей	ГОСТ 6307
Испытание на коррозию	ГОСТ 2917
Термоокислительная стабильность и коррозионная агрессивность	ГОСТ 20944
Качества пленки масла после нагревания его при температуре (65±1) °С в течение 4 ч	НТД на масло
Трибологические характеристики на четырехшариковой машине трения	ГОСТ 9490
Стабильность вязкости масел, содержащих полимерные присадки (на диспергаторе УЗДН)	Квалификационный метод
Кинематическая вязкость при максимальной и минимальной рабочих температурах	ГОСТ 33
Стабильность при отрицательных температурах	Квалификационный метод
Гидролитическая устойчивость	Квалификационный метод
Механическая деструкция на установке УЗДН	Квалификационный метод
Температура застывания	Квалификационный метод
Температура самовоспламенения	Квалификационный метод
Индукционный период воспламенения при контакте с открытым пламенем	Квалификационный метод
Воспламеняемость в состоянии аэрозоля	Квалификационный метод
Испаряемость	Квалификационный метод
Пенообразующие свойства	Квалификационный метод
Противозадирные свойства	Квалификационный метод
Совместимость с резинотехническими материалами	Квалификационный метод
Противоэрозионные свойства	Квалификационный метод
Стабильность и работоспособность в гидросистеме с аксиально-поршневым насосом	Квалификационный метод
Работоспособность масел на редукторной установке Ш-3	Квалификационный метод

Для авиационных масел термостабильность оценивается несколькими методами.

На приборе "наклонная плита" определения склонности масел к образованию высокотемпературных отложений в динамических условиях

окисления в тонком слое. Метод заключается в механическом периодическом (5 сек в минуту) набрызгивании масла на алюминиевую пластину, нагретую до заданной (290°C) температуры, в течение 6 часов с последующим весовым определением количества отложений (по разности веса пластины до и после испытания).

Модельная установка ВЦМ-1 имитирует условия отложения продуктов высокотемпературного окисления масла в масляных полостях двигателя. Сущность метода заключается в определении количества отложений и температуры начала их образования при контакте циркулирующего масла с горячей металлической поверхностью. Оценка масла производится по двум показателям. Индекс высокотемпературных отложений (Ивто) равен отношению количества отложений, получаемых при испытании масла и эталонной жидкости (смесь гексадекана и 1-метилнафталина в соотношении 40:1). Температура начала образования отложений (тно) соответствует температуре начала отложения ВТО.

Определение количественных показателей склонности масел к образованию ВТО (Ивто и тно) производится на оптическом приборе путем регистрации яркости света, отраженного от поверхности оценочной трубки. Максимальная температура стенки оценочной металлической трубки для масел типа ИПМ-10 составляет 240°C, длительность испытания - 6 часов.

На модельной установке УКМ-1М оценивается стойкость масел к воздействию кислорода воздуха при высоких температурах. Склонность авиационных масел к образованию высокотемпературных отложений (ВТО) на установке УКМ-1 определяется по массе отложений, образовавшихся на внутренней поверхности нагретой металлической реакционной камеры и уловленных фильтром установки, при окислении кислородом воздуха и циркуляции масла в системе установки.

Коррозионная агрессивность определяется путем оценки воздействия испытуемого масла в жидкой и паровой фазах на металлические пластинки при повышенной температуре в герметически закрытых металлических контейнерах. Величина коррозионной агрессивности масла к маркам металлов и сплавов

оценивается по изменению веса и состоянию поверхности металлических пластинок в результате испытаний.

Определение воздействия масел на уплотнительные резины заключается в оценке свойств резины после выдерживания ее в течение 72 часов в нагретом масле ($t_M = 200^\circ\text{C}$), через которое непрерывно барботируется воздух (10 л/час). Воздействие масла на резину определяется по изменению следующих физико-механических показателей резины: предела прочности, накоплению остаточной деформации сжатия, массы или объема.

Оценка стабильности вязкости смазочных масел, содержащих вязкостные полимерные присадки, заключается в определении снижения вязкости образца масла после воздействия ультразвука на установке типа УЗДН-1 (ГОСТ 5.687) в заданных условиях (частота излучения – 22 кГц, количество образца – 15 мл). Длительность воздействия излучения на испытуемый образец указывается в НТД на масло.

Метод оценки работоспособности масел для авиационных ГТД на редукторной установке Ш-3. Метод устанавливает сравнительную оценку работоспособности масел с эталонными маслами в системе зубчатых колес на установке Ш-3 по смазывающей способности (износ, заедание, усталостное выкрашивание рабочих поверхностей зубьев шестерен) и по термоокислительной стабильности масла. После 50-часовых испытаний масла производят визуальную и инструментальную оценку состояния рабочих поверхностей зубьев и сравнивают с допустимыми установленными нормами. Кроме того, проводят сопоставление изменения физико-химических свойств испытуемого масла за время испытаний со свойствами свежего масла и окисленного масла по ГОСТ 23797-79 при максимально допустимой рабочей температуре. Результаты исследования масел на редукторной установке Ш-3 являются комплексными и потому наиболее весомыми при принятии решения о возможности применения масел на изделиях авиатехники.

Квалификационные испытания гидравлических масел выполняются в соответствии с Комплексом методов квалификационной оценки рабочих

жидкостей для гидравлических систем самолетов и вертолётов.

Выводы по Главе 1

1. Анализ литературы по проблеме разработки авиационных смазочных и гидравлических масел показал, что отечественные смазочные масла для авиационных ГТД работоспособны при температурах до 200°C, температура вспышки наиболее распространенных углеводородных гидравлических масел не превышает 110°C. За рубежом разработаны и промышленно производятся смазочные масла, работоспособные при температурах до 225°C, и гидравлические масла с температурой вспышки 170-200°C на основе синтетических углеводородов.

2. Исследования в области перспектив развития авиационных ГТД, а также результаты стендовых испытаний перспективного ТРДДФ показывают необходимость создания смазочных масел, работоспособных при высоких температурах (225-240°C). Для повышения безопасности эксплуатации летательных аппаратов (ЛА) требуется новое гидравлическое масло с температурой вспышки выше 150°C на углеводородной основе.

3. Показано, что повышенная склонность применяемых масел к образованию пены может приводить к нештатной работе маслосистемы, в том числе, к дымлению ГТД. Для повышения надежности маслосистем ГТД и предотвращения их дымления необходимы масла с повышенной стойкостью к пенообразованию, а также разработка методов исследования пенообразующих свойств масел в условиях работы перспективных ГТД.

4. Анализ существующих подходов к созданию авиационных масел показал, что современные компьютерные технологии оптимизации составов опытных образцов масел не применяются. При разработке составов опытных образцов полученные результаты исследования свойств не вносятся в электронные базы данных. Методы исследования свойств опытных масел и методы квалификационной оценки не пересматривались длительное время в части

повышения информативности и снижения трудоёмкости проведения эксперимента. Описанные факторы приводят к высоким трудовым, временным и финансовым затратам при создании новых масел, что препятствует их оперативной разработке.

5. На основе проведенного анализа состояния проблемы сформулированы цель и задачи, решаемые в диссертационной работе.

Цель работы и решаемые задачи

Повышение рабочих параметров перспективных авиационных ГТД и гидравлических систем, недостаточный уровень эксплуатационных свойств товарных масел, необходимость импортозамещения обуславливают необходимость создания отечественных смазочных и гидравлических масел с повышенными эксплуатационными свойствами.

Для обеспечения надежной и безопасной эксплуатации ЛА с ГТД требуется создание смазочных и гидравлических масел нового поколения. При этом необходимо разработать и включить в методику создания новых масел ряд технологий, направленных на снижение влияния факторов, препятствующих разработке новых масел.

Высокая трудоёмкость создания новых масел вызвана использованием методов переработки при исследовании влияния присадок на физико-химические и эксплуатационные свойства опытного образца. Отсутствие баз данных «состав-свойства» приводит к необходимости повторных экспериментальных исследований опытных образцов.

Синергический и антагонистический эффекты присадок могут быть не обнаружены или плохо изучены. Выбор «оптимального» состава осуществляется экспертом из большого количества образцов. Это не обеспечивает выбор оптимального состава.

Экспериментальные методы определения уровня качества опытных масел длительное время не подвергались пересмотру, они недостаточно информативны.

Расширение информативности комплексных методов исследования может привести к снижению трудоёмкости оценки качества опытных масел за счет количества квалификационных методов исследования. Экономия достигается за счет получения в ходе одного испытания результатов, получаемых другими методами.

Целью работы является совершенствование методов создания авиационных смазочных и гидравлических масел нового поколения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать технические требования (ТТ) к авиационным маслам нового поколения.
2. Разработать методы оценки эксплуатационных свойств авиационных масел:
 - 2.1 Метод определения пенообразующих свойств авиационных масел в лабораторных условиях в расширенном интервале температур.
 - 2.2 Метод оценки пенообразующих свойств авиационных масел в демонстрационной системе смазки ГТД.
 - 2.3 Метод оценки работоспособности авиационных масел в условиях, приближенных к реальным условиям эксплуатации ГТД.
3. Усовершенствовать расчетно-экспериментальный комплекс методов по созданию новых авиационных масел.
4. Разработать и оптимизировать составы масел нового поколения, а также исследовать их физико-химические и эксплуатационные свойства:
 - 4.1 Выбрать базовые масла и присадки для авиационных масел нового поколения.
 - 4.2 Исследовать пенообразующие свойства новых масел лабораторным методом в расширенном интервале температур.
 - 4.3 Исследовать пенообразующие свойства новых масел на демонстрационной электроприводной системе смазки ГТД.

4.4 Исследовать термоокислительную стабильность, трибологические свойства, а также совместимость с конструкционными и уплотнительными материалами новых масел на стенде Ш-3.

4.5 Выполнить сравнительные исследования качества новых масел.

Глава 2. Разработка расчетно-экспериментального комплекса методов по созданию авиационных масел

2.1 Выбор структуры расчетно-экспериментального комплекса по созданию авиамасел

Для создания новых авиационных масел необходимо изменить существующих подход к их разработке. Основным требованием к новому подходу является снижение трудоёмкости получения состава опытных образцов. Применяемые технологии не должны повышать стоимость разработки состава опытного образца масла в сравнении с существующим подходом.

Снижение трудоёмкости разработки опытных образцов масел может быть достигнуто применением современных технологий, обеспечивающих снижение количества экспериментальных исследований, повышение качества получаемых опытных образцов, а также получения более полной и легко интерпретируемой оценки качества [44, 45].

В основе предложенного автором подхода к созданию авиационных масел лежит применение расчетно-экспериментального метода безусловной оптимизации при разработке составов опытных образцов, позволяющего снизить количество экспериментов при исследовании функции свойств от состава [16].

Процесс создания нового масла на этапе лабораторных исследований включает несколько этапов.

В соответствии с техническим заданием на разработку нового масла разрабатываются технические требования к уровню его эксплуатационных свойств и ставится оптимизационная задача. Определяются компоненты композиции опытного масла, обеспечивающие необходимый уровень эксплуатационных свойств масла. Определяются свойства, которые: а) улучшаются, б) поддерживаются на уровне технических требований, в) не нормируются, но определение которых обязательно.

Определяются компоненты, для которых исследуется влияние на улучшаемые и поддерживаемые свойства. Определяется условие окончания

процесса оптимизации составов.

Оптимизация состава выполняется по средствам лабораторных исследований влияния концентраций варьируемых компонентов на свойства опытного образца. Объём изготавливаемых образцов - минимально возможный для определения основных показателей качества, составляет примерно 500 мл. В соответствии с оптимизационной задачей её решением будет состав или множество составов. Если искомый уровень эксплуатационных свойств достичь невозможно, задача не будет иметь решения.

Выбранный метод безусловной оптимизации позволяет сокращать количество опорных точек при построении поверхности отклика за счет своих интерполяционных и экстраполяционных свойств, что приводит к снижению количества экспериментальных исследований в сравнении с применяемым на практике методом перебора.

На промышленных мощностях предприятия-изготовителя вырабатывается опытно-промышленная партия нового масла для определения возможности его применения на изделиях авиатехники. Исследования проводятся в расширенном объёме. Количество масла опытно-промышленной партии может составлять 500 кг и более.

Все результаты исследований физико-химических и эксплуатационных свойств опытных образцов масел вносятся в электронную базу данных и могут быть использованы при дальнейших исследованиях при создании новых масел.

С помощью разработанной балльной сравнительной системы оценки качества рассчитывается количество баллов новых масел, производится сравнение с маслами-аналогами и наглядно демонстрируется результат.

Результаты исследования физико-химических и эксплуатационных свойств в процессе оптимизации составов новых масел, а также в процессе квалификационных исследований вносятся в базу данных. В ряде случаев оптимизатор обращается к базе данных, что дополнительно сокращает число экспериментов [46]. Кроме того, база данных может быть использована при решении другой оптимизационной задачи с использованием известных

КОМПОНЕНТОВ.

Структурная схема предложенного расчетно-экспериментального комплекса метода создания авиационных масел представлена на рисунке 2.1.

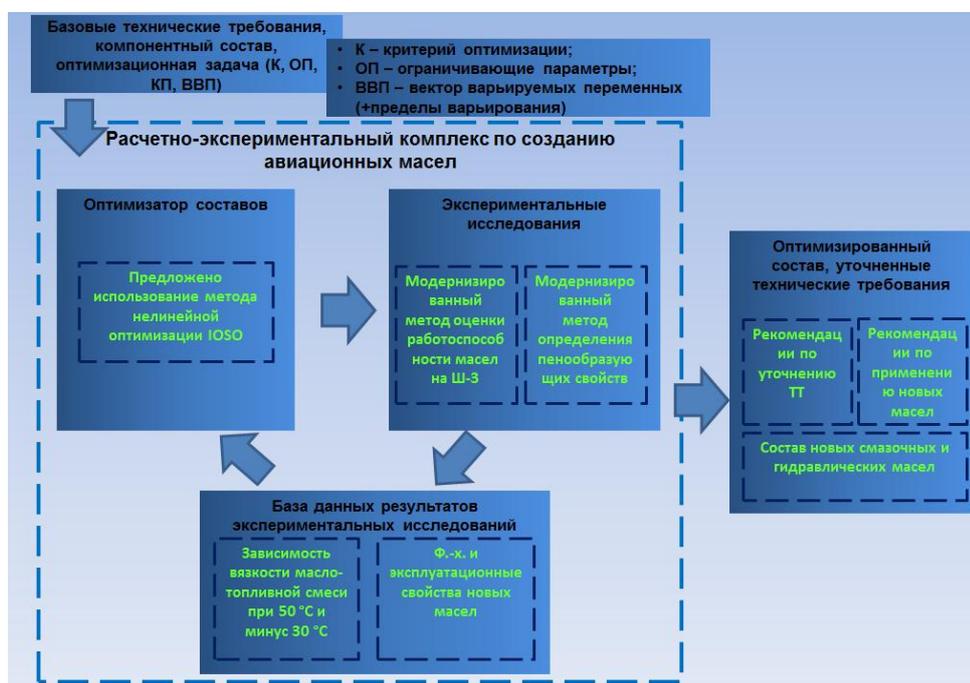


Рисунок 2.1 – Структурная схема расчетно-экспериментального комплекса методов по созданию авиационных масел

Оптимизированные образцы, удовлетворяющие ТТ в полном объеме, рекомендуются к дальнейшим этапам государственных испытаний.

2.2. Постановка задачи оптимизации

Требуемый уровень физико-химических и эксплуатационных свойств масла обуславливается необходимостью обеспечения работоспособности в течение заданного ресурса узла или агрегата ГТД или гидросистемы ЛА, выраженным в виде технических требований к маслу. Кроме требований к уровню физико-химических и эксплуатационных свойств масла, ТТ могут содержать иные требования, например, к доступности компонентов масла и степени их токсичности.

Физико-химические и эксплуатационные свойства компаундированных масел обусловлены базовым маслом, входящим в его состав. Базовое масло подбирается из числа промышленно производимых по известным свойствам и рекомендациям по области применения.

Отдельные физико-химические и эксплуатационные свойства масла могут быть улучшены добавлением в состав масла присадок. Известны концентрации присадок, обеспечивающие наибольшую их эффективность. Как правило, предел концентраций присадок составляет 5% масс., и дальнейшее повышение концентрации присадки не приводит к росту значения улучшенного показателя качества или в значительной мере снижает значения других [54, 83, 91]. Кроме того, некоторые присадки обладают разнонаправленным действием.

Противозадирные присадки химически активны. Под воздействием высоких температур и давлений они вступают в химическую реакцию с металлической поверхностью трущихся деталей с образованием сульфидов, фосфатов и хлоридов. Эти вещества обладают меньшей прочностью, чем металлическая поверхность трущихся деталей и при высоких контактных нагрузках разрушаются, тем самым предотвращая разрушение самих пар трения [81].

Повышение содержания химически активных компонентов в масле отрицательно сказывается на его термоокислительной стабильности и коррозионной агрессивности.

Невозможно улучшить эксплуатационные свойства масла в рамках одного компонентного состава путем повышения концентраций функциональных присадок. Улучшение значения одного показателя качества путем повышения концентрации присадки неизбежно вызывает ухудшения других показателей качества.

Задачей оптимизации является получение такого соотношения компонентов, при котором достигается экстремум целевой функции, а также уровень ограничивающих параметров.

Для авиационных масел наиболее важными эксплуатационными характеристиками являются трибологические характеристики,

термоокислительная стабильность (ТОС), вязкостно-температурные свойства, а также совместимость с конструкционными и уплотнительными материалами. Показатели качества, характеризующие эти эксплуатационные свойства, могут быть улучшаемыми или ограничивающими параметрами.

Вязкостно-температурные свойства в значительной степени обуславливаются базовым маслом и мало зависят от вводимых присадок. Исключением являются загущенные масла, в состав которых входят загущающие полимерные присадки, кардинально влияющие на вязкостно-температурную характеристику масла [73, 75].

Для противопенных и антикоррозионных присадок известны значения концентраций, при которых их эффективность максимальна, подтвержденные практикой применения масел. При этом концентрации присадок малы и оказывают минимальное влияние на другие эксплуатационные свойства [80, 81].

С учетом тенденций развития авиационных двигателей и гидравлических систем ЛА необходимо повышать ТОС масел. Одновременно необходимо контролировать трибологические свойства, так как для повышения ТОС потребуется снижение концентрации противозадирной присадки.

Для авиационных масел термоокислительная стабильность исследуется рядом методов, включая модельные установки, при этом определяются более десятка показателей качества. Включение их в список целевых функций в значительной степени затруднит решение оптимизационной задачи и, возможно, сделает её нерешаемой.

Трибологические характеристики масла оцениваются двумя методами, включая экспресс - метод определения трибологических характеристик на ЧШМ, характеризующийся сравнительно невысокой трудоёмкостью.

С целью упрощения оптимизационной задачи целесообразно принять за целевую функцию диаметр пятна износа, определяющийся на ЧШМ и имеющий высокую сходимость с результатами исследований масел на значительно более трудоёмком редукторном стенде Ш-3 и с опытом эксплуатации. Показатели термоокислительной стабильности масла и коррозионной агрессивности,

определяемые по ГОСТ 23797, а также вязкостно-температурные свойства, определяемые по ГОСТ 33, и пожаробезопасность, определяемую по ГОСТ 4333, целесообразно принять в качестве ограничивающих параметров.

Оптимизационная задача в этом случае является однокритериальной, и её решением является однозначный состав [16].

2.3. Выбор метода оптимизации составов опытных образцов

Поиск оптимального состава масла занимает много времени, и от него зависит успех всех последующих, достаточно длительных и дорогостоящих, этапов. В этом случае может быть эффективным использование метода математического моделирования, нашедшего применение при решении схожих задач в ряде отраслей машиностроения, например, в автомобилестроении и металлургии [45, 46, 47]. При создании композиций авиационных масел, в том числе смазочных и гидравлических, методы безусловной оптимизации до сих пор не применялись [44, 47].

Для оптимизации составов опытных масел метод должен быть не требовательным к вычислительным мощностям, эффективно сокращать число опорных точек и быть доступным по стоимости.

Автором предложена методика, предусматривающая поиск оптимального состава масел путем проведения серии экспериментов, управление которыми осуществляется с использованием оптимизатора, основанного на построении поверхностей отклика. Применение разработанной методики позволяет наиболее точно и обоснованно находить экстремум целевой функции при сокращении числа экспериментов [16].

Цель оптимизационного исследования заключается в определении такого состава масел, который обеспечивает наибольшее значение критерия оптимизации при сохранении необходимого уровня ограничивающих и

После завершения процесса оптимизации состава масла определяются контролируемые параметры. Отличие КП от ОП заключается в том, что КП оцениваются только после достижения наилучшего значения критерия K , они более трудоемки и продолжительны, а также включают большее число показателей, тогда как ОП определяют для каждого значения ВВП.

Накопление и использование информации в базе данных позволяет существенно сократить число экспериментов и повысить точность и достоверность результатов оптимизации для дальнейших исследований.

Оптимизатор базируется на технологии построения поверхностей отклика, отличающейся от известных подходов нелинейного программирования [16] наличием стадии коррекции экспериментальных данных на этапе построения поверхности отклика, в результате чего предлагаемая методика адаптирована для оптимизации составов масел.

Алгоритм построения поверхностей отклика имеет возможность аппроксимировать функции со сложной топологией, обеспечивая хорошие экстраполяционные свойства (рисунок 2.3). Коричневым маркером обозначены результаты эксперимента, синим маркером – уточненные результаты эксперимента, зеленая кривая – аппроксимационная кривая поверхности отклика.

При анализе экспериментальных данных значения, поступающие в оптимизатор, уточняют при учете соседних результатов, полученных в близких условиях эксперимента, и при учете схожих результатов из базы данных, а также при учете характера зависимости: монотонно убывающей, монотонно возрастающей или многоэкстремальной с различной степенью экстремальности.

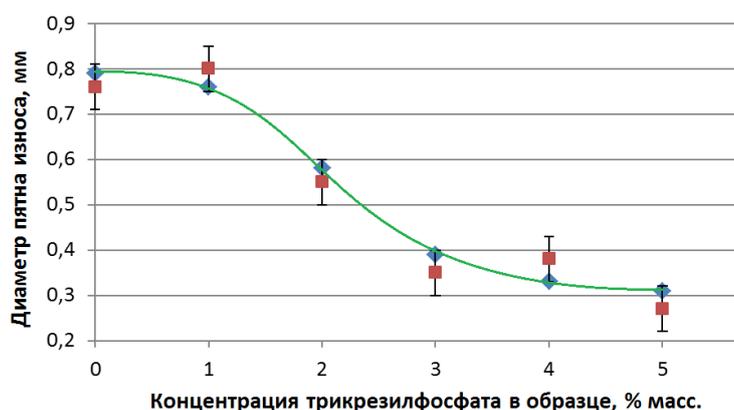


Рисунок 2.3 – Аппроксимационная кривая поверхности отклика для диаметра пятна износа от концентрации трикрезилфосфата.

На каждой итерации строят поверхности отклика критериев оптимизации и ограничиваемых параметров. Далее анализируют полученные поверхности отклика, и в полученной точке экстремума обращаются к математической модели или к эксперименту с целью подтверждения или опровержения прогноза найденного экстремума. В процессе оптимизации накапливается информация об исследуемом масле в окрестности оптимального решения, что приводит к повышению достоверности получаемых результатов.

При использовании оптимизатора каждая итерация поиска экстремума состоит из двух этапов (рисунок 2.4):

1. Построение поверхностей отклика целевой функции (критерия оптимизации) и ограничиваемых параметров.
2. Анализ исследования поверхности отклика.



Рисунок 2.4 – Итерация процесса оптимизации

При переходе от каждой итерации к последующей выполняется следующая последовательность шагов:

- Модификация плана эксперимента.
- Адаптивное изменение текущей области поиска.
- Выбор типа поверхности отклика (глобальной или локальной).
- Уточнение поверхности отклика.
- Модификация параметров и структуры алгоритма оптимизации.

Использование этого алгоритма позволяет значительно снизить затраты при решении сложных практических задач по созданию авиационных масел.

Разработанная методика, основанная на сопряжении экспериментальной базы, оптимизатора и функции управления экспериментом, представляет собой инновационную методологию создания новых масел, которая позволяет организовать эффективный процесс их создания. Математическая обработка базы данных «состав-свойства» позволяет в полной мере оценить уже накопленный опыт, а прогнозные возможности реализованного в методике математического оптимизатора — предложить обоснованный вариант продолжения поиска наилучшего результата.

2.4 Разработка метода исследования вспениваемости авиационных масел в лабораторных условиях в расширенном интервале температур

Вспениваемость авиационных смазочных и гидравлических масел является одним из важнейших факторов, влияющих на безопасность полётов [21, 27]. Снижение эксплуатационных свойств масел, обладающих повышенной вспениваемостью, обусловлено повышенным содержанием воздуха в этих маслах при эксплуатации двигателей, что приводит к ухудшению теплоотвода и перегреву узлов трения, ускоренному окислению масла, снижению эффективности смазывания деталей, увеличению мощности маслонасосов, нарушению штатной работы агрегатов летательных аппаратов (ЛА).

Пенообразующие свойства рабочих жидкостей для авиационных гидросистем и масел для авиационных газотурбинных двигателей при оценке по существующей методике согласно ГОСТ 21058-75 определяют при максимальной температуре 95 °С. Зависимость пенообразующих свойств от температуры имеет нелинейный характер, поэтому эти свойства не могут быть достоверно определены в расширенном интервале температур известными аппроксимационными методами [36, 37].

Рабочие температуры авиационных масел достигают 180°C и более. Рабочие температуры гидравлических жидкостей для гидроагрегатов и гидросистем самолётов достигают 150 °С и более.

Для получения сведений о пенообразующих свойствах авиационных масел в условиях, приближенных к реальным условиям работы масел в авиационных узлах и агрегатах, целесообразно определять пенообразующие свойства в расширенном температурном диапазоне.

Для этого автором была проведена модернизация штатной установки. Установка представляет собой устройство для определения пенообразующих характеристик (рисунок 2.4), снабженное рубашкой для термостатирования образца масла, соединенное трубопроводами с термостатом, обеспечивающим нагрев теплоносителя. В качестве теплоносителя используется вода.

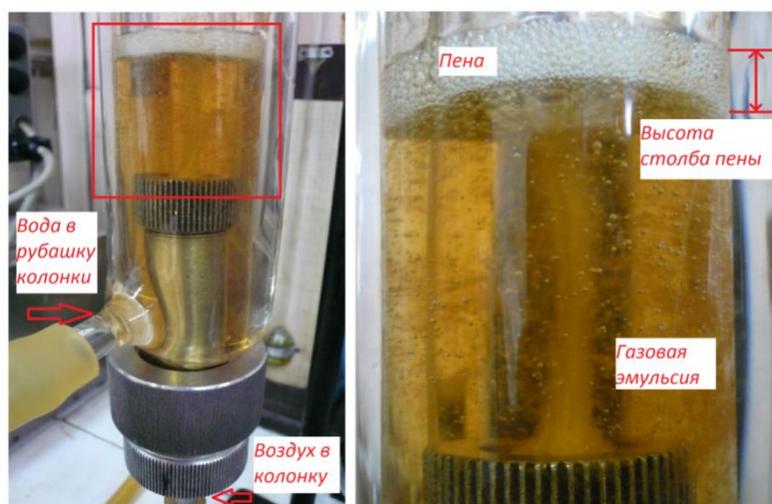


Рисунок 2.4 – Определение пенообразующих свойств

В состав установки для определения пенообразующих свойств входят:

- термостат: VEB MLW Prüfgerate-werk Medingen Sitz Freital,
- трубки силиконовые, обладающие высокой механической прочностью, стойкие к маслам, щелочам, кислотам, перекиси водорода. Температурный диапазон использования силиконовых трубок: от – 60 до +200°C (кратковременно до +300°C),
- устройство для определения пенообразующих свойств (рисунок 2.5), состоящее из:

- общей магистрали сжатого воздуха;
- редуктора низкого давления типа РДВ-1 или микрокрана для тонкой регулировки подачи газа;
- системы для осушки газа, состоящей из склянки Тищенко вместимостью 250 см³, заполненной серной кислотой по ГОСТ 4204-77, и ловушек для серной кислоты и U-образной трубки с хлористым кальцием по НД и склянки со стекловатой;
- трехходового крана;
- реометра по ГОСТ 9932-75, типа РКС;
- двухходового крана;
- рабочей колонки для вспенивания испытуемого продукта, представляющей собой впаянную в термостатирующую рубашку стеклянную трубку внутренним диаметром (25 ± 2) мм и высотой 500 мм, к нижней части которой припаян шлиф КШ 29/43 по ГОСТ 8682-93, с помощью которого внутри колонки крепится диспергирующее устройство.

Теплоносители должны быть химически стабильными, не оказывать коррозионного и эрозийного воздействия, не образовывать взрывоопасных смесей, иметь достаточную термостойкость, обеспечивать достаточно интенсивный теплообмен, обладая высокой теплоемкостью и малой вязкостью, быть доступными и иметь невысокую стоимость, отличаться малой химической токсичностью, иметь высокие температуры кипения и воспламенения. Применяемые в лабораторной практике теплоносители всем требованиям одновременно не отвечают. Для расширения температурных пределов работы установки автором был подобран теплоноситель, работоспособный при температурах 180-200 °С. В качестве высокотемпературных теплоносителей были рассмотрены: глицерин, а также смесь глицерина и воды, полиэтилсилоксановая жидкость ПЭС-7.

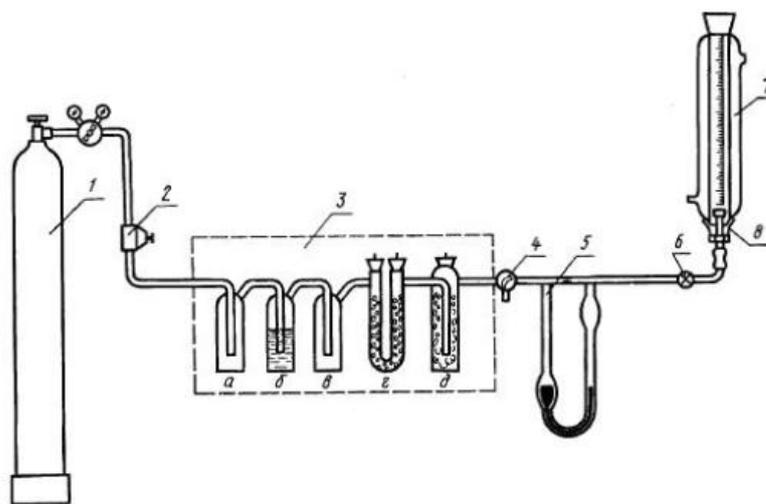


Рисунок 2.5 – Схема установки для определения пенообразующих свойств (ГОСТ 21058-75)

1 – баллон со сжатым газом и редуктором; 2 – редуктор низкого давления; 3 – система для осушки газа; 4 – трехходовой кран; 5 – реометр; 6 – двухходовой кран; 7 – рабочая колонка; 8 – диспергирующее устройство

Полиэтилсилоксановая жидкость ПЭС-7 – смесь полиэтилсилоксанов преимущественно линейного строения с температурой кипения выше 190°C [57] при остаточном давлении 1-3 мм рт. ст. Полиэтилсилоксановая жидкость ПЭС-7 предназначена для применения в качестве компонента для гидравлических масел, теплоносителей и др. [8, 56]. Технические характеристики ПЭС-7 приведены в таблице 2.2.

Теплоноситель на основе глицерина представляет собой раствор глицерина в воде. Добавление воды снижает вязкость теплоносителя и защищает его от перегрева. Кроме этого снижается температура кипения смеси глицерина и воды (рисунок 2.6).

Таблица 2.2 – Характеристики жидкости ПЭС-7

Наименование показателей	Норма
Внешний вид и цвет	Прозрачная жидкость от бесцветного до светло-желтого цвета
Механические примеси	Отсутствие. Не нормируется. Определение обязательно.
Вязкость кинематическая, мм ² /с +20°C +200°C, не менее - 60°C, не более	42-48 2,4 1400
Температура вспышки, °C, не ниже	195
Температура застывания, °C, не выше	-70
Массовая доля воды, %, не более	0,003
Термоокислительная стабильность и коррозионная активность: изменение массы металлических пластинок на единицу площади, мг/ см ² кинематическая вязкость, мм ² /с (сСт): +20°C +200°C, не более -60°C, не более кислотное число, мг КОН/г жидкости, не более	+ 0,008 42-49 (42-49) 3,0 (3,0) 1550 (1550) Не нормируется. Определение обязательно.

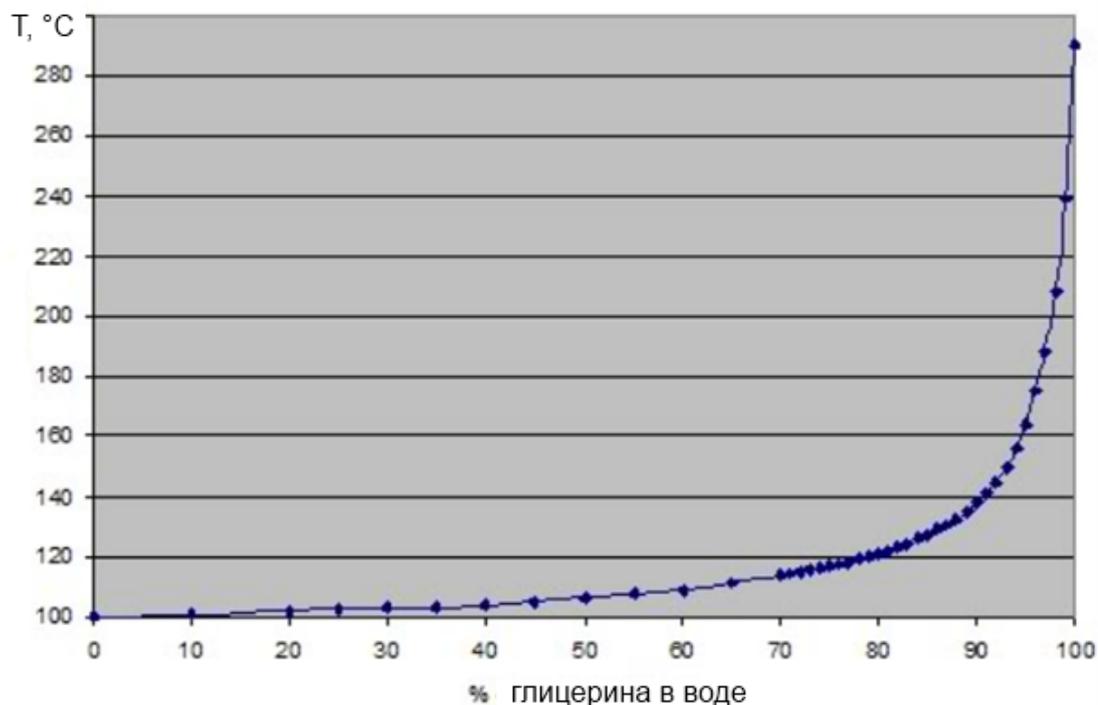


Рисунок 2.6 – Температура кипения смеси глицирина с водой

Глицерин взрывопожаробезопасен, безвреден для здоровья и имеет высокий уровень теплоотдачи. Одновременно глицерин обладает высокой вязкостью, коррозионной агрессивностью, а его высокотемпературный нагрев (более 200 °С) приводит к образованию акролеина, являющегося сильно ядовитым веществом, обладающего крайне неприятным запахом и слезоточивым эффектом [41].

Различия теплофизических свойств теплоносителей обуславливают различия в их эксплуатационных показателях: скорость нагрева, максимальная температура нагрева (при постоянной мощности нагревателя), а также режим течения теплоносителя в колонке. Теплофизические свойства высокотемпературных теплоносителей и воды приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Некоторые теплофизические характеристики теплоносителей

Показатель	Вода	Глицерин	ПЭС-7
$\nu_{20} \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	1,006	1171,5	47
$\nu_{100} \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	0,295	10,7	7
$\nu_{200} \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	–	н.д.	2,5
$\rho_{20}, \text{ кг/м}^3$	998.23	1263,3	1070

Перечень средств измерений с указанными максимальными погрешностями при определении пенообразующих свойств масел соответствует требованиям ГОСТ 21058.

Использование ПЭС-7 более предпочтительно по отношению к использованию смеси глицерина и воды по показателям времени нагрева и максимальной температуре нагрева и может обеспечить определение пенообразующих характеристик авиационных масел при температуре 185°С.

Новый метод исследования пенообразующих характеристик смазочных и гидравлических масел

Вспениваемость авиационных масел определяется, как описано выше, штатным методом по ГОСТ 21058-75. Получаемые при этом данные недостаточно

информативны. Отсутствуют сведения о пенообразующих свойствам масел в интервале температур от 25 до 185 °С включительно [104].

В случаях нештатной работы маслосистемы, приводящей к дымлению авиационных ГТД, были отобраны образцы масел для определения их вспениваемости с целью определения влияния высокой вспениваемости масел на дымление ГТД.

При определении по методу ГОСТ 21058-75 вспениваемости работавших масел с «дымящих» и «недымящих» двигателей завышенная вспениваемость установлена только для масла Rooco 899, а для масел Б-3В и TN-98 уровень вспениваемости невысок [37, 104].

Вызывает затруднение сравнение результатов вспениваемости, определяемых согласно методике ГОСТ 21058-75 при температурах 25, 95 и 25 °С, двух разных масел: у одного высота столба пены составляет 40 мм, 10 мм и 20 мм, а у второго – 20 мм, 10 мм, 40 мм. Особенно это заметно при исследовании пенообразующих свойств работавших масел, так как для синтетических масел из тары изготовителя, как правило, пенообразующие свойства равны нулю.

С целью разработки нового метода определения пенообразующих свойств авиационных масел были исследованы пенообразующие свойства масел при изменении температуры, расхода воздуха, пропускаемого через образец.

Согласно штатному методу определения пенообразующих свойств по ГОСТ 21058, осушенный воздух пропускают через образец масла, находящийся в термостатирующей колонке. Определения показателей вспениваемости: высоты и времени разрушения столба пены – выполняются последовательно при 25 °С, 95 °С и снова при 25 °С при постоянном расходе воздуха 0,2 см³/с. Последнее определение при 25 °С принципиально отличается от двух первых тем, что испытуемый образец масла предварительно барботируется газом и выдерживается при температуре 95 °С. В результате высота столба пены определяется при 25 °С в различных условиях и имеет различные значения [105].

Для получения более полной информации о пенообразующих свойствах масел автором были предложены дополнения к методу определения

пенообразующих характеристик по ГОСТ 21058-75, которые приведены в таблице 2.4. Определение вспениваемости выполняется в интервале температур с шагом 10 °С, регламентируется процедура подготовки образца, проводятся как параллельные, так и последовательные определения, исследуется кинетика развития и разрушения пены, оценивается влияние расхода воздуха и времени окисления масла, а также определяется высота столба пены по достижению максимального уровня. Все это в совокупности позволяет определять потенциальный уровень вспениваемости, который не определяется методом по ГОСТ 21058-76, однако может проявляться в эксплуатации. Для обработки и анализа экспериментальных данных используется методика [103].

Таблица 2.4 – Сравнение методик оценки вспениваемости масел

	ГОСТ 21058-75	Автор
Температуры определения вспениваемости	25, 95, 25 °С	От 25 до 95 °С с шагом 10 °С
Подготовка образца	Не регламентируется	Предварительное перемешивание образца, нагрев до 110 °С
Контроль результатов	Параллельные определения	Последовательные и параллельные определения
Исследование кинетики развития и гашения пены	Отсутствует	Предусмотрено
Оценка влияния расхода воздуха	Отсутствует. Расход воздуха – 0,2 см ³ /с	От 0,1 до 1,0 см ³ /с с шагом от 0,2 см ³ /с
Оценка влияния времени окисления масла	Отсутствует	От 10 до 50 ч по ГОСТ 23797-79
Оценка высоты столба пены	До установления постоянного уровня пены	До достижения максимального уровня пены (время удержания не менее 3 мин.)
Назначение	Для контроля качества авиамасел	Для сравнительной оценки вспениваемости авиамасел

При определении вспениваемости масел по ГОСТ 21058-75 после подачи воздуха в колонку высота столба пены начинает плавно расти, затем она достигает постоянного уровня, который считается высотой столба пены. После этого прекращают подачу воздуха и определяют время разрушения столба пены.

Иногда рост и разрушение пены протекают иначе. При исследовании кинетики развития и разрушения пены масел с дымящих двигателей (рисунок 2.7) для масла Б-3В установлена необычная зависимость: после подачи воздуха в колонку происходит сначала плавный рост, затем выход на максимум, а потом самопроизвольное (без прекращения подачи воздуха) снижение высоты столба пены до нулевого уровня. Это происходит после подготовки образца путем нагревания до 110 °С и последующего его охлаждения до исходной температуры испытания без перемешивания и пропуска воздуха.

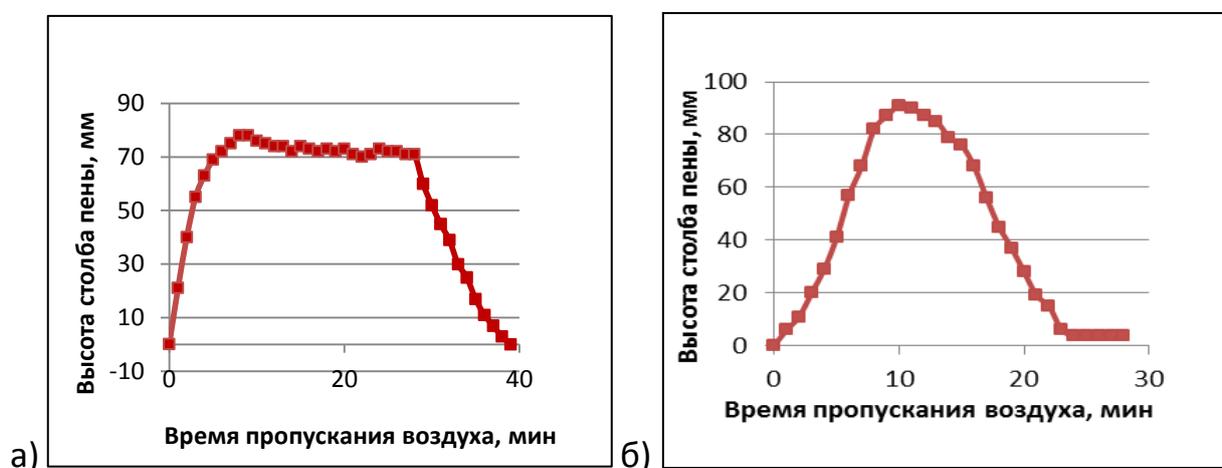


Рисунок 2.7 – Кинетика развития и разрушения столба пены для масел с дымящих двигателей. Температура 25 °С: а) Масло TN-98, б) Масло Б-3В

По методике ГОСТ 21058-75 для контроля вспениваемости требуется проводить параллельные определения. Однако контроль последовательных определений (когда испытуемый образец вспенивают последовательно при одной температуре) тоже может быть эффективен в случае, если образец не чувствителен к пропусканию воздуха. В противном случае полученные данные будут свидетельствовать об изменении вспениваемости при насыщении образца воздухом. При определении вспениваемости масел с дымящих двигателей по методике ГОСТ 21058-75 для масла TN-98 при повторном определении высоты столба пены при 25 °С (после определения вспениваемости при 95 °С) при проведении последовательных определений установлено увеличение высоты

столба пены; для масла Б-3В – снижение высоты столба пены (после нагревания до 95 °С без пропуска воздуха) (рисунок 2.8).

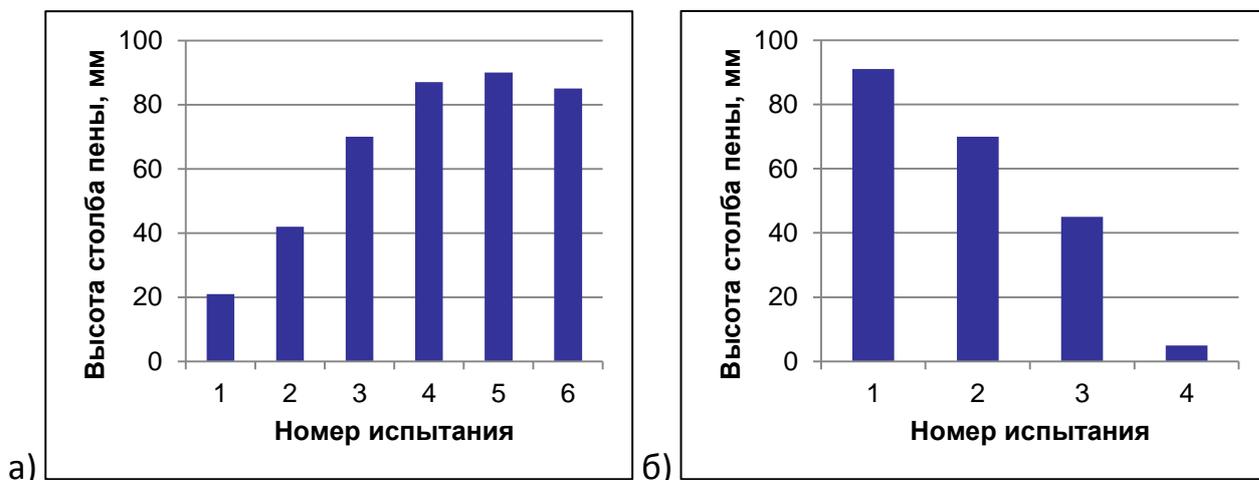


Рисунок 2.8 – Контроль последовательных определений
Температура 25 °С. а) Масло TN-98; б) Масло Б-3В

Известно, что в растворенном состоянии воздуха в масле при нормальных условиях может находиться до 10 % об., а в высокодиспергированном состоянии (для устойчивой системы с диаметром пузырька 0,4–0,8 мкм) – до 15 % об. [40]. При этом соотношение растворенных в масле газов может отличаться от содержания газов в воздухе, а с изменением температуры это соотношение может меняться. И растворенный, и диспергированный воздух могут оказывать влияние на вспениваемость [40].

Для предотвращения влияния растворенного и диспергированного воздуха на вспениваемость автором предложено регламентировать процедуру подготовки образца к испытанию.

Перед испытанием для равномерного распределения всех веществ по объему проводим интенсивное перемешивание образца. Последующее нагревание образца до 110 °С приводит к снижению вязкости масла в 10 раз, что, как следствие, способствует нормализации образца перед испытанием [40]. Предварительный нагрев и последующее охлаждение до температуры испытания имитирует подачу газомасляной смеси от узла трения через теплообменник в маслобак, приближая эксперимент к условиям эксплуатации. Выполнив контроль

параллельных определений, принимаем решение о необходимости использования нового образца для очередного определении вспениваемости при следующей температуре.

При использовании вышеописанного метода для образцов масел с дымящих двигателей, которые не имели повышенной вспениваемости по методу ГОСТ 21058-75, получен другой результат – установлен повышенный уровень вспениваемости (рисунок 2.9). Розовым цветом окрашены столбцы гистограммы высоты столба пены, определенной без подготовки образца, фиолетовым – с подготовкой.

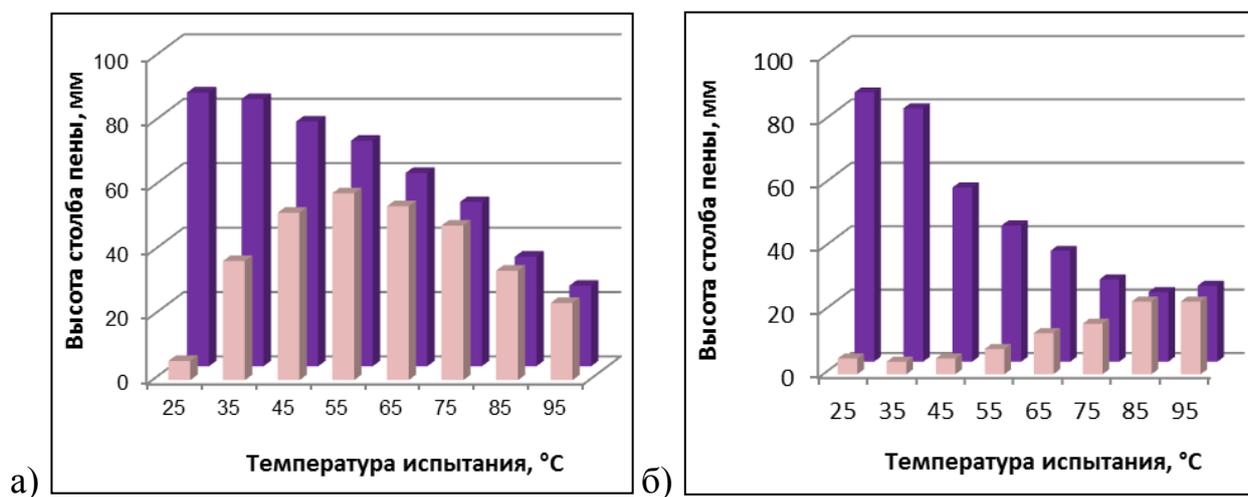


Рисунок 2.9 – Влияние метода подготовки на вспениваемость: а) масло TN-98; б) масло Б-3В.

При сравнении работавших масел с «дымящих» и «недымящих» двигателей видно, что для масел с «дымящих» двигателей характерен повышенный уровень вспениваемости (рисунок 2.10).

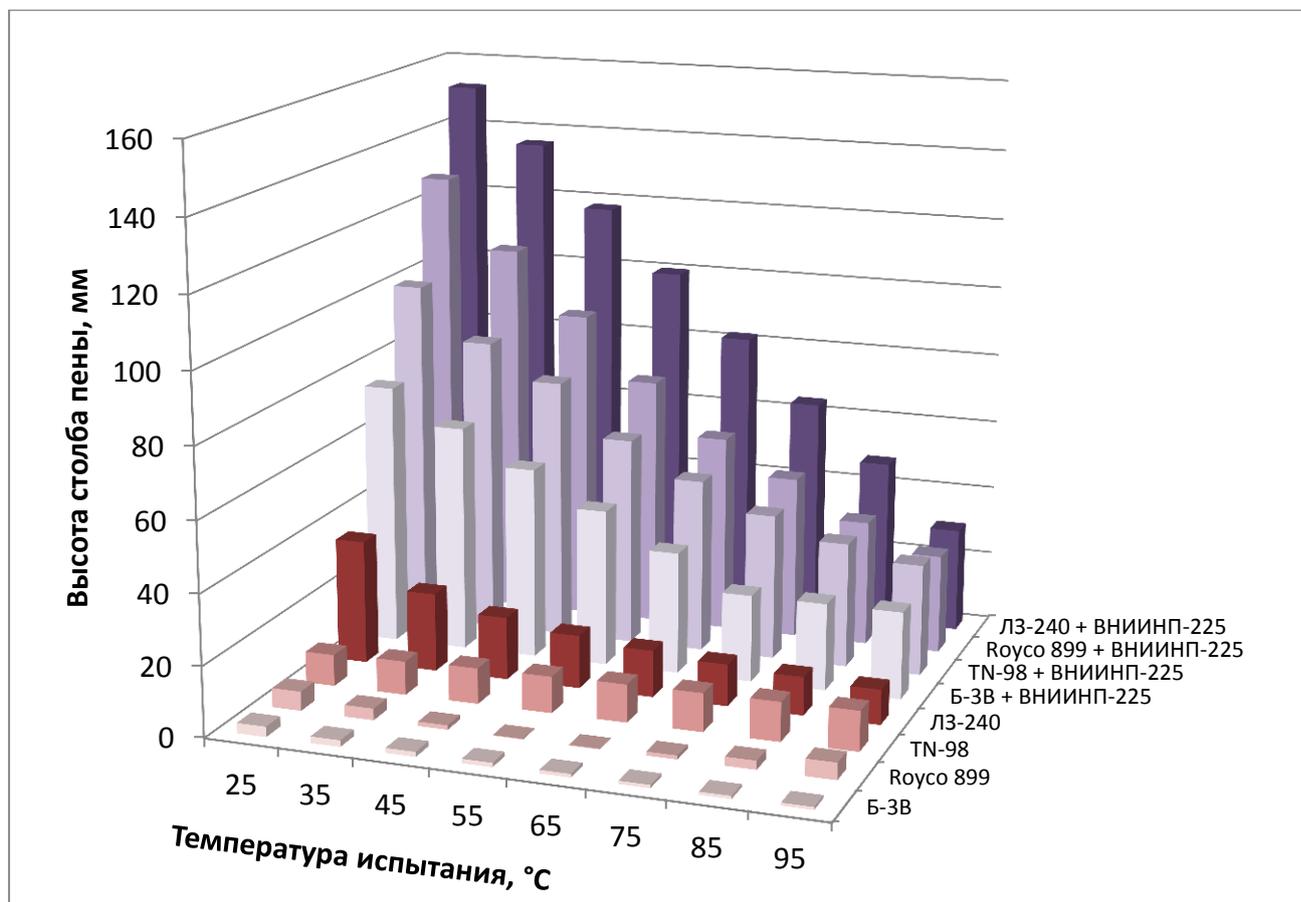


Рисунок 2.11 – Сравнение вспениваемости авиамасел при добавлении смазки ВНИИМП-225

Предложенная модификация методики ГОСТ 21058-75 позволяет определять вспениваемость масел в условиях, приближенных к условиям работы масел в двигателе и гидравлических системах, и в дальнейшем могут быть использованы как для совершенствования стандартной методики, так и для разработки новых методик.

2.5. Разработка метода исследования вспениваемости авиационных масел в демонстрационной электроприводной системе смазки ГТД

Как известно [35, 82], в маслосистемах газотурбинных двигателей (ГТД) современных летательных аппаратов применяют насосы с прямым механическим

приводом от коробки приводов агрегатов ГТД, которые позволяют бесперебойно прокачивать масловоздушную смесь по тракту при работе двигателей. Работа таких маслосистем хорошо изучена, их достоинством является высокий запас мощности, а недостатком — пониженная энергоэффективность ввиду отсутствия возможности оптимизации потребной мощности при различных режимах работы ГТД.

К числу инновационных маслосистем силовых установок новых, «электрических» самолетов относятся маслосистемы с электроприводными насосами [24, 27]. Каких-либо данных о характеристиках работы таких систем при прокачке масловоздушной смеси, образующейся при работе авиационных ГТД, в научно-технической литературе нет.

Для исследования характеристик маслосистем «электрических» самолетов автором была использована демонстрационная электрическая система смазки (ДЭСС) ЦИАМ [24]. ДЭСС представляет собой модельный стенд, имитирующий замкнутую маслосистему ГТД, снабженную электроприводными насосами. Принципиальная схема ДЭСС и испытательного стенда с имитатором масляной полости ГТД приведена на рисунке 2.12.

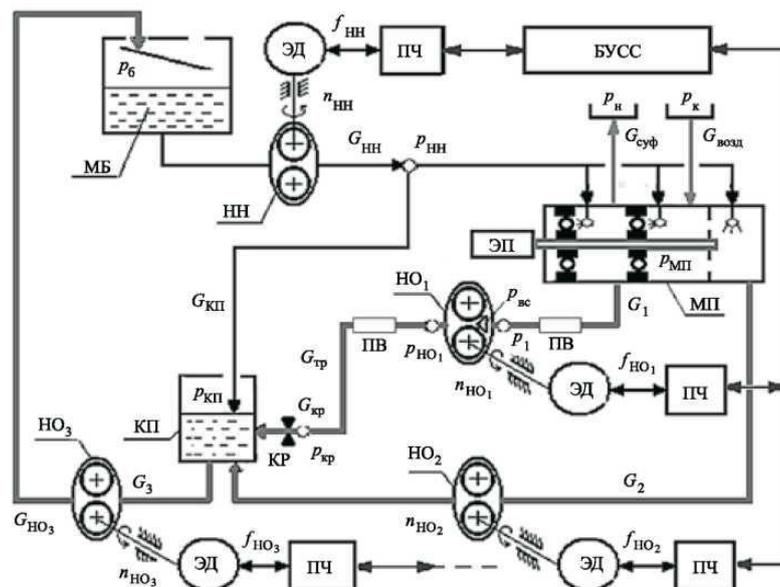


Рисунок 2.12 – Принципиальная схема демонстрационной электроприводной системы смазки (ДЭСС).

На схеме приняты условные обозначения: МБ — маслобак; НН — нагнетающий насос; НО — насосы откачки; ЭД — электродвигатели; ПЧ — преобразователи частоты; МП — масляная полость; КП — картер коробки приводов; КР — настроечный кран; ПВ — прозрачная вставка; БУСС — блок управления системой смазки; p — давление; G — расход; n — частота вращения ротора; f — частота электросети.

ДЭСС состоит из четырех шестеренных насосов, каждый из которых приводится во вращение от асинхронного электродвигателя (ЭД) с управлением от преобразователей частоты питающей сети (ПЧ) и цифровой системы управления (БУСС). Насосы — одноступенчатые типа НМШ2. Нагнетающий насос (НН) подает масло в масляную полость (МП) для смазки опоры турбины, вращаемой электроприводом (ЭП). Насосы НО₁ и НО₂ откачивают масловоздушную смесь в коробку приводов (КП), откуда насос НО₃ подает масло в маслобак (МБ). Предмасляная полость наддувается воздухом ($G_{\text{возд}}$) от компрессора с давлением p_k , а магистраль суфлирования ($G_{\text{суф}}$) соединена с атмосферой (давление p_n).

При испытаниях ДЭСС избыточное давление в масляной полости составляет 0,01...0,03 МПа, за нагнетающим насосом — 0,3...0,5 МПа, скорость прокачки масла через него — 10...20 л/мин, через откачивающие насосы — до 60 л/мин, температура масловоздушной смеси изменяется в пределах 20...70°С. Величина K_p (отношение подачи откачивающего насоса к подаче нагнетающего), изменяется от 2 до 4, при этом истинное объемное газосодержание $\alpha_n = 0,2...0,5$. Частота вращения ротора подшипников масляной полости — $n = 4000...12000$ мин⁻¹.

На вход нагнетающего насоса из маслобака поступает жидкое масло (без газовых включений или с их минимальным количеством). Нагнетающий насос обеспечивает подачу масла к форсункам, из которых оно поступает на узлы качения подшипников. Подшипники располагаются в масляной полости, куда по уплотнениям вала поступает и воздух для предотвращения попадания масла в тракт двигателя. В подшипниках жидкое масло дробится на мелкие капли и,

перемешиваясь с поступающим воздухом, образует масловоздушную смесь.

Измеряемыми характеристиками маслосистемы являются мощность электроприводов насосов и спектры давления после откачивающего насоса.

Для исследований течения масло-воздушной смеси автором была проведена модернизация стенда ДЭСС. На линии откачки масла из масляных полостей на входе и выходе насоса НО₁ (см. рисунок 2.12) в трубопровод были вмонтированы оптически прозрачные вставки (Ø12 мм, длина 300 мм), позволяющие проводить визуальную оценку структуры потока масло-воздушной смеси.

Для визуализации течения использовали видеокамеру Sony HDV-FX7.. Съемка проводилась с частотой 25 кадров/с (обычная) и 100 кадров/с (замедленная) при выдержке 1/6000 с. Для измерения давлений использовали датчики с частотой пропускания 1000 Гц. Информацию от датчиков давления регистрировали в цифровом анализаторе динамических процессов МІС-300М фирмы «Мера» для получения спектров колебания давлений. Для обработки результатов видеосъемки на компьютере использовали программу Adobe Premiere Pro CS4, обеспечивающую покадровый анализ видеофильма. Изменение цвета двухфазной масловоздушной смеси использовано для качественной оценки дисперсности потока.

Согласно результатам экспериментальных исследований автора ДЭСС с шестеренными электроприводными насосами, при работе на минеральном масле МС-8П режимы течения масловоздушной смеси в трубопроводах имеют особенности. Анализ результатов видеосъемки показал, что при увеличении подачи откачивающего насоса в контуре откачки наблюдаются следующие основные структуры потока: происходит переход от расслоенного течения (рис. 2.13 А) с двухфазной масловоздушной смесью в нижней части трубы к пузырьковому течению (рисунок 2.13 В) и, далее, к пробковому течению (рисунок 2.13 С), состоящему из дисперсной масловоздушной смеси в нижней и пузырей в верхней части трубы.

В работах ВНИИГАЗ [8] такие структуры течения считаются основными при прокачке нефтегазовых потоков. Визуализация показала, что при пробковом

режиме течения пузыри всплывают в верхнюю часть трубы и занимают часть ее проходного сечения, не разрывая поток по радиусу. При этом пузыри под действием архимедовой силы и перепада давления плавно продвигаются по потоку, вытесняя перед собой масловоздушную смесь.

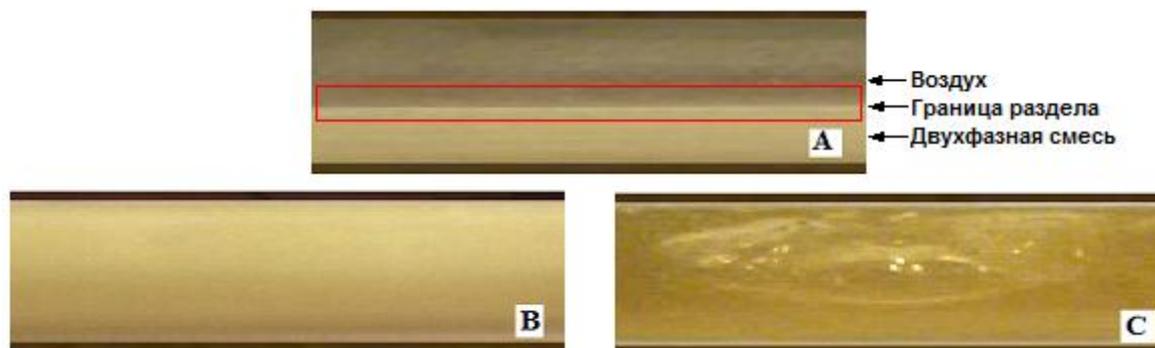


Рис. 2.13. Структуры потоков рабочей среды в контуре откачки: А – расслоенная; В – дисперсная; С – пробковая

Одна из основных причин такого течения — использование в системах смазки авиационных ГТД шестеренных насосов (насосов объемного типа). При этом величина расхода масловоздушной смеси в гидравлическом контуре формируется расходной характеристикой насоса, которая отражает зависимость объемного расхода на выходе насоса Q_n от частоты вращения его вала n_n . Расходная характеристика выбирается из условия обеспечения требуемой прокачки рабочей среды при расчетном газосодержании ($\alpha_{расч}$) на заданной частоте вращения насоса. На другой частоте вращения объемная подача насоса тоже будет соответствовать расходной характеристике. Эта специфика работы насоса обусловлена его конструкцией, в которой шестеренная пара насоса прокачивает с входа на выход объем, равный объему межзубных впадин шестерен в зоне всасывания. Величина объемного расхода на выходе (входе) насоса при текущем значении частоты вращения характеризует его пропускную способность. При прокачке шестеренным насосом масло-воздушной смеси на режиме с постоянной частотой вращения в зависимости от объемного газосодержания на входе в насос (α_n) возможны следующие режимы работы:

I. Истинное объемное газосодержание масло-воздушной смеси на входе в насос равно расчетному значению ($\alpha_n = \alpha_{\text{расч}}$), и насос прокачивает ее с объемным расходом Q_n^* , соответствующим текущей пропускной способности насоса.

II. Истинное объемное газосодержание ниже расчетного значения ($\alpha_n < \alpha_{\text{расч}}$). В этом случае на вход насоса поступает масловоздушная смесь с большей плотностью, а так как пропускная способность насоса выше, то возникает эффект опорожнения входного патрубка насоса. Это приводит к снижению давления на входе в насос и увеличению α_n . Процесс продолжается до тех пор, пока не установится равновесное состояние по величине α_n на входе в насос. При определенном значении давления происходит разрыв сплошности масловоздушной смеси, и реализуется расслоенное течение с дисперсным потоком в нижней (или наклонной) части трубопровода.

III. Истинное объемное газосодержание выше расчетного значения ($\alpha_n > \alpha_{\text{расч}}$). Пропускная способность шестеренного насоса ниже, чем поступающий на вход объемный расход, и возникает эффект динамического запираания насоса. При этом в гидравлической сети с насосом возникает пульсирующее течение масловоздушной смеси. Течение масловоздушной смеси на режимах I, II, III может реализоваться на любой частоте вращения насоса в пределах его расходной характеристики. На рисунке 2.14 показана карта режимов течения при прокачке масловоздушной смеси в гидравлическом контуре с шестеренным насосом при частотах вращения 100 и 43 %, отмеченных красным и синим цветом соответственно. Расходная характеристика насоса приведена в координатах частота вращения — расход.

Неустойчивость течения потока масловоздушной смеси на режиме III связана с образованием в гидравлическом контуре волн плотности (кинематических волн), которые распространяются со скоростью потока [7]. При $\alpha_n > \alpha_{\text{расч}}$ масловоздушная смесь не может прокачаться насосом с входа на выход, и начинается ее накопление на входе в насос, что приводит к росту давления и, как следствие, уменьшению размера ее пузырьков, увеличению ее плотности и уменьшению объема. Насос прокачивает порцию масловоздушной смеси с

большей плотностью, что приводит к падению давления на входе, уменьшению плотности, заклиниванию насоса и т. д.

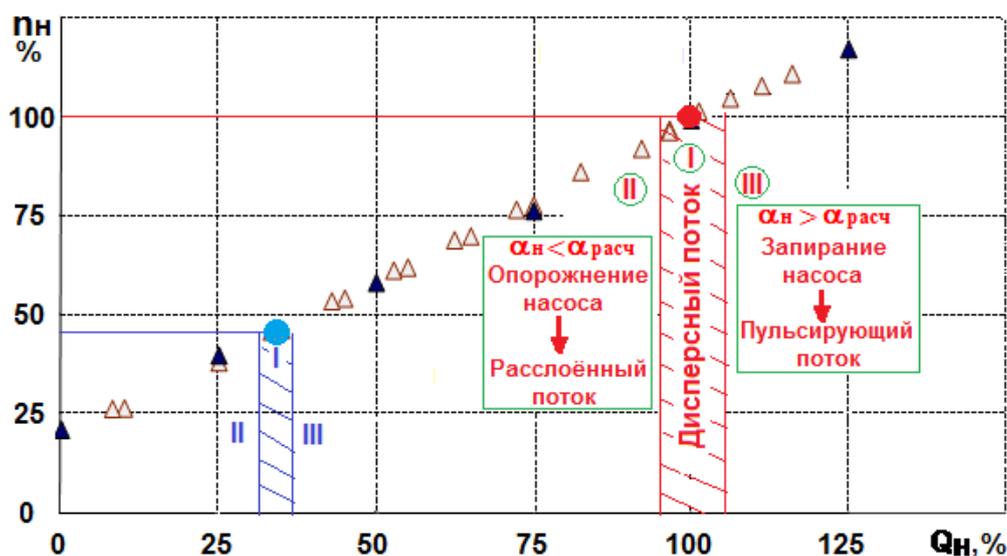


Рисунок 2.14 – Карта режимов течения масляно-воздушной смеси в контуре с шестерённым насосом

В результате на выходе из насоса получается разделенный на порции поток с разным значением плотности. Этот повторяющийся процесс изменения плотности приводит к возникновению полигармонических колебаний параметров. В экспериментах наблюдались регулярные колебания давлений с частотой $0,2 \dots 0,5$ Гц и $3 \dots 8$ Гц, а также затухающие колебания с частотой $60 \dots 110$ Гц на выходе из насоса HO_1 . Диагностическим признаком наличия колебаний параметров в системе смазки может служить наличие пульсаций давления за откачивающими насосами с частотами до 100 Гц. Возбуждение волн плотности снижает эффективность работы системы суфлирования и приводит к накоплению воздуха в масле, его вспениванию и выбросу в атмосферу [2].

Из-за перемешивания воздуха и масла в масляной полости образуется дисперсная смесь, состоящая из масляной пены в верхней части и мелкодисперсной масляно-воздушной смеси (газовой эмульсии) в нижней. Это косвенно иллюстрирует фотография на рисунке 2.15, на которой показана рабочая среда, образовавшаяся в результате диспергирования воздухом масла в цилиндре.

В нижней части цилиндра видны воздушные пузырьки, образующие масловоздушную смесь (газовую эмульсию), а на поверхности эмульсии образуется масляная пена.



Рисунок 2.15 – Рабочая среда масла в цилиндре

Для определения характеристик масловоздушной смеси проводили визуально-спектральный анализ параметров системы. При испытаниях измеряли давления: в верхней части масляной полости (МП) — $p_{м.в}$ и в трубопроводе на 0,2 м ниже ее дна — $p_{м.н}$. Соответствующие временные записи и спектры давлений без вращения ротора подшипников масляной полости показаны на рисунке 2.16.

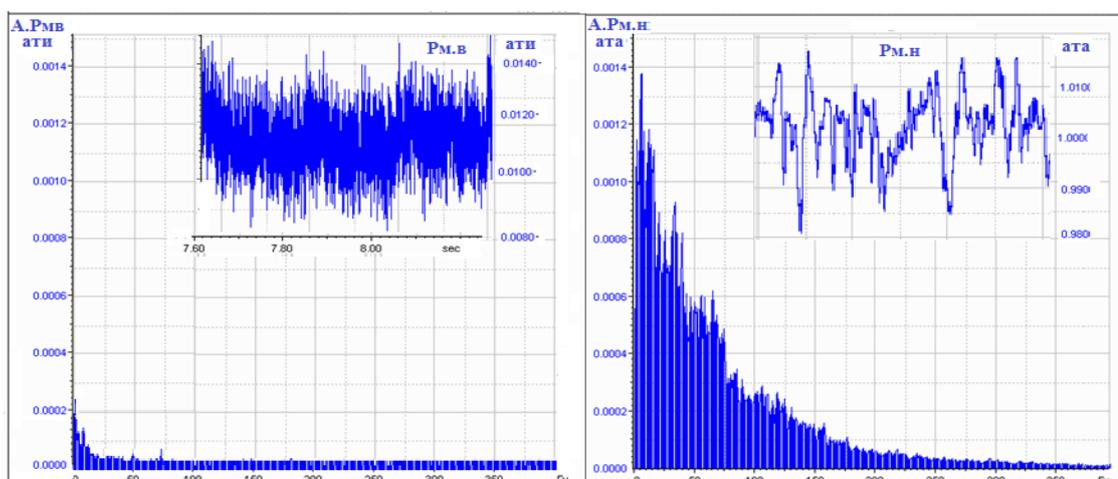


Рисунок 2.16 – Временные записи и спектры давлений сверху и внизу масляной полости (подача масла в МП 4,8 л/мин и откачка масло-воздушной смеси — 19,2 л/мин)

В верхней точке МП среднее значение амплитуды колебаний давления $p_{м.в}$ составляет 0,002...0,003 ати (0,2...0,3 %), запись имеет зашумленный вид, а спектр давления — вид спектра .белый шум.. Это может свидетельствовать о хаотичном характере процессов в верхней части масляной полости.

Плотная масловоздушная смесь находится в нижней части масляной полости, где протекают гидродинамические процессы с большими амплитудами колебаний, о чем свидетельствуют временные записи давлений и их спектры на частотах более 5...10 Гц. При этом амплитуда колебаний давления $p_{м.н}$ в нижней точке МП составляет 0,012...0,018 ата (1,2...1,8 %), что почти на порядок выше амплитуды в верхней точке.

Во временных записях давления $p_{м.н}$ наблюдаются колебания полигармонического характера со сложением многих частот. В спектрах это проявляется в виде наличия многочисленных гармоник, амплитуда которых на частотах более 20 Гц в несколько раз выше, по сравнению с амплитудами в верхней точке. Интенсивность процессов в нижней части МП возрастает при вращении ротора подшипников. В спектре давления $p_{м.н}$ на частотах 40...80 Гц наблюдается трехкратное увеличение амплитуд гармоник, по сравнению с режимом без вращения. Это указывает на интенсификацию процессов образования масловоздушной смеси с меньшим размером пузырьков.

При увеличении частоты вращения подшипников с 4000 до 12000 мин⁻¹, наблюдается потемнение масловоздушной смеси, что также свидетельствует об уменьшении размера пузырьков. На рисунке 2.17 приведены кадры видеофильма, показывающие изменение цвета рабочей среды в процессе выхода ДЭСС на заданный режим.

В исходном состоянии (время 0 с) масло находится в трубопроводе на входе в откачивающий насос (кадр 0). Кадр 10 (время 10 с) показывает, что после включения насосов темный цвет масловоздушной смеси и на входе, и на выходе откачивающего насоса практически один и тот же, а через 20 с масловоздушная смесь в трубе на входе начинает светлеть (нижняя часть на кадре 20), и ее можно характеризовать как мелкодисперсную. После включения электропривода

подшипников процесс осветления ускоряется (кадр 30). На установившемся режиме работы масловоздушная смесь на входе и выходе насоса приобретает молочный цвет по всему диаметру трубопроводов (кадр 60), но при этом на выходе она немного темнее. Повышение давления за насосом на 0,02 МПа приводит к потемнению масловоздушной смеси в трубопроводе на выходе откачивающего насоса (кадр 90).

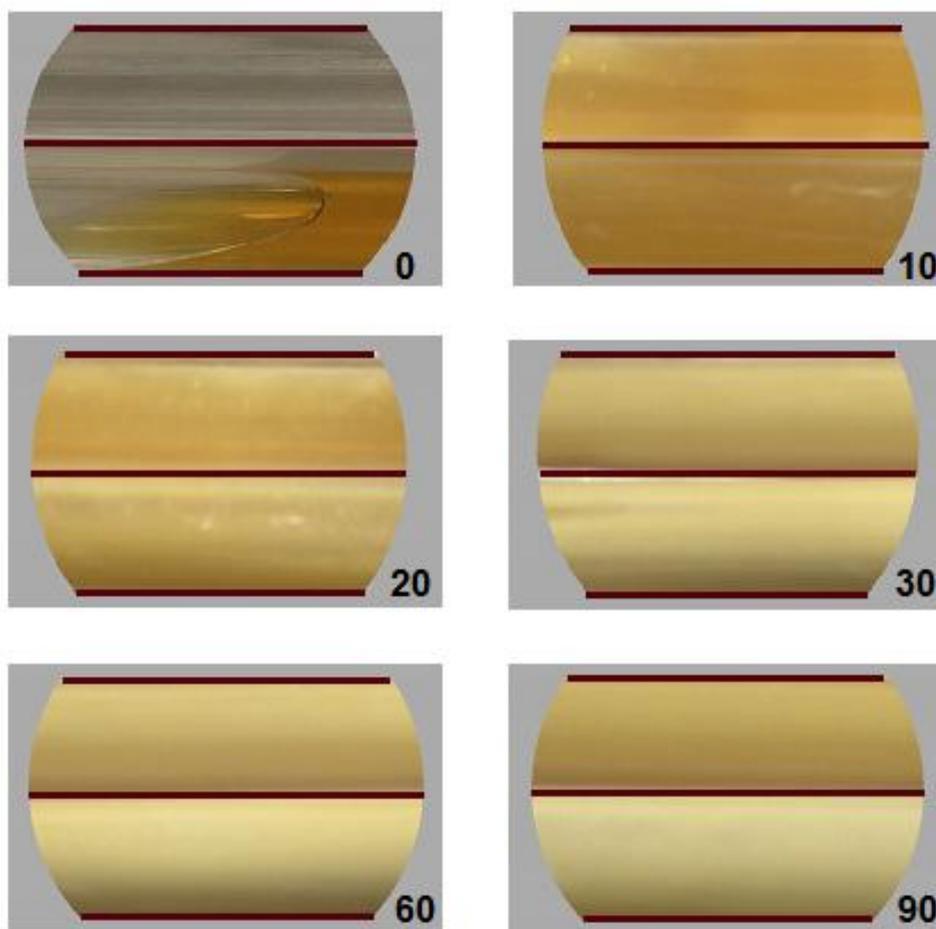


Рисунок 2.17 – Изменение цвета масловоздушной смеси при выходе системы смазки на заданный режим. (в верхней части кадра трубопровод на выходе НУ₁, в нижней – трубопровод на его входе)

Цвет смеси масла и воздуха изменяется в зависимости от соотношения этих компонентов и от размера пузырьков: чистое масло — жидкость темно-желтого цвета, воздух — бесцветный, а газовая эмульсия — дисперсная среда молочного цвета. Более темный цвет масловоздушной смеси в трубопроводе на выходе

насоса обусловлен более высоким давлением в нем и, как следствие, меньшими размерами пузырьков, что увеличивает влияние темного цвета жидкого масла.

Для оценки образования в гидравлическом контуре системы смазки устойчивой мелкодисперсной масловоздушной определяли ее цвет при прокачке: начиная с 30-й секунды цвет масловоздушной смеси стал светлеть и стабилизировался через 40...60 с; после остановки насосов светлый цвет масловоздушной смеси еще наблюдался в течение некоторого времени (рисунок 2.18).



Рисунок 2.18 – Изменение цвета масловоздушной смеси при включении/отключении насосов ДЭСС: 1 – после включения насоса, 2 – 30 сек после включения насоса; 3 – после отключения насоса

Таким образом, отмечено, что несмотря на локальные процессы сжатия масловоздушной смеси в насосах и ее расширения в трубопроводах при прокачке смесь остается мелкодисперсной.

Уменьшение (увеличение) размера пузырьков при изменении давления характеризует масло-воздушную смесь как упругую сплошную среду. В движущемся потоке наблюдается отсутствие процессов коалесценции. Устойчивость масловоздушной смеси к коалесценции пузырьков обусловлена, прежде всего, наличием в масле поверхностно-активных веществ в виде присадок (антиокислительных, ингибиторных, модификаторов трения и др.). Их влияние проявляется в изменении поверхностного натяжения масла на границе раздела масло-воздух, приводящему к замедлению деаэрации масла.

В статических условиях диспергированный воздух за 5 мин практически полностью подвергается коалесценции (рисунок 2.19).

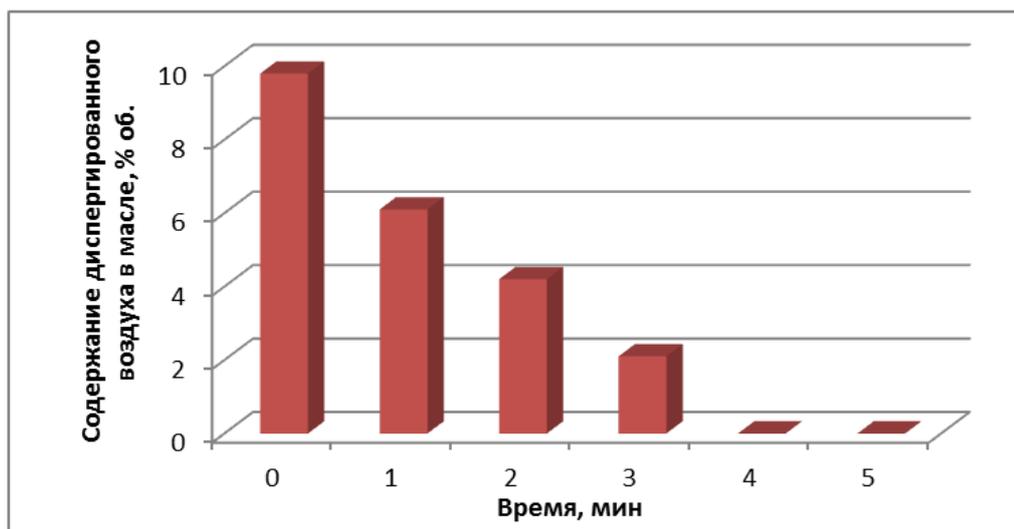


Рисунок 2.19 – Коалесценция пузырьков воздуха в статических условиях

Время нахождения воздуха в масле при всплытии пузырьков исчисляется минутами, в то время как время нахождения масловоздушной смеси во всем трубопроводном контуре системы смазки намного меньше — 5...12 с.

Факт течения мелкодисперсной масловоздушной смеси в гидравлическом контуре системы смазки подтверждается также малым значением скорости звука в трубопроводах. Скорость звука определена путем анализа временных записей давления на переходных режимах работы системы. На рисунке 2.21 показан переходный процесс при отключении электропривода нагнетающего насоса, когда наблюдается гидравлический удар с затухающими колебаниями на собственной частоте 2,4 Гц [110].

Длина однониточного трубопровода от маслобака до входа в насос составляет 2,5 м. Это «открыто-закрытая» акустическая система, для которой собственная частота колебаний (в Гц) равна скорости звука в масловоздушной смеси, разделенная на четыре длины трубопровода [12]. Тогда для частоты колебаний 2,4 Гц $2,4 \cdot 4 \cdot 2,5 = 24$ м/с. Такая низкая скорость звука может быть в мелкодисперсной масловоздушной смеси [6], имеющей характеристики гомогенной сплошной среды. Низкочастотная гармоника 2,4 Гц имеется также в спектре колебаний давления, наряду с другими гармониками: 17 и 34 Гц — 1-я и 2-я роторные, 170 и 340 Гц — 1-я и 2-я зубцовые.

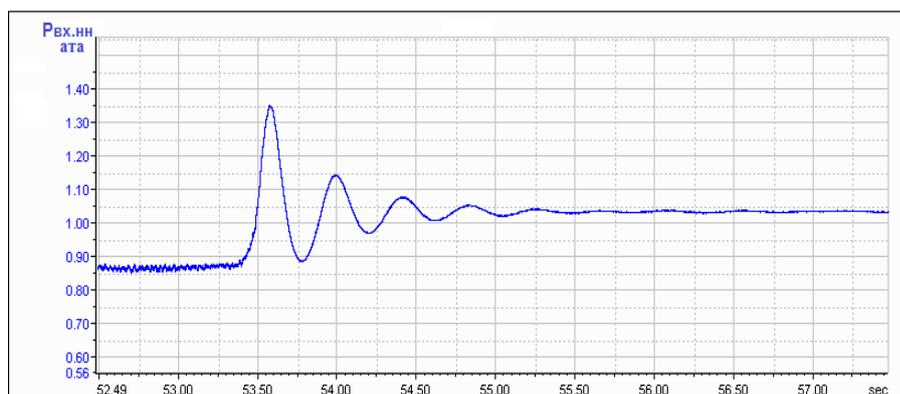


Рисунок 2.21 – Переходный процесс в контуре всасывания НН при отключении насоса

2.6 Разработка комплексного метода оценки работоспособности авиационных масел в условиях, приближенных к реальным условиям эксплуатации

Определение термоокислительной стабильности в объеме, трибологических и вязкостно-температурных характеристик опытного образца масла лабораторными методами позволяет сделать предварительное заключение о его свойствах. Однако, для принятия решения о возможности испытании опытного масла на серийном образце двигателя или гидравлической системы необходимо проведение исследований на модельных стендах, создающих условия более близкие к работе масел в эксплуатации в сравнении с лабораторными методами.

Работоспособность масел для авиационных ГТД и редукторов вертолетов оценивается на редукторном стенде Ш-3 [11]. Стенд имитирует работу замкнутой маслосистемы ЛА. Результаты многолетних исследований работоспособности масел длительное время подтверждаются практикой применения масел в эксплуатации ЛА. При принятии решения о возможности применения масел на изделиях авиатехники результаты исследования работоспособности масле на редукторном стенде Ш-3 являются наиболее весомыми в сравнении с другими результатами исследований.

Испытательным узлом редукторного стенда является зубчатое зацепление,

смазываемое испытываемым маслом, нагретым до максимальной рабочей температуры. По состоянию шестерен и изменению физико-химических свойств масла оценивается его работоспособность в авиационном двигателе.

Смазку испытательного узла обеспечивает основная маслосистема стенда замкнутого типа. Объем масла в маслосистеме составляет 7 л. Маслосистема включает маслобак, нагнетающую и откачивающую секции маслонасоса, краны грубой и тонкой регулировки расхода, фильтры грубой и тонкой очистки, нагреватель, холодильник, форсунку и трубопроводы. Маслобак снабжен суфлирующим устройством (рисунок 2.23). Основная маслосистема снабжена датчиками температуры и давления, обеспечивает регулировку и поддержание заданных расхода и температуры масла.

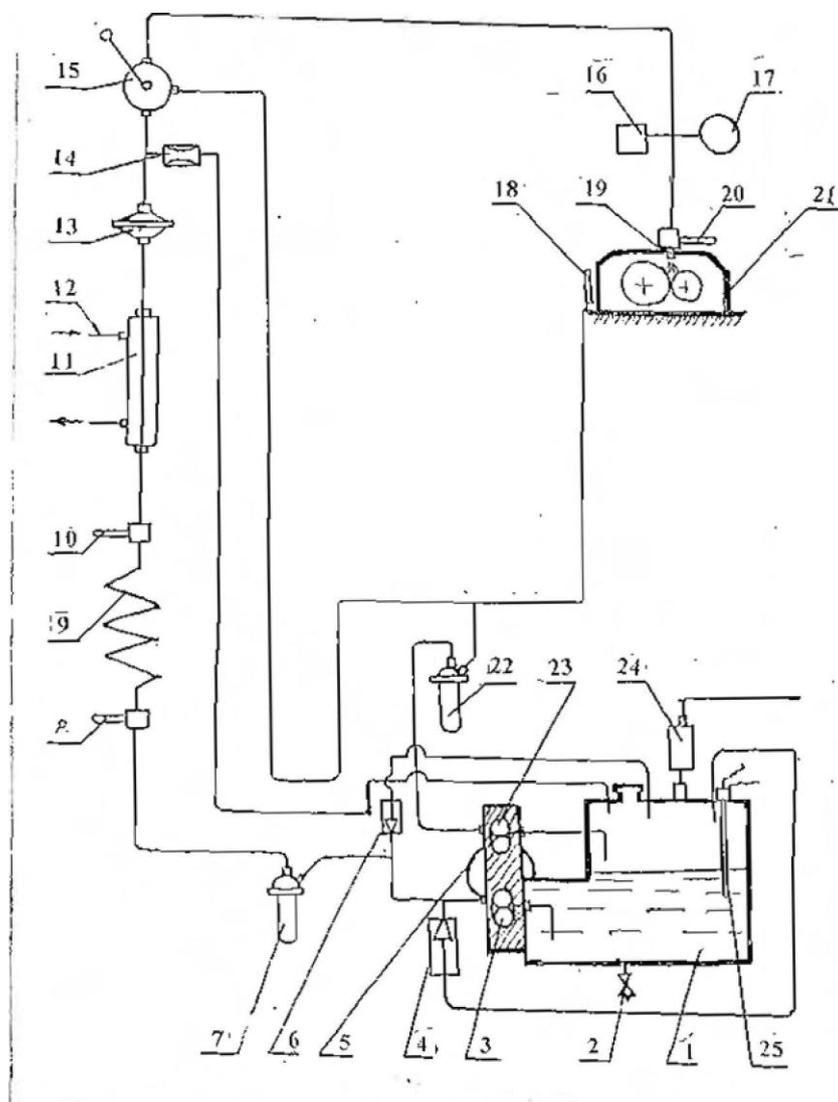


Рисунок 2.23 – Схема основной маслосистемы стенда Ш-3:

1 – бак; 2 - сливной кран; 3 - нагнетающая секция маслонасоса; 4 -

редукционный клапан; 5 - электропривод насоса; 6 - игольчатый клапан тонкой регулировки давления масла; 7 – фильтр; 8 - термопара на входе в подогреватель масла; 9 - электроподогреватель масла; 10 - термопара на выходе из подогревателя масла; 11 - охладитель масла; 12 - магистраль подачи воды в охладитель масла; 13 - фильтр грубой очистки масла; 14 – жиклер; 15 - трехходовой кран; 16 - реле давления; 17 – манометр; 18 - термопара на выходе масла из передней коробки; 19 - масляная форсунка; 20 - термопара для измерения температуры масла на входе в переднюю коробку; 21 - передняя коробка с испытуемой парой зубчатых колес; 22 – фильтр; 23 - откачивающая секция маслонасоса; 24 - отбойник масла на выводе из бака в суфлирующую систему; 25 - термопара.

Замкнутая кинематическая схема станда (рисунок 2.24) позволяет создавать нагрузку на контактных поверхностях зубьев зубчатых колес. Приводится в движение асинхронным трехфазным электродвигателем с частотой вращения 2910 мин-1. Частота вращения вала редуктора составляет 5800 мин-1.

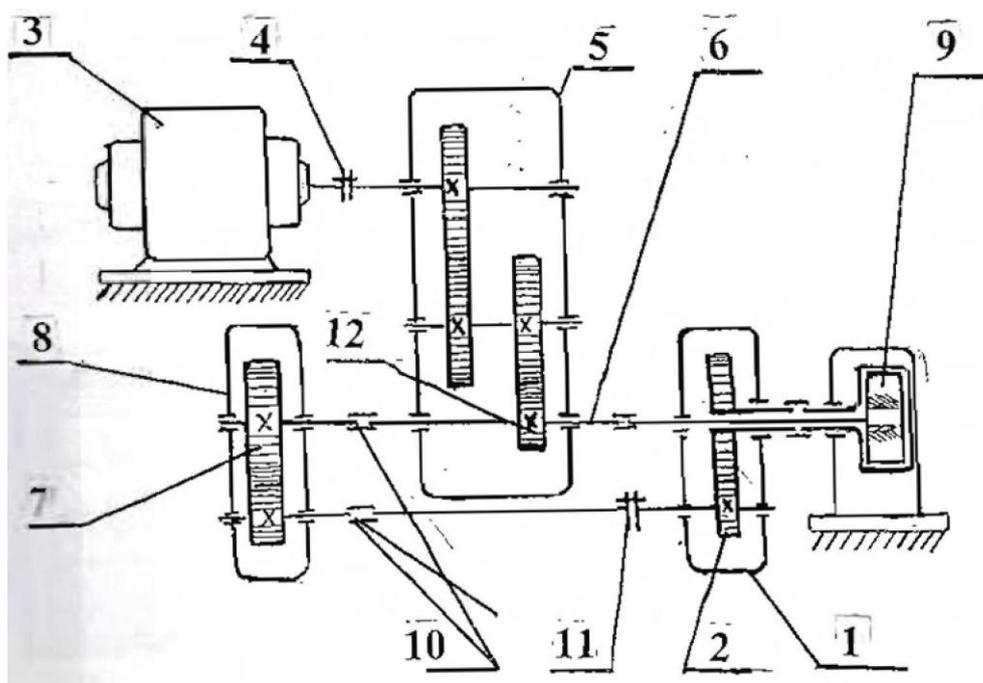


Рисунок 2.24 – Кинематическая схема станда Ш-3:

1 – передняя коробка; 2 – малое испытуемое зубчатое колесо; 3 – электропривод; 4 – упругая соединительная муфта; 5 – редуктор; 6 – выходной

вал; 7 – зубчатая пара колес; 8 – задняя коробка; 9 – муфта нагружения; 10 – муфты соединительные шлицевые; 11 – муфта соединительная свертная; 12 – колесо на выходном валу редуктора.

Система нагружения стенда включает гидромufту (рисунок 2.25), нагнетающую и откачивающую секции маслонасоса, маслобак, а также краны грубой и тонкой регулировки (рисунок 2.26). Давлением масла задается контактная нагрузка на поверхностях зубьев зубчатых колес.

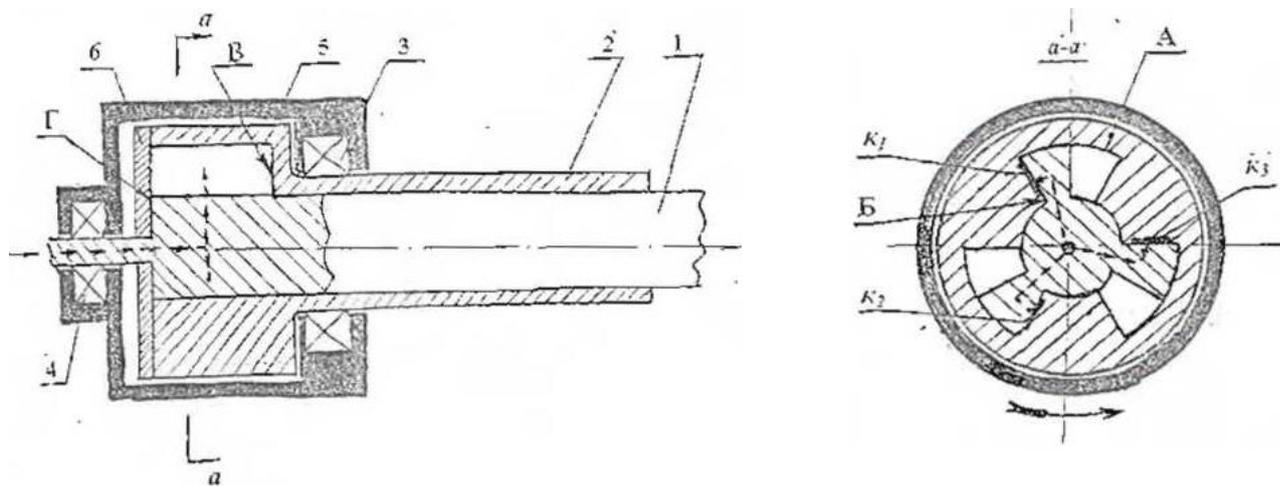


Рисунок 2.25 – Схема муфты нагружения:

1 - внутренний вал; 2 - наружный вал (полый); 3 - подшипник наружного вала; 4 - подшипник внутреннего вала; 5 - корпус муфты; А,Б,В,Г - Места притирки поверхностей; К1, К2, К3 - внутренние полости, в которые поступает масло под заданным давлением.

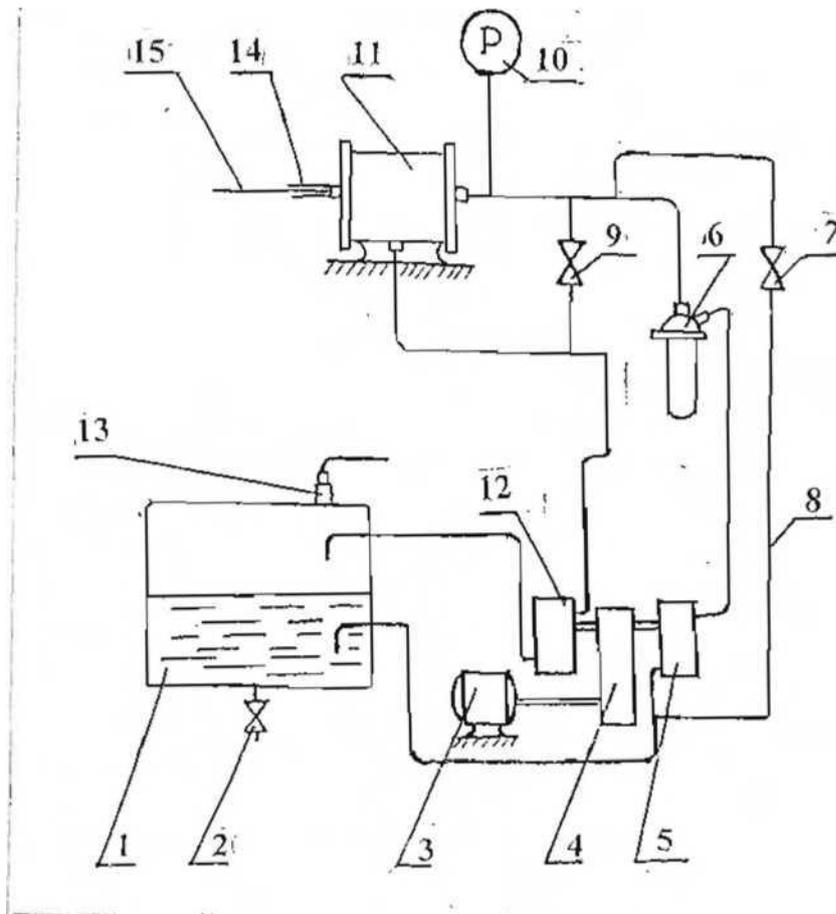


Рисунок 2.26 – Схема маслосистемы нагружения:

1 - бак с маслом; 2 - сливной кран; 3 - электропривод масляного насоса; 4 – редуктор; 5 - нагнетающая секция маслонасоса; 6 – фильтр; 7 - кран ориентировочной установки величины давления масла; 8 - магистраль сброса масла; 9 — кран тонкой регулировки давления масла; 10 - манометр для измерения давления масла в системе; 11 - муфта нагружения; 12 - откачивающая секция маслонасоса; 13 - выход систему суфлирования; 14 -наружный вал муфты нагружения; 15 - внутренний вал муфты нагружения.

Работоспособность кинематической схемы стенда обеспечивает вспомогательная маслосистема (рисунок 2.27). Маслосистема подает смазку в заднюю коробку и редуктор.

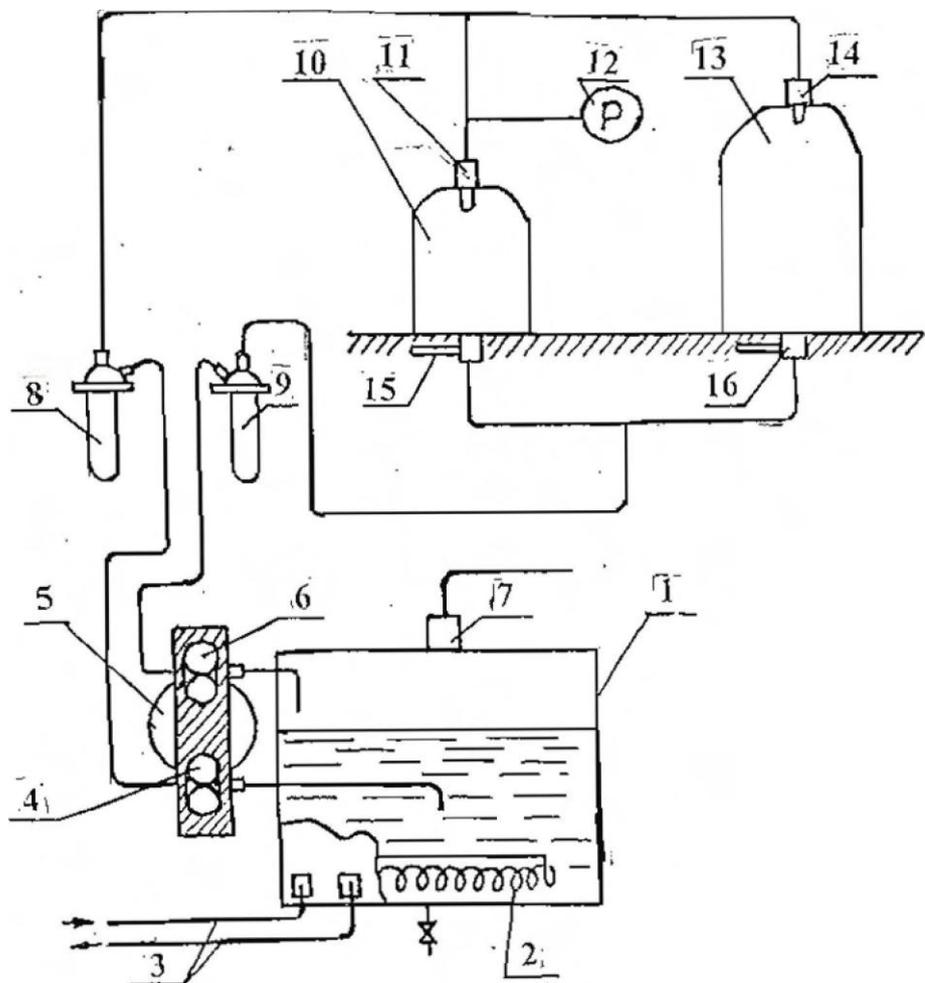


Рисунок 2.27 – Схема вспомогательной маслосистемы стенда Ш-3:

1 – бак; 2 - охладитель масла; 3 - подвод воды к охладителю и отвод ее в канализацию; 4 — нагнетающая секция маслососа; 5 - электропривод маслососа; 6 - откачивающая секция маслососа; 7 - вывод в систему суфлирования; 8 и 9 - масляные фильтры; 10 - задняя коробка; 11 - масляная форсунка; 12 - манометр для измерения давления масла в системе; 13 – редуктор; 14 - масляная форсунка; 15 и 16 - термопары для измерения температуры масла на выходе из задней коробки и редуктора.

Для авиационных масел разработаны типовые программы испытания на редукторном стенде Ш-3. Маловязкие масла, применяемые для ТРД и ТРДД, испытываются в режиме КПА ТРД. Температура масла составляет 200 °С (175 °С для масла ВНИИ НП 50-1-4ф). Контактное напряжение на зубьях шестерен составляет 136 кг/мм². Расход масла составляет 2,2 литра в минуту. Время

проведения испытания – 50 часов. Остальные параметры установки согласно программе испытаний.

Унифицированные масла дополнительно испытываются в режиме редуктора ТВД или вертолета. Температура масла составляет 85 °С. Контактное напряжение – 160 кг/мм². Расход масла и продолжительность испытания те же.

После завершения испытания испытываемые зубчатые колеса демонтируются, масло сливается.

Состояние шестерни оценивается инструментально. Изменение массы шестерни оценивается весовым методом, Ra и Rmax поверхностей зубьев – с помощью профилометра-профилографа.

Для испытываемого масла определяются вязкость при температуре 100 °С, кислотное число и количество осадка, нерастворимого в изооктане методами по ГОСТ. Полученные значения сравниваются со значениями исходного масла и масла, окисленного лабораторно по ГОСТ 23797.

По состоянию шестерен и изменению физико-химических и эксплуатационных свойств масла делается комплексная оценка его термоокислительной стабильности и трибологических свойств.

Испытания на редукторном стенде Ш-3 носят сравнительный характер. Испытуемое масло сравнивается с эталонными маслами МК-8 (режим ТРД) и смесь 25% МК-8 и 75% МС-20 (режим ТВД).

Результаты испытаний масел на редукторном стенде Ш-3 подтверждаются практикой применения масел в авиадвигателях.

К недостаткам метода оценки работоспособности масел на редукторном стенде Ш-3 можно отнести его высокую трудоемкость. Представляет интерес повышение информативности результатов испытаний.

Автором предложено в основную маслосистему редукторного стенда Ш-3 установить дополнительный узел – испытательную камеру, что позволит оценивать воздействия испытываемых масел на авиационные конструкционные и уплотнительные материалы в условиях, наиболее приближенных к условиям работы этих материалов в изделиях авиатехники [103].

Дополнительный узел установлен в основную маслосистему станда на линии перепуска части нагретого в теплообменнике масла в маслобак через специальный жиклёр 1 (см. рисунок. 2.28).

Испытательная камера (рисунок 2.29) состоит из корпуса (3) и крышки (2). Внутри камеры предложено использовать приспособления (7) (крючки) для крепления образцов авиационных конструкционных (9) и уплотнительных материалов (8). Для контроля температуры в камере устанавливаются две термопары (1,6). Для уменьшения теплопотерь корпус и крышка камеры выполнены двухстенными и заполнены теплоизолятором (4).

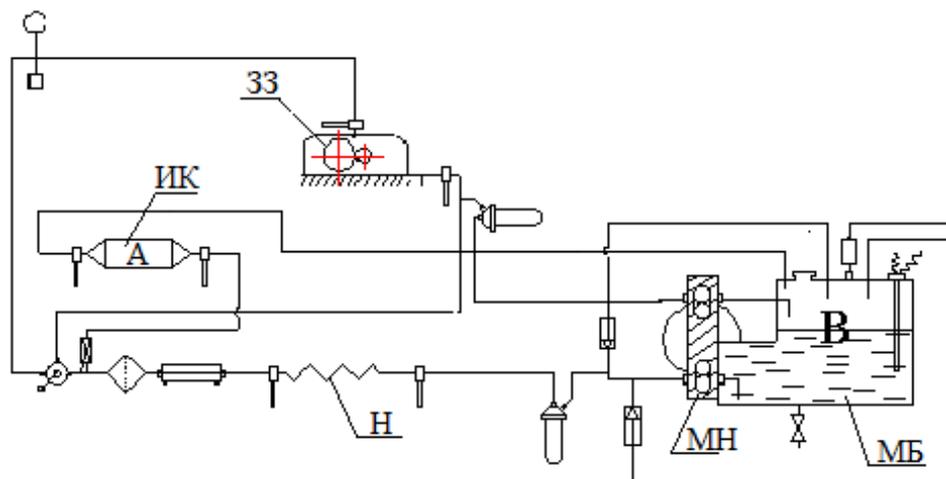


Рисунок 2.28 - Принципиальная схема размещения испытательной камеры и образцов материалов в основной маслосистеме станда Ш-3.

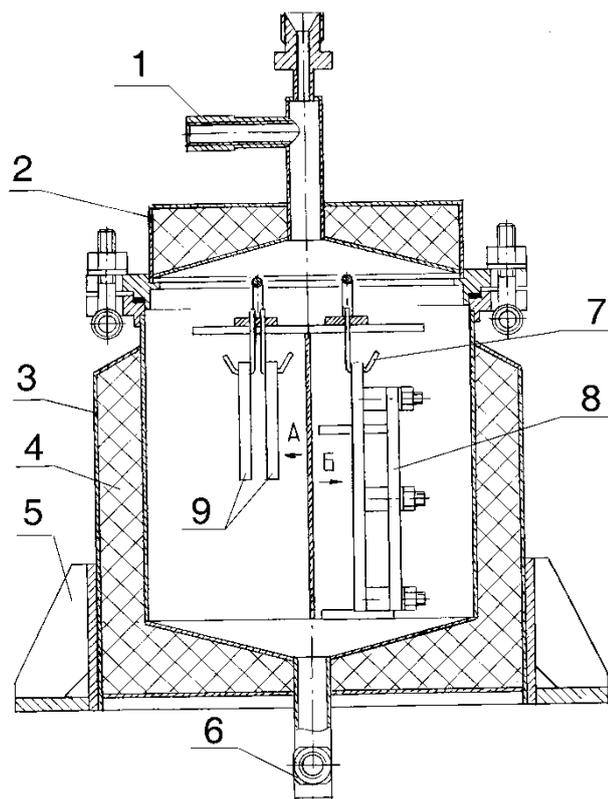


Рисунок 2.29 – Испытательная камера стенда Ш-3

Для оценки коррозионной агрессивности и воздействия масла на резины изготовлены образцы из металлов и резин, применяющихся в авиадвигателестроении [1, 2, 3]. На некоторые металлы нанесено гальваническое покрытие.

Образцы металлов изготовлены в виде пластин размером 20×40×1-3 мм из магниевого сплава МЛ 10, стали оцинкованной с хроматным пассивированием, стали оксиднофосфатированной, меди М1, латуни ЛС 59-1, бронзы БрАЖН 10-4-4 (рисунок 2.30 а)).

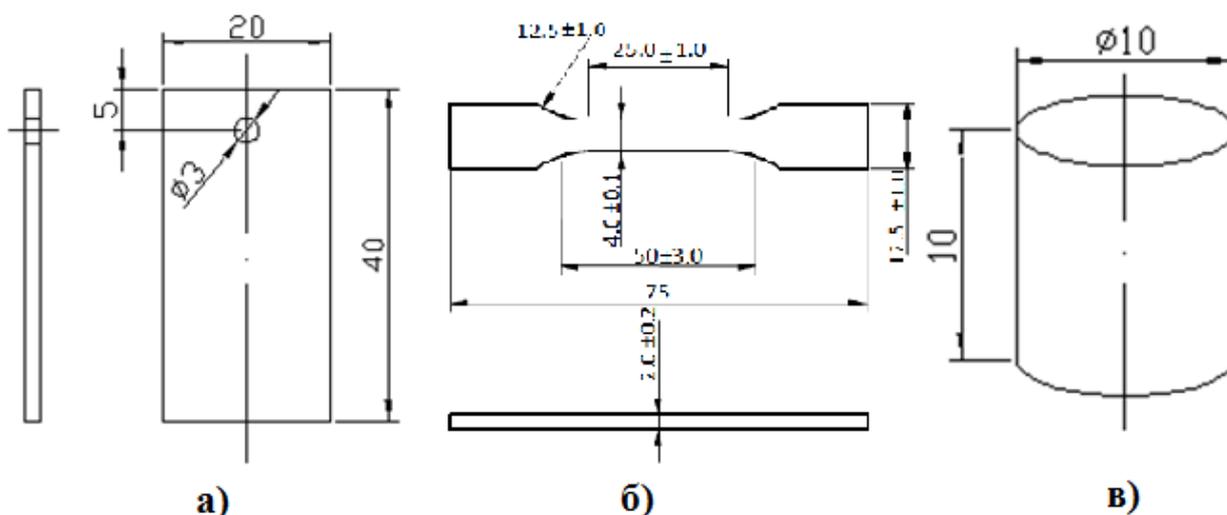


Рисунок 2.30 – Форма и размеры образцов конструкционных и уплотнительных материалов.

а) – пластинка; б) – лопатка; в) – столбик

Резиновые образцы изготовлены из серийных резин ИРП-1287 НТА, ИРП-1316 НТА и 51-1434 НТА в виде лопаток по ГОСТ 270-75 и столбиков по ГОСТ 9.029 метод Б диаметром 10 мм и высотой 10 мм (рисунок 2.30 б), в)).

Размеры образцов конструкционных и уплотнительных материалов аналогичны существующим в квалификационных методах, предусматривающих испытания в статических условиях.

Для закрепления образцов резин в камере и маслобаки изготовлены зажимы и струбины (рисунок 2.31). Образцы металлов крепятся крючками.

Автором разработан метод комплексной оценки работоспособности авиационных масел на редукторном стенде Ш-3 (см. Приложение А).

Подготовка стенда, проведение и обработка результатов испытания на нем масла проводятся в соответствии со штатной методикой оценки работоспособности масел для авиационных ГТД и редукторов вертолетов на редукторном стенде Ш-3. Для получения комплексной оценки работоспособности разработана и оформлена в виде Стандарта организации (СТО) методика оценки коррозионной агрессивности и воздействия масла на уплотнительные резины.

Методика включает последовательность действий при подготовке к

испытанию, проведении испытания и обработке результатов оценки масел на металлы и резины.

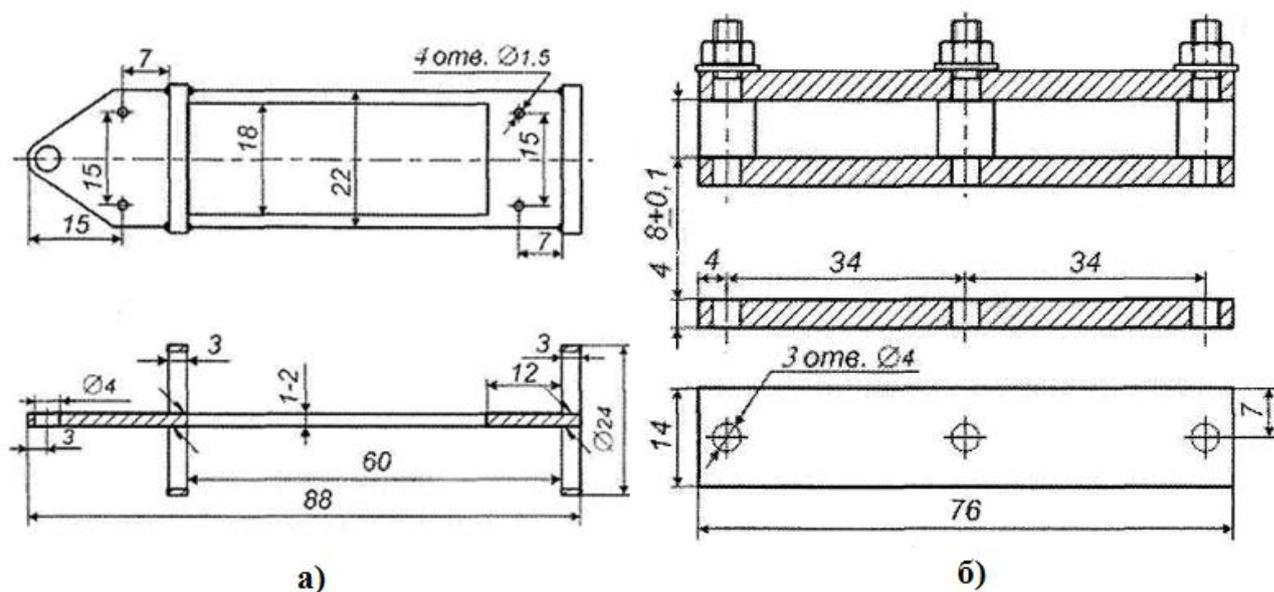


Рисунок 2.31 – Приспособления для крепления образцов уплотнительных и конструкционных материалов

а) – зажим для резиновых лопаток, б) – трубка для цилиндрических образцов

При подготовке к испытанию образцы уплотнительных резин в виде лопаток маркируются иглой, промываются спиртом и протираются тканью. Взвешиваются, закрепляются в зажимы и устанавливаются в испытательную камеру и маслобак.

Образцы резин в виде столбиков подвергаются измерению высоты толщиномером, зажимаются в трубки и размещаются в испытательную камеру и маслобак стенда.

Образцы конструкционных материалов без защитных покрытий шлифуются. Шлифованные и имеющие защитное покрытие образцы промываются бензином и просушиваются фильтровальной бумагой. Измеряется площадь всех шести граней. Образцы повторно промываются в бензине, доводятся до постоянного веса и взвешиваются с точностью 0,0002 г, после чего

развешиваются на крючках в испытательной камере и маслобаке стенда.

Образцы материалов размещаются в испытательной камере и в верхней части маслобака. Время воздействия масла на уплотнительные и конструкционные испытания соответствует времени испытания масла согласно штатной методике. Температура масла при проведении испытаний уплотнительных материалов соответствует условиям проведения испытаний масла на стенде Ш-3.

После проведения испытания состояние поверхностей металлических пластинок определяются визуально: по изменению самой поверхности (подтравливание, потускнение и т.п.), по цвету поверхности, по наличию легкоудаляемого или трудноудаляемого осадка на поверхности. Пластинки взвесить на аналитических весах с точностью до 0,0002 г.

Образцы резин освобождаются от зажимов и струбцин, промываются в течение 30 секунд в бензине или спирте. Количество промывочной жидкости должно быть не менее 1,5 л. Промытые образцы протираются фильтровальной бумагой или мягкой тканью.

Образцы, предназначенные для определения величины остаточной деформации, оставляются в свободном состоянии на «отдых». Время «отдыха» 1 час.

Образцы, предназначенные для определения предела прочности и величины набухания резины, помещаются в емкость, ограничивающую испарение среды.

После «отдыха» измеряется высота цилиндрических образцов.

Определяется масса образцов по ГОСТ 267 не позднее, чем через 3 часа после выдержки в масле.

Определяется предел прочности образцов по ГОСТ 270. Определение проводят не ранее, чем через 4 ч и не позднее, чем через сутки после того, как образцы были извлечены из масла.

Оценка воздействия масла на конструкционные материалы определяется по изменению массы образца (формула 2.1)

$$X = \frac{P_1 - P_2}{S}, \quad (2.1)$$

где X - коррозионная агрессивность топлив и масел, г/м^2 ,

P_1 - вес пластинки до испытания, г,

P_2 - вес пластинки после испытания, г,

S - площадь поверхности пластинки, м^2 .

Оценка воздействия масла на уплотнительные материалы определяется по показателям: «коэффициент изменения предела прочности», «величина относительной остаточной деформации сжатия» и «изменение массы».

Показатель «коэффициент изменения предела прочности» определяется по формуле 2.2:

$$K_\sigma = \frac{\sigma_1}{\sigma_0}, \quad (2.2)$$

где σ_0 - прочность образца до воздействия масла, σ_1 - прочность образца после воздействия масла.

Показатель «величина относительной остаточной деформации сжатия» определяется по формуле 2.3:

$$E_{\text{ост}} = \frac{h_0 - h_2}{h_0 - h_1} \times 100, \quad (2.3)$$

где h_0 – исходная высота образца, мм; h_1 - высота ограничителя, мм (8 мм); h_2 - высота образца после «отдыха», мм.

Показатель «изменение массы» определяется по формуле 2.4:

$$\Delta G = \frac{G_1 - G_0}{G_0} \times 100, \quad (2.4)$$

где G_0 - масса образца до воздействия масла, г, G_1 - масса образца после воздействия масла, г.

За результат испытаний принимают среднее арифметическое показателей всех испытываемых образцов. Если результаты испытаний отклоняются от их средних величин более чем на +10 %, то их не учитывают и среднее арифметическое вычисляют из оставшихся образцов, число которых должно быть не менее трех.

Результаты испытаний сопоставимы на образцах одного типа, одной толщины, заготовленных одним способом и испытываемых в одинаковых условиях (температура, продолжительность и т.п.).

2.7. Разработка системы сравнительной оценки уровня физико-химических и эксплуатационных свойств авиационных масел

Качество авиационных смазочных и гидравлических масел оценивается показателями в количестве более 30. Большое количество показателей качества делает затруднительным оценку запаса качества масла и сравнение качества масла, вырабатываемого различными производителями.

При отсутствии норм по ряду показателей качества, определяемых квалификационными методами, уровень показателя качества масла определяется сравнением со значением для образца сравнения. Сведения о запасе качества продукта, если таковой имеется, и полная информация об уровне качества продукта в заключении не приводятся.

Интерпретация результатов экспериментальных исследований требует детального знания методов исследования. Это дополнительно затрудняет оценку качества масел и разработку рекомендаций по их применению в авиатехнике.

Известна система добровольной сертификации, разработанная Всероссийской организацией качества (ВОК) и направленная на проверку потребительских свойств товаров и услуг [115]. Сущность программы «Российское качество» заключается в интерпретации характеристик продукции в баллах, что упрощает понимание уровня качества продукции. К авиационным маслам такой метод оценки ранее не применялся.

Для оценки качества используется экспертный метод обобщенной количественной оценки качества. На основе этого метода применительно к смазочным и гидравлическим авиационным маслам разрабатываются оценочные программы.

Поскольку качество характеризуется показателями разной физической природы и разными признаками, используется их пересчет в баллы, что позволяет получить обобщенную количественную оценку качества в целом. В результате для каждого масла определяется суммарное количество баллов, характеризующее его качество.

Апробация новой системы оценки качества авиационных масел выполнялась на примере авиационного смазочного масла МС-8П производства ОАО «Ново-Уфимский нефтеперерабатывающий завод» (ОАО «Новойл»). Это масло, выпускаемое по СТО 11605031-014-2008, было и до сих пор остается наиболее применяемым для смазки отечественных авиационных газотурбинных двигателей самолетов. Масло МС-8П изготавливается на минеральной основе, отличается высоким качеством и относительно невысокой стоимостью [2].

Производство масла МС-8П осуществляется с 2010 года, объем реализации продукции составляет примерно 2500 тонн в год.

Качество масла МС-8П оценивалось по физико-химическим и эксплуатационным характеристикам, определяемым при квалификационных испытаниях. Номенклатура характеристик включает в себя показатели, определяемые по СТО 11605031-014-2008, а также показатели, оцениваемые при квалификационными методами, ранее входившими в Комплекс методов квалификационной оценки (КМКО). Дополнительно использованы сведения о наличии санитарно-эпидемиологического заключения, а также о качестве маркировки, транспортировки и хранения.

Для расчета эквивалента в баллах были установлены минимально допустимые и оптимальные значения параметров качества масла.

Для показателей качества, величины которых устанавливаются нормативной документацией, за минимальные допустимые значения были приняты числовые значения норм. Для показателей, нормы которых не установлены, за минимальные допустимые значения были приняты фактические значения образца сравнения товарного масла МС-8П.

За оптимальные величины принимались фактические характеристики лучших масел-аналогов зарубежного производства.

За фактические значения показателей качества продукции ОАО «Новойл» приняты результаты ранее выполненных квалификационных исследований опытно-промышленного образца масла.

Для расчета допустимых баллов по каждому показателю общую сумму баллов, соответствующую образцу масла, отвечающему по всем показателям требованиям норм документации и не имеющему никакого запаса качества, разделили на количество показателей качества, получив вклад каждого в эту сумму. Полученную «стоимость» каждого показателя в баллах откорректировали на основании значимости показателей качества, учитывая то, что некоторые характеристики масла выражаются несколькими показателями. Например, характеристика «термоокислительная стабильность масла в объеме» выражается рядом показателей, измеренных после окисления образца масла - «вязкость», «количество осадка, не растворенного в изооктане», «кислотное число» и «величина коррозии на пластинках-катализаторах».

Оптимальные баллы для каждой характеристики масла рассчитывались по следующим формулам:

$$B_{\text{опт}} = \frac{P_{\text{опт}}}{P_{\text{доп}}} \times B_{\text{доп}}, \text{ если } P_{\text{опт}} > P_{\text{доп}}, \quad (2.8)$$

$$B_{\text{опт}} = \frac{P_{\text{доп}}}{P_{\text{опт}}} \times B_{\text{доп}}, \text{ если } P_{\text{опт}} < P_{\text{доп}}, \quad (2.9)$$

где $P_{\text{опт}}$ и $P_{\text{доп}}$ - оптимальное и допустимое значения показателя качества; $B_{\text{опт}}$ и $B_{\text{доп}}$ - оптимальное и допустимое значения показателя качества, выраженные в баллах.

В отдельных случаях величина $B_{\text{опт}}$ может быть изменена (по усмотрению эксперта) в большую или меньшую сторону по сравнению со значением, полученным по формулам (2.8) и (2.9), исходя из очевидной нелинейности зависимости B от P , или округлена до целого числа.

Обязательным условием корректировки экспертом количества баллов по тому или иному показателю является учет области применения продукта. Так,

масло МС-8П было разработано в 1978 году и в настоящее время применяется для смазывания и охлаждения подшипников качения опор ротора, подшипников качения и зубчатых зацеплений кинематики коробки приводов агрегатов (КПА) в авиадвигателях старого поколения, для которых характерны невысокие тепловые нагрузки.

Фактические баллы для показателей качества масла рассчитывались по следующим формулам:

$$B_{\text{факт}} = \frac{P_{\text{факт}}}{P_{\text{доп}}} \times B_{\text{доп}}, \text{ если } P_{\text{факт}} > P_{\text{доп}}, \quad (2.10)$$

$$B_{\text{факт}} = \frac{P_{\text{доп}}}{P_{\text{факт}}} \times B_{\text{доп}}, \text{ если } P_{\text{факт}} < P_{\text{доп}}, \quad (2.11)$$

где $P_{\text{факт}}$ - фактическое значение показателя качества; $B_{\text{факт}}$ - фактическое значение показателя качества, выраженное в баллах.

Рассчитав и просуммировав балльные эквиваленты допустимых, оптимальных и фактических значений показателей качества масла, получаем следующее:

$$\sum B_{\text{доп}} = 350 \text{ баллов}; \sum B_{\text{опт}} = 716 \text{ баллов};$$

$$\sum B_{\text{факт}} = 545 \text{ баллов}; \sum B_{\text{гр}} = 533 \text{ балла.}$$

Таким образом, минимальное количество баллов для масла МС-8П составило 350, при этом ни один показатель не опускался ниже $P_{\text{доп}}$. Сумма в 350 баллов соответствует образцу масла, по всем показателям отвечающему требованиям нормативной документации и не имеющему запаса качества. То есть, например, при норме на показатель «вязкость кинематическая при 50°C» не менее 8,0 мм²/с фактическое значение вязкости масла составляет 8,022 мм²/с, и так далее для всех показателей. Оптимальному значению - 726 баллам - соответствует образец лучшего масла с соответствующей вязкостью для авиационных ГТД на минеральной основе, которое можно произвести в настоящее время.

Образцы масла, характеризующиеся суммой фактических баллов в диапазоне от 350 до 533, имеют запас качества и относятся к категории продукции среднего качества. Аттестуемый образец масла производства ОАО «Новойл» набрал 545

фактических баллов и попал в категорию продукции высшего качества (от 533 до 716 баллов).

Помимо показателей качества масла, оценивалась способность производства обеспечить стабильность качества масла. В эту категорию показателей были включены оценки организации производства и действующей в ОАО «Новойл» системы управления качеством, планов и программ по улучшению качества и результаты их реализации, количества и квалификации персонала, занятого производством масла, подготовка и аттестация персонала, состояние проектной и технологической документации, состояние производственных помещений, технологического оборудования, оснастки, инструмента, их технического обслуживания и ремонта, состояние лабораторной и испытательной базы и другие показатели. Устанавливались допустимые, оптимальные и фактические баллы на основании сведений, предоставленных заводом-изготовителем масла, рассчитывалось граничное значение баллов. Для ОАО «Новойл» допустимая сумма баллов для оценки способности обеспечить постоянство качества масла МС-8П равна 910 баллам (каждая характеристика оценивалась в интервале от 70 до 100 баллов), а оптимальная сумма - 1300 баллов. Граничное значение составило 1105 баллов [115].

Способность обеспечения постоянства качества масла МС-8П заводом ОАО «Новойл» была оценена в 1210 баллов, что позволило отнести производство к категории высшего качества.

В результате оценки масла МС-8П производства ОАО «Новойл» было установлено, что по качеству и по способности производства обеспечить постоянство качества продукта и масло МС-8П, и само производство относятся к категории высшего качества.

Несмотря на исследование вопроса возможности обеспечения производством постоянства качества продукции, остается неосвещенной экономическая составляющая производства. Стоимость продукции неизменно связана с ее качеством. Соотношение двух последних факторов является основным доводом при закупке продукции того или иного производителя. Включение в

оценку качества продукта экономической составляющей могло бы заставить производителя продукции более ответственно избирать политику ценообразования.

Следует отметить, что опыт оценки масел для авиационных ГТД на примере масла МС-8П является в настоящий момент первым и единственным. Предстоит аналогичная работа для синтетических масел на основе синтетических углеводородов, ди- и полиэфиров - ИПМ-10, ВНИИНП 50-1-4У, ЛЗ-240 и других масел, которые применяются в двигателях современных самолетов и вертолетов. Это обусловлено тем, что в настоящее время производство масел для авиационных ГТД осуществляется небольшими компаниями, и вопрос о возможности производства обеспечить постоянство качества масел стоит особенно остро.

Сравнительная система оценки качества масел на основе расчёта баллов может быть адаптирована под нужды сравнения уровня физико-химических и эксплуатационных свойств новых масел, включая сравнение опытных образцов.

Выводы по Главе 2

1. Предложен новый подход к созданию авиационных смазочных и гидравлических масел, основанный на процедуре оптимизации составов опытных образцов масел с применением современных компьютерных технологий, исследовании их физико-химических и эксплуатационных свойств, в том числе усовершенствованными автором методами, формировании электронной базы данных, расчетах вязкостно-температурных характеристик. Также предложено оценивать физико-химические и эксплуатационные свойства новых масел на базе балльной системы показателей их качества.

2. Задачей оптимизации составов новых масел является определение наилучших значений концентраций антиокислительных и противозадирных присадок в базовой основе масла, обеспечивающих минимальное значение целевой функции: показателя износа при удовлетворении сформулированных

требований по термоокислительной стабильности, вязкостно-температурным свойствам и температуре вспышки.

3. Впервые был применен программный комплекс безусловной многопараметрической оптимизации «Сигма Технология», который позволяет не только решать оптимизационные задачи при разработке новых масел, но и снижать количество выполняемых экспериментов в сравнении с существующими методами создания масел.

4. Усовершенствован метод определения пенообразующих свойств авиационных масел. Продолжена новая методика подготовки образца (выдержка при температуре 110°C и барботаж воздухом в течение 15 минут), которая позволяет определять пенообразующие характеристики образца масла в более широком интервале температур (25-185°C). Метод позволяет выявить склонность к пенообразованию тех образцов масел, для которых штатный метод этого не показал.

5. Для исследования пенообразующих свойств масел в условиях работы маслосистемы перспективных ГТД была использована демонстрационная электроприводная система смазки. В трубопровод маслосистемы до и после откачивающего насоса установлены оптически прозрачные вставки и выполнена визуализация структуры течения масловоздушной смеси. По колебаниям давления на линии откачки масла из масляной полости, а также потребляемой мощности электропривода откачивающего насоса можно судить о влиянии пенообразующих свойств масла на характеристики маслосистемы. Высокая склонность масла к пенообразованию приводит к потерям мощности электропривода и его отключению при перегрузке электросети.

6. С целью повышения информативности результатов испытаний редукторный стенд Ш-3 был модернизирован путем ввода нового блока для оценки воздействия масел на конструкционные и уплотнительные материалы. Новый блок вмонтирован в маслосистему стенда Ш-3, включающую нагреватель, маслонасос, маслобак и зацепление испытуемых зубчатых колес. Образцы материалов выдерживаются в среде испытуемого масла в течение времени

испытания при температуре, близкой к рабочей. После завершения испытания степень воздействия масла на уплотнительные и конструкционные материалы.

7. Разработанный метод оценки воздействия масел на материалы на редукторном стенде Ш-3 оформлен автором как стандарт организации (СТО). Новый метод оценки работоспособности масел на стенде Ш-3 позволяет совместно оценивать термоокислительную стабильность, трибологические характеристики и вязкостно-температурные свойства, а также совместимость с материалами в условиях, приближенных к реальным условиям эксплуатации.

8. Предложен метод сравнительной оценки качества авиамасел на основе балльной системы, используемой Всероссийской организацией качества при добровольной сертификации качества другой продукции. Показатели качества формируются по принадлежности к основным эксплуатационным свойствам масел. Устанавливается диапазон возможных значений каждого показателя качества от минимально допустимого до максимально возможного. Значения показателей качества переводятся в баллы пропорционально отношению фактического значения показателя качества к допустимому по следующим формулам. Применение нового метода позволяет наглядно продемонстрировать преимущества и недостатки новых масел в сравнении со штатными аналогами.

Глава 3. Исследования в обеспечение создания смазочных и гидравлических масел нового поколения для авиационной техники

3.1. Разработка технических требований к смазочным и гидравлическим маслам нового поколения

Технические требования (ТТ), как правило, содержат перечень и нормы по основным показателям качества разрабатываемых масел, а также сведения о методах их определения. Технические требования отражают желаемый уровень технических характеристик новых масел, обусловленный тенденциями развития авиационной техники. В процессе проведения экспериментальных исследований ТТ могут быть доработаны в части изменения норм по отдельным показателям качества.

ТТ включают блок основных физико-химических показателей качества и блок эксплуатационных показателей качества, определяемых квалификационными методами.

Для выбора норм по основным показателям качества ТТ необходимо учесть тенденции развития авиационной техники, значения показателей качества российских и зарубежных товарных масел [112].

Рассмотрим существующие требования к основным физико-химическим и эксплуатационным свойствам российских маловязких и унифицированных смазочных масел (Таблица 3.1.).

Кинематическая вязкость маловязких масел при температуре минус 40 °С не превышает 2700 мм²/с, обеспечивая запуск двигателя при заданной температуре окружающей среды без применения средств технического подогрева. Для унифицированных масел этот показатель не превышает 12500 мм²/с [111].

Температура вспышки в открытом тигле не должна быть ниже допустимой рабочей температуры.

Таблица 3.1 – Требования к основным физико-химическим и эксплуатационным свойствам российских авиационных смазочных масел

	Показатель	Маловязкие		Унифицированны е	
		ИПМ-10	ВНИИ НП 50-1- 4У	ЛЗ-240	Б-3В
1.	Плотность при 20°С, г/см ³	≤ 0,820	≤0,928	0,980 ÷ 1,020	0,9900 ÷ 0,9970
2.	Вязкость кинематическая (мм ² /с), мм ² /с, При 100°С При -30°С При -40°С При -50°С	≥ 3.00 - ≤3000 -	≥ 3,2 - 2700 8500	≥4,80 - ≤12500 -	≥5,0 ≤3500 ≤12500 -
3.	Кислотное число, мг КОН/г	≤0,1	≤ 0,25	≤ 0,50	4,40- 5,50
4.	Содержание водорастворимых кислот и щелочей	отс.	отс.	отс.	отс.
5.	Содержание воды	отс.	отс.	следы	следы
6.	Содержание механических примесей, %	отс.	-	отс.	отс.
7.	Температура вспышки (в открытом тигле), °С	≥190	≥204	≥235	≥235
8.	Трибологические характеристики (на ЧШМ по ГОСТ 9490-75): -критическая нагрузка (Рк), кгс; -показатель износа (Ди), мм	≥71 ≤0.35	≥75 ≤0,45	≥89 ≤0,50	≥89 не норм.
9.	Термоокислительная стабильность в объёме по ГОСТ 23797 при 200°С в течение 50 час.: - содержание осадка, нерастворимого в изооктане, % - вязкость окисленного масла, мм ² /с (сСт), при 100°С при минус 40°С - кислотное число окисленного масла, мг КОН/г - коррозия, мг/см ² , на ШХ-15, АК-4 М-2	≤0,35 ≤5,0 ≤5000 ≤8,0 0 0 ≤+0,2	≤0,15 ≤3,7 - ≤4,5 ≤0,1 ≤0,1 ≤0,4	≤0.1 ≤6,0 ≤20000 1,50 0 0 0	≤0.2 ≤8,0 ≤30000 0,7-3,0 0 0 ≤-6,0

Кислотное число для маловязких масел не должно превышать 0,1 мг КОН/г, для унифицированных – 0,5 мг КОН/г.

Показатель «диаметр пятна износа» коррелирует в большей степени с практикой применения масел и результатами исследования работоспособности масле на стенде Ш-3. Для маловязких масел этот показатель не превышает 0,35

мм, для унифицированных – 0,5 мм. В то же время, показатель «критическая нагрузка» характеризует способность масла предотвращать задиры и является важным для масел, смазывающих редукторы вертолёта или ТВД. Для маловязких масел значение этого показателя не должно быть ниже 75 кгс, для унифицированных – ниже 89 кгс.

Кинематическая вязкость маловязких масел при 100 °С не должна быть ниже 3,2 мм²/с, унифицированных – 5 мм²/с.

Стойкость масел к окислению воздухом в объеме определяется по ряду показателей качества: «вязкость при 100 °С и минус 40 °С», «кислотное число», «количество осадка, нерастворимого в изооктане», «коррозия на пластинках-катализаторах». Кинематическая вязкость при температуре 100 °С для маловязких масел не превышает 3,7 мм²/с, унифицированных – 6 мм²/с. При температуре минус 40 °С – 5000 и 20000 мм²/с, соответственно. Количество осадка, нерастворимого в изооктане не должно превышать для маловязких масел 1,5% масс., для унифицированных – 1% масс. Кислотное число не должно превышать для маловязких масел 4,5 мг КОН/г, для унифицированных – 1,5 мг КОН/г. Коррозия на стальной и алюминиевой пластинке для маловязких и унифицированных масел должна отсутствовать, на медной – для маловязких масел не должна превышать 0,2 мг/см², для унифицированных – отсутствовать.

К маслу АМГ-10 предъявляются высокие требования по вязкостно-температурным свойствам. Кинематическая вязкость при 100 °С составляет не менее 10 мм²/с, при температуре минус 40 °С – не более 1250 мм²/с. Температура застывания не выше минус 70 °С (таблица 3.2).

Температура вспышки в открытом тигле не ниже 93 °С.

После окисления при температуре 125 °С в течение 100 часов вязкость при 50 °С должна быть не менее 9,5 мм²/с, кислотное число – не более 0,15 мг КОН/г. Коррозия на медных, стальных, алюминиевых и магниевых пластинках не должна превышать 0,1 мг/см².

Таблица 3.2 – Требования к отечественному гидравлическому маслу АМГ-10.

Наименование показателей	АМГ-10		
	Результат		Норма по ГОСТ и КМКО
	с присадкой винипол	с присадкой вископлекс	
1. Внешний вид	Прозрачная однородная жидкость красного цвета	Прозрачная однородная жидкость красного цвета	Прозрачная однородная жидкость красного цвета
2. Вязкость кинематическая, мм ² /с (сСт) при 50 °С, при минус 50 °С	10,1 1158	10,1 965	Не менее 10,0 Не более 1250
3. Температура застывания, °С, не выше	Минус 70	Минус 70	Не выше минус 70
4. Температура вспышки в открытом тигле, °С не ниже	110	106	Не ниже 93
5. Кислотное число, мг КОН на 1 г масла, не более	0,01	0,0038	Не более 0,03
6. Содержание водорастворимых кислот и щелочей	отсутствие	отсутствие	Отсутствие
7. Термоокислительная стабильность и коррозионная активность при 125°С, в течение 100ч. и расходе воздуха 5 л/час: - внешний вид - кинематической вязкости при 50°С, мм ² /с - увеличение кислотного числа, мг КОН на 1 г масла, не более - весовой показатель коррозии металлов, мг/см ² не более медь М-1 сталь 30ХГСА алюминий Д-16 магний МЛ-5	10,2 0,01 Отсутствие Отсутствие Отсутствие Отсутствие	10,7 0,01 Отсутствие Отсутствие Отсутствие Отсутствие	≥ 9,5 ≤ 0,15 ±0,1 ±0,1 ±0,1 ±0,1
8. Трибологические характеристики на ЧШМ: - диаметр пятна износа (Ди), мм: - (20±5) ⁰ С, не более	0,62	0,50	Не более 0,6
9. Плотность при 20 °С, г/см ³	0,842	0,850	Не более 0,850
10. Устойчивость к механической деструкции на УЗДН: уменьшение кинематической вязкости при 50°С, за время испытаний, %: - 50 мин, не более	33,5	39,5	Не более 42

Вязкость при 50 °С после озвучивания на ультразвуковом диспергаторе не должна понижаться более, чем на 42 %.

Фактические же значения показателей качества масел для авиационных ГТД, определенные российскими и зарубежными методами, приведены в таблице 3.3 [114].

Таблица 3.3 - Фактические значения показателей качества российских и зарубежных масел и нормы требований спецификаций к маслам высокотермостабильным маслам

Наименование показателя	Типичные значения			
	Б-3В	ЛЗ-240	ASTO 560 (HTS)	ВРТО 2197 (HTS)
Вязкость кинематическая, мм ² /с: при 100 ⁰ С при минус 40 ⁰ С	5,20 9700	5,10 8900	5,3 11570	5,26 11800
Плотность при 20 ⁰ С, кг/дм ³	0,991	0,992	0,986	0,986
Температура застывания, ⁰ С	-66	-	- 58	- 57
Температура вспышки, ⁰ С	254	245	256	261
Кислотное число мг КОН/г	4,50	0,28	0,15	0,17
Диаметр пятна износа, мм, при осевой нагрузке 20кгс Критическая нагрузка (Р _к)	0,5 89	0,33 94	0,43 106	0,30 71
Термоокислительная стабильность в объеме при 200 ⁰ С в течение 50 ч а) кинематическая вязкость, мм ² /с, 100 ⁰ С минус 40 ⁰ С б) кислотное число, мг КОН/г в) массовая доля осадка, нерастворимого в изооктане,% г) коррозия на пластинках, мг/см ² : -сталь ШХ-15 -медь М1 -алюминиевый сплав АК-4	6,2 13800 3,0 0,17 0,0 4,5 0,0	5,48 11500 1,45 0,04 0,0 0,0 0,0	5,9 14933 0,87 отс. отс. отс. отс.	5.89 21850 0,33 0,015 отс. отс. - 0.21
Коксуемость,%	025	0,10	0,2	-

Зарубежные масла характеризуются значениями показателей «кислотное число» и «осадок, нерастворимый в изооктане» ниже, чем для российских масел.

Требованиям спецификации MIL-PRF-7808 grade 4 соответствует только одно зарубежное масло – Turbonucoil 400 (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Фактические свойства маловязкого зарубежного масла для ТРДД.

№	Наименование показателя	TN-400
1.	Плотность при 20°С, г/см ³	0,958
2.	Вязкость кинематическая, (мм ² /с): при 100°С при - 40°С	4,10 4450
3.	Температура застывания, °С	минус 60
4.	Температура вспышки, определяемая в открытом тигле, °С	239
5.	Кислотное число, мг КОН/г	0,17
6.	Содержание водорастворимых кислот и щелочей	отс.
7.	Содержание воды	отс.
8.	Содержание механических примесей	отс.
9.	Термоокислительная стабильность при 200°С за 50 час: -вязкость кинематическая после окисления, мм ² /с, при 100°С при -40°С - кислотное число после окисления, мг КОН/г - содержание осадка, не растворимого в изооктане, % - коррозия после окисления, мг/см ² на пластинах: сталь ШХ-15, алюминиевый сплав АК-4, медь М-2	 4,15 4890 0,64 0,04 0 0 0
1 1.	Трибологические характеристики на ЧШМ при 20°С: - критическая нагрузка Рк, кгс - показатель износа Ди, мм	 60 0,28

Зарубежное масло Turbonucoil 400 обладает высокой термоокислительной стабильностью в сравнении с российскими аналогами – маслами ВНИИ НП-50-1-4У и ИПМ-10 за счет уникального базового масла – смеси эфиров полиолов. Этим же обусловлены его вязкостно-температурные свойства и весьма низкие трибологические характеристики [124].

Значения показателей качества основных физико-химических и

эксплуатационных свойств углеводородных гидравлических масел зарубежного производства приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Основные эксплуатационные свойства пожаробезопасных гидравлических жидкостей зарубежного производства.

Наименование показателей	Результаты исследования	
	FH-2 (MIL-PRF-83282)	FH-42 (MIL-PRF-87257)
	Результат	Результат
1. Внешний вид	Прозрачная однородная жидкость красного цвета	Прозрачная однородная жидкость красного цвета
2. Вязкость кинематическая, мм ² /с (сСт) при 125 ⁰ С, при 50 ⁰ С, при 40 ⁰ С при минус 40 ⁰ С при минус 54 ⁰ С при минус 55 ⁰ С	2,41 10,50 14,27 6946 14141 32094	1,51 5,23 6,78 1374 2552 5371
3. Температура застывания, °С, не выше	Ниже минус 65	Ниже минус 65
4. Температура вспышки в ОТ, °С не ниже	214	170
5. Кислотное число, мг КОН на 1 г масла, не более	0,019	0,016
6. Содержание воды, не более % ГОСТ 2477	отсутствие	отсутствие
7. Содержание водорастворимых кислот и щелочей	отсутствие	отсутствие
8. Термоокислительная стабильность и коррозионная активность при 125 ⁰ С, в течение 100ч. и расходе воздуха 5 л/час: - внешний вид - изменение кинематической вязкости при 50 ⁰ С, % не более - увеличение кислотного числа, мг КОН на 1 г масла, не более -весовой показатель коррозии металлов, мг/см ² не более медь М-1 сталь 30ХГСА алюминий Д-16 магний МЛ-5	Однородная прозрачная жидкость без осадка 0,02 0,005 Отсутствие Отсутствие Отсутствие Отсутствие	Однородная прозрачная жидкость без осадка 0,57 0,006 Отсутствие Отсутствие Отсутствие Отсутствие

Наименование показателей	Результаты исследования	
	FN-2 (MIL-PRF-83282)	FN-42 (MIL-PRF-87257)
	Результат	Результат
9. Трибологические характеристики на ЧШМ: диаметр пятна износа (Ди), мм, при осевой нагрузке 196 Н и температуре: - $(20\pm 5)^{\circ}\text{C}$, не более	0,39	0,35
10. Плотность при 20°C , г/см ³	0,848	0,832
11. Устойчивость к механической деструкции на УЗДН: уменьшение кинематической вязкости при 50°C , за время испытаний, %: - 50 мин, не более	0,2	0,2

Вязкостно-температурные свойства масла FN-42 наиболее близкие к свойствам масла АМГ-10. При этом температура вспышки в открытом тигле для зарубежного масла составляет 170°C .

Учитывая уровень физико-химических и эксплуатационных свойств зарубежных высокотермостабильных масел, отвечающих требованиям спецификаций MIL-PRF-23699 HTS и MIL-PRF-7808 Gr.4 и гидравлических масел, отвечающих спецификациям MIL-PRF-83282 и MIL-PRF-87257, определенных российскими методами исследования, а также тенденции повышения температуры выхода масла из двигателя и требования к повышению пожаробезопасности гидравлических масел автором предложены технические требования к маслам нового поколения (таблица 3.6). Метод определения термоокислительной стабильности масел по ГОСТ 23797 включает определение коррозионной агрессивности к стали ШХ-15, меди М1 и алюминиевому сплаву АК-4, что позволяет прогнозировать совместимость опытного масла с конструкционными материалами. Более полная оценка коррозионной агрессивности масел определяется квалификационными методами.

Показатели «содержание воды, механических примесей, водорастворимых кислот и щелочей», «плотность» и другие не определяются при процессе оптимизации опытного образца в целях снижения числа экспериментов. Для оптимизированного образца определение этих показателей обязательно [123].

Таблица 3.6 – Технические требования к маслам нового поколения.

	ТРД, ТРДД, ТВад, ТВД (нормальные условия эксплуатации ГТД)	ТРД, ТРДД (особые условия эксплуатации)	Гидравлические системы ЛА
Вязкость, мм ² /с 100 °С 50 °С минус 40 °С	≥5,0 - ≤12500	≥4,0 - ≤5500	- ≥10 ≤1200
Кислотное число, мг КОН/г	≤1,0	≤0,5	≤0,03
Температура вспышки в ОТ, °С	≤ 240	≤ 230	≤ 150
ТОС, °С Вязкость, мм ² /с 100 °С 50 °С минус 40 °С Кислотное число, мг КОН/г Осадок, % масс. Коррозия, мг/см ² : медь М1; Сталь ШХ15; Алюминиевый сплав АК4	200 ≤7,5 - ≤25000 ≤4,0 ≤0,1 ±0,2 отс. отс.	225 ≤6,0 - ≤9000 ≤6,0 ≤0,10 ±0,2 отс. отс.	125 - ≤10% ≤+0,3 для всех металлов ±0,1*
Трибология на ЧШМ: Критическая нагрузка, кгс Пятно износа, мм	≥89 ≤0,5	≥60 ≤0,4	- ≤0,6

3.2. Обоснование выбора базовых масел и присадок для авиационных масел

Уровень эксплуатационных свойств масел определяется в большей степени эксплуатационными свойствами основы. С помощью введения функциональных присадок возможно изменить свойства основы в некоторых пределах.

Анализ научно-технических публикаций [6,9,55,64,91,107,118] показывает, что российские марки смазочных масел содержат схожий набор присадок. Это вызвано тем, что условия работы масел в ГТД разных типов схожие. Температуры

работы масла в двигателе или узлах гидравлической системы, нагрузки контактных поверхностей узлов трения, конструкционные и уплотнительные материалы, условия запуска двигателя при низкой температуре окружающей среды, разумеется, отличаются, но не значительно.

Российские синтетические маловязкие масла, применяемые в системах смазки ГТД, изготавливаются на основе диэфира себаценовой кислоты (ВНИИ НП 50-1-4У, ВНИИ НП 50-1-4Ф) или полиальфаолефинов (ИПМ-10). Унифицированные масла, применяемые для смазки ГТД с редуктором, изготавливаются на основе эфиров пентаэритрита (ЛЗ-240, Б-3В) [6, 66].

Температурный предел применения масел на основе полиальфаолефинов составляет 200 °С [73]. Даже незначительное превышение температуры приводит к быстрой термоокислительной деградации масла. Масла на основе диэфиров обладают несколько большим запасом качества по термоокислительной стабильности, однако недостаточным, чтобы обеспечить работоспособность масла при температуре 225 °С в течение заданного ресурса.

Температурный предел отечественных товарных масел на основе эфира пентаэритрита не превышает 200 °С, однако исследования, проведенные автором в ЦИАМ, показывают возможность обеспечения работоспособности масла при температуре 240 °С путем оптимизации композиции присадок.

Базовыми маслами для синтетических углеводородных гидравлических масел являются полиальфаолефины с вязкостью 3,5 мм²/с, или смесь полиальфаолефинов с значением вязкости 2 и 4 мм²/с. Диэфир может быть добавлен к углеводородам в количестве до 33-35 % масс. Учитывая высокие требования к вязкостно-температурным свойствам, вместо диэфира необходима добавка реологического концентрата, представляющего собой моноэфир, загущенный высокомолекулярным полимером [65].

В качестве антиокислителей авиационных смазочных масел применяются фенольные и аминные присадки. К синтетическим базовым маслам добавляют фенил-альфа-нафтиламин (Неозон «А»), диоктил-дифениламин (ДАТ), 2,4-оксидифениламин (ПОДФА) и алкилированный фенил-α-нафтиламин (ФАТ).

Для гидравлических масел применяются фенил-альфа-нафтиламин (Неозон «А») и 2,6-ди-трет-бутил-4-метилфенол (алидол-1). Эффективные концентрации присадок составляют до 2% масс [119].

Трибологические характеристики смазочных масел повышаются серу- или фосфорсодержащими присадками, такими как «совол», «каптакс» и трикрезилфосфат. По токсикологическим соображениям применение присадки «совол» запрещено в России [72, 90]. Масла с «каптаксом» обладают высокой коррозионной агрессивностью к меди и медным сплавам, склонны к выпадению в осадок «альтакса». В состав гидравлических масел входит только трикрезилфосфат [82]. Эффективная концентрация трикрезилфосфата для смазочных масел составляет 2-4% масс., для гидравлических – 0,4-3% масс [64].

Активность к цветным металлам снижается добавлением смеси триазолов, например, 1,2,3-бензтриазолом. Его эффективная концентрация составляет 0,05% [71].

Для удобства применения в гидравлические масла добавляют красители, например, краситель жирорастворимый темно-красный «Ж» в концентрации не более 0,01% масс [55].

Эффективность присадок в синтетических базовых маслах различного класса отличается, это обуславливает уникальность композиций.

Зарубежные масла для тех же областей применения, что и российские, изготавливаются из аналогичных базовых масел и присадок [67] (см. таблицу 3.7).

Масла, отвечающие требованиям спецификации MIL-PRF-7808L, grade 3 (с вязкостью ~3 мм²/с при 100°С), производятся, как правило, на основе сложных эфиров двухосновных кислот (типа диоктилсебагината), а отвечающие требованиям спецификации MIL-PRF-7808L grade 4, - на основе эфиров триметилпропана или на основе смешанных эфиров. Основой композиций масел, отвечающих требованиям спецификации MIL-PRF- 23699F, являются сложные эфиры многоатомных спиртов (эфиры пентаэритрита, неопентиловых спиртов, смешанные эфиры).

Проведенные автором в ЦИАМ исследования зарубежных масел нового

(третьего) поколения, отвечающих требованиям спецификации MIL-PRF-23699 HTS, свидетельствуют о том, что такие масла обладают более высокой термоокислительной стабильностью по сравнению с ранее разработанными товарными отечественными и зарубежными синтетическими маслами на аналогичной основе [113]. Так, масла Castrol 5000 (фирмы Castrol) и Mobil Jet Oil 254 (фирмы Mobil Oil) термостабильны до 225 °С, а масло Aeroshell Turbine Oil 560 (фирмы Shell) - до 240 °С (при исследовании ТОС отечественными методами). Необходимо отметить, что некоторые из таких масел уступают отечественным маслам по другим показателям. Например, масло Mobil Jet Oil 254 обладает повышенной коррозионной агрессивностью к некоторым конструкционным авиационным материалам и не может быть рекомендовано к применению в ГТД при температурах выше 200°С. Масло Aeroshell Turbine Oil 560 характеризуется пониженными смазывающими свойствами (в сравнении с отечественными требованиями по этому показателю). Масло Castrol 5000 оказалось работоспособным при 225°С как по ТОС, так и по смазывающей способности [5,7].

Таблица 3.7 - Составы композиций масел, соответствующие зарубежным спецификациям

MIL-PRF-7808 L grade 4	MIL-PRF-23699 F class HTS
Неополиольный эфир, в основном триметилпропановые эфиры, 90 - 97%	Неополиольный эфир, в основном пентаэритритовые эфиры, 90 - 97%
Антиокислительные присадки, 1.0 - 5.0 %	Антиокислительные присадки, 1.0 - 5.0 %
Противоизносные присадки, 1.0 - 5.0%	Противоизносные присадки, 1.0 - 5.0%
Ингибитор коррозии: 0.01 - 0.05 %	Ингибитор коррозии: 0.01 - 0.05 %
Антипенные присадки, 5 - 50 ppm	Антипенные присадки, 5 - 50 ppm
MIL-PRF-87257	MIL-PRF-83282
Смесь полиальфаолефинов с вязкостью 2 и 4 мм ² /с, 60 – 97 % Дизфир, до 35 %	Смесь полиальфаолефинов с вязкостью 3,5 мм ² /с, 62 – 97 % Дизфир, до 33 %
Антиокислительные присадки фенольного типа, до 2.0 %	Антиокислительные присадки фенольного типа, до 2.0 %
Противоизносные присадки, до 3.0%	Противоизносные присадки, до 3.0%
Ингибитор коррозии: 0.01 - 0.05 %	Ингибитор коррозии: 0.01 - 0.05 %
Антипенные присадки, 5 - 50 ppm	Антипенные присадки, 5 - 50 ppm
Депрессорные присадки не применяются	Депрессорные присадки не применяются
Краситель красный, до 100 ppm	-

Учитывая вышесказанное, в качестве базовых масел для смазочных масел целесообразно использованы только сложные эфиры неопентилполиолов, в основном, пентаэритрита и триметилпропана или их смесей [6, 54, 71, 76].

Для гидравлического масла целесообразно использовать полиальфаолефины вязкостью 2 – 4 мм²/с, загущенные реологическим концентратом до требуемого уровня.

В качестве антиокислительных присадок могут быть использованы высокоэффективные присадки классов: алкилированных аминов и алкилзамещенных фенолов или их смеси в концентрации до 2% масс., позволяющие получить синергетический эффект [77, 79, 80].

Противоизносная присадка может быть выбрана из класса фосфорных эфиров (трикрезилфосфат) с возможным ее усилением серусодержащей присадкой в концентрации до 4 % масс [118].

Коррозионная агрессивность к цветным металлам может быть снижена добавлением до 0,05% масс. 1,2,3-бензтриазола [77, 79, 80].

3.3. Обоснование выбора высокотемпературного антиокислителя

В зависимости от механизма окисления в маслах различают два типа процессов: низкотемпературное окисление (до 120 °С) и высокотемпературное (более 120°С).

Низкотемпературное окисление приводит к образованию пероксидов, спиртов, альдегидов, кетонов и воды.

Высокотемпературное окисление способствует дальнейшему окислению образовавшихся альдегидов и кетонов до кислот с образованием высокомолекулярных продуктов. Эти процессы ведут к росту кислотного числа и вязкости масла за счет образования в масле полимерных продуктов и нерастворимых осадков на их основе.

Для замедления процессов окисления в авиационных маслах применяются аминные антиокислители – фенил- α -нафтиламин (Неозон А), алкилированный дифениламин (Irganox L-01), 4-оксидифениламин и фенольные – 2,6-дитретбутил-4-метилфенол (Агидол-1), 4,4-метилен-бис (2,6-дитретбутил-фенол) (Агидол-23, Irganox L-101), 2,6-диалкилфенол-*p*-этилалкилат (L-135) и другие. Одна химическая формула может иметь несколько торговых названий в зависимости от производителя.

Действие антиокислителей основано на отдаче атома водорода для нейтрализации алкоксильных и алкилпероксидных радикалов, образующихся в процессе окисления. Тем самым, прерывается цепной механизм образования радикалов процессов самоокисления [105]. Большой эффект наблюдается при одновременном введении в состав масла присадок фенольного и аминного типов.

Аминные антиокислители обладают большей эффективностью ингибирования процессов низкотемпературного окисления, в то время как фенольные присадки эффективны при высокотемпературном окислении. Повышение максимальной рабочей температуры масла невозможно без подбора высокотемпературной антиокислительной присадки.

В последнее время антиокислительная присадка зарубежного производства L-135 доказала свою эффективность в составе авиационных смазочных масел российского производства на основе полиэфиров (наиболее высокотермостабильных российских масел в настоящее время). Целесообразно включить в состав новых масел эффективный антиокислитель фенольного типа российского производства.

Российская присадка «3,5-дитретбутил-4-гидроксигидроциннамоновая кислота, сложный алкил эфир C8» (K-145) является аналогом зарубежной L-135. Производство присадки обеспечено отечественной сырьевой базой [105]. Применяется при изготовлении высокотемпературных опытных масел для морской и сухопутной техники. Эффективность присадки K-145 показал тест на термоокислительную стабильность моторных масел [105]. В составе авиационных масел присадка K-135 ранее не применялась.

Структурная формула присадки К-135 представлена на рисунке 3.1.

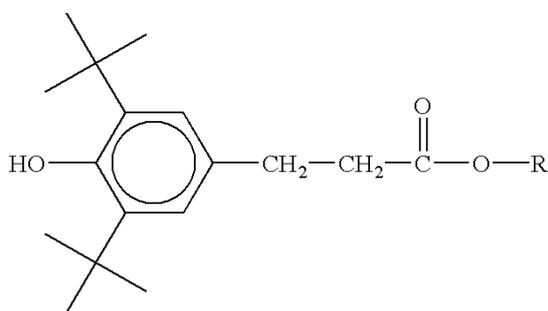


Рисунок 3.1 – Структурная формула присадки К-135

Пространственно-затрудненные фенолы (и получающиеся из них феноксильные радикалы) являются эффективными ингибиторами процессов окисления различных синтетических базовых основ. ПЗФ реагируют с радикалами $\text{ROO}\cdot$, прерывая цепь окисления (см. рисунок 3.2).

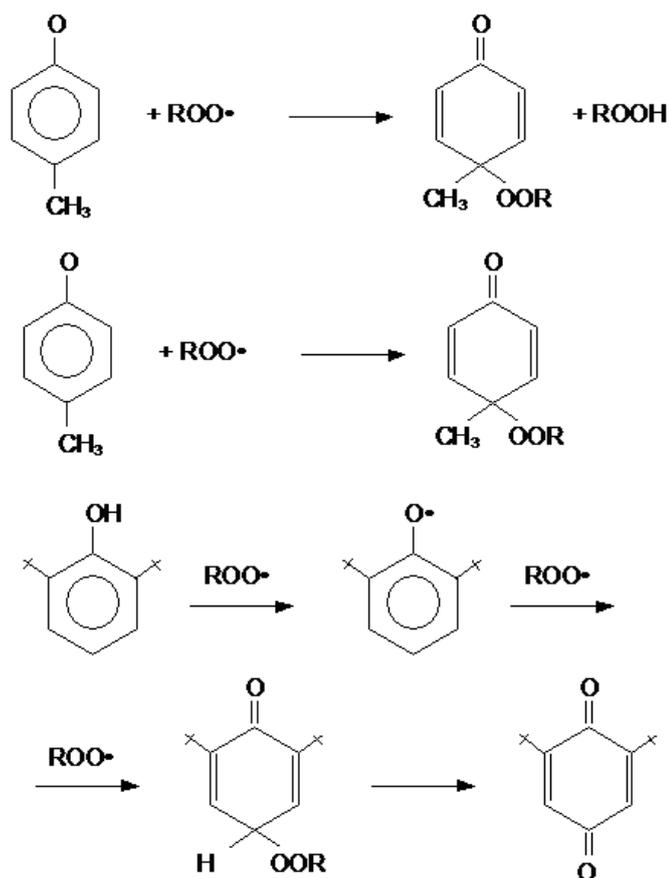


Рисунок 3.2 – Механизм действия антиокислителей фенольного типа

Для определения возможности применения в составе авиационных масел присадки К-135 - аналога L-135 были проведены исследования термоокислительной стабильности и трибологических характеристик опытных образцов авиационных масел.

В лабораторных условиях были изготовлены образцы масел Б-3В и ЛЗ-240 с присадкой К-135, по составу аналогичные маслам, проходившим квалификационные испытания и включавшим состав присадку L-135.

Марка и концентрации остальных присадок оставлены без изменения.

Термоокислительная стабильность оценивалась по свойствам образцов масел после окисления в лабораторных условиях методом по ГОСТ 23797 [30]. Окисление проводилось в течение 50 часов при непрерывном барботаже воздуха со скоростью 10 дм³/час в присутствии пластин-катализаторов - стали ШХ15, алюминиевого сплава АК4 и меди М1. После окисления определялись кинематическая вязкость при температуре минус 40 °С и количество образовавшегося осадка.

Трибологические характеристики: пятно износа и критическая нагрузка - определялись на четырёхшариковой машине трения (ЧШМ) по ГОСТ 9490 [51]. Испытательный узел ЧШМ представляет пирамиду из 4 стальных шаров диаметром 12,7 мм. Три нижних шара неподвижны и погружены в испытуемый образец смазочного материала, верхний вращается с заданной частотой вращения. С помощью специального механизма создаётся давление верхнего шара на три нижних [50].

Пятно износа определяется по диаметрам пятен износа трех нижних шаров после испытания продолжительностью 1 час под нагрузкой верхнего шара 196 Н. Критическая нагрузка определяется как предыдущая нагрузка в ряду стандартных нагрузок нагрузки, приводящей к заеданию узла трения в течение 15 секунд работы.

Результаты исследования опытных образцов масел ЛЗ-240 и Б-3В с присадкой К-135 приведены на рисунках 3.3 и 3.4. Для сравнения, приведены результаты исследования тех же масел с зарубежной присадкой L-135.

Характеристики опытных образцов масла Б-3В

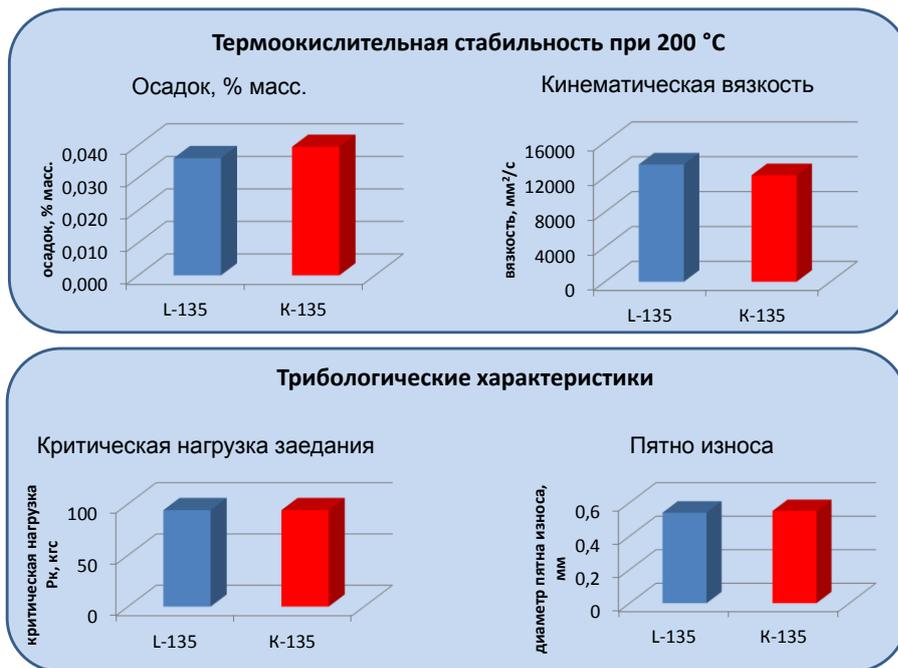


Рисунок 3.3 – Свойства опытных масел Б-3В

Характеристики опытных образцов масла ЛЗ-240

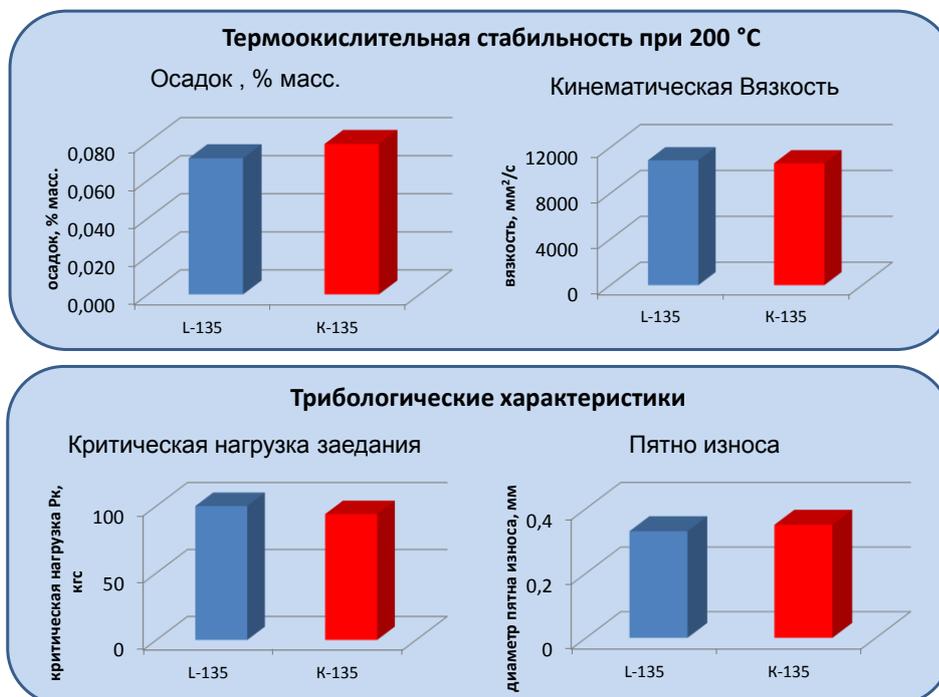


Рисунок 3.4 – Свойства опытных масел ЛЗ-240

Полученные данные о термоокислительной стабильности и

трибологических характеристиках модельных образцов Б-3В и ЛЗ-240 показывают эффективность российской антиокислительной присадки К-135 на уровне присадки L-135 зарубежного производства [49].

Таким образом российская присадка К-135 может быть рекомендована к применению в отечественных авиационных смазочных маслах. Для получения образцов масел, обладающих заданными свойствами, необходимо проведение работы по оптимизации компонентного состава масел.

3.4. Выбор присадки для снижения вспениваемости масел

Вспениваемость авиационных масел — один из важнейших факторов, влияющих на безопасность полетов. Снижение эксплуатационных свойств масел, обладающих повышенной склонностью к вспениваемости, обусловлено повышенным содержанием воздуха в этих маслах при эксплуатации двигателей и может приводить к нарушению штатной работы авиационных ГТД: ухудшению теплоотвода и перегреву узлов трения, ускоренному окислению масла, снижению эффективности смазывания деталей, остановке электроприводов маслонасосов [74, 75].

Воздух в смазочных маслах может находиться в свободном, диспергированном, растворенном или пенообразном состояниях и, в зависимости от этого, оказывать различное воздействие на эксплуатационные свойства масел [61, 83, 84, 94].

Для улучшения стойкости зарубежных масел к пенообразованию в них вводят пеногасящие присадки [115]. В российских маслах пеногасящие присадки не применяются. Вызвано это тем, что синтетические масла не склонны к образованию пены. Тем не менее, имеются факторы, значительно повышающие вспениваемость масел, которые могут привести к нарушению штатного режима работы маслосистемы или гидросистемы ЛА.

Пеногасящие кремнийорганические присадки могут ухудшать деаэрацию масел [17, 100]. Причина заключается в том, что из-за разности между поверхностным натяжением масла и присадки последняя концентрируется на поверхности пузырьков воздуха, находящихся в объеме масла, и снижает поверхностное натяжение на границе газовой и жидкой фаз. Исходя из уравнения Лапласа [36], снижение поверхностного натяжения на границе «масло—воздух» приводит к уменьшению размеров пузырьков:

$$r = 2\sigma/\Delta p,$$

где r — радиус пузырька воздуха, м;

σ — поверхностное натяжение, Н/м;

Δp — разность давлений в воздушном пузырьке и масле, Па.

Согласно уравнению Стокса [108], скорость подъема пузырьков пропорциональна квадрату радиуса, следовательно, скорость всплытия маленьких пузырьков уменьшается:

$$v = 2\rho g r^2 / 9 \nu,$$

где ρ — плотность жидкости, кг/м³;

g — ускорение свободного падения, м/с²;

ν — вязкость жидкости, Па·с.

Кроме этого, присадки обладают большей плотностью и, будучи размещенными на стенках пузырьков, влияют на скорость всплытия последних.

На рисунке 3.5 показаны кривые изменения содержания газа в масле как на этапе пропускания воздуха, так и на этапе последующего отстаивания масла [17]. Видно, что на первом этапе (в динамических условиях) масло с пеногасящей кремнийорганической присадкой вовлекает меньше воздуха, т.е. меньше вспенивается, однако на втором этапе скорость выделения воздуха из этого масла также меньше, т.е. деаэрация хуже. Очевидно, что в динамичном режиме пузырьки, сталкиваясь между собой, укрупняются и быстрее поднимаются на поверхность [36, 41].



Рисунок 3.5. Изменение содержания воздуха в маслах по времени при добавлении кремнийорганической присадки

Кремнийорганическая присадка ПМС-200А является штатной пеногасящей присадкой, применяемой в моторных маслах [101, 107]. С целью определения возможности применения присадки ПМС-200А в качестве пеногасящей присадки для авиационных масел необходимо изучить её влияние на вспениваемость и трибологические свойства полиэфирных масел.

Влияние кремнийорганической присадки ПМС-200А на пенообразующие свойства штатного масла ЛЗ-240 представлены на рисунках 3.6, 3.7 и 3.8.

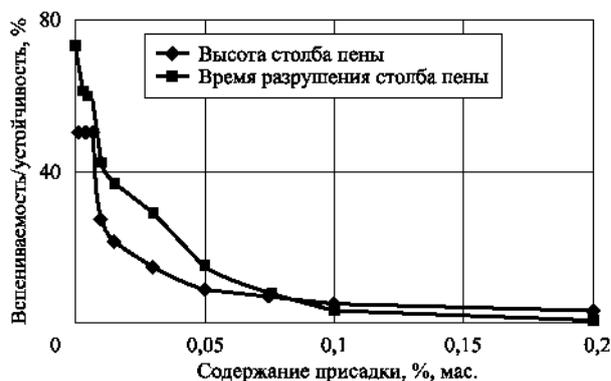


Рисунок 3.6. Влияние кремнийорганической присадки на вспениваемость масла ЛЗ-240

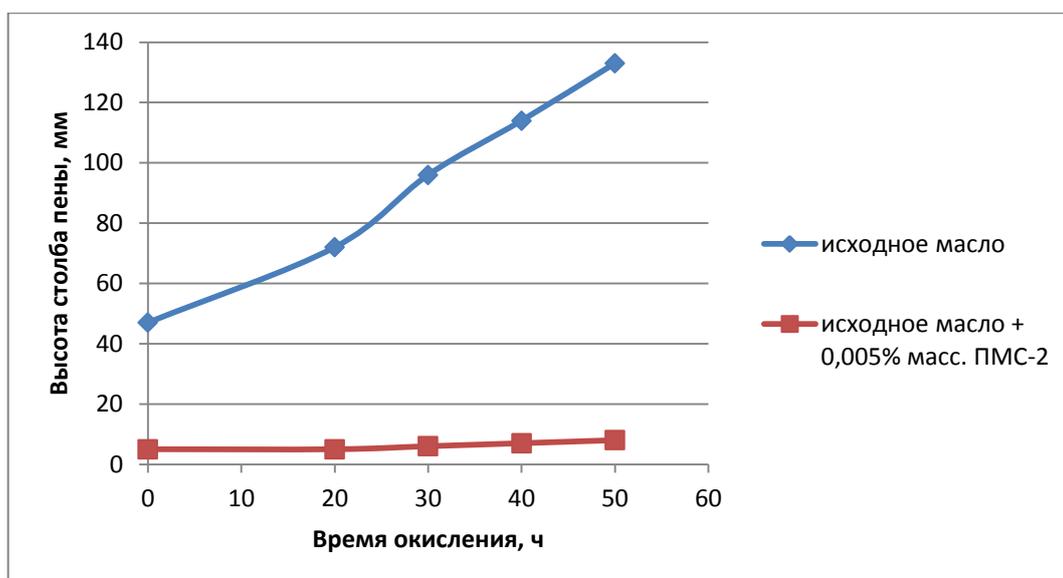


Рисунок 3.7 – Влияние кремнийорганической присадки на вспениваемость окисленного масла ЛЗ-240

Диспергированный воздух может отрицательно влиять на смазывающую способность масла, так как включение мелких пузырьков воздуха в масляную пленку приводит к снижению ее прочности и, следовательно, к повышенному износу деталей [109]. Известны [106] результаты исследований оценки влияния вспениваемости на эксплуатационные свойства смазочных масел [39, 97, 99], однако отсутствуют какие-либо данные по трибологическим свойствам аэрированных авиационных масел.

Оценку трибологических характеристик аэрированного масла автор проводил по ГОСТ 9490—75, определяя его несущую способность и противоизносные свойства.

Для определения показателя несущей способности — критической нагрузки R_k — перед началом испытания масло подвергалось сильной аэрации при помощи механического блендера с частотой вращения вала $15\ 000\ \text{мин}^{-1}$ в течение 15 с. При сильной аэрации масла приобретали непрозрачный кремово-желтый вид.

Диспергированный воздух практически полностью выходил из масла в течение 5 мин (рисунок 3.9).

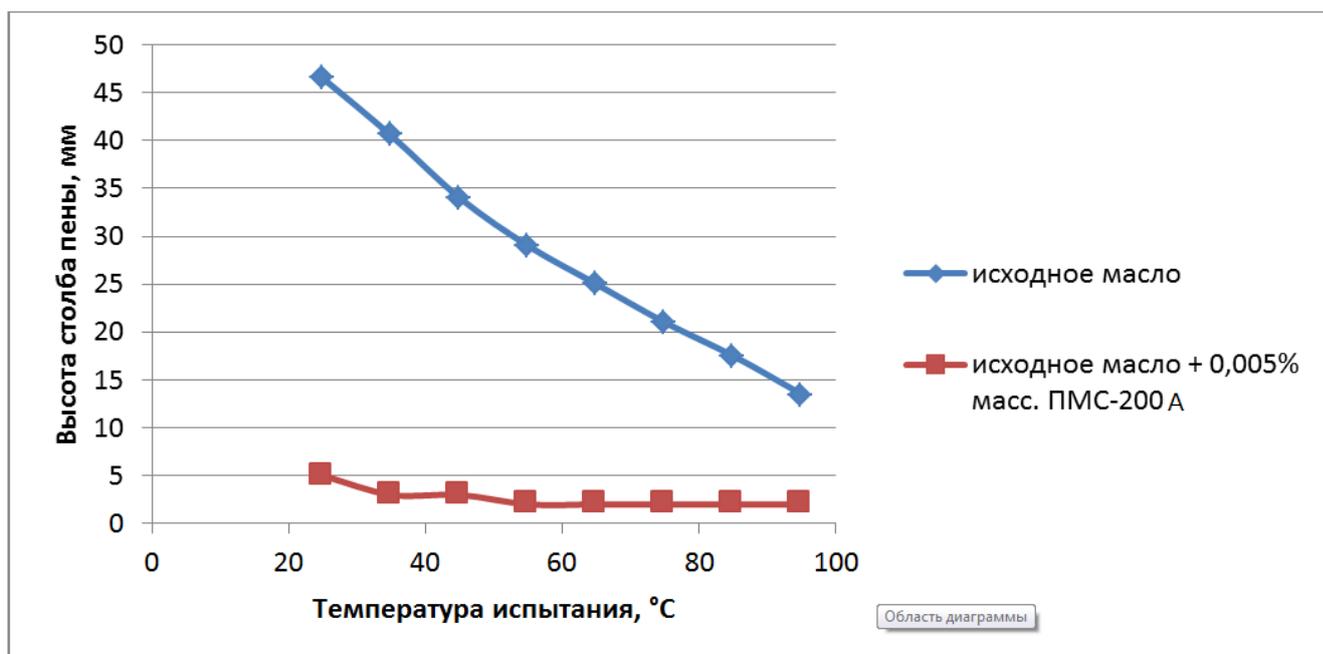


Рисунок 3.8 – Влияние кремнийорганической присадки на вспениваемость масла ЛЗ-240

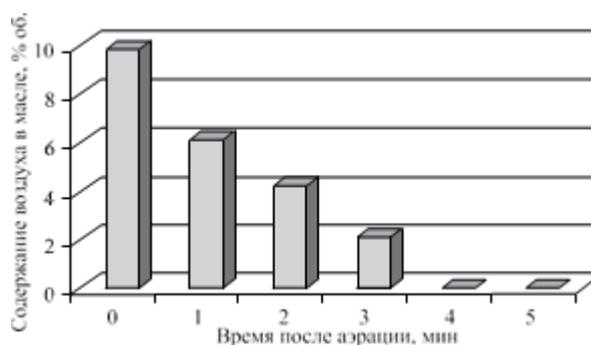


Рисунок 3.9. Влияние времени отстаивания на удаление воздуха. Масло ЛЗ-240

Сразу после выключения блендера аэрированное масло заливали в патрон четырехшариковой машины трения (ЧШМ) [50], и определяли критическую нагрузку P_k (таблица 3.8).

При определении диаметра пятна износа ($D_{и}$) в методику (ГОСТ 9490—75) автором были внесены изменения: время проведения испытания составило 30, 60 и 120 минут, нагрузка – 100, 200 и 300 Н. Во время испытания непрерывную аэрацию обеспечивали подводом воздуха в масло через трубку, проходящую через нижнюю часть патрона ЧШМ. Результаты исследования влияния аэрации на

смазывающие свойства масла приведены в таблице 3.9.

Различия между показателями P_k и D_i для чистых и аэрированных масел также не превышают погрешности метода.

Таблица 3.8 – Трибологические свойства масел с аэрацией и без аэрации

Показатель	ЛЗ-240	
	без аэрации	с аэрацией
Критическая нагрузка P_k , Н	840	890
Износ D_i , мм	0,32	0,31

Таблица 3.9 – Противоизносные свойства масла МС-8П с аэрацией и без аэрации

Нагрузка, Н	Длительность испытания, мин	Показатель износа D_i , мм	
		без аэрации	с аэрацией
200	60	0,32	0,33
200	120	0,31	0,30
100	120	0,17	0,18
300	30	0,55	0,56

При добавлении присадки ПМС-200А в малых концентрациях (до 0,005 % масс.) обеспечивается снижение вспениваемости синтетического масла, при этом трибологические свойства масла остаются в пределах требования нормативной документации. Это дает основания рекомендовать вводить присадку ПМС-200А в авиационные масла для снижения их вспениваемости [60, 70, 80].

Выводы по Главе 3

1. Разработаны новые Технические требования к термостабильным маловязкому и унифицированному маслу для авиационных ГТД, а также пожаробезопасному гидравлическому маслу с учетом тенденции развития российской авиационной техники, проблем применения современных масел в

перспективных авиадвигателях, а также зарубежного опыта разработки авиационных масел и имеющейся сырьевой базы.

Смазочные масла должны быть работоспособны при температуре 225 - 240°C, температура вспышки гидравлического масла должна быть не ниже 150°C.

2. Автором экспериментально показана возможность и эффективность применения антиокислительной присадки российского производства 3,5-дитретбутил-4-гидроксигидроциннамоновой кислоты, сложного алкил эфира С8 (К-135). Отечественная присадка К-135, показавшая преимущества перед аналогичной зарубежной присадкой L-135, включена в состав новых масел.

3. Обосновано применение и найдена величина оптимальной концентрации кремнийорганической присадки, равная 0,005 % масс., для снижения вспениваемости новых масел. Показано, что введение кремнийорганической присадки в масла не влияет на их трибологические характеристики. Кремнийорганическая противопенная присадка включена в состав новых масел.

4. Выбраны базовые масла и присадки для новых масел. Основа унифицированного масла – пентаэритритовый эфир. В состав масла также включены фенольный антиокислитель К-135 в концентрации до 2% масс., аминный окислитель ДАТ в концентрации до 2% масс., антикоррозионная присадка 1,2,3-БТА в концентрации 0,13% масс., антипенная присадка ПМС-200А в концентрации 0,005% масс. и противозадирная присадка ТКФ в концентрации до 4% масс. В качестве базового масла для маловязкого масла выбран триметилпропановый эфир. В состав масла включены присадки ФАТ в концентрации до 2% масс., К-135 – до 2% масс., ТКФ – до 4% масс., 1,2,3-БТА - 0,13% масс. и ПМС-200А – 0,005% масс. За основу гидравлического масла выбрано полиальфаолефиновое масло (ПАОМ-2), загущенное до необходимой вязкости. В состав включены присадки К-135 в концентрации до 2% масс., ТПФ – до 4% масс., 1,2,3-БТА – 0,05% масс., красный и синий красители – по 0,0006% масс. каждый и ПМС-200А – 0,005% масс.

Глава 4. Результаты исследования смазочных и гидравлических масел нового поколения

4.1. Оптимизация составов опытных образцов новых масел

После постановки оптимизационной задачи на основе разработанных новых Технических требований и компонентного состава были определены оптимальные составы опытных образцов новых масел.

Опытные образцы масла изготавливались автором в лабораторных условиях в объеме, достаточном для определения основных показателей качества (таблица 4.1) и достаточном для обеспечения концентрации компонентов с заданной точностью.

Результаты исследования физико-химических и эксплуатационных свойств составов опытных образцов, формируемых оптимизатором, занесены в электронную базу данных.

Итерационный процесс оптимизации состава опытных образцов представлен в таблицах 4.1, 4.3 и 4.5. Оптимизированные составы новых масел представлены в таблицах 4.2, 4.4 и 4.6.

Согласно поставленной оптимизационной задаче, улучшаемым показателем унифицированного масла выбран диаметр пятна износа. Показатели термоокислительной стабильности в объеме, вязкостно-температурные свойства, кислотное число и температура вспышки установлены в качестве ограничивающих параметров.

Образец унифицированного масла № 15 соответствует требованиям по ограничивающим параметрам и обладает самым низким значением диаметра пятна износа. Оптимизированный состав унифицированного масла рекомендован к определению контролируемых параметров. Это масло получило наименование АСМО-200 [31].

Таблица 4.1 – Процесс оптимизации состава опытных образцов унифицированного масла

	Компонент	Концентрация, % масс.								
	Пентаэритритовый эфир		95,2	93,7	97,0	96,0	96,25	98,8	95,0	95,2
ВП	ДАТ	≤ 2,0	1,5	2,0	1,5	1,5	0,1	0,2	0,5	1,0
	К-135	≤ 2,0	0,5	1,5	0,5	1,5	0,15	0,5	1,0	0,8
	ТКФ	≤ 4,0	3,0	2,8	1,0	1,0	3,5	0,5	3,5	3,0
	1,2,3-БТА	= 0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
	ПМС-200А	= 0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
		ТЗ	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№15
ОП	Вязкость, мм ² /с 100 °С минус 40 °С	≥ 5,0 ≤ 12500	5,1 9979	5,2 10984	5,2 11497	5,0 9714	5,2 9717	5,0 10573	5,2 11823	5,1 10321
	Кислотное число, мг КОН/г	≤ 0,2	0,21	0,21	0,26	0,26	0,18	0,19	0,19	0,08
	Характеристики после ТОС: Вязкость, мм ² /с 100 °С минус 40 °С	≤ 6,0 ≤ 20000	5,47 11912	5,58 11898	5,69 12162	5,33 10784	5,34 11276	5,52 13574	5,74 13619	5,3 10727
	Кислотное число, мг КОН/г Осадок, % масс.	≤ 1,5 ≤ 0,1	0,62 0	0,1 0,016	0,92 0,046	0,79 0,029	0,73 0,062	0,7 0,033	0,87 0,032	0,6 0,04
	Трибология на ЧШМ: Критическая нагрузка, кгс	≥ 89	89	89	96	89	89	96	89	89
	Температура вспышки, °С	≥ 245	268	257	269	261	270	265	259	267
К	Пятно износа, мм	≤ 0,35	0,35	0,37	0,44	0,40	0,36	0,45	0,34	0,32

Показатели термоокислительной стабильности в объеме, вязкостно-температурных свойств и кислотное число выбраны в качестве ограничивающих параметров.

Таблица 4.2 – Состав оптимального образца масла АСМО-200

ВВП	ДАТ	1,0
	К-135	0,8
	ТКФ	3,0
	1,2,3-БТА	0,13
	ПМС-200А	0,005
	ПЭ	До 100

Таблица 4.3 – Процесс оптимизации состава опытных образцов маловязкого масла

	Компонент	Концентрация, % масс.								
										До 100
	ТМП									
ВП	ФАТ	≤ 2,0	0,2	0,5	0,5	2,0	1,5	1,5	1,0	2,0
	К-135	≤ 2,0	0,4	0,8	0,5	1,8	1,0	1,8	1,0	2,0
	ТКФ	≤ 4,0	1,5	1,5	2,0	1,5	3,0	3,5	3,5	4,0
	БТА	= 0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
	ПМС-200А	= 0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
		ТЗ	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№18
ОП	Вязкость, мм ² /с 100 °С минус 40 °С	≥ 4,0 ≤ 5500	3,9 5600	4,1 5691	4,2 5490	3,8 5120	3,9 5421	4,1 5563	4,2 5866	4,0 5370
	Кислотное число, мг КОН/г	≤ 0,2	0,21	0,21	0,26	0,26	0,18	0,19	0,19	0,04
	Свойства после ТОС при 225 °С: Вязкость, мм ² /с 100 °С минус 40 °С	≤ 6,0 ≤ 9000	5,47 8960	4,9 8500	5,69 8990	5,33 8100	5,34 7530	5,52 7860	5,74 8730	4,8 8550
	Кислотное число, мг КОН/г	≤ 6,0	4,62	5,1	5,92	5,79	4,73	5,7	3,87	4,4
	Осадок, % масс.	≤ 0,1	0,09	0,08	0,09	0,1	0,06	0,08	0,07	0,07
	Трибология на ЧШМ: Критическая нагрузка, кгс	≥ 60	54	60	54	61	54	58	60	60
Температура вспышки, °С	≥ 230	250	245	255	239	235	241	245	252	
К	Пятно износа, мм	≤ 0,4	0,51	0,55	0,45	0,40	0,50	0,45	0,36	0,32

Критерием оптимизации для опытных образцов маловязкого масла выбран диаметр пятна износа, характеризующий смазывающие свойства масла.

Таблица 4.4 –Состав оптимального образца маловязкого масла

ВВП	ФАТ	2,0
	К-135	2,0
	ТКФ	4,0
	БТА	0,13
	ПМС-200А	0,005
	ТМП	До 100

Образец маловязкого масла № 12 обладает наименьшим значением показателя пятна износа и отвечает требованиям по ограничивающим параметрам. Это масло получило наименование ВАСМО-225.

Критерием оптимизации для опытных образцов гидравлического масла выбран диаметр пятна износа. Показатели термоокислительной стабильности в объеме, вязкостно-температурные свойства, кислотное число и температура вспышки выбраны в качестве ограничивающих параметров.

После 22 итерации получен состав гидравлического масла с наименьшим значением показателя пятна износа, отвечающий требованиям ТЗ по ограничивающим параметрам. Это гидравлическое масло получило наименование АСГИМ [32].

Полученные опытные образцы были исследованы автором на работоспособность на редукторном стенде Ш-3 в условиях, приближенных к реальным условиям работы масел в двигателе.

Таблица 4.5 – Процесс оптимизации состава опытных образцов гидравлического масла

	Компонент	Концентрация, % масс.								
										До 100
	БССУ									
ВП	К-135	≤ 2,0	0,5	0,1	0,1	0,3	0,5	0,2	0,1	0,5
	ТКФ	≤ 4,0	1,0	4,0	1,5	0,1	0,2	2,0	1,0	0,93
	1,2,3-БТА	= 0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
	ПМС-200А	= 0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
	Краситель синий	= 0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006
	Краситель желтый	= 0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006
		ТЗ	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№22
ОП	Вязкость, мм ² /с 50 °С	≥ 9,0	8,5	8,0	8,8	9,0	8,5	9,0	9,2	9,0
	минус 50 °С	≤ 1250	1150	1120	1350	1290	1200	1190	1340	1148
	Минус 60 °С	≤ 4200	4121	4110	4632	4410	4218	4039	4644	3726
	Кислотное число, мг КОН/г	≤ 0,2	0,19	0,19	0,18	0,17	0,18	0,19	0,19	0,08
	Температура вспышки, °С	150	153	152	155	151	152	154	150	151
	Хар-ки после ТОС: Вязкость, % 50 °С	≤ +1,0	+1,4	+4,5	+3,6	+1,3	+0,3	+2,5	+1,7	+0,3
	Кислотное число, мг КОН/г	≤ +0,15	+0,07	+0,14	+0,10	+0,20	+0,05	+0,05	+0,3	+0,005
К	Трибология на ЧШМ: Пятно износа, мм	≤ 0,6	0,7	0,60	0,65	0,60	0,75	0,64	0,55	0,55

Таблица 4.6 – Состав оптимального образца гидравлического масла

ВВП	К-135	0,5
	ТКФ	0,93
	1,2,3-БТА	0,05
	Краситель синий	0,0006
	Краситель желтый	0,0006
	ПМС-200А	0,005
	БССУ	До 100

4.2. Результаты квалификационных исследований опытных образцов новых масел

С целью получения полной информации о физико-химических и эксплуатационных свойствах определены контролируемые параметры новых масел. В перечень контролируемых параметров автором введены показатели качества, определяемые при приёмочных испытаниях. По результатам приёмочных испытаний новых масел с участием автора выпущены квалификационные отчеты [120, 121, 122].

На основании результатов исследований были разработаны рекомендации по проведению дальнейших мероприятий по внедрению новых масел АСМО-200, ВАСМО-225 и АСГИМ. Образцы масел АСМО-200, ВАСМО-225 и АСГИМ были изготовлены в промышленных условиях на предприятии АО «НПЦ Спецнефтьпродукт».

Для оценки вязкостно-температурных характеристик определены вязкость кинематическая и температура застывания масел. Кинематическая вязкость определена при температурах минус 40°С, 100°С и 200°С для масла АСМО-200 и 225 °С для масла ВАСМО-225 (таблица 4.7).

Термоокислительную стабильность новых масел характеризуют результаты определения ТОС в объеме, ТОС в тонком слое на приборах «Папок» и «Наклонная плита», коксуемости, склонности к образованию высокотемпературных отложений на установках ВЦМ-1 и УКМ-1 (таблица 4.8).

Трибологические характеристики масел определены на установке ЧШМ (таблица 4.9).

Результаты исследований эксплуатационных свойств образцов масел АСМО-200 и ВАСМО-225 из опытно-промышленных партий, выполненных автором, показали следующее.

Таблица 4.7 – Вязкостно-температурные и трибологические свойства, термоокислительная стабильность, пожаробезопасность, а также совместимость с металлами и резинами масел АСМО-200 и ВАСМО-225

№	Наименование показателя	Масло АСМО-200	Штатное масло Б-3В	Масло ВАСМО-225	Штатное масло ВНИИ НП50-1-4У
Вязкостно-температурные свойства					
1	Вязкость кинематическая, мм ² /с: при 200°С при 100°С при минус 40°С	1,4 5,1 10321	- 5,36 10667	1,14 4,03 5370	- 3,3 2150
2	Температура застывания, °С	минус 60	-60	минус 61	Минус 60
Пожаробезопасность					
1	Температура вспышки в открытом тигле	267	258	252	220
Термоокислительная стабильность					
1	Кислотное число, мг КОН/г	0,08	4,7	0,04	0,04
2	Термоокислительная стабильность при 200°С за 50 час: -вязкость кинематическая после окисления, мм ² /с при 100°С при минус 40°С - кислотное число после окисления, мг КОН/г - содержание осадка, не растворимого в изооктане, % - коррозия после окисления, мг/см ² на пластинах: сталь ШХ-15, алюминиевый сплав АК-4, медь М-2	5,3 10727 0,6 0,04 отс. отс. отс.	5,74 13200 1,35 0,176 отс. отс. - 7,18	3,49 2440 2,52 0,02 отс. отс. отс.	
3	Термоокислительная стабильность при 225°С за 50 час: -вязкость кинематическая после окисления, мм ² /с при 100°С при минус 40°С кислотное число после окисления, мг КОН/г - содержание осадка, не растворимого в изооктане, % - коррозия после окисления, мг/см ² на пластинах: сталь ШХ-15, алюминиевый сплав АК-4, медь М-2	7,45 39123 3,77 0,071 0 0 3,77		4,83 8357 4,40 отс. отс. отс. +0,02	

4	Коксуемость, %	0,13	0,19	-	-
5	Склонность масел к образованию высокотемпературных отложений (ВТО) на приборе «наклонная плита» - масса ВТО, мг	30	32,4	104	-
6	Термоокислительная стабильность в тонком слое при 250°C, мин	110	94	150	46
7	Склонность масел к образованию ВТО на установке ВЦМ-1: -индекс ВТО,% -температура начала отложений, °С	21 138	116 184	40 159	8,8 195
8	Склонность масел к образованию высокотемпературных отложений (ВТО) на моделирующей установке УКМ-1, ВТО, г	2,1	7,42	4,9	1,6
Трибологические свойства					
1	Трибологические характеристики на ЧШМ при 20 °С: - критическая нагрузка, Р _к , кг - показатель износа D _и при 20 кг, мм	89 0,32	94 0,54	60 0,4	84 0,30

По вязкостно-температурным свойствам масло АСМО-200 соответствует своему аналогу – маслу Б-3В и обеспечит запуск двигателя при температуре окружающей среды, что и масло Б-3В.

После окисления в лабораторных условиях по ГОСТ 23797 (ТОС в объёме) образец масла АСМО-200 характеризуется меньшим изменением вязкости при температуре минус 40°C и меньшим количеством образовавшегося осадка. Изменение кислотного числа не может быть принято во внимание, так как этот процесс протекает разнонаправленно и обусловлен характерным компонентным составом масла Б-3В.

Значение коксуемости для масла АСМО-200 ниже на треть, чем для масла Б-3В.

Количество высокотемпературных отложений на приборе «наклонная плита» для масла АСМО-200 меньше на 10%, чем для масла Б-3В.

Результат определения ТОС в тонком слое на приборе «Папок» масла АСМО-200 выше чуть более, чем на 10% в сравнении с маслом Б-3В.

Количество высокотемпературных отложений на установке ВЦМ-1 для

масла АСМО-200 ниже, чем для масла Б-3В (индекс характеризует прозрачность высокотемпературных отложений в сравнении с эталонным веществом). Однако, температура начала отложений для масла АСМО-200 ниже, чем для масла Б-3В.

Количество высокотемпературных отложений на установке УКМ-1 для масла АСМО-200 более чем в 3,5 раза ниже, чем для масла Б-3В.

Результаты исследования термоокислительной стабильности масла АСМО-200 в объеме, тонком слое в статических и динамических условиях, а также на модельных установках УКМ-1 и ВЦМ-1 свидетельствуют о повышенной термоокислительной стабильности в сравнении со штатным унифицированным маслом Б-3В.

Пожаробезопасность масла АСМО-200 незначительно выше в сравнении со штатным аналогом.

По противоизносным свойствам масло АСМО-200, определенным на ЧШМ, значительно превосходит Б-3В. По противозадирным свойствам масло АСМО-200 незначительно уступает маслу Б-3В. Исследования ЦИАМ показывают, что значения показателя «диаметр пятна износа» в значительной степени коррелируются с результатами испытаний масел на редукторном стенде Ш-3 и практикой применения масел на серийных ГТД в сравнении со значениями показателя «критическая нагрузка». Из чего можно сделать вывод, что применение масла АСМО-200 приведет к меньшему износу сопряженных поверхностей узлов трения.

Ближайшим аналогом масла ВАСМО-225 по составу и термостабильности является масло ПТС-225. Промышленное производство масла ПТС-225 не было организовано. Сведения о практике применения масла в серийных авиационных ГТД отсутствуют.

Масло ВНИИ НП 50-1-4У является штатным маловязким маслом для авиационных ТРД и ТРДД, изготавливается на основе диэфира и может быть рассмотрено в качестве прототипа масла ВАСМО-225.

Вязкостно-температурные характеристики масла ВАСМО-225 в сравнении с маслом ВНИИ НП 50-1-4У ниже. Масло ВАСМО-225 обеспечит запуск двигателя

при более высокой температуре окружающей среды, чем масло ВНИИ НП 50-1-4У.

Пожаробезопасность масла ВАСМО-225 выше, чем масла ВНИИ НП 50-1-4У.

Результаты исследования на приборе «Папок» масла ВАСМО-225 показывают трехкратное превышение ТОС в тонком слое в сравнении с маслом ВНИИ НП 50-1-4У.

После окисления в объеме по ГОСТ 23797 значение вязкости при температуре минус 40°С, кислотного числа и количества образовавшегося осадка для масла ВАСМО-225 ниже, чем для масла ВНИИ НП 50-1-4У.

Испытания на установке ВЦМ-1 показали, что масло ВАСМО-225 в большей степени склонно к образованию ВТО и температура начала их образования ниже, чем для масла ВНИИ НП 50-1-4У. Количество образовавшихся ВТО на установке УКМ-1 для масла ВАСМО-225 выше, чем для масла ВНИИ НП 50-1-4У.

Результаты исследования ТОС в различных условиях показали, что масла ВАСМО-225 в сравнении с маслом ВНИИ НП 50-1-4У обладает запасом качества при температуре окисления 225°С, несмотря на несколько худшие результаты при 200°С.

Трибологические свойства масла ВАСМО-225, определенные на ЧШМ, ниже, чем для масла ВНИИ НП 50-1-4У.

Результаты испытания масла АСГИМ приведены в таблицах 4.14 и 4.15.

Температура вспышки масла АСГИМ составляет 151°С. По данному показателю масло АСГИМ значительно превосходит штатное масло АМГ-10.

По вязкостно-температурным свойствам новое масло АСГИМ соответствует маслу АМГ-10. Вязкость масла АСГИМ при температуре 50°С составляет 9,0 мм²/с, вязкость масла АМГ-10 – 10,12 мм²/с. При температуре минус 50°С вязкости составляют 1098 °С и 1158°С для масел АСГИМ и АМГ-10, соответственно. Несмотря на пониженную вязкость масла АСГИМ при

температуре 50°C, ввиду его значительно большей стойкости к деструкции загущающей присадки, можно предположить большой ресурс работы масла.

Таблица 4.14 Результаты оценки физико-химических и эксплуатационных свойств масла АСГИМ.

№	Наименование показателя	Требования ТТ	Фактические данные АСГИМ	АМГ-10
Вязкостно-температурные свойства				
1	Вязкость кинематическая, мм ² /с: при 150°C при 50°C при минус 50°C	- ≥ 9,0 ≤ 1250	2,20 9,0 1098	2,70 10,12 1158
2	Температура застывания, °C, не выше	≤ минус 65	минус 65	минус 65
Пожаробезопасность				
1	Температура вспышки, определяемая в открытом тигле, °C	≤ 150	151	110
Трибологические свойства				
1	Трибология на ЧШМ: противоизносные свойства, диаметр пятна износа (Ди), мм, при нагрузке 196Н и температуре: -(20±5)C -(100±5)C	≤ 0,6 ≤ 0,8	0,46 0,60	0,62 0,65
Термоокислительная стабильность				
1	Кислотное число, мг КОН/г на 1г масла, не более	≤ 0,03	0,0056	0,01

2	Термоокислительная стабильность и коррозионная активность (125 С, 100ч., 5л/ч воздух); - внешний вид -изменение кинематической вязкости при 50 °С, % - увеличение кислотного числа, мг КОН на 1 г масла - весовой показатель коррозии металлов, мг/см ² : -сталь 30 ХГСА -медь М1 -магниевый сплав МЛ-5 неокисленный -алюминиевый сплав Д-16	без осадка ≤ +8,0 ≤ +0,15 ≤ ±0,1 Для всех металлов	без осадка +0,3 +0,005 отсутствие отсутствие отсутствие отсутствие	без осадка +2,14 0 отсутствие отсутствие отсутствие отсутствие
Стабильность к деградации загущающей присадки				
	Устойчивость к механической деградации на ультразвуковой установке: уменьшение кинематической вязкости при 50°С, за 50 мин %	≤ 20,0	20,0	33,5

При температуре 20°С противоизносные свойства масла АСГИМ выше, чем у масла АМГ-10 на 30%. При температуре 100°С противоизносные свойства масле сопоставимы, учитывая точность метода измерения.

При окислении масла АСГИМ, его вязкость увеличилась на 0,3%, кислотное число на 0,005 мг КОН/г, визуально осадок отсутствует. При окислении масла АМГ-10, его вязкость увеличилась на 2,14%, кислотное число не изменилось, осадок отсутствует. Таким образом, можно сделать вывод, что термоокислительная стабильность масла АСГИМ выше, чем у масла АМГ-10.

4.3. Результаты исследования вспениваемости новых масел в лабораторных условиях в расширенном интервале температур

Масла АСМО-200, ВАСМО-225 и АСГИМ были исследованы автором в лабораторных условиях с целью определения их пенообразующих свойств.

Выполнена подготовка образцов масел согласно разработанной автором методике. Интервал температур испытания масел составил 25 – 185 °С. Расход воздуха – 0,2 см³/с.

Результаты определения пенообразующих свойств исходных масел показывают, что синтетические масла не склонны к образованию пены. На всем интервале температур отсутствовало образование столба пены.

Известно, что в процессе окисления масел их пенообразующие свойства повышаются [23, 24]. Масла АСМО-200, ВАСМО-225 и АСГИМ были окислены в лабораторных условиях по ГОСТ 23797. Температура окисления соответствовала максимальной рабочей температуре для каждого масла: 200 °С для масла АСМО-200, 225 °С для масла ВАСМО-225 и 125 °С для масла АСГИМ. Время окисления составило 50 часов. Остальные условия окисления установлены в соответствии со стандартом на метод.

Образцами сравнения являлись штатные масла-аналоги новых масел: Б-3В, ВНИИ НП 50-1-4У и АМГ-10.

Результаты исследования приведены на рисунках 4.1 – 4.3.

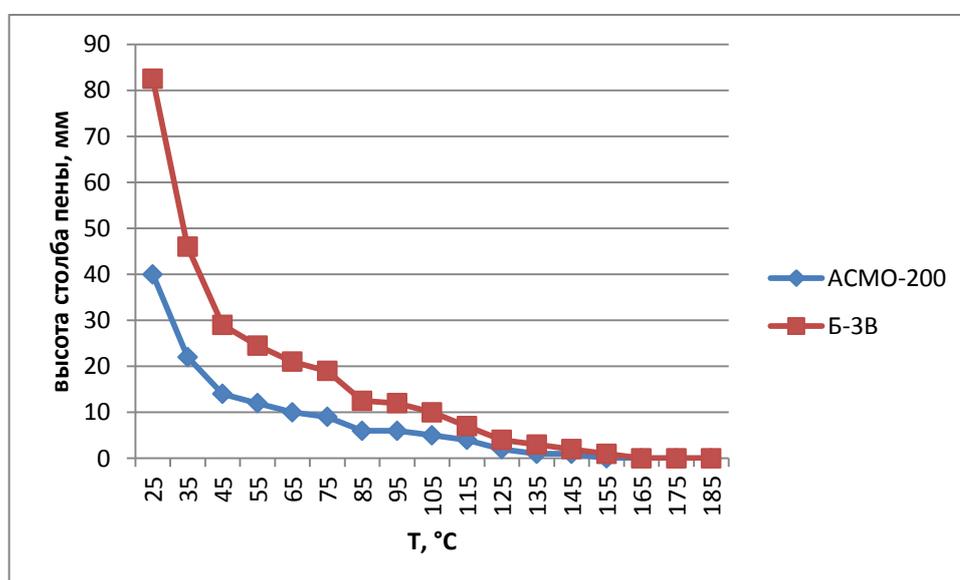


Рисунок 4.1 – Пенообразующие свойства масел АСМО-200 и Б-3В.

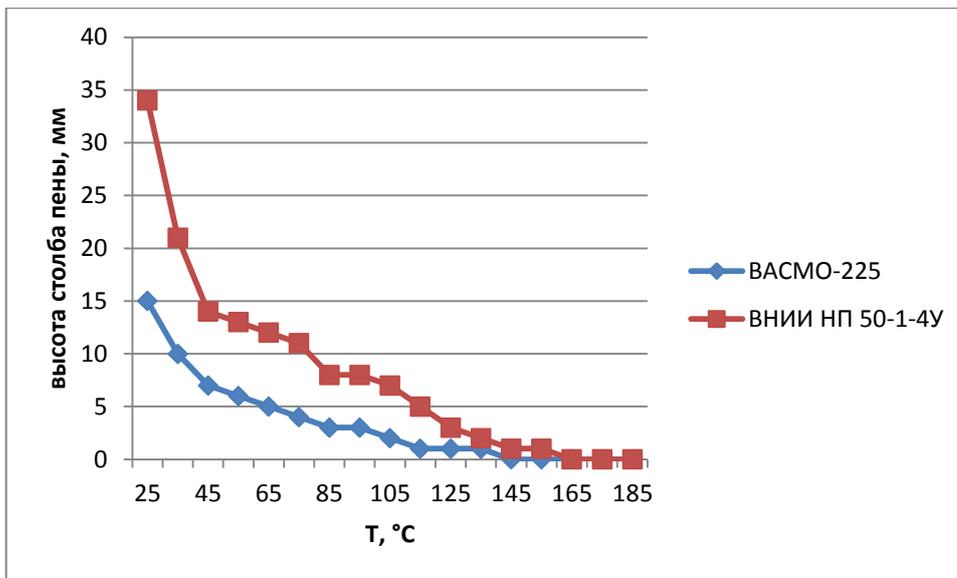


Рисунок 4.2 – Пенообразующие свойства масел ВАСМО-225 и ВНИИ НП 50-1-4У.

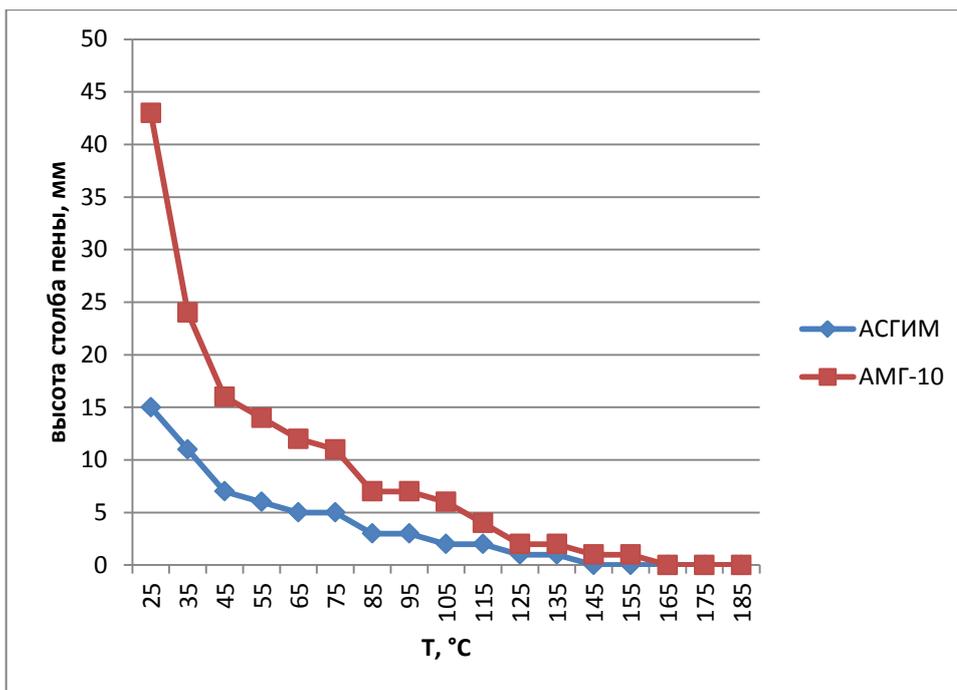


Рисунок 4.3 – Пенообразующие свойства масел АСГИМ и АМГ-10.

Результаты исследования пенообразующих свойств в расширенном интервале температур показывают, что исходные масла АСМО-200, ВАСМО-225 и АСГИМ не образуют пены в условиях проведения эксперимента во всем интервале температур.

Окисленные образцы масел АСМО-200, ВАСМО-225 и АСГИМ в меньшей степени склонны к образованию пены в сравнении со штатными аналогами – маслами Б-3В, ВНИИ НП 50-1-4У и АМГ-10. Высоты столбов пены для новых масел, содержащих кремнийорганическую присадку, в 2 раза меньше высот столбов масел аналогов.

4.4. Расчет вязкости новых масел в зависимости от температуры.

Кинематическая вязкость авиационных масел определяется экспериментально. Для её определения применяется лабораторное оборудование и методика в соответствии с ГОСТ 33. При квалификационных испытаниях и при оценке качества масла, как правило, вязкость определяется при температурах минус 40, плюс 100 °С, а также при максимальной рабочей температуре.

Для расчета маселосистем и определения интервала температур эксплуатации изделий авиатехники может потребоваться данные кинематической вязкости масла в интервале температур от минус 40°С (минус 60° для гидравлических масел) до максимальной рабочей температуры с шагом 10°С.

С целью сокращения трудозатрат на проведение экспериментальных исследований кинематическая вязкость масла может быть определена расчетным методом [28].

Для расчета вязкости масел при различных температурах известен ряд формул, среди которых наиболее часто используются формулы Вальтера (2.5 – 2.7) и Филонова-Рейнольдса (2.8 – 2.10) [19, 127, 128].

Верификация этих двух формул на известных значениях вязкости полиэфирного масла ЛЗ-240, ВТХ которого близка к маслам АСМО-200 и ВАСМО-225, в диапазоне температур от минус 40°С до 200°С с шагом 10°С показала, что расчеты, выполненные по формуле Вальтера (2.5) значительно точнее.

$$\lg \lg(v + 0,8) = a + b \lg T, \text{ где} \quad (2.5)$$

$$a = \lg \lg(v_1 + 0,8) - b \lg T_1 \quad (2.6)$$

$$b = \frac{\lg[\lg(v_1+0,8)/\lg(v_2+0,8)]}{\lg \frac{T_1}{T_2}} \quad (2.7)$$

$$v = v_* \cdot \exp(-uT), \text{ где} \quad (2.8)$$

$$v_* = \exp\left(\frac{T_1 \cdot \ln v_2 - T_2 \cdot \ln v_1}{T_1 - T_2}\right) \quad (2.9)$$

$$u = \frac{\ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)}{T_1 - T_2} \quad (2.10)$$

Здесь v_1, v_2 – кинематическая вязкость масла при температуре 100°C и минус 40°C, T_1 и T_2 – температуры 373К и 233К, соответственно.

Погрешность расчетов вязкости по формуле Вальтера не превышает 10%. Погрешность расчетов вязкости по формуле Филонова-Рейнольдса достигает 450%.

Формула Вальтера позволяет рассчитать вязкость продукта при заданной температуре по двум известным значениям вязкости при двух температурах. Для расчетов приняты вязкости при температурах минус 40°C и 100°C вязкости при температурах 0 и 100 °C [29, 127].

С помощью вышеуказанной формулы рассчитаны значения вязкости для новых масел АСМО-200, ВАСМО-225 и АСГИМ в интервале температур от минус 40 до 200°C, 225°C и 125°C (см. таблицу 4.15 и рисунок 4.4).

Таблица 4.15 – Результаты расчета кинематической вязкости новых масел

T, °C	АСМО-200	ВАСМО-225	АСГИМ
225	-	0,9	1,1
220	-	1	1,2
210	-	1,1	1,3
200	1,4	1,2	1,4
190	1,5	1,3	1,5
180	1,7	1,4	1,6
170	1,8	1,5	1,7
160	2,1	1,7	1,9
150	2,3	1,9	2,1

140	2,7	2,2	2,3
130	3,1	2,5	2,6
120	3,6	2,9	2,9
110	4,2	3,4	3,3
100	5,1	4	3,9
90	6,2	4,9	4,5
85	7	5,4	4,9
80	7,8	6	5,3
70	10	7,6	6,3
60	13,2	9,9	7,7
50	18,1	13,3	9,6
40	25,9	18,6	12,2
30	38,8	27,2	16,0
20	61,9	42,1	21,7
10	106,3	70,1	30,6
0	200,1	127,1	45,3
-10	420,8	256,5	70,9
-20	1015,5	590,7	118,9
-30	2908,7	1605	217,2
-40	10321	5370	440,2
-50	47992	23393,1	1014,4
-54	97255,6	46098,7	1478,5
-55	117114,1	55115,5	1631,4
-60	314955,4	142865,4	2743,7

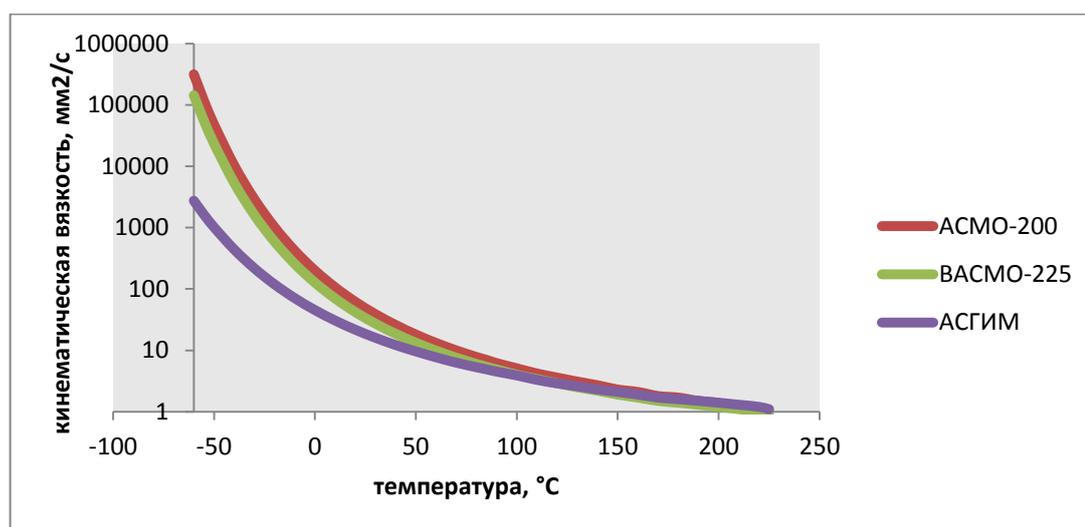


Рисунок 4.4 – Зависимость вязкости новых масел от температуры

Адекватность применения формул 2.5 – 2.7 для расчета вязкостно-температурных характеристик новых масел проверялась в сравнении с экспериментально полученными значениями (см. таблицу 4.16).

Таблица 4.16 – Проверка расчетных значений вязкости новых масел

Т, °С	АСМО-200			ВАСМО-225			АСГИМ		
	Эксп., мм ² /с	Расч., мм ² /с	Погр., %	Эксп., мм ² /с	Расч., мм ² /с	Погр., %	Эксп., мм ² /с	Расч., мм ² /с	Погр., %
150	-	-	-	-	-	-	2,2	2,1	4,7
80	8,00	7,8	2,3	6,2	6,03	2,8	-	-	-
50	-	-	-	-	-	-	9	9,6	-6,6
40	26,2	26,0	1,3	19,2	18,6	3,3	11,12	12,23	-10
0	198	200,1	-1,0	126	127	-0,9	-	-	-
-50	-	-	-	-	-	-	1098	1014	7,6
-60	-	-	-	-	-	-	3591	2743	23,6

Точность расчетных значений вязкости для смазочных масел выше, чем для гидравлического. Это вызвано, по-видимому, отсутствием в составе масел загущающей присадки, изменяющей ВТХ масел.

Расчетные значения вязкости масел АСМО-200 и АСГИМ совпадают со значениями вязкости их аналогов: масел Б-3В и АМГ-10, что позволяет с большой уверенностью предположить возможность применения новых масел узлах современных изделий авиатехники.

Вязкость масла ВАСМО-225 выше в сравнении с маслами ИПМ-10 и ВНИИ НП 50-1-4У. Допустимая температура запуска авиационных двигателей с применением масла ВАСМО-225 может быть повышена в сравнении с маслами ИПМ-10 и ВНИИ НП 50-1-4У.

Рассчитанные значения вязкости масел АСМО-200, ВАСМО-225 и АСГИМ, а также формула Вальтера могут быть использованы при разработке рекомендаций к применению новых масел и инженерных расчетах элементов маслосистем перспективных ЛА.

4.5. Результаты исследования вспениваемости новых масел на электроприводной демонстрационной системе смазки ГТД

Для исследования влияния пенообразующих свойств новых масел АСМО-200, ВАСМО-225 и АСГИМ на характеристики электроприводной маслосистемы перспективных ГТД были проведены исследования на ДЭСС. За образец сравнения было принято масло минеральное МС-8П.

Испытания были проведены автором по следующей методике. В течение одного цикла работ сначала включался электропривод откачивающих насосов для опорожнения масляной полости и в нее подавался воздух. Затем включался электропривод нагнетающего насоса и запускался электропривод ротора подшипников масляной полости. После выхода системы смазки на заданный режим производили регистрацию параметров и запись на видеокамеру картины течения потока в трубопроводах на входе и выходе откачивающего насоса.

Исследования характеристик ДЭСС проводили в условиях трехкратного изменения подачи масел нагнетающим насосом и изменения отношения подачи откачивающего насоса к подаче нагнетающего от 2 до 4. Частота вращения ротора подшипников масляной полости изменялась в диапазоне 4000... 12 000 мин⁻¹. Газосодержание приводило к возбуждению полигармонических колебаний параметров системы (давления, газосодержания и др.), повышению мощности насосов до критических значений и отключению их электроприводов (см. рисунок 4.5).

Переходные процессы в ДЭСС установлены при работе на режиме с постоянной частотой вращения насосов и подшипников в течение 18 мин. На установившийся по гидравлическим и тепловым параметрам режим система выходит примерно через 80 с. Значения гидравлических характеристик на второй минуте процесса следующие: подача нагнетающим насосом $Q_p = 17,5$ л/мин и давление за нагнетающим насосом $P_p = 4,2$ бар.

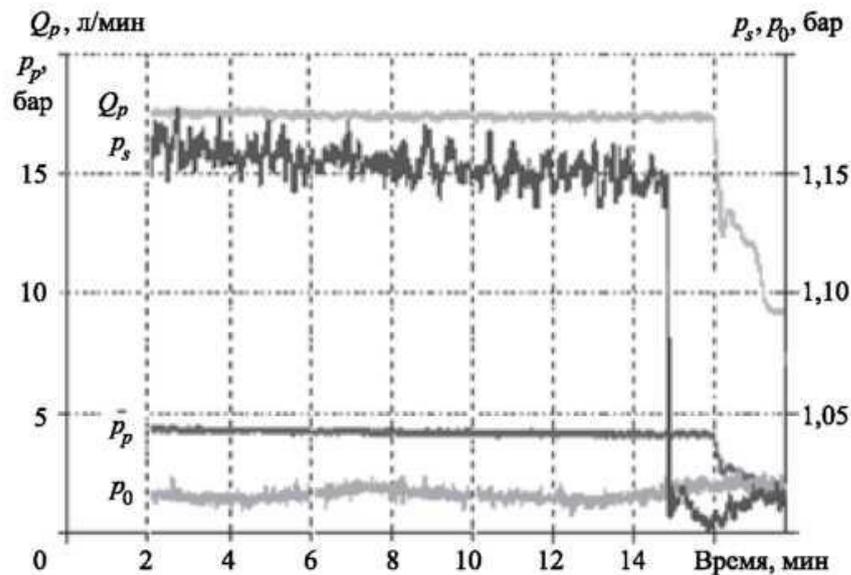


Рисунок 4.5 – Переходные процессы в ДЭСС на режиме с постоянной частотой вращения насосов

Начиная с пятой минуты, при постоянной величине объемной подачи нагнетающего насоса Q_p имеет место плавное снижение давления за нагнетающим (P_p) и откачивающим (P_s) насосами. После 15,5 мин работы происходит резкое (за 0,5 с) падение давления P_s за откачивающим насосом до уровня давления P_0 в масляной полости. Падение давления P_s обусловлено отключением электропривода насоса из-за превышения допустимой величины тока в силовых обмотках электродвигателя.

Образование мелкодисперсной смеси в трубопроводах подтверждается также низким значением скорости звука в масловоздушной смеси. Она была определена путем анализа временных записей давления. На рисунке 4.6 в верхней части показан переходный процесс при отключении электропривода насоса, когда наблюдаются затухающие колебания на собственной частоте трубопровода 2,4 Гц из-за гидравлического удара. Длина однониточного трубопровода от маслобака до входа в насос составляет 2,5 м. Это «открыто-закрытая» акустическая система, для которой собственная частота колебаний равна $\nu = a/4L$ (a — скорость звука в смеси, L — длина трубопровода). Тогда для частоты колебаний 2,4 Гц скорость звука в смеси равна $2,4 \times 4 \times 2,5 = 24$ м/с. Такая низкая скорость звука может

реализоваться в мелкодисперсной двухфазной смеси, которая имеет характеристики гомогенной среды [108]. Соответствующая этой скорости звука величина объемного газосодержания равна 0,55.

На рисунке 4.6 также приведена зависимость скорости звука в гомогенной двухфазной смеси от объемного газосодержания и показана экспериментальная точка для условий работы ДЭСС.

В системах смазки авиационных ГТД обычно используются шестеренные (объемного типа) насосы. При этом величина расхода смеси в гидравлической сети определена расходной характеристикой насоса $Q_p = f(n_p)$, где Q_p объемный расход на выходе (входе) насоса, n_p — частота вращения вала насоса. Она выбирается из условия обеспечения требуемой прокачки масловоздушной смеси при расчетном газосодержании α_p на заданной частоте вращения насоса. На другой частоте вращения n_p величина Q_p будет другой в соответствии с расходной характеристикой. Эта специфика работы насоса обусловлена его конструкцией, в которой шестеренная пара насоса прокачивает с входа на выход объем, равный объему межзубовых впадин шестерен в зоне всасывания.

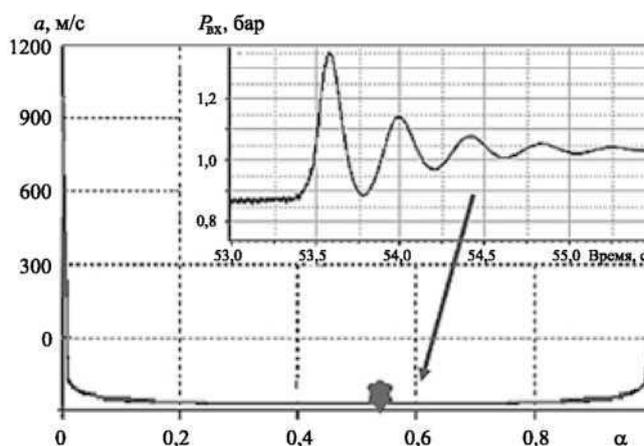


Рисунок 4.6 – Зависимость скорости звука a в масловоздушной смеси от истинного объемного газосодержания α

В случае, когда истинное объемное газосодержание выше расчетного значения ($\alpha_n > \alpha_p$) происходит возбуждение пульсирующего течения, которое

снижает эффективность работы системы суфлирования, и в окружающую среду начинает поступать масловоздушная смесь. При работе авиационных ГТД это приводит к их дымлению.

Одной из причин образования смеси с большим объемным газосодержанием может быть повышенная вспениваемость масла.

Сравнение характеристик ДЭСС при работе на новых маслах показало, что на 23...40 % уменьшился размах колебаний давлений, в спектре давлений p_s произошел сдвиг гармоник из области частот 110 Гц в область 80 Гц, а также снизилась потребляемая насосом мощность при работе на дисперсной смеси.

Влияние пеногасящей присадки ПМС-200А на экспериментальные спектры давления на выходе из масляной полости $p_{м.н}$ приведены на рисунке 4.7.

Улучшение состояния потока в виде снижения амплитуд колебаний свидетельствует об увеличении количества мелких пузырьков в маслах. Так как характерные частоты в области 80...110 Гц обусловлены массой жидкой фазы, участвующей в формировании периода колебаний, то при их импульсном характере уменьшение размера пузырьков приводит к увеличению текущего значения массы и, следовательно, снижению частот колебаний.

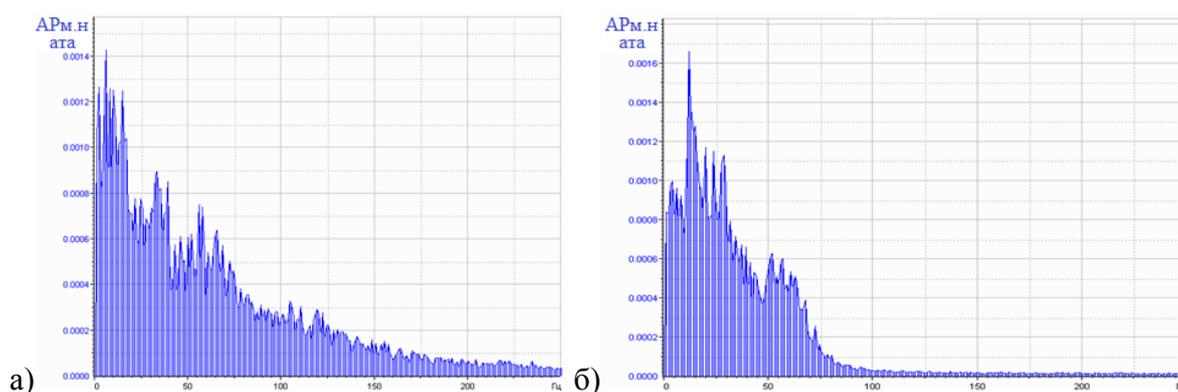


Рисунок 4.7 – Временные записи и спектры давления на выходе из масляной полости: а) без пеногасящей присадки, б) с пеногасящей присадкой

Влияние масел, содержащих пеногасящую присадку, на мощность насоса иллюстрирует рисунок 4.8, на котором показано изменение мощности

электропривода насоса в зависимости от коэффициента K_p — отношения расхода среды из масляной полости к расходу в полость. При испытаниях изменение K_p проводилось путем увеличения частоты вращения откачивающего насоса при постоянной частоте нагнетающего. При такой процедуре с увеличением K_p повышается объемное газосодержание рабочей среды на входе в откачивающий насос, что и приводит к увеличению потребляемой им мощности. Как видно из рисунка 4.3, новые масла обеспечивают пониженную мощность откачивающего насоса. Эффект уменьшается при увеличении объемного газосодержания смеси (увеличении K_p), и при $K_p = 4$ исчезает, что подтверждается фактом отключения электропривода. Рабочая область изменения K_p в ГТД находится в диапазоне 2...3, и здесь эффективность новых масел существенная. При $K_p = 2$ потребляемая насосом мощность уменьшается более, чем в 2 раза.

Таким образом, испытания ДЭСС при работе шестеренных насосов на постоянной частоте вращения показали, что применение новых масел АСМО-200 и ВАСМО-225 обеспечивает снижение газонасыщения масла в системе смазки. Предотвращение работы насоса в режиме запираания обеспечивает прокачку масловоздушной смеси с входа на выход насоса в полном объеме, что приводит к полному отделению воздуха из масло-воздушной смеси в системе суфлирования и предотвращению «дымления» авиационных ГТД.

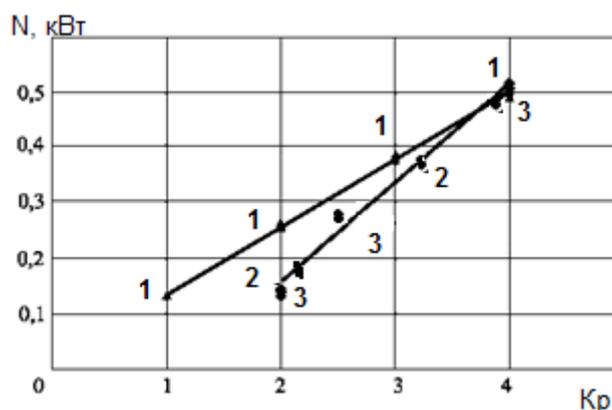


Рисунок 4.8 – Влияние присадки на мощность насоса

1 – МС-8П, 2- АСМО-200, 3 – ВАСМО-225

Стендовые испытания демонстрационной электроприводной системы смазки на маслах АСМО-200 и ВАСМО-225, содержащих пеногасящую присадку, показали, что новые масла позволяют уменьшить потребляемую насосами мощность и улучшить характеристики системы смазки.

4.6. Результаты исследования работоспособности опытных образцов новых масел на редукторном стенде Ш-3

Для оценки работоспособности новых масел АСМО-200, ВАСМО-225 и АСГИМ в условиях, приближенных к реальным, были проведены испытания на модернизированном редукторном стенде Ш-3.

Программа испытания выбиралась, исходя из области применения каждого масла. Температура испытания соответствует максимальной рабочей температуре.

Масло АСМО-200 предназначено для смазки ТРДД, ТВД, а также ГТД и редукторов вертолетов. Унифицированные масла испытывались автором на стенде Ш-3 в режиме КПА ТРД, а также ТВД и редукторов вертолетов. Масло ВАСМО-225 предназначено для ТРДД и ТРД. Такие масла испытывались автором только в режиме КПА ТРД. Масло АСГИМ было испытано автором на стенде Ш-3 в режиме КПА ТРД при своей максимальной рабочей температуре. Для масла АСГИМ максимальная рабочая температура составляет 125 °С.

Остальные рабочие параметры стенда Ш-3 приведены в таблице 4.16.

Регистрация параметров стенда проводилась каждые 15 минут. Значения температур масел усреднены и приведены в таблице 4.17.

Согласно методу оценки работоспособности масел на редукторном стенде Ш-3, потеря массы малой шестерни не должна превышать 60 мг, среднее арифметическое отклонение профиля не должно превышать 0,63 мкм, а наибольшая высота неровностей не должна превышать 10,0 мкм.

Таблица 4.16 – Рабочие параметры стенда Ш-3

	Режим ТРД	Режим ТВД и редукторов вертолетов
продолжительность испытания, час	50	50
количество испытаний	1	1
крутящий момент на валу ведущего зубчатого колеса, кГс.м: - при приработке - на режимных этапах	2,5 (2 часа) 5,5 Нм	2,5 (1 час) 5,5 (1 час) 8,0 Нм
материал шестерен	Ст. 12Х2НВФА	Ст. 12Х2Н4А
прокачка масла, л/мин	2÷2,2	2÷2,2
температура масла на входе в зацепление: - на режимных этапах, °С - при приработке, °С	200±5/ 225±5/125±5 150±5/150±5/70±5	85±5 85±5

Таблица 4.17 – Средние температуры масел при испытании на стенде Ш-3

Масло	на входе в зацепление	в маслобаке	на выходе из теплообменника
АСМО-200	200	164	205
	85	80	86
ВАСМО-225	224	180	230
АСГИМ	125	98	128

Данные по состоянию поверхностей рабочих шестерен после испытания масла АСМО-200 на редукторном стенде Ш-3 представлены в таблице 4.18.

Таблица 4.18 – Состояние рабочих поверхностей зубьев шестерен после испытаний масла АСМО-200 на стенде Ш-3

Режим	Состояние рабочих поверхностей зубьев шестерен			Инструментальная оценка износа		
	Головка	Ножка	Зона делительной окружности	ΔG, мг	Ra, мкм	Rmax, мкм
КПА ТРД (200 °С)	Шлифовальная сетка просматривается, мелкие риски	Шлифовальная сетка сохранилась	Шлифовальная сетка сохранилась, мелкие риски	3,5	0,06	0,71
ГТД и ред. верт. (85 °С)	Шлифовальная сетка сохранилась, мелкие риски	Шлифовальная сетка сохранилась	Шлифовальная сетка сохранилась, мелкие риски	5,9	0,07	0,42

Рабочие поверхности шестерен после испытаний в режимах КПА ТРД, а также ГТД и редукторов вертолетов находятся в хорошем состоянии, потеря массы шестерен (износ) незначительна. На фильтрах тонкой очистки масла отложения отсутствуют после обоих испытаний.

Из представленных в таблице 4.19 данных автора по физико-химическим свойствам масла после испытаний на редукторном стенде Ш-3 следует, что вязкость и кислотное число масла АСМО-200 в ходе испытаний на стенде Ш-3 изменились незначительно, количество осадков, нерастворимых в изооктане, составило 0,07% и 0,06%, соответственно.

Таблица 4.19 – Изменение физико-химических свойств масла АСМО-200 после испытаний на стенде Ш-3

Показатель	До испытания	После испытания	
		КПА ТРД	ТВД и ред. верт.
Вязкость при 100°С, мм ² /с,	5,1	5,5	5,14
Кислотное число, мг КОН/г	0,08	0,66	0,34
Осадок, % (не раствор. в изооктане)	-	0,07	0,06

В таблицах 4.20 и 4.21 приведены результаты оценки воздействия масла АСМО-200 на уплотнительные и конструкционные материалы в объеме и паровой фазе.

Таблица 4.20 – Воздействие масла АСМО-200 на уплотнительные резины

Марка масла	Объём		Пары	
	АСМО-200	ЛЗ-240	АСМО-200	ЛЗ-240
Коэффициент изменения предела прочности				
ИРП 1287	0,63	0,65	0,77	0,79
ИРП 1316	0,68	0,71	0,77	0,81
51-1434	0,47	0,48	1,04	1,07
Изменение остаточной деформации сжатия, %				
ИРП 1287	55,6	55	66,99	66,27
ИРП 1316	58,2	58,1	64,66	64,55
51-1434	66,4	66,1	130,19	129,60
Изменение массы, %				
ИРП 1287	7,65	7,94	5,35	5,42
ИРП 1316	6,23	6,67	4,36	4,59
51-1434	13,96	14,28	9,76	9,78

Таблица 4.21 – Воздействие масла АСМО-200 на конструкционные материалы

	ЛЗ-240	АСМО-200	ЛЗ-240	АСМО-200
	Объем		Пары	
МЛ-10	0,9	1,04	0,96	1,10
Сталь оксидно-фосфатированная	0,36	0,41	0,83	0,94
Сталь оцинкованная	0,26	0,30	0,17	0,2
Бронза БрАЖН 10-4-4	0,4	0,46	0,32	0,37
Латунь ЛС 59	0,5	0,58	0,56	0,66
Медь М1	2,7	3,1	0,52	0,60

Результаты испытания масла АСМО-200 на редукторном стенде показали следующее.

Трибологические характеристики масла АСМО-200 удовлетворяют нормам метода в режимах КПА ТРД, а также ТВД и редуктора вертолетов.

Значения показателей термоокислительной стабильности масла АСМО-200, полученные после испытания на стенде, находятся на уровне значений, полученных после окисления в лабораторных условиях по ГОСТ 23797.

По коррозионной агрессивности и воздействию на уплотнительные резины масло АСМО-200 находится на уровне штатного масла ЛЗ-240.

Масло АСМО-200 выдержало испытания по квалификационному методу на редукторном стенде Ш-3 в режиме ТРД (при 200°С), и в режиме ТВД и редукторов вертолетов (при 85°С).

Данные по состоянию поверхностей рабочих шестерен после испытания масла ВАСМО-225 на редукторном стенде Ш-3 представлены в таблице 4.22.

Рабочие поверхности шестерен после испытания в режиме ТРД находятся в хорошем состоянии, потеря массы шестерен (износ) незначительна. На фильтрах тонкой очистки масла отложения отсутствуют.

Таблица 4.22 – Состояние рабочих поверхностей зубьев шестерен после испытания образца масла ВАСМО-225 на стенде Ш-3

Режим	Состояние рабочих поверхностей зубьев шестерен			Инструментальная оценка износа		
	Головка	Ножка	Зона делительной окружности	ΔG , мг ¹⁾	Ra, мкм ²⁾	Rmax мкм ³⁾
ТРД (225 °С)	Мелкие риски Шлифовальная сетка просматривается	Шлифовальная сетка сохранилась	Мелкие риски	4,6	0,37	1,98

Из представленных в табл. 4.23 данных по свойствам масла после испытаний на редукторной установке Ш-3 следует, что вязкость масла ВАСМО-225 в ходе испытаний на стенде Ш-3 изменилась незначительно, количество осадков, нерастворимых в изооктане, составило 0,01%, и кислотное число возросло со значения 0,04 до 1,27 мг КОН/г.

Таблица 4.23 – Изменение физико-химических свойств масла ВАСМО-225

Показатель	До испытания	После испытания N 329-1
Вязкость при 100 °С, мм ² /с,	4,03	4,68
Кислотное число, мг КОН/г	0,04	1,27
Осадок, % (не раствор. в изооктане)	-	0,01

В таблицах 4.24 и 4.25 приведены результаты оценки воздействия масла ВАСМО-225 на уплотнительные и конструкционные материалы в объеме и паровой фазе.

Результаты испытания масла ВАСМО-225 на редукторном стенде показали следующее.

Трибологические характеристики масла ВАСМО-225 удовлетворяют нормам метода в режиме КПА ТРД при температуре 225 °С.

Значения показателей термоокислительной стабильности масла ВАСМО-225 полученные после испытания на стенде находятся на уровне значений, полученных после окисления в лабораторных условиях по ГОСТ 23797.

По коррозионной агрессивности и воздействию на уплотнительные резины масло ВАСМО-225 находится на уровне штатного масла ВНИИ НП 50-1-4У.

Таблица 4.24 – Воздействие масла ВАСМО-225 на уплотнительные резины

Марка масла	Объём		Пары	
	ВНИИ НП 50-1-4У	ВАСМО- 225	ВНИИ НП 50- 1-4У	ВАСМО-225
Коэффициент изменения предела прочности				
ИРП 1287	1,05	0,75	1,28	0,92
ИРП 1316	0,67	0,82	0,76	0,93
51-1434	0,49	0,25	1,09	0,56
Изменение остаточной деформации сжатия, %				
ИРП 1287	42,49	21,43	51,19	25,82
ИРП 1316	68,97	26,32	76,63	29,24
51-1434	56,29	20,12	110,37	39,45
Изменение массы, %				
ИРП 1287	2,52	5,95	1,77	4,24
ИРП 1316	4,06	5,15	2,91	5,31
51-1434	13,26	4,83	9,34	4,53

Таблица 4.25 – Воздействие масла ВАСМО-225 на конструкционные материалы

	Объём		Пары	
	ВНИИ НП 50-1-4у	ВАСМО-225	ВНИИ НП 50-1-4у	ВАСМО-225
МЛ-10	1,8	1,5	1,5	1,6
Сталь оксидно-фосфатированная	0,77	0,52	1,4	1,2
Сталь оцинкованная	0,70	0,63	0,65	0,42
Бронза БрАЖН 10-4-4	0,3	0,26	0,42	0,21
Латунь ЛС 59	0,45	0,36	0,68	0,41
Медь М1	0,65	0,51	0,25	0,1

Масло ВАСМО-225 выдержало испытания по квалификационному методу на редукторном стенде Ш-3 в режиме КПА ТРД (при 225 °С).

Данные по состоянию поверхностей рабочих шестерен после испытания масла АСГИМ на редукторном стенде Ш-3 представлены в таблице 4.26.

Рабочие поверхности шестерен после испытания в режиме ТРД (при 125 °С) находятся в хорошем состоянии, потеря массы шестерен (износ) незначительна. На фильтрах тонкой очистки масла отложения отсутствуют.

Таблица 4.26 – Состояние рабочих поверхностей зубьев шестерен после испытания образца масла АСГИМ на стенде Ш-3

N исп.	Состояние рабочих поверхностей зубьев шестерен			Инструментальная оценка износа		
	Головка	Ножка	Зона делительной окружности	ΔG ,	Ra,	Rmax
КПА ТРД (125 °С)	Мелкие риски Шлифовальная сетка просматривается	Шлифовальная сетка сохранилась	Мелкие риски	4,6	0,37	1,98

Из представленных в таблице 4.27 данных по свойствам масла после испытаний на редукторном стенде Ш-3 следует, что вязкость масла АСГИМ в ходе испытаний на стенде Ш-3 изменилась незначительно, количество осадков, нерастворимых в изооктане, составило 0,01%, и кислотное число возросло со значения 0,04 до 1,27 мг КОН/г.

Таблица 4.27 – Изменение физико-химических свойств образца масла АСГИМ

Показатель	До испытания	После испытания N 329-1
Вязкость при 100°С, мм ² /с,	4,03	4,68
Кислотное число, мг КОН/г	0,04	1,27
Осадок, % (не раствор. в изооктане)	-	0,01

В таблицах 4.28 и 4.29 приведены результаты оценки воздействия масла АСГИМ на уплотнительные и конструкционные материалы в объёме и паровой фазе.

Таблица 4.28 – Воздействие масла АСГИМ на уплотнительные резины

Марка масла	Объём		Пары	
	АСГИМ	АМГ-10	АСГИМ	АМГ-10
Коэффициент изменения предела прочности				
ИРП 1287	0,72	0,80	0,88	0,91
ИРП 1316	0,67	0,71	0,76	0,79
51-1434	0,56	0,66	1,24	1,29
Изменение остаточной деформации сжатия, %				
ИРП 1287	57	55,12	68,67	66,51
ИРП 1316	51,92	47,34	57,68	51,33
51-1434	49,86	45,25	97,76	93,65
Изменение массы, %				
ИРП 1287	1,41	1,23	0,98	0,87
ИРП 1316	0,20	0,15	0,14	0,05
51-1434	1,05	0,98	0,73	0,66

Таблица 4.29 – Воздействие масла АСГИМ на конструкционные материалы

	Объём		Пары	
	АСГИМ	АМГ-10	АСГИМ	АМГ-10
МЛ-10	0,1	0,1	0,01	0,05
Сталь оксидно-фосфатированная	0,15	0,2	0,03	0,05
Сталь оцинкованная	0,11	0,15	0,06	0,1
Бронза БрАЖН 10-4-4	0,16	0,15	0,09	0,1
Латунь ЛС 59	0,01	0,05	0	0
Медь М1	0,1	0,1	0	0

Результаты испытания масла АСГИМ на редукторном стенде показали следующее.

Трибологические характеристики масла АСГИМ удовлетворяют нормам метода в режиме КПА ТРД при температуре 125 °С.

Значения показателей термоокислительной стабильности масла АСГИМ полученные после испытания на стенде, находятся на уровне значений, полученных после окисления в лабораторных условиях по ГОСТ 23797.

По коррозионной агрессивности и воздействию на уплотнительные резины масло АСГИМ уступает штатному маслу АМГ-10, что объясняется наличием моноэфира в его составе.

Масло АСГИМ выдержало испытания по квалификационному методу на редукторном стенде Ш-3 в режиме КПА ТРД (при 125 °С).

Новые масла удовлетворяют требованиям норм метода оценки работоспособности масел на редукторном стенде Ш-3 по массе износа и шероховатости контактных поверхностей зубьев шестерен. Изменение вязкости и кислотного числа, а также количество образовавшегося осадка масел после окисления в условиях работы стенда Ш-3 не превышает изменения свойств при окислении по ГОСТ 23797. Коррозионная агрессивность и воздействие на уплотнительные материалы масел не выше, чем их штатных аналогов.

По результатам комплексной оценки качества новых масел на стенде Ш-3, можно сделать заключение о работоспособности масел АСМО-200 в условиях ГТД при 200 °С и редукторов вертолетов при 85°С, ВАСМО-225 в условиях КПА

ТРД при 225°C и АСГИМ по программе испытаний, адаптированной к условиям работы масел в гидравлических системах ЛА при 125°C.

4.7. Разработка рекомендаций к применению новых масел в изделиях авиатехники

Рекомендации по допуску масел к дальнейшим этапам приёмочных испытаний разработаны по результатам лабораторно-стендовых исследований физико-химических и эксплуатационных свойств новых масел.

1. Полученные данные по физико-химическим и эксплуатационным свойствам унифицированного синтетического масла АСМО-200 показали следующее.

1.1. Опытный образец масла АСМО-200 (СТО 07548712-001-2010) по проверенным физико-химическим и эксплуатационным свойствам стандартными методами отвечает нормам «Технических требований к унифицированному авиационному синтетическому маслу на основе сложных эфиров для ГТД и редукторов вертолетов» и СТО 07548712-001-2010 на масло.

1.2. Данные по эксплуатационным свойствам опытного образца масла АСМО-200 полученные квалификационными методами исследования в объёме программы испытаний, включая определение работоспособности масла на модернизированном редукторном стенде Ш-3, исследование коррозионной агрессивности, воздействие масла на уплотнительные резины, испытание на установке УКМ-1М, а также исследование пенообразующих свойств в лабораторных условиях на модернизированной установке и на электроприводной демонстрационной системе смазки показывают, что масла АСМО-200 удовлетворяет техническим требованиям и нормам методов [120].

1.3. На совещании профильной рабочей группы экспертного совета, проведенном в 2012г. (протокол совещания № ЛА-14/18, Минпромторг), по представленным материалам решено разработать программу внедрения масла

АСМО-200, включающую проведение испытаний в составе изделий на стендах и контрольно-лётной эксплуатации. По результатам этих испытаний включить масло АСМО-200 в РЭ ЛА.

1.4. На основании разработанных автором рекомендаций к допуску на изделиях авиатехники, результатов стендовых испытаний на серийном двигателе ВК-2500 и лётных испытаний выпущены бюллетени (см. Приложения Б,В и Г) для уточнения руководства по технической эксплуатации (РЭ) двигателей ТВЗ-117 и ВК-2500 всех модификаций, а также главных редукторов ВР-14 и ВР-24 в части применения масла АСМО-200.

2. На основании проведенных исследований образца опытно-промышленной партии масла ВАСМО-225 (СТО 07548712-002-2010) можно сделать следующие выводы:

2.1. Опытный образец масла ВАСМО-225 по проверенным физико-химическим и эксплуатационным свойствам стандартными методами отвечает требованиям СТО 07548712-002-2010 на масло.

2.2. Опытный образец масла ВАСМО-225 (СТО 07548712-002-2010) по проверенным эксплуатационным свойствам стандартными и квалификационными методами, включая определение работоспособности масла на модернизированном редукторном стенде Ш-3, исследование коррозионной агрессивности, воздействие масла на уплотнительные резины, испытание на установке УКМ-1М, а также исследование пенообразующих свойств в лабораторных условиях на модернизированной установке и на электроприводной демонстрационной системе смазки, отвечает «Техническим требованиям к высокотемпературному авиационному синтетическому маслу, работоспособному при температурах 220-240°С в теплонапряженных ГТД» и нормам методов [121].

2.3. На совещании профильной рабочей группы экспертного совета, проведенном в 2012г. (протокол совещания № ЛА-14/18, Минпромторг), решено разработать план мероприятий по проведению испытаний на перспективных двигателях масла ВАСМО-225 с целью его дальнейшего внедрения в эксплуатацию.

3. В результате проведенных квалификационных испытаний образца авиационного синтетического гидравлического масла АСГИМ опытно-промышленной партии установлено:

3.1. Опытный образец масла АСГИМ по проверенным физико-химическим и эксплуатационным свойствам стандартными методами отвечает требованиям СТО 07548712-006-2010 на масло и «Техническим требованиям на разработку гидравлического масла на основе синтетических углеводородов для гидравлических систем гражданской и государственной авиационной техники (взамен АМГ-10)».

3.2. Опытный образец масла АСГИМ по проверенным физико-химическим и эксплуатационным свойствам квалификационными методами отвечает требованиям СТО 07548712-006-2010 на масло и нормам методов, включая определение работоспособности на модернизированном стенде Ш-3, а также исследование пенообразующих свойств в лабораторных условиях на модернизированной установке и на электроприводной демонстрационной системе смазки.

3.3. На совещании профильной рабочей группы экспертного совета, проведенном в 2012г. (протокол совещания № ЛА-14/18, Минпромторг), по представленным материалам решено организовать подконтрольную эксплуатацию авиационной техники государственной и экспериментальной авиации с применением масла АСГИМ и включить в РЭ ЛА по результатам подконтрольной эксплуатации, оценить возможность применения масла АСГИМ взамен кремнийорганической жидкости 7-50с-3.

Таким образом, образцы из опытно-промышленных партий масел АСМО-200, ВАСМО-225 и АСГИМ выдержали квалификационные испытания с положительными результатами и были рекомендованы к применению на отечественной авиатехнике в установленном порядке [122].

4.8. Результаты сравнения уровня физико-химических и эксплуатационных свойств новых масел

Для оценки качества новых масел была применена система оценки в баллах ГСМ. Сравнению подлежали основные физико-химические и эксплуатационные свойства новых масел. В их числе – термическая и термоокислительная стабильность, вязкостно-температурные свойства, трибологические характеристики, а также совместимость с конструкционными и уплотнительными материалами.

Каждая группа свойств оценивалась показателями качества, включенными в объём квалификационных испытаний. Для их определения применялись на практике методы исследования.

Результаты оценки качества новых масел, полученных автором, представлены в виде диаграммы (см. рисунок 4.9)

Диаграмма (в баллах) наглядно показала преимущество унифицированного масла АСМО-200 по трибологическим характеристикам и термоокислительной стабильности в сравнении с остальными маслами и маслами II поколения. Совместимость масла АСМО-200 с конструкционными и уплотнительными материалами сопоставима со штатными маслами на основе полиэфиров. Вязкостно-температурные свойства масла АСМО-200 сопоставимы со штатными маслами и ниже масел ВАСМО-225 и АСГИМ.

Термоокислительная стабильность маловязкого масла ВАСМО-225 выше масел-аналогов. По трибологическим свойствам новое масло сопоставимо со штатными маслами. Совместимость с конструкционными и уплотнительными материалами масла ВАСМО-225 находится на уровне масел на основе эфира триметилпропана. Вязкостно-температурные свойства нового масла ниже, чем у российских масел аналогов.

Гидравлическое масло АСГИМ обладает большей пожаробезопасностью в сравнении со штатным маслом АМГ-10. Лучшими трибологическими свойствами и термоокислительной стабильностью. В меньшей степени совместимо с

конструкционными и уплотнительными материалами, чем масло АМГ-10 и обладает несколько худшей прокачиваемостью.

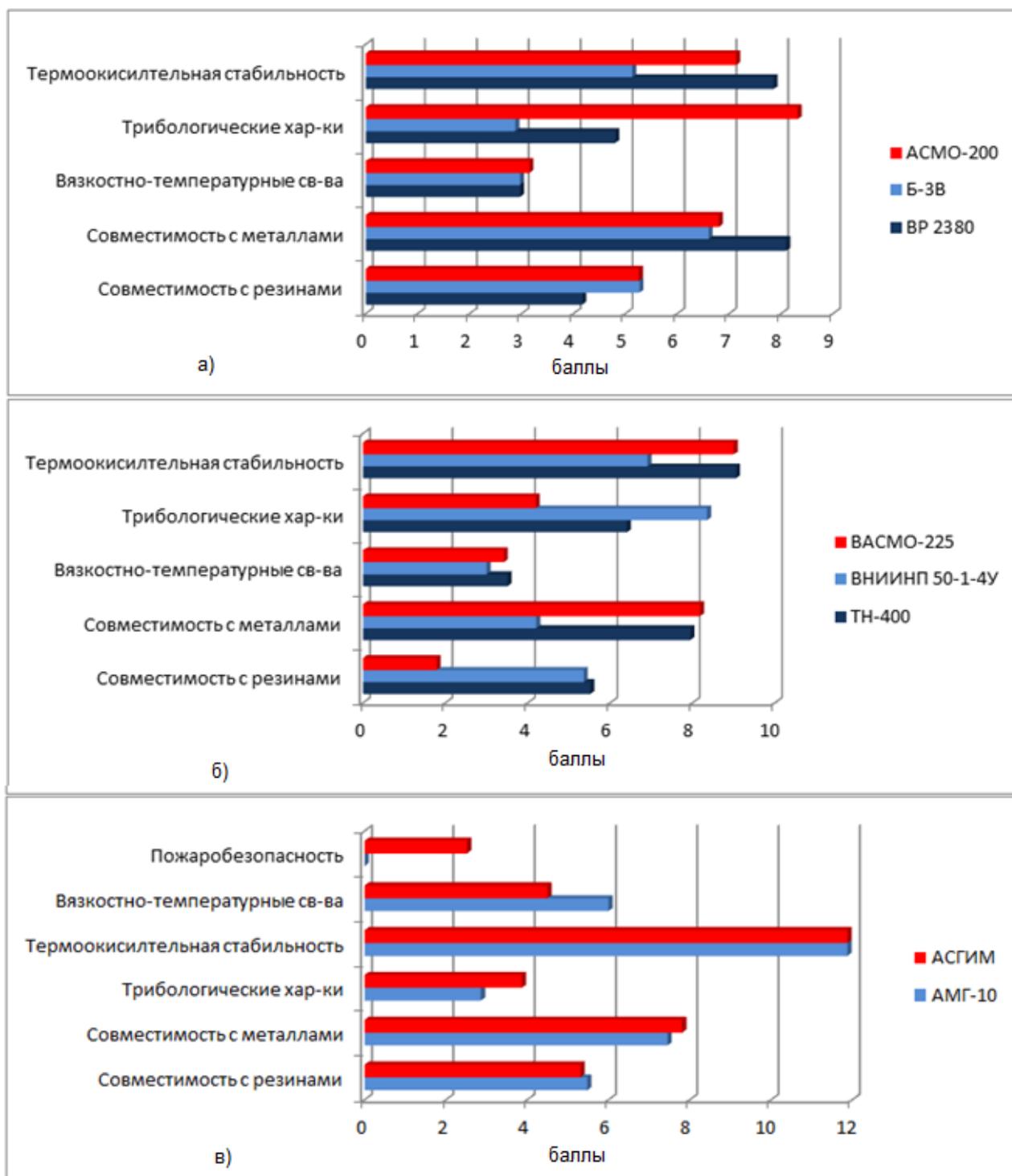


Рисунок 4.9 – Результаты сравнения уровня свойств новых масел по балльной системе

а) АСМО-200, б) ВАСМО-225, в) АСГИМ

Выводы по Главе 4

1. Получены оптимизированные составы опытных образцов новых смазочных масел для ГТД и редукторов вертолетов, теплонапряженных ТРД (ТРДД) и гидравлических систем ЛА. Образцы масел обладают минимальным значением показателя пятна износа и удовлетворяют требованиям к термоокислительной стабильности, величине температуры вспышки и вязкостно-температурным характеристикам.

2. Применение метода безусловной оптимизации позволило снизить количество и время проведения экспериментов при оптимизации композиций масел АСМО-200, ВАСМО-225 и АСГИМ в 5 раз в сравнении количеством экспериментов, определенным согласно широко используемому методу планирования эксперимента.

3. Результаты исследований физико-химических и эксплуатационных свойств новых смазочных масел показали, что унифицированное масло (АСМО-200) превосходит штатное масло Б-3В по термоокислительной стабильности при температуре 200°C по показателям качества «вязкость при температуре минус 40°C» и «кислотное число». Маловязкое масло (ВАСМО-225) превосходит по термоокислительной стабильности штатное масло ИПМ-10 и работоспособно при температуре 225°C по показателям «вязкость при температуре минус 40°C», «кислотное число» и «осадок, нерастворимый в изооктане».

4. Результаты исследований физико-химических и эксплуатационных свойств нового гидравлического масла (АСГИМ) показали, что оно превосходит штатное масло АМГ-10 по показателям «температура вспышки», «изменение вязкости при 50°C после ТОС», «показатель пятна износа», «устойчивость к механической деструкции на УЗДН» и «вспениваемости».

5. Получены значения вязкости масел АСМО-200, ВАСМО-225 и АСГИМ в интервале температур от минус 60°C до 225°C расчетным путем. Для расчета вязкости новых масел рекомендована формула Вальтера.

6. Исследована работоспособность новых масел АСМО-200, ВАСМО-225 и АСГИМ на модернизированном стенде Ш-3. Исследование включает

оценку термоокислительной стабильности, вязкостно-температурных и трибологических свойств, а также совместимости с конструкционными и уплотнительными материалами. Эти масла удовлетворяют нормам метода и не уступают своим штатным аналогам.

7. Исследованы пенообразующие свойства новых масел АСМО-200, ВАСМО-225 и АСГИМ в интервале температур 25-185°C, а также их влияние на характеристики демонстрационной электроприводной системы смазки ГТД. Показано, что новые масла позволяют снизить потребляемую насосами мощность в 2 раза и сдвинуть гармоники колебаний из области 0 – 200 Гц в область 0 – 100 Гц в сравнении с маслом МС-8П.

8. Исследование качества новых масел показывают преимущество масел АСМО-200 и ВАСМО-225 по термоокислительной стабильности в сравнении с маслами Б-3В и ВНИИ НП 50-1-4У. Масло АСГИМ превосходит по температуре вспышки и термоокислительной стабильности масло АМГ-10.

9. По результатам квалификационных исследований новые масла АСМО-200, ВАСМО-225 и АСГИМ рекомендованы к допуску на авиационной технике в установленном порядке. Масло АСМО-200 включено в руководство технической эксплуатации на двигатели ВК-2500 и ТВ3-117 всех модификаций и главные редукторы ВР-14 и ВР-24 вертолетов, масло ВАСМО-225 – на двигателях АЛ-31Ф всех серий. Масло АСГИМ – в гидравлических системах ЛА взамен масла АМГ-10.

Заключение

На основании выполненных автором исследований по разработке расчетно-экспериментального комплекса для создания смазочных и гидравлических масел нового поколения для авиационной техники можно сделать следующее заключение.

1. Разработаны новые Технические требования к термостабильным маловязким и унифицированным маслам для авиационных ГТД, а также пожаробезопасному гидравлическому маслу. Новые смазочные масла должны обладать пониженной, по сравнению с существующими маслами, склонностью к коксо- и пенообразованию. К гидравлическому маслу предъявляются повышенные требования по пожаробезопасности, по сравнению со штатным углеводородным маслом АМГ-10.

2. Разработан новый метод определения пенообразующих свойств авиационных масел, включающий специальную подготовку образца и обеспечивающий получение данных о вспениваемости масел в широком интервале температур 25-185°C.

3. Модернизирована демонстрационная электроприводная установка, в которой до и после насоса вмонтированы в трубопровод оптически прозрачные вставки. Визуализация структуры потока масло-воздушной смеси показала, что введение кремнийорганической присадки в масло снижает содержание воздуха в масло-воздушной смеси, способствует снижению мощности электроприводов насосов в 2 раза и сдвигу гармоник колебаний из области 0 – 200 Гц в область 0 – 100 Гц.

4. Усовершенствован редукторный стенд Ш-3 путем введения нового блока оценки совместимости масел с конструкционными и уплотнительными материалами. Разработана методика оценки воздействия масел на конструкционные и уплотнительные материалы на редукторном стенде Ш-3. Стенд позволяет совместно оценивать термоокислительную стабильность, трибологические характеристики и вязкостно-температурные свойства масла, а также их совместимость с конструкционными и уплотнительными материалами.

5. Усовершенствован комплекс по созданию новых авиационных смазочных и гидравлических масел, включающий оптимизатор составов опытных масел и комплекс экспериментальных методов исследования физико-химических и эксплуатационных свойств масел. Метод оптимизации составов опытных масел, основанный на современной компьютерной технологии многомерной нелинейной оптимизации, обеспечивает значительное снижение числа экспериментов, а также формирование электронной базы данных составов и соответствующего им уровня физико-химических эксплуатационных свойств. Применение комплекса позволит снизить количество экспериментальных исследований, повысить качество разрабатываемых масел, а также сформировать электронную базу данных составов и свойств опытных образцов, необходимых для авиационной промышленности.

6. Предложена новая отечественная антиокислительная присадка фенольного типа 3,5-дитретбутил-4-гидроксигидроциннамоновой кислоты, сложного алкил эфира С8 (К-135) в концентрации 0 – 2 % масс. взамен штатной фенольной присадки 2,6-диалкилфенол-п-этилалкилат (L-135) зарубежного производства. Экспериментально показана её эффективность в составе отечественных авиационных масел.

7. Предложена кремнийорганическая присадка для снижения вспениваемости новых масел. Экспериментально обоснована её концентрация в маслах, равная 0,005 % масс. Показано, что аэрация масла не влияет на триботехнические характеристики масел, определяемые на четырехшариковой машине трения по ГОСТ 9490-75. Получены новые экспериментальные данные о процессах течения масловоздушной пены лабораторными методами, а также на стенде, имитирующем электроприводную маслосистему ГТД.

8. Выбраны базовые масла и присадки, а также определены интервалы их концентраций для маловязкого масла (ВАСМО-225) для ТРДД (особые условия эксплуатации), унифицированного масла (АСМО-200) для ТРД, ТРДД, ТВД и ТВад, а также главных редукторов вертолётных, пожаробезопасного

гидравлического масла (АСГИМ) для гидравлических систем ЛА, обеспечивающие требуемый уровень эксплуатационных свойств.

9. Определены оптимальные составы новых масел унифицированного масла (АСМО-200), высокотермостабильного масла (ВАСМО-225) и гидравлического масла (АСГИМ). Масла обладают максимальными значениями противоизносной характеристики при допустимых уровнях термоокислительной стабильности.

10. Исследованы пенообразующие свойства опытных образцов масел АСМО-200, ВАСМО-225 и АСГИМ лабораторным методом в расширенном интервале температур и на модернизированной демонстрационной электроприводной системе смазки ГТД. Исследована работоспособность опытных образцов масел АСМО-200, ВАСМО-225 и АСГИМ на усовершенствованном стенде Ш-3.

11. Исследования качества новых масел показали, что масла АСМО-200 и ВАСМО-225 обладают повышенной термоокислительной стабильностью в сравнении со штатными аналогами – маслами Б-3В и ВНИИ НП 50-1-4У, соответственно. Масло АСГИМ обладает повышенной термоокислительной стабильностью и пожаробезопасностью в сравнении со штатным маслом АМГ-10. Определены вязкостно-температурные характеристики новых масел в интервале температур от минус 60 до 225°С. Для расчета вязкостно-температурных свойств новых масел рекомендована формула Вальтера. Определены значения вязкости масел АСМО-200, ВАСМО-225 и АСГИМ в интервале температур от минус 60°С до 225°С. Для расчета вязкости новых масел рекомендована формула Вальтера.

12. По результатам квалификационных исследований разработаны рекомендации по внедрению в эксплуатацию новых масел АСМО-200, ВАСМО-225 и АСГИМ. В настоящее время гидравлическое масло АСГИМ допущено к применению в гидравлических системах военной авиатехники, масло АСМО-200 допущено к эксплуатации под наблюдением и включено в РЭ на двигатели ТВЗ-117 и ВК-2500 всех модификаций, а также главные редукторы ВР-14 и ВР-24 (бюллетени №№ 200.7.0.0554.04, 200.7.0.0555.04, 200.7.0.0556.04 (см.

Приложения Г, Д, Е), масло ВАСМО-225 испытывается в составе перспективных авиационных двигателях.

Таким образом, предложен, разработан и внедрен новый метод создания смазочных и гидравлических масел оптимального состава для авиационной техники как метод принятия оптимального конструктивно-технологического решения на ранних стадиях проектирования перспективных ЛА с авиационными двигателями нового поколения.

Список сокращений и условных обозначений

- ЛА – летательный аппарат;
- ГТД – газотурбинный двигатель;
- ТВД – турбовинтовой двигатель;
- ТРД – турбореактивный двигатель;
- ТРДД – двухконтурный турбореактивный двигатель;
- ТВад – турбовальный двигатель;
- ТТ – технические требования;
- ТЗ – техническое задание;
- РЭ – руководство по эксплуатации;
- STD – standard (non-corrosion inhibiting);
- С/И – corrosion inhibiting;
- HTS – high thermal stability;
- НД – нормативная документация;
- РФ – Российская Федерация;
- ВОК – Всероссийская организация качества;
- КМКО – Комплекс методов квалификационной оценки;
- СТО – Стандарт организации;
- РД – реактивный двигатель
- ВТХ – вязкостно-температурная характеристика

Список литературы

1. Яновский, Л.С., Дубовкин, Н.Ф., Галимов, Ф.М. и др. Горюче-смазочные материалы для авиационных двигателей /Казанский государственный Технический Университет им. А.Н. Туполева, Казань, 2002. -400с.
2. Яновский, Л.С., Дубовкин, Н.Ф., Галимов, Ф.М. и др. Инженерные основы авиационной химмотологии. –Казань: Изд-во Казанск. Ун-та, 2005. -714с.
3. Яновский, Л.С., Дубовкин, Н.Ф., Дмитриенко, В.П. Основы авиационной химмотологии: учеб. Пособие – М.:МАТИ, 2005. – 680 с.
4. Резников, М.Е. Топлива и смазочные материалы для летательных аппаратов. М. Воениздат, 1973г. -232с.
5. Анисимов, И.Г., Бадышева, К.М., Бнатов, С.А. и др. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент, применение: Справочник. Под ред. В.М. Школьников. Изд. 2-е перераб. и доп. – М.: Издательский центр «Техинформ», 1999. – 596с.
6. Динцес, А.И., Дружинина, А.В. Синтетические смазочные масла.- М.: Гостоптехиздат, 1958. – 350 с.
7. Остриков, В.В., Нагорнов, С.А., Клейменов, О.А. и др. Топливо, смазочные материалы и технические жидкости: учебное пособие. – Тамбов: Изд-во Тамб. Гос. техн. Ун-та, 2008. – 304с.
8. Соболевский М.В., Музовская О.А., Попелева Г.С. Свойства и области применения кремнийорганических продуктов под общей ред. проф. М.В. Соболевского, М.: «Химия», 1975г. -296с.
9. Хаттон, Р.Е. Жидкости для гидравлических систем. Под. Ред. В.В. Вайнштока, М: Химия, 1965 - 364с.
10. Отечественные и зарубежные смазочные масла для авиационных двигателей, «Мир нефтепродуктов», №9, 2012г., с. 6-11., Яновский Л.С., Ежов В.М., Молоканов А.А., Колыбельский Д.С.
11. Методология допуска авиационных масел к применению на авиатехнике в России и за рубежом, «Двигатель», №2, 2012г., с. 20-22., Яновский Л.С., Ежов В.М., Молоканов А.А.

12. Нормативные требования к отечественным и зарубежным маслам для авиационных газотурбинных двигателей, «Вестник МАИ», №4, Том 19, 2012г., С. 81-85., Яновский Л.С., Ежов В.М., Молоканов А.А.

13. Смазочные масла для турбовальных двигателей и редукторов вертолётов, «Трение и смазка в машинах и механизмах», №1, 2012г., С. 16-20., Яновский Л.С., Ежов В.М., Молоканов А.А., Шаранина К.В., Кирсанов А.В.

14. Авиационные рабочие жидкости: проблемы и перспективы, «Мир нефтепродуктов», №2, 2013г., С. 1-16., Яновский Л.С., Шабалина Т.Н., Ежов В.М., Молоканов А.А., Колыбельский Д.С.

15. Новая пожаровзрывобезопасная авиационная отечественная рабочая жидкость, «Трение и смазка в машинах и механизмах», №6, 2013г., С. 28-31., Яновский Л.С., Ежов В.М., Молоканов А.А., Шаранина К.В., Кирсанов А.В.

16. Инновационный метод создания горючего и смазочных материалов для авиационных двигателей, «Трение и смазка в машинах и механизмах», №8, 2014г., С. 30-34., Яновский Л.С., Разносчиков В.В., Ежов В.М., Молоканов А.А., Шаранина К.В., Бырдина А.А., Колыбельский Д.С.

17. Пенообразующие свойства отечественных и зарубежных смазочных масел для авиационных газотурбинных двигателей, «Трение и смазка в машинах и механизмах», №4, 2015г., С. 33-38., Бабкин В.И., Яновский Л.С., Ежов В.М., Молоканов А.А., Шаранина К.В., Бакулин Е.К.

18. Влияние вспениваемости масел на характеристики электроприводной системы смазки авиационных ГТД самолётов нового поколения, «Трение и смазка в машинах и механизмах», №8, 2015г., С. 43-48., Яновский Л.С., Гулиенко А.И., Ежов В.М., Молоканов А.А., Шаранина К.В., Щуровский Ю.М.

19. Исследование вязкостно-температурных характеристик синтетических масел для авиационных ГТД, «Новые решения и технологии в газотурбостроении». Москва 26-28 мая 2015г. Сборник тезисов докладов. – М.: ЦИАМ, 2015. – 363 с., Бакулин Е.К., Ежов В.М., Молоканов А.А.

20. Новые синтетические гидравлические масла для авиационной техники, «Новые решения и технологии в газотурбостроении». Москва 26-28 мая 2015г.

Сборник тезисов докладов. – М.: ЦИАМ, 2015. – 363 с., Яновский Л.С., Ежов В.М., Молоканов А.А., Шаранина К.В.

21. Исследование влияния вспениваемости и аэрации на трибологические характеристики авиационных масел, «Новые решения и технологии в газотурбостроении». Москва 26-28 мая 2015г. Сборник тезисов докладов. – М.: ЦИАМ, 2015. – 363 с., Бакулин Е.К., Ежов В.М., Молоканов А.А., Шаранина К.В.

22. Новые синтетические смазочные материалы для авиационной техники, «Новые решения и технологии в газотурбостроении». Москва 26-28 мая 2015г. Сборник тезисов докладов. – М.: ЦИАМ, 2015. – 363 с., Яновский Л.С., Ежов В.М., Молоканов А.А., Шаранина К.В.

23. Исследование вспениваемости отечественных и зарубежных смазочных масел для авиационных ГТД, «Новые решения и технологии в газотурбостроении». Москва 26-28 мая 2015г. Сборник тезисов докладов. – М.: ЦИАМ, 2015. – 363 с., Яновский Л.С., Ежов В.М., Молоканов А.А., Шаранина К.В., Бакулин Е.К.

24. Влияние вспениваемости масел на характеристики электроприводной системы смазки авиационных ГТД «электрических» летательных аппаратов, VIII международный аэрокосмический конгресс IAC`2015. Москва 28-31 августа 2015 г. Тезисы докладов. М.:АИР – 432 с., Яновский Л.С., Гулиенко А.И., Ежов В.М., Молоканов А.А., Шаранина К.В., Щуровский Ю.М.

25. Новые синтетические смазочные масла для авиационных двигателей, VIII международный аэрокосмический конгресс IAC`2015. Москва 28-31 августа 2015 г. Тезисы докладов. М.:АИР – 432 с., Яновский Л.С., Ежов В.М., Молоканов А.А., Шаранина К.В.

26. Новые синтетические смазочные материалы для авиационной техники, Всероссийская научно-техническая конференция «Авиадвигатели XXI века». Москва 24-27 ноября 2015 г. Сборник тезисов докладов. – М.: ЦИАМ, 2015 – 1133 с., Яновский Л.С., Ежов В.М., Молоканов А.А., Шаранина К.В., Хурумова А.Ф.

27. Влияние вспениваемости масел на характеристики системы смазки авиационных ГТД, Всероссийская научно-техническая конференция

«Авиадвигатели XXI века». Москва 24-27 ноября 2015 г. Сборник тезисов докладов. – М.: ЦИАМ, 2015 – 1133 с., Яновский Л.С., Гулиенко А.И., Ежов В.М., Молоканов А.А., Шаранина К.В., Щуровский Ю.М.

28. Guillermo Centeno, Gabriela Sánchez-Reyna, Jorge Ancheyta, José A.D. Muñoz, Nayeli Cardona. Testing Various Mixing Rules for Calculation of Viscosity of Petroleum Blends // Fuel. – 2011. – №9.

29. Долматов, Л.В., Кутуков, Е.Г., Кутуков, И.Е.. Адекватность математических моделей для расчета вязкости смесей жидких нефтепродуктов // Химия и технология топлив и масел. – 2001. – №3. – С. 43-45.

30. ГОСТ 23797-79 Масла для авиационных двигателей. Метод определения термоокислительной стабильности в объеме масла. – М.: Калужская типография стандартов, 2001. – 7с.

31. Яновский Л.С., Хурумова А.Ф., Алексагин А.А. Патент WO 2012064232 A2 Смазочная композиция универсального синтетического масла, работоспособного в газотурбинных двигателях и редукторах вертолетов, а также турбовинтовых двигателях и турбовинтовентиляторных двигателях самолетов, 2012.

32. Хурумова А.Ф., Алексагин А.А., Ковба Л.В., Патент WO 2012064231 A2 Смазочная композиция синтетического гидравлического масла с повышенной пожаробезопасностью для авиационной техники, 2012.

33. Гришин, Н.Н., Гутенев, Б.С., Лашхи, В.Л. и др. Порядок допуска к производству и применению в РФ топлив, масел, смазок и специальных жидкостей. –М.:25ГосНИИ МО РФ, 1999. -80с.

34. Яновский, Л.С., Варламова, Н.И., Ежов, В.М. Перечень горюче-смазочных материалов, рекомендованных к применению на авиатехнике отечественного производства. (8-е издание) РТМ Ц2-2009. Москва. 2009. -17с.

35. Яновский, Л.С., Харин, А.А., Киришев, Е.Л. Топливомасляные системы и агрегаты авиационных газотурбинных двигателей и влияние качества горюче-смазочных материалов на их работоспособность: Монография. – М.: РГУИТП, 2007. – 94с.

36. Кругляков, П.М., Ексерова, Д.Р. Пена и пенные пленки. М.: Химия, 1990. – 432с.
37. Gurevich, O., Gulienko, A., Schurovskiy, U. Demonstation System of the “Electric” Gas Turbine Engine. Congress ICAS. St. Petersburg, Russia, September 7-12, 2014. P.6.
38. Яновский, Л.С., Ежов, В.М., Молоканов, А.А. Методология допуска авиационных масел к применению на авиатехнике в России и за рубежом// Двигатель. 2012. №2. С. 20-22.
39. Яновский, Л.С., Попов, В.Г., Киришев, Е.Л. Влияние качества горючесмазочных материалов на работоспособность авиационных газотурбинных двигателей.- М.: МАТИ, 2008. -102с.
40. Башта, Т.М. Машиностроительная гидравлика.-М.: Машиностроение, 1971. -672с.
41. Stevenson, P. Foam Engineering. Fundamentals and Applications. New Zealand: A John Wiley & Sons, Ltd, 2012. 536p.
42. Яновский, Л.С., Ежов, В.М., Молоканов, А.А. Авиационные рабочие жидкости: проблемы и перспективы. Мир нефтепродуктов. 2013. №2. С. 11-16.
43. Цветков, О.Н., Розанова, Н.Л., Зверев, О.В. О современном состоянии и перспективах совершенствования масел для газотурбинных двигателей// Мир нефтепродуктов. 2012. № 2. С. 8–14.
44. Захаров, С.М. Применение информационных технологий в трибологии// Трение и износ в машинах и механизмах. 2006. № 12. С. 34–38.
45. Кича, Г.П. Моделирование изнашивания судовых тронковых двигателей при использовании унифицированных моторных масел// Трение и износ. 2004. Т. 25. № 6. С. 635–641.
46. Логунов, В.Л., Шмотин, Ю.Н., Лещенко, И.А. Моделирование и разработка новых жаропрочных сплавов// Двигатель. 2013.№ 5. С. 24–27.
47. Захаров, С.М., Жаров, И.А. Сложные трибосистемы: моделирование и оптимизация/ Вестник ВНИИЖТ. 2001. № 5. С. 4–10.

48. Бабкин, В.И. и др. Отечественные смазочные масла для авиационных газотурбинных двигателей: проблемы и перспективы // Двигатель. 2012. № 5. С. 6–9.

49. Меджибовский, А.С., Яновский, Л.С., Ежов В.М. и др. Исследование эффективности пространственно-затрудненных фенолов в качестве антиоксидантов к смазочным маслам, «Мир нефтепродуктов», №1, 2017г., С. 23-26.

50. ГОСТ 9490–75. Метод определения трибологических характеристик на четырехшариковой машине. М.: Изд-во стандартов, 1997.

51. Раскин, Ю.Е., Квитницкая, Г.П., Кузнецов, Н.В. Стабильность вязкости и ресурс работы в гидросистемах жидкостей с полимерными присадками. Химия и технология топлив и масел. 1981. № 1. С. 59-61.

52. Раскин, Ю.Е., Денисов, Ю.И., Вижанков, Е.М. Диагностика и контроль ресурса применения рабочих жидкостей в гидросистемах авиационной техники// Контроль. Диагностика. 2004. №5. С. 3-4.

53. Никитин, О.Ф. Рабочие жидкости гидроприводов. Классификация, свойства, рекомендации по выбору и применению.-М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. -152с.

54. Виппер, А.Б., Виленкин, А.В., Гайснер, Д.А. Зарубежные масла и присадки.-М.: Химия, 1981. -192с.

55. Крейн, С.Э, Санин, П.И., Кулиев, А.М. и др. Присадки к маслам. Труды второго всесоюзного научно-технического совещания. - М.: Издательство «Химия», 1966. – 400с.

56. Соболевский, М.В., Скороходов, И.И., Гриневич, К.П. Органосилоксаны. Свойства, получение, применение. -М.: Химия, 1985. – 264с.

57. Харитонов, Н.П., Островский, В.В. Термическая и термоокислительная деструкция полиорганосилоксанов. -Л.: Наука, 1982. -208с.

58. Кондаков, Л.А. Рабочие жидкости и уплотнения гидравлических систем.-М.: Машиностроение, 1982. -216с.

59. Крысин, В.Н., Лейчик, Е.Ф. Опыт внедрения пожаровзрывобезопасной гидравлической жидкости// *Авиационная промышленность*. 1982. №2. С.-24-27.
60. Брайн, Р. О. Токсические эфиры кислот фосфора. -М.:Мир, 1964. 632с.
61. А.Е. Арбузов Избранные труды по химии фосфорорганических соединений.-М.: Наука, 1976. -560с.
62. Шейпак, А.А. Гидравлика и пневмопривод. Основы механики жидкости и газа. – М.: МГИУ, 2003. –192с.
63. Фукс, И.Г., Спиркин, В.Г., Шабалина, Т.Н. Основы химмотологии. Химмотология в нефтегазовом деле. –М.: Нефть и газ, 2004. – 280с.
64. Харт, А.В., Гундерсон, Р.С. Синтетические смазочные материалы и жидкости. – Л.: Химия, 1965. -350с.
65. Мамедьяров, М.А. Химия синтетических масел. – Л.: Химия, 1989. - 236с.
66. Хурумова, А.Ф. Вертолетные масла: Тем. Обзор. –М.:ЦНИИТЭ-нефтехим, 1992. -56с.
67. Яновский, Л.С., Галимов, Ф.М., Аляева, В.А. Отечественные и зарубежные горючесмазочные материалы. – Казань: Изд-во Казанск. Ун-та, 2004, -92с.
68. Гришин, Н.Н., Ечин, А.И. О межведомственной комиссии (1968-2008)// *Научно-технический журнал «Мир нефтепродуктов. Вестник Нефтяных Компаний»* - 2008. №8. –С. 30-33.
69. Аксенов, А.Ф. Авиационные топлива, смазочные материалы и специальные жидкости. –М.: Транспорт, 1970, -232с.
70. Алабин, М.А., Кац, Б.М., Литвинов, Ю.А. Запуск авиационных газотурбинных двигателей. –М.: Машиностроение, 1968. -228с.
71. Виппер, А.Б., Гайснер, Д.А., Лосиков, Б.В.и др. Зарубежные топлива, масла и присадки.; Под ред. И.В. Рожкова, Б.В. Лосикова. - М.: Химия, 1971. -328 с.

72. Евдокимов, Е.А., Фукс, И.Г., Шабалина, Т.Н. Смазочные материалы и проблемы экологии. - М.: Изд. "Нефть и газ"; РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2000. - 423 с.
73. Калайтан, Е.Н. Смазочные масла для реактивных двигателей. - М.: Химия, 1968.-196 с.
74. Коваленко, В.П. Загрязнение и очистка нефтяных масел. - М.: Химия, - 304 с.
75. Литпинов, А.А. Основы применения горюче-смазочных материалов в гражданской авиации. - М.: Транспорт, 1987. - 312 с.
76. Папок, К.К., Семенидо, Е.Г. Моторные топлива, масла и жидкости. - М.: ГНТИ нефтяной и горно-топливной литературы, 1957. - 512 с.
77. Папок, К.К., Климов, К.И., Семенидо, Е.Г. Моторные и реактивные масла и жидкости. Под ред. Папок, К.К., Семенидо, Е.Г.- М.: Химия, 1963. -704с.
78. Обельницкий, А.М. Топливо и смазочные материалы. - М.: Высшая школа, 1982.-208 с.
79. Папок, К.К., Рагозин, Н.А. Технический словарь-справочник по топливу и маслам. - М.: ГНТИ нефтяной и горно-топливной литературы, 1963. - 767 с.
80. Папок, К.К. Смазочные масла. - М.: Воениздат, 1962. - 255 с.
81. Папок, К.К. Химмотология топлив и смазочных масел. - М.: Воениздат, - 192с.
82. Папок, К.К., Барон, И.Г. Ядовитость топлив, масел и технических жидкостей.- М.: Воениздат, 1960. - 79 с.
83. Папок, К.К., Рагозин, Н.А. Словарь по топливам, маслам, смазкам и специальным жидкостям. - М.: Химия, 1975. - 392 с.
84. Пискунов, В.А., Зрелов, В.Н., Чернова, К.С. Химмотология в гражданской авиации: Справочник. - М.: Транспорт, 1983. -248 с.
85. Рыбаков, К.В., Алпатов, А.С., Рожков, А.Ф. Заправка самолетов горюче-смазочными материалами. - М.: Транспорт, 1975. -208с.
86. Рыбаков, К.В., Жулдыбин, Е.Н., Коваленко, В.П. Обезвоживание авиационных горюче - смазочных материалов. - М.: Транспорт, 1979. -181 с.

87. Рыбаков, К.В., Коваленко, В.П. Фильтрация авиационных масел и специальных жидкостей. - М.: Транспорт, 1977. -192 с.
88. Соловьев, Б.А., Куландин, А.А., Макаров, Н.В. Устройство и летная эксплуатация силовых установок. Под ред. проф. Соловьева В.А.. - М.: Транспорт, 1991.-253 с.
89. Сосунов, В.А., Шляхтенко, С.М. Теория и расчет воздушно-реактивных двигателей. /Под ред. Шляхтенко С.М. - М.: Машиностроение, 1987. -568 с.
90. Фукс, И.Г., Евдокимов, А.О., Лашхи, В.Л. Экологические проблемы рационального использования смазочных материалов. - М.: Нефть и газ, 1993. - 163с.
91. Школьников, В.М., Малявинский, Л.В., Тимофеев, С.В. Товарные нефтепродукты. Свойства и применение: Справочник.; Под. ред. Школьникова В.М.. - М.: Химия, 1978. -472 с.
92. Шишков, И.Н., Белов, В.Б. Авиационные горюче-смазочные материалы и специальные жидкости. - М.: Транспорт, 1979. -247 с.
93. Яновский, Л.С., Иванов, В.Ф., Галимов, Ф.М. Коксоотложения в авиационных и ракетных двигателях. Казан, науч. центр РАН. Казань, 1999. -284 с.
94. Максютя, С.Л. Вопросы авиационной химмотологии: Сборник. - Киев: КНИГА, 1983.-С. 35-37.
95. Лосикова, Б.В. Нефтепродукты. Свойства, качество, применение. Справочник/ Под ред. Б.В. Лосикова. - М.: Химия, 1966. - 776 с.
96. Итинская, Н.И., Кузнецов, Н.А. Справочник по топливу, маслам и техническим жидкостям. - М.: Колос, 1982. - 208 с.
97. Степанов, В.А. Диагностика технического состояния узлов трансмиссии газотурбинных двигателей по параметрам продуктов износа в масле. – ЦИАМ, 2002. -232с.
98. Щедров, В.С., Крагельский, И.В., Решетов, Д.Н. Теория трения и износа. М.: Наука, 1965. -365с.

99. Комиссар, А.Г. Опоры качения в тяжелых режимах эксплуатации: Справочник. –М: Машиностроение, 1987. -384с.

100. Сафонов, А.С., Ушаков, А.И., Золотов, В.А. Моторные масла для автотракторных двигателей. Санкт-Петербург, НПИКЦ, 2004, -200с.

101. Федоров, М.И., Золотов, В.А. Классификация и применение моторных масел. –М.: Диалог-МГУ, 1999. -147с.

102. ОСТ 1.00148 «Масла для авиационных газотурбинных двигателей. Порядок назначения»

103. Ежов, В.М. Разработка проекта модернизации редукторного стенда Ш-3 для комплексного исследования авиационных смазочных масел// Проблемы разработки, производства, оценки соответствия и применения горюче-смазочных материалов и технических средств нефтепродуктообеспечения: тез. Докл. II Междунар. Науч.-техн. Конф. Москва. 2008. – 368с.

104. Технический отчет ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» Исследования технологий проведения экспериментальных работ, разработка способов расширения технологических возможностей экспериментальной базы, используемой при создании и доводке авиационных ГТД в среднесрочной перспективе/ Варламова Н.И., Ежов В.М., Шаранина К.В. 2015.

105. ГОСТ 21058 Жидкости для авиационных систем и масла авиационные. Метод определения пенообразующих свойств. - М.: ИПК Издательство стандартов, 1975. – 6с.

106. Заключение ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» по результатам исследования пенообразующих свойств образцов масел Б-3В, ЛЗ-240, Turbonucoil 98, Roусо 899. Яновский Л.С., Ежов В.М., 2014, -21с.

107. Присадки к смазочным материалам. Свойства и применение/ Л.Р. Рудник, Перевод с англ. 2-го изд. (2009г., Lubricant Additives: Chemistry and Applications), 2012. – 928 с.

108. Marianne Duncanson. Effects of Physical and Chemical Properties on Foam in Lubricating Oils. Lubrication Engineering. 2003. №5. P 9-13.

109. Fowle T.I. Aeration in Lubricating Oils. Tribology international, № 6, 1981. P. 151-157.

110. Wallis G.B. One-Dimensional Two-Phase Flow. McGraw-Hill Book Company. 1969. P. 408.

111. Яновский, Л.С., Ежов, В.М., Шаранина, К.В. Технический отчет ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» №009-6724 Разработка рекомендаций по созданию неэтилированного авиационного бензина, синтетического масла для авиационных ПД, масла для трансмиссий вертолётов и их применению в современных и перспективных авиационных ПД и трансмиссиях вертолётов., 2015г.

112. Яновский, Л.С., Ежов, В.М., Шаранина, К.В. Технический отчет ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» № 009-6823 Обоснование и разработка технических требований к опытным образцам горюче-смазочных материалов с улучшенными физико-химическими и эксплуатационными свойствами, 2016 г.

113. Яновский, Л.С., Ежов, В.М., Шаранина, К.В. Технический отчет ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» № 009-6248 Разработка рекомендаций по созданию альтернативных топлив не нефтяного происхождения и высокотемпературных синтетических масел для авиационных ГТД перспективных ЛА различного назначения.

114. Яновский, Л.С., Ежов, В.М., Шаранина, К.В. Технический отчет ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» № 009-6353, 2013 г. Разработка требований к показателям и эксплуатационным свойствам альтернативных синтетических топлив не нефтяного происхождения и высокотемпературных синтетических масел для перспективных двигателей ГА.

115. Яновский, Л.С., Ежов, В.М., Шаранина, К.В. К вопросу об оценке качества масел для авиационных газотурбинных двигателей. Авиакосмическая техника и технология, №2, 2003г. -С. 53-58.

116. Цветков, О.Н., Розанова, Л.Н., Зверев, О. В. О современном состоянии и перспективах совершенствования масел для газотурбинных двигателей самолета// Мир нефтепродуктов, № 2, 2012.-С. 8-14.

117. Performance specification MIL-PRF-23699F. Lubricating oil, aircraft turbine engine, synthetic base, NATO CODE NUMBERS: O-152, O-154, O-156 and O-167, 2014г., -29с. <http://www.everyspec.com>

118. Кулиев, А.М. Химия и технология присадок к маслам и топливам. – Л.: «Химия», 1985, -312 с.

119. Рудник, Л.Р. Присадки к смазочным материалам: свойства и применение / пер. с англ. яз. 2-го изд. под ред. А. М. Данилова. - 2-е изд. - Санкт-Петербург : Профессия, 2013. - 927 с.

120. Яновский, Л.С., Ежов, В.М., Степанова, Р.М., Шаранина, К.В. Технический отчет ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», 2011 г., -51 с. «Квалификационные испытания опытно-промышленного образца масла АСМО-200 по СТО 07548712-001-2010».

121. Яновский, Л.С., Ежов, В.М., Степанова, Р.М., Шаранина, К.В. Технический отчет ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», 2011 г., -31с. «Квалификационные испытания опытно-промышленного образца масла ВАСМО-225 по СТО 07548712-002-2010».

122. Урявин, С.П., Ковба, Л.В., Азжеурова, О.Б., Морозова, Н.В. Технический отчет ФГУП «ГосНИИ Га», 2011 г., -48с. Квалификационные испытания гидравлического масла АСГИМ, разработанного ФГУП «НИИСУ» опытно-промышленной партии, изготовленной ЗАО «НПЦ Спецнефтьпродукт».

123. Федякин, В.Н., Ланшин, А.И., Полев, А.С. и др. Обоснование и разработка предложений в проект программы создания экспериментальных объектов по критическим технологиям в обеспечение разработок авиационных двигателей гражданского назначения 6-го поколения 2025-2039 годов. Основные результаты научно-технической деятельности ЦИАМ (2015-2016 гг.) / под общей редакцией В.И. Бабкина, А.И. Ланшина, М.Я. Иванова. – М.: ЦИАМ, 2016. -950с.

124. Ланшин, А.И., Полев, А.С. Обоснование обликов и конструктивно-схемных решений перспективных конкурентоспособных двигателей и силовых установок самолетов гражданской авиации 2025-2030 годов на основе расчетно-

экспериментальных исследований. Основные результаты научно-технической деятельности ЦИАМ (2015-2016 гг.) / под общей научной редакцией В.И. Бабкина, А.И. Ланшина, М.Я. Иванова. – М.: ЦИАМ, 2016. -950с.

125. Луковников, А.В., Полев, А.С., Евстигнеев, А.А. Сравнительная оценка перспективных силовых установок на базе ТРДД и ТВВД для ближне- и среднемагистральных пассажирских самолётов следующего поколения. Основные результаты научно-технической деятельности ЦИАМ (2015-2016 гг.) / под общей научной редакцией В.И. Бабкина, А.И. Ланшина, М.Я. Иванова. – М.: ЦИАМ, 2016. -950с.

126. Ланшин, А.И., Швец, Л.И., Крашенинников, С.Ю. Анализ предварительных проектных материалов предприятий ОАО «ОДК» в части компоновочных схем ТРДД большой тяги (35 тс) для перспективных широкофюзеляжных пассажирских и транспортных самолетов гражданской авиации. Основные результаты научно-технической деятельности ЦИАМ (2015-2016 гг.) / под общей научной редакцией В.И. Бабкина, А.И. Ланшина, М.Я. Иванова. – М.: ЦИАМ, 2016. -950с.

127. Тугунов, П.И., Новосёлов, В.Ф., Коршак, А.А. Типовые расчеты при проектировании и эксплуатации нефтебаз и нефтепроводов. Учебное пособие для ВУЗов. – Уфа: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2002. – 658с.

128. Григорьев, Б.А., Богатов, Г.Ф., Герасимов, А.А. Теплофизические свойства нефти, нефтепродуктов, газовых конденсатов и их фракций / Под редакцией Б.А. Григорьева. – М.: Издательство МЭИ, 1999. – 372с.

Приложения

Приложение А

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
ЦЕНТРАЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ АВИАЦИОННОГО МОТОРОСТРОЕНИЯ ИМЕНИ П.И.БАРАНОВА



СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ

СТО 07538518-09-36-2010

Система менеджмента качества

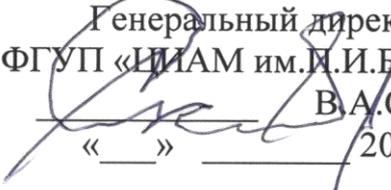
Масла моторные

**МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ СМАЗОЧНЫХ
МАСЕЛ НА КОНСТРУКЦИОННЫЕ И
УПЛОТНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

Москва

Содержание

1	Область применения.....	3
2	Нормативные ссылки.....	4
3	Аппаратура, материалы и реактивы.....	5
4	Подготовка к испытаниям.....	6
5	Проведение испытания.....	9
6	Обработка результатов испытаний.....	10
7	Точность определения.....	12

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ФГУП «ИИАМ им.Д.И.Баранова»

В.А.Скибин
«__» ____ 2010г.

СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ

Система менеджмента качества

Масла моторные

**МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ
СМАЗОЧНЫХ МАСЕЛ НА КОНСТРУКЦИОННЫЕ
И УПЛОТНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

Введен впервые

Введен в действие приказом от «01» августа 2010г.

Дата введения «01» октября 2010г.

1 Область применения

1.1 Настоящий стандарт «Система менеджмента качества. Масла моторные. Метод определения воздействия смазочных масел на конструкционные и уплотнительные материалы» распространяется на смазочные масла для авиационных ГТД и устанавливает метод определения их воздействия на конструкционные и уплотнительные материалы в динамических условиях при испытаниях на редукторной установке Ш-3.

1.2 Метод заключается в оценке изменения физико-механических свойств образцов конструкционных и уплотнительных материалов в результате контакта с испытуемым смазочным маслом. Воздействие смазочного масла на конструкционные и уплотнительные материалы оценивается по изменению

массы, величины относительной остаточной деформации сжатия, коррозии, коэффициента изменения предела прочности образцов до и после испытаний.

2 Характеристики погрешности измерений

При определении относительной остаточной деформации сжатия, изменения массы, изменения объема, а также коэффициента изменения предела прочности образцов резин за результат испытаний принимают среднее арифметическое показателей 5-ти испытываемых образцов. Если результаты испытаний отклоняются от средней величины более чем на +10 %, то их не учитывают и среднее арифметическое вычисляют из значений, полученных для оставшихся образцов, число которых должно быть не менее трех.

При определении коррозионной агрессивности образцов конструкционных материалов за результат испытаний принимают среднее из двух значений удельного изменения массы на единицу площади пластины. Результаты испытаний не должны отклоняться от средней величины более чем на +10 %.

3. Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы ссылки на следующие нормативные документы:

ГОСТ 9.029-88 Система защиты от коррозии и старения. Детали оптические из кристаллов и стекла. Типовые технологические процессы защиты от влаги воздуха и биологических повреждений

ГОСТ 9.030-74 Единая система защиты от коррозии и старения. Резины. Методы испытаний на стойкость в напряженном состоянии к воздействию жидких агрессивных сред

Гост 267 Резина. Метод определения плотности

ГОСТ 270-75 Резина. Метод определения упругопрочностных свойств при растяжении

ГОСТ 613-79 Бронзы оловянные литейные. Марки

ГОСТ 1012-72 Бензины авиационные. Технические условия

ГОСТ 1173-2006 Фольга, ленты, листы и плиты медные. Технические условия

ГОСТ 1510-84 Нефть и нефтепродукты. Маркировка, упаковка, транспортирование и хранение

ГОСТ 1577-93 Прокат толстолистовой и широкополосный из конструкционной качественной стали. Технические условия

ГОСТ 2208-2007 Фольга, ленты, листы и плиты латунные. Технические условия

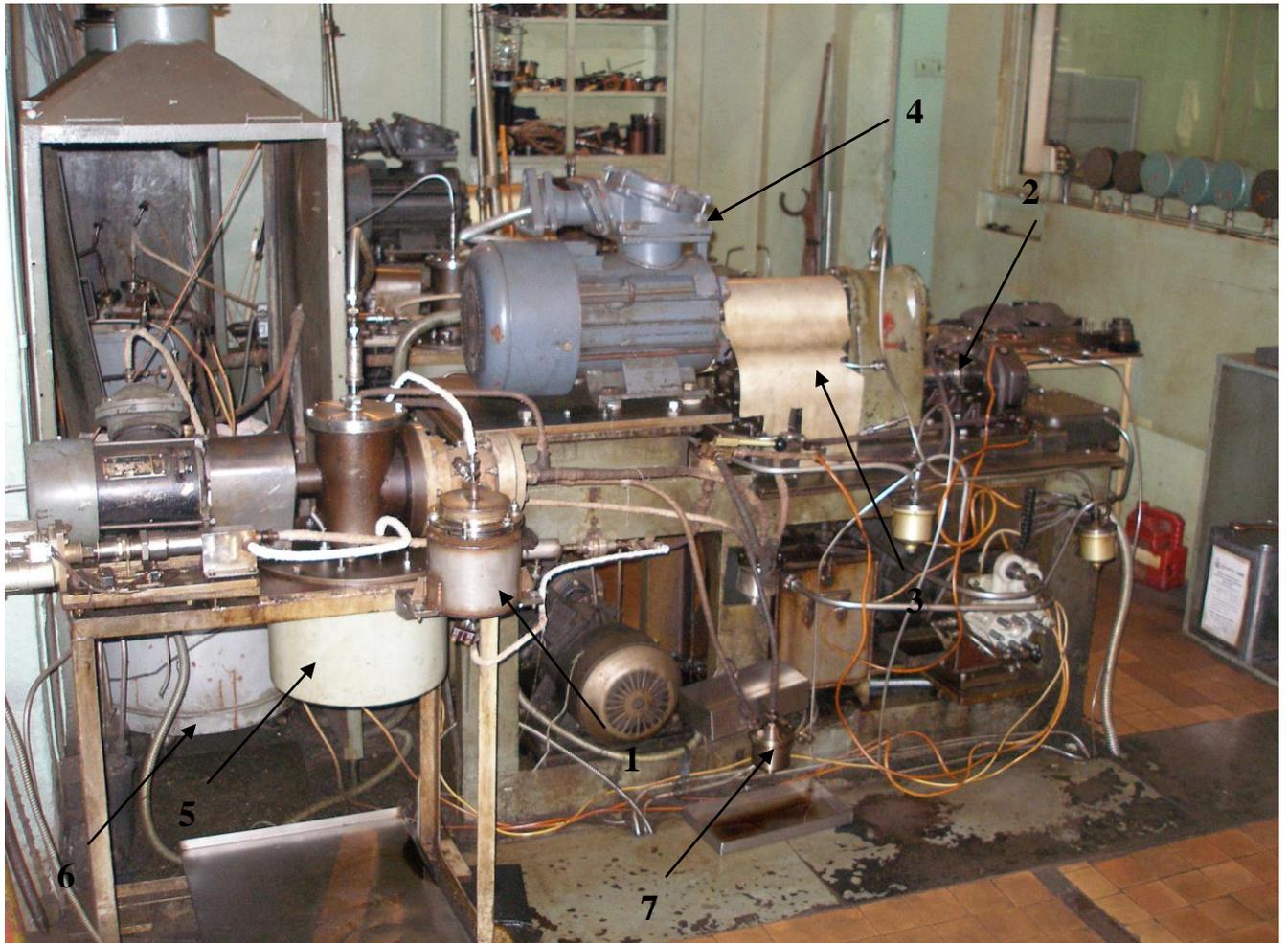
ГОСТ 2405-88 Манометры, вакуумметры, мановакуумметры,

напоромеры, тягомеры и тягонапоромеры. Общие технические условия
ГОСТ 2517-85 Нефть и нефтепродукты. Методы отбора проб
ГОСТ 2789-73 Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики
ГОСТ 8505-80 Нефрас–С 50/170. Технические условия
ГОСТ 9045-93 Прокат тонколистовой холоднокатаный из низкоуглеродистой качественной стали для холодной штамповки. Технические условия
ГОСТ 11358-89 Толщиномеры и стенкомеры индикаторные с ценой деления 0,01 и 0,1 мм. Технические условия
ГОСТ 16523-97 Прокат тонколистовой из углеродистой стали качественной и обыкновенного качества общего назначения. Технические условия
ГОСТ 18175-78 Бронзы безоловянные, обрабатываемые давлением. Марки
ГОСТ 18300-87 Спирт этиловый ректификованный технический. Технические условия
ТУ 38.005-1166-98 Смеси резиновые для резинотехнических изделий авиационной техники. Технические условия
ТУ 38.401-67-108-92 Бензин растворитель для резиновой промышленности. Технические условия
ГОСТ 10227-86 Топлива для реактивных двигателей. Технические условия
ПИ 1.2.293-85 Защита от коррозии магниевых сплавов

4. Аппаратура, материалы и реактивы

4.1 Аппаратура:

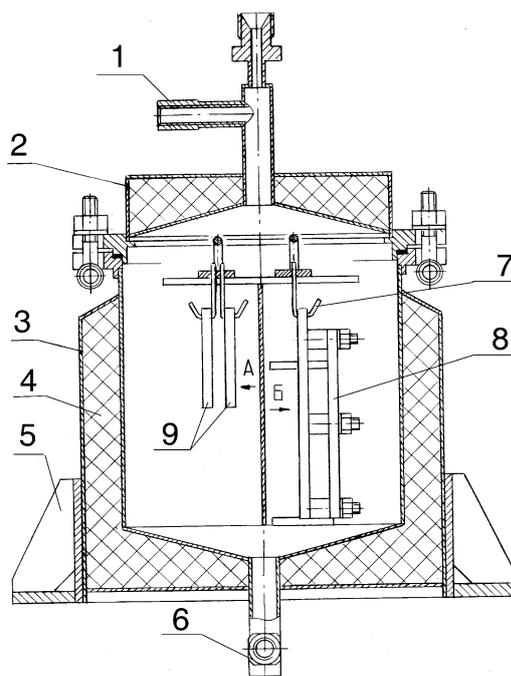
- редукторная установка Ш-3 для определения работоспособности масел и смесей масел (рисунок 1), паспорт ПУ 009-0.2-04-2000 и руководство по эксплуатации;



1 – испытательная камера, 2 - передняя коробка, 3 – редуктор, 4 – электродвигатель, 5 – маслобак, 6 – нагреватель, 7 – маслофильтр.

Рисунок 1 – Установка Ш-3

- испытательная камера, вмонтированная в основную схему установки Ш-3, для выдержки образцов конструкционных и уплотнительных материалов в условиях испытания (рисунок 2);



1 – термопара, 2 – крышка, 3 – корпус, 4 – теплоизолятор, 5,6 – термопара, 7 - приспособления для крепления образцов (крючки), 8 - приспособления для крепления уплотнительных материалов, 9 - приспособления для крепления авиационных конструкционных материалов

Рисунок 2 - Испытательная камера

- разрывная машина для определения физико-механических свойств образцов резины по ГОСТ 270 (относительной остаточной деформации сжатия и коэффициента изменения предела прочности) типа ИР 5040-5;

- толщиномер индикаторный с ценой деления 0,01мм по ГОСТ 11358, например, марки ТР 10-60М ;

- весы аналитические с точностью взвешивания до 0,0002 г по ГОСТ Р 53228.

4.2 Материалы и реактивы:

- образцы для испытаний, изготовленные из резины марок ИРП-1316, ИРП-1287, 51-1434 (рисунок 3,4) отвечающие по своим физико-механическим свойствам требованиям ТУ 38 005-1166;

- спирт этиловый ректификационный технический по ГОСТ 18300;

- нефрас С4-50/170 по ГОСТ 8505;

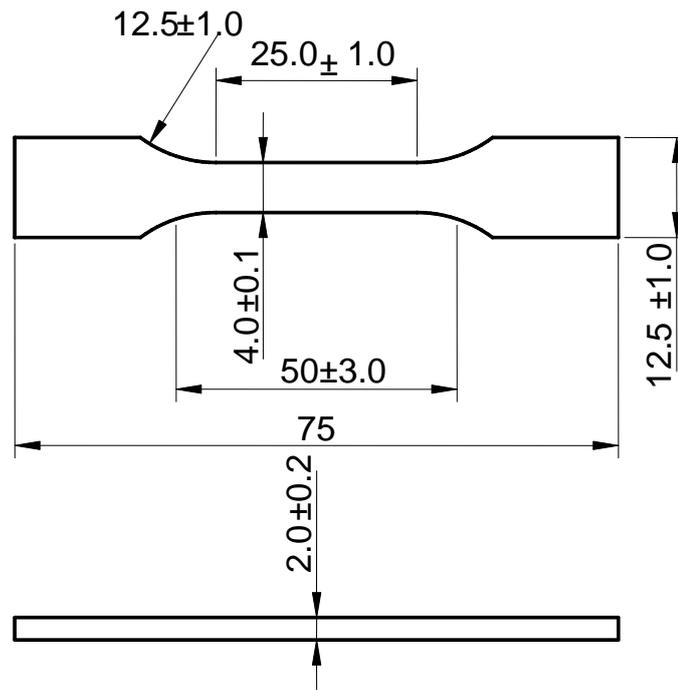


Рисунок 3 - Форма и размеры уплотнительного материала (лопатка)

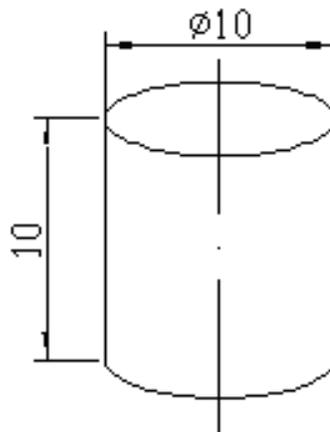


Рисунок 4 - Форма и размеры уплотнительного материала (столбик)

- образцы конструкционных материалов (металлов) в виде пластин с линейными размерами 20x40x3 мм и отверстием диаметром 3 мм (рисунок 5) из металлов и сплавов:

- сталь углеродистая (ст. 10 или 45) по ГОСТ 1050;
- медь М1 или М3 по ГОСТ 1173;
- латунь ЛС 59-1 по ГОСТ 2208;
- бронза БрОС 10-10 по ГОСТ 613.

Образцы должны иметь маркировку: порядковый номер в верхней части пластинки слева от отверстия и индекс материала справа.

Шероховатость поверхности пластинок, должна быть не более $R_z = 1,25$ по ГОСТ 2789.

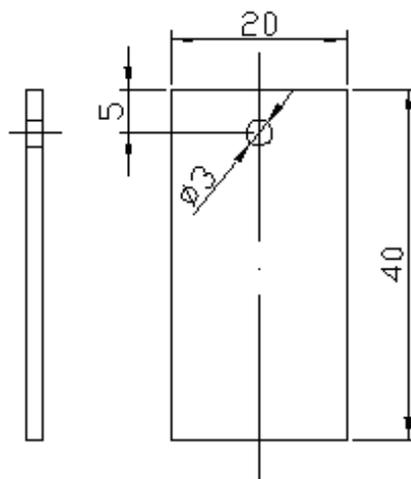


Рисунок 5 – Форма и размеры конструкционного материала (пластинка)

5 Подготовка к испытанию

5.1. Подготовка образцов конструкционных материалов

5.1.1 Металлические пластинки шлифуют по всем граням наждачным полотном №6, затем №5 или №4. Шлифовка проводится в продольном направлении. Не допускается использование одного и того же полотна для зачистки пластинок из разных металлов.

5.1.2 Зачищенные пластинки, промыть нефрасом, просушить фильтровальной бумагой. Провести измерение площади всех шести граней. Затем пластинки снова промыть нефрасом, протереть тампоном, смоченным этиловым спиртом, просушить фильтровальной бумагой. Обработанные пластинки выдержать в течение 24 часов в эксикаторе, после чего взвесить на аналитических весах с точностью до 0,0002 г.

5.1.3 На подготовленных пластинках не должно быть следов коррозии, пятен, ворсинок и т.п. До испытания пластинки хранить на фильтровальной бумаге в эксикаторе с силикагелем – осушителем.

5.2 Подготовка образцов резины

5.2.1 Подготовка резиновых лопаток:

- на широкую часть каждого образца нанести номер иглой. С припудренных образцов тальк удалить щеткой или сухой тканью, поверхность образцов промыть этиловым спиртом и протереть тканью;
- взвесить образцы с точностью до 1 мг;
- укрепить образцы резины в зажимы (рисунок 6) по два в каждый, зажимы установить в испытательную камеру установки Ш-3.

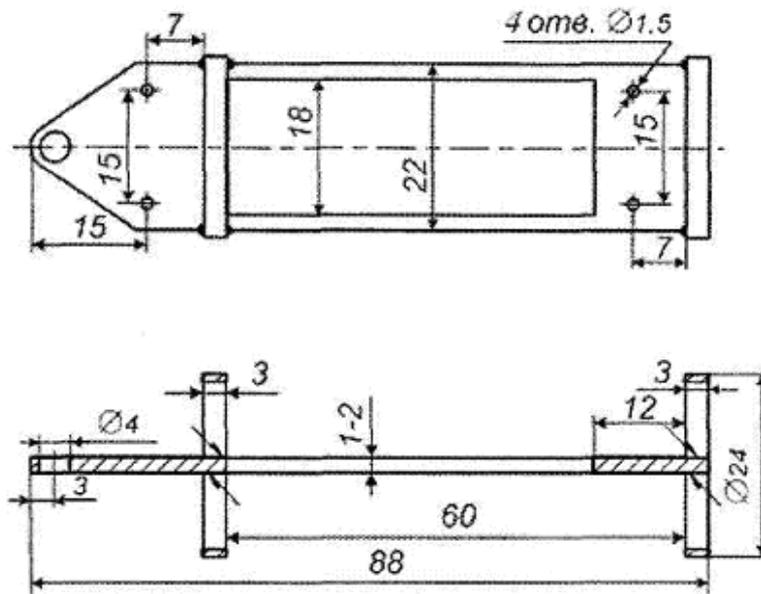


Рисунок 6 – Зажим для резиновых лопаток

5.2.2 Подготовка цилиндрических образцов резины:

- измерить высоту центральной части образца толщиномером, зафиксировать результат измерения в мм до второго знака после запятой;
- поместить образцы и ограничители между пластинами струбцин (рисунок 7) и подвергнуть образцы деформации сжатия, затягивая болты до соприкосновения с ограничителями. При этом образцы не должны соприкасаться друг с другом и с ограничителями.
- струбцины поместить в испытательную камеру установки Ш-3.

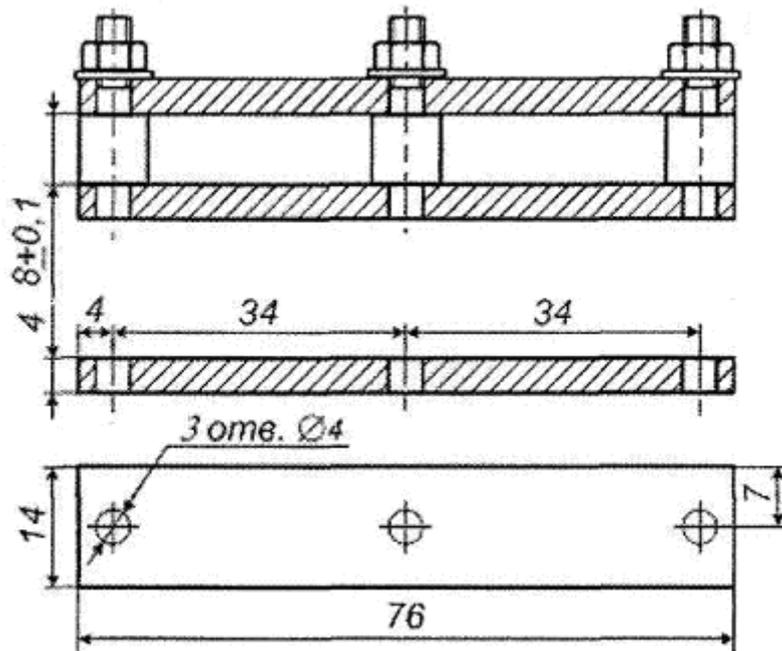


Рисунок 7 – Струбцина для цилиндрических образцов

5.3 Подготовка испытательной камеры

5.3.1 Испытательная камера вытирается насухо от остатков промывочного керосина.

5.3.2 Образцы конструкционных и уплотнительных авиационных материалов подвесить на крючки крышки испытательной камеры. Закрывать камеру крышкой, тем самым помещая образцы в объём камеры (рисунок 2).

5.4 Подготовка установки Ш-3 к работе

Подготовку установки к работе проводят согласно методике определения работоспособности масел на редукторной установке Ш-3.

6 Проведение испытания

Температура масла при проведении испытаний уплотнительных материалов соответствует условиям проведения испытаний масла на установке Ш-3.

6.1 Испытание в режиме КПА ТРД

6.1.1 Основные параметры режима испытания:

- температура масла в зацеплении, °С от 195 до 205

- расход масла через форсунку, л/мин от 2 до 2,2
- крутящий момент на валу, Нм 24,5
- продолжительность испытания, час 50

6.1.2 Испытания масла на установке проводят в соответствии с п. 3.3.1 Руководства по эксплуатации.

6.2 Испытание в режиме ГТД и редукторов вертолётов

6.2.1 Основные параметры режима испытания:

- температура масла в зацеплении, °С от 75 до 85
- расход масла через форсунку, л/мин от 2 до 2,2
- крутящий момент на валу, Нм 53,9
- продолжительность испытания, час 50

6.2.2 Испытания масла на установке проводят в соответствии с п. 3.3.2 Руководства по эксплуатации.

6.3 Разборка испытательной камеры

По окончании испытания снять крышку испытательной камеры с подвешенными образцами пластинок и резин и поместить штатив для охлаждения.

Состояние поверхности металлических пластинок после проведения испытаний определить визуально: по изменению самой поверхности (подтравливание, потускнение и т.п.), по цвету поверхности, по наличию легкоудаляемого или трудноудаляемого осадка на поверхности. Пластинки взвесить на аналитических весах с точностью до 0,0002г

Образцы резин освободить от зажимов и струбцин, промыть в течение 30 с в бензине или спирте. Количество бензина должно быть не менее 1,5 л. Промытые образцы вытереть фильтровальной бумагой или мягкой тканью.

Образцы, предназначенные для определения величины остаточной деформации, оставить в свободном состоянии на «отдых». Время «отдыха» 1 час.

Образцы, предназначенные для определения предела прочности и величины набухания резины, поместить в емкость, ограничивающую испарение среды.

Измерить высоту цилиндрических образцов после их «отдыха».

Определить массу образцов или их объем по ГОСТ 267 не позднее, чем через 3 часа после выдержки в масле.

Определить предел прочности образцов по ГОСТ 270. Определение проводят не ранее, чем через 4 ч и не позднее, чем через сутки после того, как образцы были вынуты из масла.

7 Обработка результатов испытаний

7.1 Обработка результатов испытания уплотнительных материалов

7.1.1 Величину относительной остаточной деформации сжатия $E_{ост}$ в процентах вычисляют по формуле:

$$E_{ост} = \frac{h_0 - h_2}{h_0 - h_1} \cdot 100, \quad (1)$$

где h_0 - исходная высота образца, мм;
 h_2 - высота образца после «отдыха», мм.
 h_1 - высота ограничителя, мм (8 мм);

7.1.2 Изменение массы образца ΔG в процентах вычисляют по формуле:

$$\Delta G = \frac{G_1 - G_0}{G_0} \cdot 100, \quad (2)$$

где G_1 - масса образца после воздействия масла, г;
 G_0 - масса образца до воздействия масла, г.

7.1.3 Изменение объема образца ΔV в процентах, определенное гидростатическим или пикнометрическим методами, вычисляют в соответствии с ГОСТ 9.030.

7.1.4 Коэффициент изменения предела прочности образца K_σ вычисляют по формуле:

$$K_\sigma = \frac{\sigma_1}{\sigma_0}, \quad (3)$$

где σ_1 - прочность образца после воздействия масла;
 σ_0 - прочность образца до воздействия масла.

7.1.5 За результат испытаний принимают среднее арифметическое показателей всех испытываемых образцов. Если результаты испытаний отклоняются от их средних величин более чем на +10 %, то их не учитывают и среднее арифметическое вычисляют из оставшихся образцов, число которых должно быть не менее трех.

7.2 Обработка результатов испытания конструкционных материалов (пластинок)

7.2.1. Коррозионную агрессивность масла по отношению к каждому из испытанных образцов металлов вычисляют по формуле:

$$X = \frac{M_1 - M_2}{S}, \quad (4)$$

где X - коррозионная агрессивность масел, г/м²

M_1 - масса пластинки до испытания, г;

M_2 -масса пластинки после испытания, г;

S -площадь поверхности пластинки, м²

6.2.2 Допустимые нормы на потерю веса пластинок из различных конструкционных материалов устанавливаются на основании статистических данных, полученных в ходе многочисленных испытаний.

8 Точность определения

Данные по сходимости метода со степенью вероятности 95% приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Нормирование сходимости для различных диапазонов значений исследуемых показателей

Наименование показателя	Интервал полученных результатов	Допустимое расхождение между параллельными определениями, г
Изменение массы, %	2,5 – 8	Не выше 0,93
Коэффициент изменения предела прочности, усл. ед.	0 – 1,2	Не выше 0,11
Величина относительной остаточной деформации сжатия, %	18 – 61	Не выше 4,79
Коррозия, г/м ²	0 – 0,9	Не выше 0,86

Заместитель Генерального директора
ГУП «ЦИАМ им. П.И.Баранова» по
эксперименту



А.А. Марков

Представитель руководства по системе
менеджмента качества



Б.И. Менеев

Начальник отдела двигателей и
химмотологии



Л.С. Яновский

Начальник отдела стандартизации



Г.Н. Гайворонцева

Начальник сектора авиационных смазочных
материалов



В.М. Ежов

Ведущий инженер-химик



Р.М. Степанова

Ведущий инженер-химик



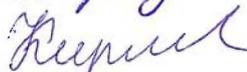
Е.Н. Чвыкова

Инженер-химик II кат.



К.В. Шаранина

Инженер-химик



А.В. Кирсанов

Младший научный сотрудник



А.А. Молоканов

.Лист регистрации изменений									
Изм.	Номера листов (страниц)				Всего листов (страниц) в документе	№ докум.	Входящий № сопроводительного документа	Подп.	Дата
	Измененных	Замененных	Новых	Аннулированных					



**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«КЛИМОВ» (АО «КЛИМОВ»)**

Акционерное Общество
«Климов»
(АО «КЛИМОВ»)
Россия, 194100, Санкт-Петербург,
Кантемировская ул., д. 11
Телефон: (812) 454-71-00
Факс: (812) 647-00-29
Телетайп 122284 Альбит
E-mail: klimov@klimov.ru
<http://www.klimov.ru>

БЮЛЛЕТЕНЬ № 200.7.0.0556.04

(К7870-20БЭ-В)

Дата 18 февраля 2017 г.

Изделие: Главный редуктор ВР-14

**По вопросу: Руководство по технической эксплуатации (РЭ)
Уточнение текста в связи с применением масла
АСМО-200 (СТО 07548712-001-2014) производства
АО «ННЦ Спецнефтьпродукт»**

200-84.10.00-0556
17-02-0004-0-04

1 Вводная часть

1.1 Бюллетень распространяется на главные редуктора ВР-14 принадлежности МО РФ.

1.2 Основание: Решение №78.668.0818-2016 «О выпуске бюллетеня шифра БЭ-В по уточнению эксплуатационной документации двигателей ТВЗ-117 всех модификаций, ВК-2500 всех моделей и вертолетных главных редукторов ВР-14 и ВР-24 в части допуска к применению масла АСМО-200 по СТО 07548712-001-2014 производства АО «НПЦ Спецнефтьпродукт».

2 Требования безопасности

При выполнении работ по данному бюллетеню руководствоваться требованиями по технике безопасности указанными в «Руководстве по технической эксплуатации редуктора ВР-14» 7871РЭ.

3 Порядок выполнения работ

3.1 Настоящим бюллетенем эксплуатирующие организации информируются о возможности эксплуатации под наблюдением главных редукторов ВР-14 на масле авиационном синтетическом АСМО-200 по СТО 07548712-001-2014 производства АО «НПЦ Спецнефтьпродукт».

3.2 Эксплуатация под наблюдением главных редукторов ВР-14 на масле АСМО-200 должна проводиться с выполнением следующих требований:

- заправку и дозаправку маслосистемы редукторов в процессе эксплуатации выполнять маслом АСМО-200;
- установить временный расход масла АСМО-200 аналогичным расходу масел ЛЗ-240 и БЗ-В;
- проводить осмотр и промывку маслофильтра редукторов согласно т.к. 84.10.00ж каждые 50±10 часов наработки (при эксплуатации в условиях тропического и морского климата каждые 25 часов наработки);

• проводить осмотр и проверку срабатывания пробок-сигнализаторов редукторов согласно т.к. 84.10.00и каждые 50±10 часов наработки;

• проводить отбор проб масла АСМО-200 и анализ его физико-химических свойств:

Наименование показателей	Нормы
Кинематическая вязкость при температуре 100°С не менее, мм ² /с	4,9
Кислотное число, мг КОН на 1 г масла, не более	0,2
Содержание воды, % не более	отсутствие
Содержание механических примесей, % не более	отсутствие

3.3 ВКС России (ГК) организовать эксплуатацию под наблюдением главных редукторов ВР-14 на масле АСМО-200 в различных климатических условиях во всем эксплуатационном диапазоне высот и скоростей вертолетов

3.4 В процессе эксплуатации редуктора ВР-14 на масле АСМО-200 1 раз в полгода направлять на АО «Климов» данные о результатах работ по пункту 3 данного бюллетеня.

3.5 Ниже приведены изменения на странице 6 раздела 84.10.00 «Руководства по технической эксплуатации главного редуктора ВР-14» 7871РЭ:

Краткое содержание изменения		Способ внесения изменения
Имеется	Должно быть	
а) марки масел <ul style="list-style-type: none"> • БЗ-В ТУ 38.101295-85, с кинематической вязкостью не ниже 5 сСт при 100°С • ЛЗ-240 ТУ 301-04-010-92 (ЗАО «Завод им. Шаумяна») с кинематической вязкостью не ниже 4,8 сСт при 100°С 	а) марки масел <ul style="list-style-type: none"> • БЗ-В ТУ 38.101295-85, с кинематической вязкостью не ниже 5 сСт при 100°С • ЛЗ-240 ТУ 301-04-010-92 (ЗАО «Завод им. Шаумяна») с кинематической вязкостью не ниже 4,8 сСт при 100°С • АСМО-200 по СТО 07548712-001-2014 производства АО «НПЦ Спецнефтьпродукт» (для МО РФ) 	От руки



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«КЛИМОВ» (АО «КЛИМОВ»)

Акционерное Общество
«Климов»
(АО «КЛИМОВ»)
Россия, 194100, Санкт-Петербург,
Кантемировская ул., д. 11
Телефон: (812) 454-71-00
Факс: (812) 647-00-29
Телетайп 122284 Альбит
E-mail: klimov@klimov.ru
<http://www.klimov.ru>

БЮЛЛЕТЕНЬ № 200.7.0.0554.04

(К72-08БЭ-В)

Дата 18 февраля 2017 г.

Изделие: **Главный редуктор ВР-24**

По вопросу: **Руководство по технической эксплуатации (РЭ)
Уточнение текста в связи с применением масла
АСМО-200 (СТО 07548712-001-2014) производства
АО «НПЦ Спецнефтьпродукт»**

200-84.10.00-0554
17-02-0004-0-04

1 Вводная часть

1.1 Бюллетень распространяется на главные редуктора ВР-24 принадлежности МО РФ.

1.2 Основание: Решение №78.668.0818-2016 «О выпуске бюллетеня шифра БЭ-В по уточнению эксплуатационной документации двигателей ТВЗ-117 всех модификаций, ВК-2500 всех моделей и вертолетных главных редукторов ВР-14 и ВР-24 в части допуска к применению масла АСМО-200 по СТО 07548712-001-2014 производства АО «НПЦ Спецнефтьпродукт».

2 Требования безопасности

При выполнении работ по данному бюллетеню руководствоваться требованиями по технике безопасности указанными в «Руководстве по технической эксплуатации редуктора ВР-24» 72РЭ.

3 Порядок выполнения работ

3.1 Настоящим бюллетенем эксплуатирующие организации информируются о возможности эксплуатации под наблюдением главных редукторов ВР-24 на масле авиационном синтетическом АСМО-200 по СТО 07548712-001-2014 производства АО «НПЦ Спецнефтьпродукт».

3.2 Эксплуатация под наблюдением главных редукторов ВР-24 на масле АСМО-200 должна проводиться с выполнением следующих требований:

- заправку и дозаправку маслосистемы редукторов в процессе эксплуатации выполнять маслом АСМО-200;
- установить временный расход масла АСМО-200 аналогичным расходу масел ЛЗ-240 и БЗ-В;
- проводить осмотр и промывку маслофильтра редукторов согласно т.к. 84.10.00ж каждые 50±10 часов наработки (при эксплуатации в условиях тропического и морского климата каждые 25 часов наработки);

• проводить осмотр и проверку срабатывания пробок-сигнализаторов редукторов согласно т.к. 84.10.00и каждые 50±10 часов наработки;

• проводить отбор проб масла АСМО-200 и анализ его физико-химических свойств:

Наименование показателей	Нормы
Кинематическая вязкость при температуре 100°С не менее, мм ² /с	4,9
Кислотное число, мг КОН на 1 г масла, не более	0,2
Содержание воды, % не более	отсутствие
Содержание механических примесей, % не более	отсутствие

3.3 Эксплуатацию под наблюдением главных редукторов ВР-24 на масле АСМО-200 проводить в разных климатических зонах РФ.

3.4 ВКС России (ГК) организовать эксплуатацию под наблюдением главных редукторов ВР-24 на масле АСМО-200 в различных климатических условиях во всем эксплуатационном диапазоне высот и скоростей вертолетов

3.5 Ниже приведены изменения на странице 6 раздела 84.10.00 «Руководства по технической эксплуатации главного редуктора ВР-24» 72РЭ:

Краткое содержание изменения		Способ внесения изменения
Имеется	Должно быть	
а) марки масел <ul style="list-style-type: none"> • БЗ-В ТУ 38.101295-85, с кинематической вязкостью не ниже 5 сСт при 100°С • ЛЗ-240 ТУ 301-04-010-92 (ЗАО «Завод им. Шаумяна») с кинематической вязкостью не ниже 4,8 сСт при 100°С 	а) марки масел <ul style="list-style-type: none"> • БЗ-В ТУ 38.101295-85, с кинематической вязкостью не ниже 5 сСт при 100°С • ЛЗ-240 ТУ 301-04-010-92 (ЗАО «Завод им. Шаумяна») с кинематической вязкостью не ниже 4,8 сСт при 100°С • АСМО-200 по СТО 07548712-001-2014 производства АО «НПЦ Спецнефтьпродукт» (для МО РФ) 	От руки



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«КЛИМОВ» (АО «КЛИМОВ»)

Акционерное Общество
«Климов»
(АО «КЛИМОВ»)
Россия, 194100, Санкт-Петербург,
Кантемировская ул., д. 11
Телефон: (812) 454-71-00
Факс: (812) 647-00-29
Телетайп 122284 Альбит
E-mail: klimov@klimov.ru
<http://www.klimov.ru>

БЮЛЛЕТЕНЬ № 200.7.0.0555.04 (К78-090БЭ-В)

Изделие: **Двигатели ТВЗ-117 всех модификаций и
ВК-2500 всех моделей**

По вопросу: **Уточнение РЭ двигателей ТВЗ-117 всех модификаций,
ВК-2500 всех моделей в части применения масла
АСМО-200 по СТО 07548712-001-2014 производства
АО «НПЦ Спецнефтьпродукт»**

200-072.00.00-0555
17-02-0004-0-4

1. Вводная часть

1.1 Бюллетень распространяется на двигатели ТВЗ-117 всех модификаций и ВК-2500 всех моделей принадлежности Минобороны России.

1.2 Основание для выпуска бюллетеня Решение №78.668.0818-2016 «О выпуске бюллетеня шифра БЭ-В по уточнению эксплуатационной документации двигателей ТВЗ-117 всех модификаций, ВК-2500 всех моделей и вертолетных главных редукторов ВР-14 и ВР-24 в части допуска к применению масла АСМО-200 по СТО 07548712-001-2014 производства АО «НПЦ Спецнефтьпродукт».

2. Требования по мерам безопасности

При выполнении работ по настоящему бюллетеню, руководствоваться мерами безопасности указанными в руководстве по технической эксплуатации двигателя 078.00.5700РЭ.

3. Порядок проведения работ

3.1 Настоящим бюллетенем эксплуатирующие организации информируются о возможности эксплуатации под наблюдением двигателей ТВЗ-117 всех модификаций и ВК-2500 всех моделей на масле авиационном синтетическом АСМО-200 по СТО 07548712-001-2014 производства АО «НПЦ Спецнефтьпродукт».

3.2 Эксплуатация под наблюдением двигателей ТВЗ-117 всех модификаций и ВК-2500 всех моделей на масле АСМО-200 должна проводиться с выполнением следующих требований:

- заправку и дозаправку маслосистемы двигателей в процессе эксплуатации выполнять маслом АСМО-200 по СТО 07548712-001-2014 производства АО «НПЦ Спецнефтьпродукт»;

- установить временные нормы расхода масла АСМО-200 по СТО 07548712-001-2014 производства АО «НПЦ Спецнефтьпродукт» аналогичным расходу масел ЛЗ-240 и БЗ-В;

- проводить осмотр и промывку масляного фильтра согласно т.к.№20: раздела 072.90.02, 078.00.5700РЭ каждые 50±10 часов наработки;

- проводить отбор проб и анализ масла АСМО-200 из маслобак вертолета по СТО 07548712-001-2014 производства АО «НПЦ Спецнефтьпродукт» для определения его физико-химических свойств:

Наименование показателей	Нормы
Кинематическая вязкость при температуре 100°С не менее, мм ² /с	4,9
Кислотное число, мг КОН на 1 г масла, не более	0,2
Содержание воды, % не более	отсутствие
Содержание механических примесей, % не более	отсутствие

3.3 ВКС России (ГК) организовать эксплуатацию под наблюдением двигателей ТВЗ-117 всех модификаций и ВК-2500 всех моделей на масле АСМО-200 по СТО 07548712-001-2014 производства АО «НПЦ Спецнефтьпродукт» при различных климатических условиях во всем эксплуатационном диапазоне высот и скоростей вертолетов.

3.4 Направлять на АО «Климов» один раз в полгода сведения о результатах анализа масла АСМО-200 по СТО 07548712-001-2014 производства АО «НПЦ Спецнефтьпродукт», а также информацию о нештатной работе двигателей.

3.5 Ниже приведены временные изменения Руководства по технической эксплуатации 078.00.5700РЭ на стр.6 раздела 072.00.00

Краткое содержание изменения		Способ внесения изменения
Имеется	Должно быть	
2.1.15. Работоспособность двигателя обеспечивается на рабочем масле:	2.1.15. Работоспособность двигателя обеспечивается на рабочем масле:	От руки
Б-3В по ТУ 38.101295-85 производства ООО	Б-3В по ТУ 38.101295-85 производства ООО	

К78-090БЭ-В

<p>«Производство Завод имени Шаумяна»</p> <p>ЛЗ-240 по ТУ 301-04-010-92 производства ООО «Производство Завод имени Шаумяна»</p>	<p>«Производство Завод имени Шаумяна»</p> <p>ЛЗ-240 по ТУ 301-04-010-92 производства ООО «Производство Завод имени Шаумяна»</p> <p>АСМО-200 по СТО 07548712- 001-2014 производства АО «НПЦ Спецнефтьпродукт»</p>	
---	--	--