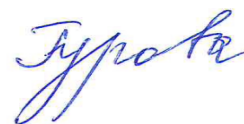


На правах рукописи



Гурова Елена Игоревна

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ СВОЙСТВ
ГИДРАВЛИЧЕСКИХ МАСЕЛ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ
В АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКЕ

2.6.12. Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина»

Научный руководитель: Доктор технических наук, доцент
Маньшев Дмитрий Альевич

Официальные оппоненты: **Рудяк Константин Борисович**, доктор технических наук, Общество с ограниченной ответственностью «Объединенный центр исследований и разработок», генеральный директор

Мойкин Алексей Анатольевич, кандидат химических наук, Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственное предприятие КВАЛИТЕТ», заместитель директора по развитию

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

Защита состоится 26 июня 2025 года в 16.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.383.05, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)» по адресу: 190013, Россия, Санкт-Петербург, Московский проспект, дом 24-26/49 литера А, Белоколонный зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета), <https://spbti.ru/filecat/511>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим отправлять по адресу: 190013, Россия, Санкт-Петербург, Московский проспект, дом 24-26/49 литера А, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Ученый совет, e-mail: dissowet@spbti.ru

Автореферат разослан

2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Клементьев Василий Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

К маслам, применяемым в гидравлических системах (далее – ГС) авиационной техники (далее – АТ) предъявляют особые требования по стабильности эксплуатационных свойств (далее – ЭС). В результате развития АТ меняются условия эксплуатации ГС: уменьшается масса элементов гидросистем за счет способности гидравлического масла (далее – ГМ) отводить тепло, выделяемое в результате потерь энергии. Для улучшения динамических характеристик систем управления, уменьшения их габаритных размеров гидравлические насосы форсируют по давлению: в настоящее время используют ГС и насосы с рабочим давлением от 35 МПа до 60 МПа и выше. Увеличиваются скорости полета летательных аппаратов, следовательно, возрастают рабочие температуры (до 150 °С).

Оценка уровня эксплуатационных и физико-химических свойств ГМ осуществляется лабораторными малоинформативными методами, так как они не моделируют химмотологические процессы (далее – ХП), протекающие в ГС АТ. При квалификационной оценке опытных образцов применяется стендовый метод подтверждения работоспособности масел в течение назначенного ресурса аксиально-поршневого насоса ГС; проведение испытаний по данной методике длительное и дорогостоящее. При этом отсутствует метод прогнозирования стабильности свойств ГМ при его применении в гидросистеме, который позволил бы устанавливать срок применения масла в ГС АТ до его замены.

Для получения прогнозной оценки срока применения ГМ в ГС требуется установление количественных зависимостей показателей качества от его состава, конструктивных особенностей ГС и условий эксплуатации АТ, при этом испытания должны быть выполнены в модельных условиях (физической модели (далее – ф-модель) ГС), отражающих функциональное воздействие на масло при его эксплуатации в ГС АТ.

Актуальность получения достоверной прогнозной оценки сроков применения ГМ до замены в ГС АТ обуславливается разработкой новых ГМ на основе продуктов гидрокрекинга, сложных эфиров, содержащих вязкостные полимерные присадки, и необходимостью их модернизации в условиях обеспечения технологической независимости производств. О деградации ЭС разрабатываемых и модернизируемых образцов в условиях применения сложно судить, основываясь на существующие физико-химические методы исследования.

Степень разработанности темы исследования

Изучением физико-химических и эксплуатационных свойств занимались ученые-химмотологи Школьников В.М., Хурумова А.Ф., Булатников В.В., Крылов В.Б. во Всероссийском научно-исследовательском институте по переработке нефти (АО «ВНИИ НП»). В ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России» проводили исследования по разработке квалификационных методов испытаний опытных марок горюче-смазочных материалов для их допуска к применению в вооружении и военной технике Митягин В.А., Раскин Ю.Е.

В опытно-конструкторских бюро ОКБ им. А.С. Яковлева, ОКБ им. П.О. Сухого, ОКБ А.Н. Туполева, ОКБ им. С.В. Ильюшина, АК «Рубин» определены требования по надежности и долговечности работы ГС самолетов.

Цель и задачи работы

Цель диссертационной работы – прогнозирование срока применения масла до замены в гидравлической системе авиационной техники методом, разработанным на основе физического и математического моделирования химмотологического процесса деградации свойств масла.

Для достижения поставленной цели решены **задачи исследования**:

1. Обоснованы требования к физической модели гидросистемы для моделирования химмотологического процесса деградации свойств гидравлических масел при применении в авиационной технике;
2. Создан стенд для исследования механохимической и термоокислительной стабильности свойств гидравлических масел;
3. Разработан метод прогнозирования срока применения гидравлических масел до замены в гидравлической системе авиационной техники;
4. Исследованы зависимости изменения свойств и состава гидравлических масел в модельных условиях эксплуатации и определены прогнозные сроки применения масел в авиационной технике до замены;
5. Проведена технико-экономическая оценка результатов исследования стабильности свойств гидравлических масел.

Научная задача исследований заключается в установлении в модельных условиях количественных зависимостей, характеризующих деградацию эксплуатационных свойств гидравлических масел при применении в гидравлической системе авиационной техники, и разработке на их основе метода прогнозирования срока их применения до замены.

Научная новизна работы

1. Обоснованы требования к конструктивным особенностям (объем ГМ, диаметр трубопроводов ГС) и параметрам работы (скорость потока ГМ, рабочие температура и давление, перепад давления в системе) ф-модели ГС АТ, заключающиеся в реализации условий приближенного подобия ХП деградации

свойств ГМ в ф-модели и ГС АТ, определяемого равенством критериев: гидродинамического подобия Рейнольдса (Re) и Эйлера (Eu) в диапазоне значений 6060-8700 и 150-220 соответственно, и условиями однозначности, что соответствует интервалу давления от 16 до 21 МПа и диапазону температуры от 60 до 120 °С, а также одинаковым значениям плотности и кинематической вязкости масла ($\rho^T, \nu^T = idem$).

На основе установленных требований к ф-модели ГС создан стенд, позволяющий независимо задавать и варьировать факторы, определяющие процесс деградации свойств ГМ (температура, давление и продолжительность испытаний), обеспечить многофакторность и, следовательно, повысить информативность оценки механохимической и термоокислительной стабильности свойств ГМ.

2. Разработан метод прогнозирования срока применения масла, содержащего загущающую полиметакрилатную присадку, до замены в ГС АТ, сущность которого заключается в получении зависимости кинематической вязкости при 50 °С от продолжительности испытаний на стенде в режиме критичной для стабильности ГМ нагрузки ($P=21$ МПа, $T=60$ °С) и определении по установленной корреляционной зависимости между временем работы масла в ГС (самолет Ил-76) и продолжительностью испытаний в стенде (коэффициент корреляции более 0,9) прогнозного допустимого срока эксплуатации масла в ГС, при котором кинематическая вязкость при 50 °С достигает предельного (нормативного) значения, равного 7,00 мм²/с.

3. В модельных условиях на созданном стенде получены количественные зависимости показателей механохимической стабильности свойств ГМ (изменения кинематической вязкости при 50 °С и перепада давлений на фильтрах) от температуры, давления и продолжительности испытаний. Установлено, что для ГМ, загущенного полиметакрилатной присадкой, наиболее склонным к изменению свойством при применении масла в ГС АТ является кинематическая вязкость при 50 °С. Изменения кислотного числа испытуемого масла АМГ-10 находятся в пределах погрешности метода, что свидетельствует о процессах термомеханической деструкции полимерного загустителя при дросселировании и об отсутствии влияния процессов окисления на срок применения масел до замены.

Установлено, что наибольшее относительное снижение кинематической вязкости масла АМГ-10 происходит в режиме максимального давления и минимальной температуры (относительное снижение кинематической вязкости (ν_{50}) при 21 МПа и 60 °С больше на 7 %, чем при 21 МПа и 120 °С). При этом снижение кинематической вязкости масла с присадкой Максойл В3-011 (средневесовая молекулярная масса (далее – M_w) $M_w=101505$) меньше, чем с присадками Viscoplex 7-610 ($M_w=140093$) и IRGAFLO 6000 V ($M_w=154386$) в

1,8 и 2,7 раза соответственно, что свидетельствует о более высокой стойкости к термомеханической деструкции присадок с меньшей M_w .

4. В соответствии с разработанным методом прогнозирования установлены количественные зависимости изменения кинематической вязкости при 50 °С от продолжительности испытаний на стенде при значениях давления (21 МПа) и температуры (60 °С), соответствующих максимальной нагрузке на ГМ при его эксплуатации, и определены прогнозные сроки применения ГМ в ГС Ил-76 до его замены масла АМГ-10 с различными полиметакрилатными присадками: с отечественной присадкой Максойл ВЗ-011 – 1973 ± 52 ч, с IRGAFLO 6000 V – 1606 ± 42 ч, с Viscoplex 7-610 – 1376 ± 36 ч; масла АСГИМ – 4404 ± 116 ч.

5. По результатам исследований методом гель-проникающей хроматографии установлено, что ГМ, содержащие полимерные загустители с более однородными молекулярно-массовыми характеристиками имеют меньшее снижение кинематической вязкости, что позволило предложить комплексный критерий стабильности вязкости загущающей присадки, характеризующий повышенную стойкость к термомеханической деструкции при большем значении отношения разности средневязкостной (M_v) и средневесовой (M_w) молекулярных масс (далее – ММ) к средневязкостной (M_v) и меньшем значении степени полидисперсности (далее – PD). Для масла АМГ-10 с загущающими полиметакрилатными присадками с $M_w=101505$ (Максойл ВЗ-011), с $M_w=154386$ (IRGAFLO 6000 V) и с $M_w=140093$ (Viscoplex 7-610) значения отношения составили 0,475, 0,467 и 0,447, а PD – 2,47, 3,04 и 3,14 соответственно.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Впервые в условиях приближенного подобиya получены количественные зависимости показателей механохимической стабильности ГМ, содержащего загущающую полиметакрилатную присадку, (кинематической вязкости при 50 °С, перепада давления на фильтре) от условий применения в ГС АТ (температуры, давления в ГС и продолжительности испытаний), заключающиеся в снижении кинематической вязкости с повышением давления и температуры эксплуатации ГМ, и свидетельствующие о более значительном влиянии температуры по сравнению с давлением и продолжительностью испытаний; при этом изменения кислотного числа находятся в пределах погрешности метода определения.

2. Предложен комплексный критерий стабильности вязкости загущающей присадки, позволяющий на основе молекулярно-массовых характеристик и однородности состава полимера определить наиболее устойчивый загуститель для ГМ.

3. Разработан метод прогнозирования срока применения ГМ, загущенного полиметакрилатными присадками, до замены в ГС АТ, основанный на физическом моделировании, использование которого позволяет сократить время проведения испытаний до 50 % и снизить затраты при квалификационной оценке ГМ до 20 %.

Установлены прогнозные сроки применения ГМ в ГС Ил-76 до его замены масла АМГ-10 с различными полиметакрилатными присадками: с присадкой Максойл ВЗ-011 – 1973 ± 52 ч, с IRGAFLO 6000 V – 1606 ± 42 ч, с Viscoplex 7-610 – 1376 ± 36 ч; масла АСГИМ – 4404 ± 116 ч.

Методология и методы исследования

Методология исследования основана на использовании методов теории подобия, физического моделирования. Экспериментальные данные проанализированы статистическими методами и обработаны с помощью регрессионного анализа. Изучение физико-химических и ЭС ГМ проводилось лабораторными методами в объеме ГОСТ 6794, а также физическими методами исследования – ИК-спектроскопия, гель-проникающая хроматография, исследование термической стабильности.

Положения, выносимые на защиту

1. Требования к конструктивным особенностям (объем ГМ, диаметр трубопроводов ГС) и параметрам работы (скорость потока ГМ, рабочие температура и давление, перепад давления в системе) ф-модели ГС АТ, заключающиеся в реализации условий приближенного подобия химмотологического процесса деградации свойств ГМ, определяемого равенством критериев: гидродинамического подобия Рейнольдса (Re) и Эйлера (Eu) в диапазоне значений 6060-8700 и 150-220 соответственно, и условиями однозначности, что соответствует интервалу давления от 16 до 21 МПа и диапазону температуры от 60 до 120 °С, а также одинаковым значениям плотности и кинематической вязкости масла ($\rho^T, \nu^T = idem$).

2. Метод прогнозирования срока применения ГМ, содержащего загущающую полиметакрилатную присадку, до замены в ГС АТ, сущность которого заключается в получении зависимости кинематической вязкости при 50 °С от продолжительности испытаний в стенде в режиме критичной для стабильности ГМ нагрузки (Р=21 МПа, Т=60 °С), определении предельного времени эксплуатации ГМ в ГС по установленной корреляционной зависимости между временем эксплуатации масла в ГС АТ (самолета Ил-76) и продолжительностью испытаний в стенде (коэффициент корреляции более 0,9), при котором кинематическая вязкость масла при 50 °С достигает предельного значения, равного 7,00 мм²/с.

3. Комплексный критерий стабильности вязкости загущающей присадки, характеризующий повышенную стойкость к термомеханической деструкции

при большем значении отношения разности средневязкостной (M_v) и средневесовой (M_w) ММ к средневязкостной (M_v) и меньшем значении PD.

Степень достоверности результатов

Обоснованность результатов диссертационного исследования подтверждается теоретическими и методологическими положениями, применением методов теории подобия, планирования эксперимента, согласованностью научных утверждений с экспериментальными данными; внедрением основных результатов исследования в практическую деятельность ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России» научно-исследовательского института.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечена экспериментальными исследованиями, проведенными стандартизованными, квалификационными методами и результатами стендовых испытаний; корреляцией прогнозных оценок стабильности свойств ГМ, полученных при стендовых испытаниях и натурных условиях эксплуатации ГС самолета Ил-76.

Основные результаты работы докладывались на национальной научно-практической конференции с международным участием «Нефть и газ: технологии и инновации», г. Тюмень, Тюменский индустриальный университет, 19-20 ноября 2020 года, конкурс молодых специалистов «Инновационные подходы к химмотологическому обеспечению разработки и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники», г. Москва, ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России», 15 декабря 2020 года, научно-техническая конференция «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса», г. Москва, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 27 апреля 2021 года, III научно-техническая конференции «Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «Энергетика. Технологии, аппараты и машин жизнеобеспечения», г. Анапа, 20 октября 2021 года, конференция молодых специалистов ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России», 17 декабря 2021 года.

По материалам диссертации опубликовано 10 научных работ, в том числе 5 статей, 3 из которых в журналах, рекомендованных ВАК при Министерстве образования и науки РФ, тезисы 5 докладов в сборниках материалов научных конференций, получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 130 источников, 4 приложений. Общий объем диссертационной работы включает 170 страниц машинописного текста, в том числе 34 рисунка и 46 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность и степень разработанности темы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, научная задача, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности результатов и апробация результатов исследования.

В Главе 1 проведен анализ особенностей условий применения ГМ в АТ. Определены основные факторы, влияющие на протекание ХП деградации свойств ГМ в границах исследования ГС самолета Ил-76.

Проведен анализ номенклатуры, состава и технологии производства ГМ, применяемых в ГС АТ, эксплуатируемой в условиях температур от минус 60 до 120 °С и рабочим давлением до 21 МПа. Отечественным ГМ для таких ГС является масло АМГ-10 по ГОСТ 6794-2017; приведены зарубежные аналоги данного ГМ. Представлены компоненты для разработки перспективных ГМ, позволяющие повышать уровень ЭС: вязкостно-температурные и низкотемпературные, устойчивость к термомеханической деструкции.

Проанализированы существующие методы оценки ЭС ГМ для ГС АТ. Установлено, что существующие методы оценки качества ГМ имеют ряд недостатков, заключающихся в условиях проведения испытаний, в размере материальных затрат и продолжительности исследований; в программе квалификационной оценки масел отсутствуют методы прогнозирования срока применения ГМ до замены в ГС АТ.

В Главе 2 представлены объекты исследования и методы испытаний ГМ для оценки их стабильности.

Для исследования влияния основы и загущающей присадки на стабильность свойств ГМ в качестве объектов исследования выбраны различные основы - полиальфаолефиновое масло ПАО-2, изопарафиновые масла НВИ-2 и VHV-4, дибутилсебацинат (далее – ДБС), диоктилтерефталат (далее – ДОТФ); загущающие присадки – полиметакрилатные присадки различной молекулярной массы Максойл В3-011, Viscoplex 7-610 и IRGAFLO 6000 V, поливинил-н-бутиловый полимер Синтолукс В-20.

Оценка механохимической и термоокислительной стабильности ГМ определена по показателям качества: кинематическая вязкость при 50 °С по ГОСТ 33-2016 и кислотное число по ГОСТ 5985-79 соответственно. С целью идентификации химического состава ГМ выбраны физические методы исследования – гель-проникающая хроматография (далее – ГПХ), ИК-спектроскопия и определение термической стабильности.

Для разработки метода прогнозирования срока применения ГМ до замены в АТ выбрано масло АМГ-10 по ГОСТ 6794-2017 трех отечественных

производителей, загущенных полиметакрилатными присадками с различными молекулярно-массовыми характеристиками, и масло АСГИМ по СТО 07548712-006-2013 как перспективная марка ГМ в сравнении с маслом АМГ-10. Представлены компонентный состав масел и характеристика основных компонентов; приведены физико-химические показатели качества..

При разработке метода прогнозирования срока применения ГМ в ГС АТ применен научно-методический подход системного анализа, основанный на физическом и математическом моделировании ХС «ГМ – ГС – условия эксплуатации», позволяющий исследовать ХП деградации свойств ГМ при их применении в гидросистеме.

На основе информационного, морфологического и функционального описания ХС «ГМ – ГС – условия эксплуатации» обоснованы условия приближенного подобия протекания ХП деградации свойств ГМ, представляемого в виде функциональной зависимости:

$$R = \varphi (T, V, U, d, \rho, \Delta P, \tau, \nu) \quad (1)$$

где R – результат изменения ЭС ГМ; T – рабочая температура ГМ, °С; V – объем ГМ в системе, м³; U – скорость потока жидкости, м/с; d – диаметр трубопроводов ГС, м; ρ – плотность ГМ, кг/м³; ΔP – перепад давления в ГС, МПа; τ – время работы ГС, ч; ν – кинематическая вязкость ГМ, мм²/с.

В качестве критериев приближенного подобия в ф-модели и ГС самолета определены – гидродинамические критерии Рейнольдса (Re) и Эйлера (Eu), полученные методом анализа размерностей на основе функциональной модели ХП (1). Условиями однозначности определено соответствие значений температуры, давления, вязкости и плотности масла в реальной ГС и в ф-модели.

На основании данных о технических параметрах ГС самолета Ил-76, как наиболее нагруженной ГС самолетов транспортной авиации, с помощью критериев подобия установлены требования к ф-модели и условиям ее функционирования (таблица 1).

Таблица 1 – Параметры работы гидравлической системы и ф-модели

Рабочий параметр	ГС самолета ИЛ-76	Значения критериев подобия	Ф-модель
Рабочая температура ГМ, Т, °С	60-120	Re = 6060-8700	60-120
Рабочее давление ГС, Р, МПа	16-21		16-21
Объем ГМ в системе, V, м ³	0,200		0,020
Скорость потока жидкости, U, м/с	10,1	Eu = 150-220	6,1
Диаметр трубопроводов, d, м	0,006		0,010
Перепад давления в системе, Р, МПа	13,4-18,5		15,4-20,5

Для исследования деградации ЭС ГМ в модельных условиях в соответствии с требованиями к ф-модели и условиям ее функционирования создан гидравлический стенд, позволяющий моделировать работу ГС путем непосредственного энергетического воздействия на ГМ при его подаче по элементам системы. Стенд состоит из силового электропривода с дистанционным управлением и регулированием, основного гидравлического экспериментального контура и пульта управления. Управление и контроль за работой стенда осуществляется с помощью программного блока управления.

По сравнительным результатам оценки кинематической вязкости при 50 °С в ГС Ил-76 и на стенде получена корреляционная зависимость между сроком применения масла в ГС и продолжительностью испытания на стенде в режиме, критичном для деградации свойств ГМ при его эксплуатации в ГС (T=60 °С и P=21 МПа) (рисунок 1).

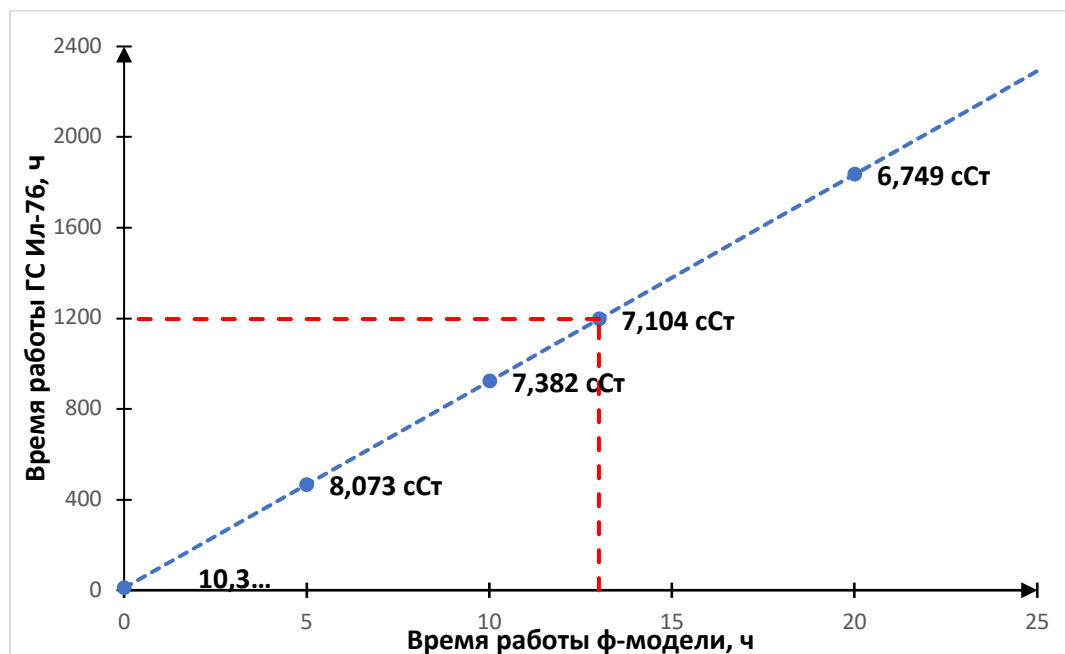


Рисунок 1 – Корреляционная зависимость между сроком эксплуатации масла в гидросистеме Ил-76 и продолжительностью испытания на стенде

По зависимости кинематической вязкости при 50 °С от продолжительности испытаний до предельного значения, равного 7 мм²/с, и корреляционной зависимости (коэффициент корреляции более 0,9) между временем эксплуатации масла АМГ-10 в гидросистеме самолета Ил-76 и продолжительностью работы на стенде:

$$\tau_{\text{самолет}} = 91,75 \cdot \tau_{\text{исп}} \quad (2)$$

где $\tau_{\text{самолет}}$ – время работы масла АМГ-10 в ГС самолета Ил-76;

$\tau_{\text{исп}}$ – время работы масла АМГ-10 в стенде,

предложена модель прогнозирования срока применения ГМ до замены в ГС АТ в виде функции:

$$\tau_{\text{самолет}} = f_{\text{корр}}(\tau_{\text{исп}}), \text{ где } \tau_{\text{исп}} = \lim_{v_{50} \rightarrow 7,00} F_v(T_{\min}, P_{\max}) \quad (3)$$

На основе модели (3) предложен метод прогнозирования срока применения ГМ в ГС АТ до замены, заключающийся в определении времени эксплуатации масла до замены по корреляционной зависимости (коэффициент корреляции более 0,9) между временем работы масла в ГС АТ (самолет Ил-76) и продолжительностью испытаний в стенде в режиме критичной для стабильности ГМ нагрузки (21 МПа, 60 °С) до предельного значения кинематической вязкости при 50 °С, равного 7 мм²/с.

В Главе 3 представлены результаты исследования зависимостей и закономерностей изменения свойств ГМ при его применении в ГС АТ.

По результатам исследования влияния основ и загущающих присадок на стабильность свойств базовых масел, представляющих собой основу, загущенную 10 % загущающей присадки, установлено, что загущающая способность присадок возрастает в ряду Максойл ВЗ-011 – Viscoplex 7-610 – Синтолюкс В-20; присадка на основе поливинил-н-бутилового эфира обладает большей загущающей способностью. Присадки Viscoplex 7-610 и Максойл ВЗ-011 в смеси с различными основами проявляют депрессорные свойства: снижается температура застывания смесей по сравнению с основами; присадка Синтолюкс В-20 повышает температуру застывания ГМ. Стабильность вязкости после озвучивания на установке УЗДН выше у образцов, загущенных присадкой Максойл ВЗ-011. Минимальное снижение вязкости наблюдается в образцах ПАОМ-2 + 10 % Максойл ВЗ-011 и масло изопарафиновое VHVI-4 + 10 % Максойл ВЗ-011. В образцах с основой ДОТФ выявлен наибольший эффект деструкции.

В отечественном производстве масла АМГ-10 используют две различные основы (Таблица 2):

Таблица 2 - Компонентный состав масла АМГ-10 отечественного производства

Название образца	Состав основы масла
Образец № 1	Насыщенные парафино-нафтеновые – 98,6 %; Ароматические УВ – 1,34 %; Смолы – 0,06 %
Образец № 2	ПАОМ-2 – 20-25 % масс.
	Нафтенное масло – 75-80 % масс.

Для исследования стабильности к деструкции загущающих полиметакрилатных присадок – отечественной Максойл ВЗ-011 и зарубежной Viscoplex 7-610 – в составе основ масла АМГ-10 различного состава проведена

оценка стабильности вязкости после озвучивания на ультразвуковой установке УЗДН. Установлено, что на стабильность вязкости ГМ влияет полимерный загуститель: полиметакрилатная присадка Максойл ВЗ-011 устойчивее к механической деструкции на 7 % в составе используемых основ, чем Viscoplex 7-610; основа масла не оказывает влияния на стабильность вязкости ГМ.

Исследованиями методом ГПХ установлено, что присадка Максойл ВЗ-011 с более узким молекулярно-массовым распределением (меньше степень полидисперсности) по сравнению с Viscoplex 7-610 и IRGAFLO 6000 V, устойчивее к деструкции в составе масла АМГ-10 (Таблица 3).

Таблица 3 – Молекулярно-массовые характеристики загущающих присадок

Образец	Средне- весовая ММ, M_w , г/моль	Средне- вязкостная ММ, M_v , г/моль	$\frac{M_v - M_w}{M_v}$	Степень поли- дисперсности, PD	Степень деструкции полимера после 35 ч испытаний в стенде, %
Присадка Viscoplex 7-610	140093	253382	0,447	3,14	39,0
Присадка IRGAFLO 6000 V	154386	289420	0,467	3,04	38,3
Присадка Максойл ВЗ-011	101505	193437	0,475	2,47	34,4

По результатам оценки термической стабильности полиметакрилатных присадок получено, что термическая стабильность возрастает в ряду Viscoplex 7-610 – Максойл ВЗ-011 – IRGAFLO 6000 V (Таблица 4).

Таблица 4 – Результаты оценки термической стабильности загущающих присадок

Наименование показателя	Наименование присадки		
	Viscoplex 7-610	Максойл ВЗ-011	IRGAFLO 6000 V
Температура начала реакции, °С	208,05	212,91	251,52
Температура 10 % потери массы, °С	152,44	207,36	236,81
Температура 50 % потери массы, °С	259,64	259,64	325,35
Температура первого максимума, °С	313,77	314,56	399,44
Температура окончания тепловых эффектов, °С	544,51	544,22	597,05

Результаты термогравиметрического анализа показывают, что деструкция загущающей присадки в составе ГМ обусловлена в большей мере механическим воздействием на полимерный загуститель, чем температурой, что подтверждает преобладающее значение процессов термомеханической деструкции загущающей присадки при эксплуатации ГМ в ГС.

В соответствии с разработанным методом получены количественные зависимости изменения кинематической вязкости при 50 °С от продолжительности испытаний на стенде при критичной для стабильности ГМ нагрузке, соответствующей значениям давления (21 МПа) и температуры (60 °С) (рисунок 2).

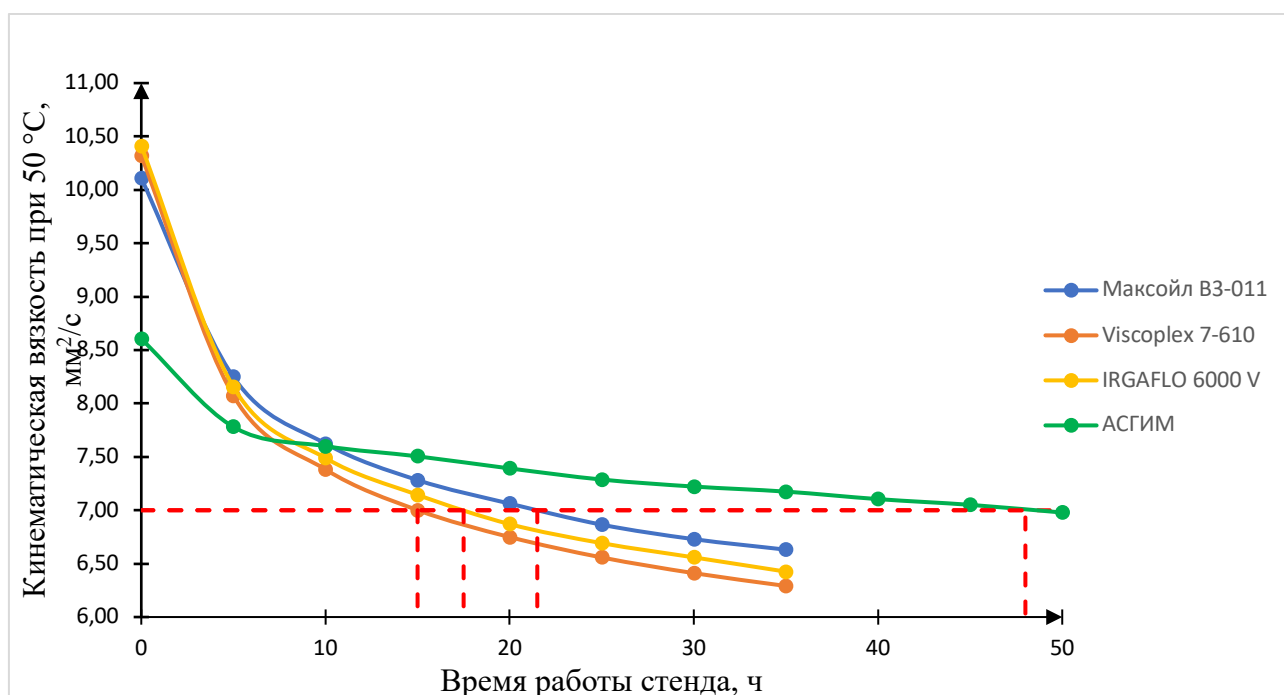


Рисунок 2 – Зависимости изменения кинематической вязкости при 50 °С масла АМГ-10 с различными загустителями и масла АСГИМ при испытании на стенде в условиях $T=60\text{ °С}$ и $P=21\text{ МПа}$

Установлено, что кинематическая вязкость при 50 °С для АМГ-10 снизилась до 7 мм²/с с присадкой Максойл В3-011 после 21,5 ч испытаний, IRGAFLO 6000 V – через 17,5 ч, с Viscoplex 7-610 – через 15 ч, для масла АСГИМ – после 48 ч продолжительности испытаний на стенде. Это свидетельствует о повышенной устойчивости к деструкции полиметакрилатной присадки Максойл В3-011 в составе масла АМГ-10 по сравнению с Viscoplex 7-610 и IRGAFLO 6000 V. Повышенную стойкость к деструкции масла АСГИМ по сравнению с маслом АМГ-10, а следовательно, более высокий ресурс его эксплуатации в ГС Ил-76 до замены обоснован составом масла АСГИМ: загущающим компонентом является реологический концентрат NYCOPERF RA 655 на основе маловязких моноэфиров C_5 - C_{10} -карбоновых кислот и C_8 - C_{13} -

спиртов, стабилизированных полиметакрилатом, причем концентрация ПМА менее 10 %.

Установлены прогнозные сроки применения¹ масла АМГ-10 в ГС самолета Ил-76 до его замены с различными полиметакрилатными присадками: с Максойл В3-011 – 1973 ± 52 ч, с IRGAFLO 6000 V – 1606 ± 42 ч, с Viscoplex 7-610 – 1376 ± 36 ч; масла АСГИМ – 4404 ± 116 ч.

По графическим зависимостям (рисунок 2) получено, что скорость изменения кинематической вязкости при 50 °С у ГМ с загущающими присадками равна: для Максойл В3-011 – $0,0046$ (мм²/с)/ч, для Viscoplex 7-610 – $0,0081$ (мм²/с)/ч, для IRGAFLO 6000 V – $0,0124$ (мм²/с)/ч.

Исследования зависимостей и закономерностей деградации свойств ГМ в модельных условиях эксплуатации проведены при следующих значениях параметров: объем ГМ в баке ($V_{ст}$) 20 дм³; температура масла (T , X_1) от 60 до 120 °С; рабочее давление (P , X_2) от 16 до 21 МПа; время работы стендовой установки (τ , X_3) от 30 до 40 ч.

Для получения модели ХП использован 3-х факторный D-оптимальный план второго порядка Бокса-Бенкена.

Для получения полиномиальных уравнений регрессии второго порядка, отражающих зависимость показателей качества масла АМГ-10 от факторов эксперимента, проведены испытания на стенде. Для проб, отобранных с интервалом 5 ч, определены кинематическая вязкость при 50 °С и кислотное число. Установлено, что кинематическая вязкость снижается с увеличением давления и температуры. Наибольшее относительное снижение кинематической вязкости масла АМГ-10 ($dv_{50}/d\tau$) происходит при испытаниях в режиме максимального давления (21 МПа) и минимальной температуры (60 °С), что свидетельствует о большем механическом воздействии на полимер при дросселировании и, следовательно, более интенсивном протекании процесса механохимической деструкции. При этом изменения кислотного числа испытуемого масла АМГ-10 находятся в пределах сходимости метода определения².

Зависимости изменения кинематической вязкости при 50 °С масла АМГ-10 представлены на рисунке 3.

¹ Значения времени представлены с учетом прецизионности метода СТО 08151164-0473-2023 Гидравлические жидкости. Метод оценки стабильности свойств на стенде ($\pm 2,63$ %) и коэффициента корреляции между временем эксплуатации масла АМГ-10 в ГС самолета Ил-76 и продолжительностью работы на стенде;

² Прецизионность определения кислотного числа согласно ГОСТ 5985-87 при значении кислотного числа до 0,5 мг КОН/г составляет 0,06 мг КОН/г.

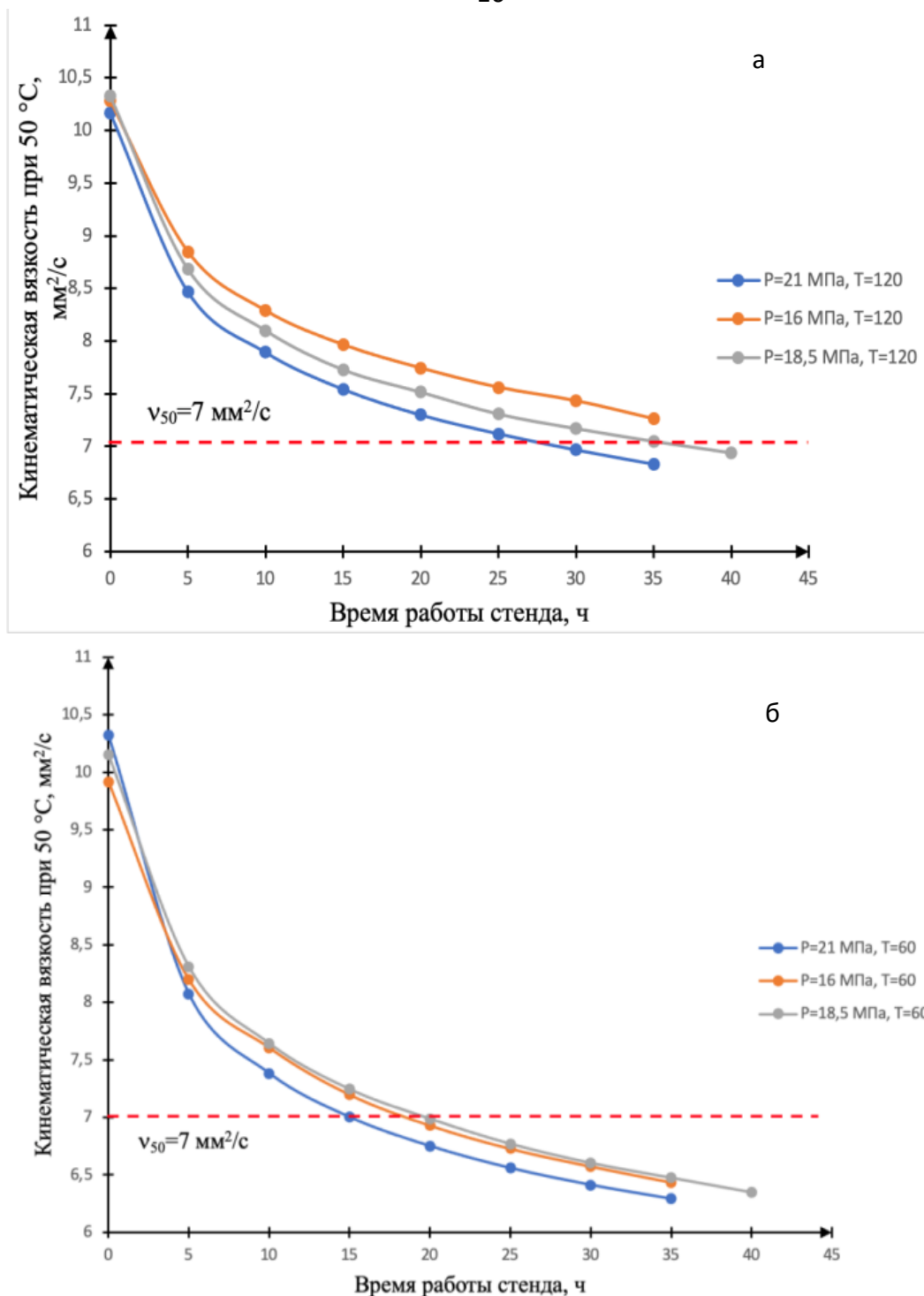


Рисунок 3 – Зависимости изменения кинематической вязкости при 50 °C масла АМГ-10 от времени работы стенда при разном давлении: P=21 МПа, P=18,5 МПа и P=16 МПа и температурах а) T=120 °C б) T=60 °C

Согласно эксплуатационной документации, масло АМГ-10 пригодно для работы в ГС самолета, если его кинематическая вязкость при 50 °C выше 7,00 мм²/с и кислотное число менее 0,15 мг КОН/г. При анализе результатов стендовых испытаний установлено, что определяющим показателем качества является кинематическая вязкость при 50 °C – в процессе испытаний ГМ на

стенде вязкость уменьшилась ниже нормы; максимальное значение кислотного числа по результатам испытаний – не более 0,02 мг КОН/г.

По результатам испытаний получена регрессионная модель изменения кинематической вязкости при 50 °С масла АМГ-10.

По методике планирования эксперимента³ рассчитаны числовые значения коэффициентов. С учетом значимости коэффициентов регрессии, установленной с помощью t-критерия Стьюдента, регрессионная зависимость изменения кинематической вязкости при 50 °С (Y_1) ГМ от факторов условий испытаний имеет вид (в кодированном значении):

$$Y_1 = 6,737 + 0,315 \cdot X_1 - 0,163 \cdot X_2 - 0,122 \cdot X_3 - 0,071 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,006 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,016 \cdot X_1^2 - 0,016 \cdot X_2^2 + 0,045 \cdot X_3^2 \quad (4)$$

При деструкции загущающей присадки масла в процессе течения его по гидравлическому контуру в стенде через фильтрующие элементы возникает перепад давления, который фиксируется манометрами. Получено уравнение регрессии для перепада давлений (Y_2) от факторов условий испытаний ГМ:

$$Y_2 = 1,30 + 0,13 \cdot X_1 + 0,30 \cdot X_2 - 0,05 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,15 \cdot X_1^2 - 0,50 \cdot X_2^2 \quad (5)$$

Однако на значение перепада давления в системе наибольшее влияние оказывает рабочее давление ГС: чем оно больше, тем больше перепад, что подтверждает регрессионная зависимость (5). Следовательно, оценка стабильности свойств ГМ, характеризуемая стойкостью к термомеханической деструкции, наиболее достоверной является по изменению кинематической вязкости, зависящей в большей мере от температуры.

Построены диаграммы поверхностей отклика, отражающие зависимость кинематической вязкости при 50 °С от двух переменных факторов при фиксированном третьем (факторы представлены в кодированном виде согласно плану Бокса-Бенкена) (рисунок 4).

Анализ полученных зависимостей показал, что на снижение кинематической вязкости наибольшее влияние оказывает температура и давление: чем ниже температура испытания и выше давление, тем больше деструкция загущающей присадки.

³ Box G.E.P., Behnken D.W. Some new three level designs for the study of quantitative variables. – Technometrics, 1960, v. 2, N4, h. 455-475).

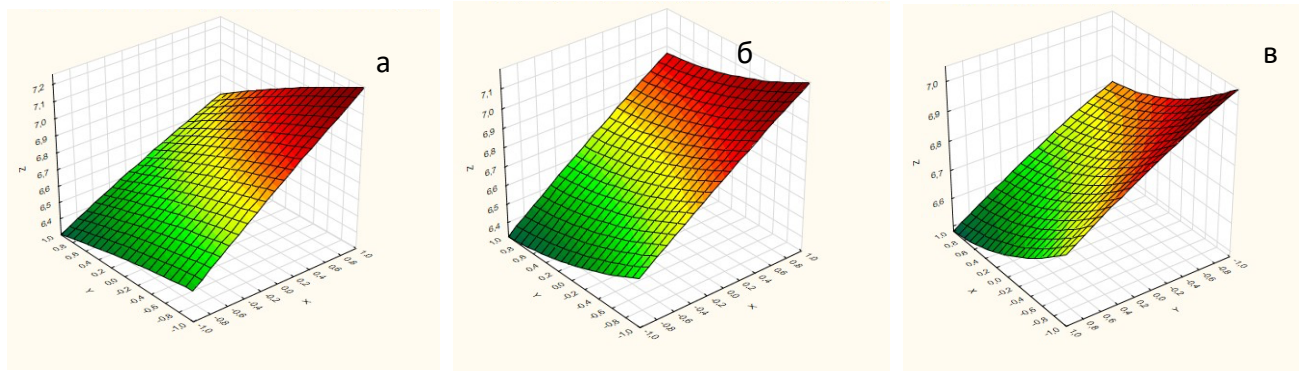


Рисунок 4 – Зависимости кинематической вязкости при 50 °С (Z) от:
 а – температуры T_u (X) и давления P_u (Y) при времени $\tau_u = \text{const}$; б –
 температуры T_u (Y) и времени τ_u (X) при давлении $P_u = \text{const}$; в – давления P_u
 (Y) и времени τ_u (X) при температуре $T_u = \text{const}$

Методом ГПХ исследованы образцы масла АМГ-10 различной вязкости после стендовых испытаний. По результатам установлено, что при снижении кинематической вязкости масла ММ его полимерного загустителя и PD снижаются (Таблица 5).

Таблица 5 – Молекулярно-массовые характеристики образцов масла АМГ-10 с присадками Viscoplex 7-610 и Максойл ВЗ-011 после стендовых испытаний

Образец		M_w , г/моль	M_v , г/моль	$\frac{M_v - M_w}{M_v}$	PD
Viscoplex 7-710	Масло АМГ-10 $\nu=10,30 \text{ мм}^2/\text{с}$	130444	207596	0,372	1,933
	Масло АМГ-10 $\nu=8,288 \text{ мм}^2/\text{с}$	89237	116094	0,231	1,504
	Масло АМГ-10 $\nu=6,465 \text{ мм}^2/\text{с}$	57825	71396	0,190	1,340
Максойл ВЗ-011	Масло АМГ-10 $\nu=10,11 \text{ мм}^2/\text{с}$	113115	220648	0,487	2,266
	Масло АМГ-10 $\nu=8,759 \text{ мм}^2/\text{с}$	79140	110681	0,285	1,771
	Масло АМГ-10 $\nu=7,086 \text{ мм}^2/\text{с}$	56234	71595	0,215	1,471

Из таблицы 5 следует, что устойчивость к деструкции полиметакрилатного загустителя повышается при уменьшении значений PD и ММ. Для оценки стабильности к термомеханической деструкции масла при его применении в ГС АТ предложен комплексный критерий стабильности вязкости загущающей присадки, представляющий отношение разности средневязкостной (M_v) и средневесовой (M_w) ММ к средневязкостной ММ (M_v), стремящееся к максимуму, а степень полидисперсности (PD) – к минимуму:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{M_v - M_w}{M_v} \rightarrow \max \\ PD \rightarrow \min \end{array} \right. \quad (7)$$

По результатам исследования методом ИК-спектроскопии образцов масла АМГ-10, отобранных после стендовых испытаний с интервалом 5 ч при давлении 21 МПа и температурах 60, 90 и 120 °С, значимых отличий спектрограмм не установлено, что характеризует неизменность структурно-группового состава испытуемого масла при изменении его вязкости.

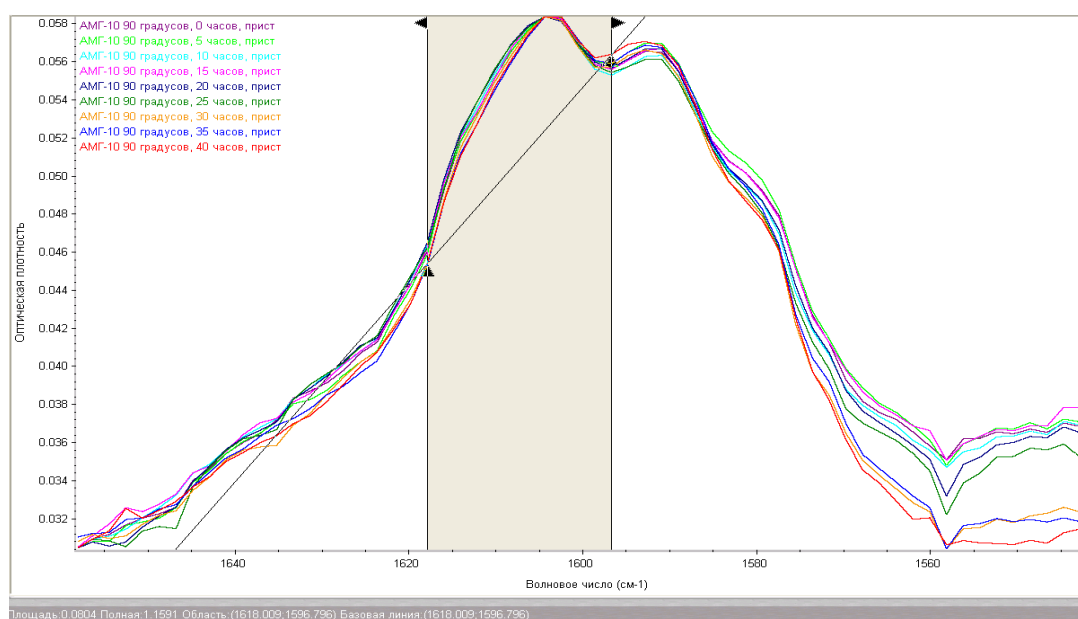


Рисунок 5 – ИК-спектры образцов масла АМГ-10 после испытаний в ф-модели ГС течение 40 ч при температуре $T=90\text{ }^{\circ}\text{C}$ в диапазоне волновых чисел $1700\text{--}1500\text{ см}^{-1}$

На основе результатов исследований методами ИК-спектроскопии, термогравиметрического анализа, ГПХ образцов ГМ с полиметакрилатной присадкой доказано, что при применении ГМ, загущенного полиметакрилатными присадками, в ГС протекают процессы термомеханической деструкции, а процессы окисления не значимы.

В Главе 4 приведена технико-экономическая оценка результатов исследования стабильности свойств ГМ для АТ. Показано, что использование нового метода оценки стабильности свойств ГМ повышает информативность и достоверность принятия решений по срокам службы ГМ в ГС, сокращает время проведения стендовых испытаний до 50 % и снижает затраты до 20 %.

Предложено включить новый метод прогнозирования срока применения масла до замены в ГС АТ в перечень квалификационных испытаний масла АМГ-10 с целью подтверждения соответствия физико-химических показателей

и ЭС масла требованиям и нормам ГОСТ 6794-2017, а также использовать предложенный комплексный критерий стабильности вязкости загущающей присадки в составе ГМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью прогнозирования срока применения масла до замены в ГС АТ в ходе диссертационных исследований решена актуальная научная задача, заключающаяся в установлении в модельных условиях количественных зависимостей, характеризующих деградацию ЭС ГМ при применении в ГС АТ, и разработке на их основе метода прогнозирования срока их применения до замены.

Получены следующие новые научные и практические результаты:

1. Обоснованы требования к конструктивным особенностям (объем ГМ, диаметр трубопроводов ГС) и параметрам работы (скорость потока ГМ, рабочие T и P , ΔP в системе) ф-модели ГС АТ, заключающиеся в реализации условий приближенного подобия ХП деградации свойств ГМ в ф-модели и ГС АТ, определяемого равенством критериев: гидродинамического подобия Рейнольдса (Re) и Эйлера (Eu) в диапазоне значений 6060-8700 и 150-220 соответственно, и условиями однозначности, что соответствует интервалу давления от 16 до 21 МПа и диапазону температуры от 60 до 120 °С, а также одинаковым значениям кинематической вязкости и плотности масла ($\nu^T, \rho^T = idem$).

2. Создан стенд с ПБУ и разработанным ПО, позволяющий при исследовании процессов деградации свойств ГМ управлять и контролировать работу стенда по определяющим процесс факторам (температура, давление, продолжительность испытаний) для получения информативных (многофакторных) оценок механохимической и термоокислительной стабильности масел.

3. Установлена корреляционная зависимость между продолжительностью испытаний на стенде и временем применения ГМ в ГС, на основе которой разработан метод прогнозирования срока применения масла с загущающей присадкой до замены в ГС АТ, позволивший установить прогнозные сроки применения в ГС Ил-76 до замены для масла АМГ-10 с полиметакрилатными присадками: Максойл ВЗ-011 – 1973 ± 52 ч, с IRGAFLO 6000 V – 1606 ± 42 ч, с Viscoplex 7-610 – 1376 ± 36 ч; масла АСГИМ – 4404 ± 116 ч.

4. По результатам исследования зависимостей и закономерностей изменения свойств ГМ при его эксплуатации ГС АТ в модельных условиях выявлено, что кинематическая вязкость при 50 °С является показателем качества, наиболее склонным к снижению. Изменения кислотного числа

находятся в пределах сходимости метода определения. Установлено, что скорость снижения вязкости масла АМГ-10, сопровождающееся деструкцией загущающей присадки, возрастает при меньшей температуре и большем давлении, при этом относительное снижение кинематической вязкости ($d\nu_{50}/d\tau$) масла АМГ-10 с присадкой Viscoplex 7-610 при 21 МПа и 60 °С больше на 7 %, чем при 21 МПа и 120 °С.

5. Показано, что вязкость основ масла АМГ-10 (изопарафиновых масел НВИ-2 и VHV-4, масла ПАО-2) после озвучивания на УЗДН не меняется;

Методом ИК-спектроскопии образцов масла АМГ-10 после стендовых испытаний не установлено образование продуктов окисления углеводородов в составе ГМ при изменении (снижении) кинематической вязкости масла.

6. Скорость снижения кинематической вязкости ($d\nu_{50}/d\tau$) масла АМГ-10 с присадками Максойл ВЗ-011 в 1,8 раза меньше, чем с присадкой Viscoplex 7-610 и в 2,7 раза, чем с присадкой IRGAFLO 6000 V, что свидетельствует о различной стойкости к механической деструкции присадок, имеющих различные молекулярно-массовые характеристики, и позволило предложить комплексный критерий стабильности вязкости загущающей присадки, характеризующий повышенную стойкость к термомеханической деструкции при большем значении отношения разности M_v и M_w к M_v и меньшем значении PD.

7. Метод прогнозирования срока применения ГМ до замены в ГС АТ рекомендовано включить в объем квалификационных испытаний масла АМГ-10, что позволяет повысить информативность и достоверность результатов, сократить время проведения стендовых испытаний. Применение комплексного критерия стабильности вязкости загущающей присадки при разработке новых ГМ и модернизации существующих позволяют обосновать выбор наиболее стойкого к термомеханической деструкции загустителя.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, выпускаемых в РФ, в соответствии с требованиями ВАК Минобрнауки РФ:

1. Митягин, В. А. Возможность программной оценки стабильности гидравлических жидкостей на стенде / / В. А. Митягин, И. В. Поплавский, Е. М. Вижанков, **Е. И. Сафронова** (Гурова) // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. – 2020. – № 9. – С. 39-43.

2. Митягин, В. А. Программа оценки гидравлических жидкостей на стенде / В. А. Митягин, И. В. Поплавский, **Е. И. Сафронова** (Гурова) // Нефтегазовое дело. – 2021. - № 4. – С. 49–56.

3. **Сафронова** (Гурова), **Е. И.** Прогнозная модель срока смены масла АМГ-10 при его применении в гидравлической системе самолета / **Е. И. Сафронова** (Гурова), В. А. Митягин, Д. А. Маньшев, И. В. Поплавский // Нефтегазовое дело. – 2022. – № 4. – С. 136-153.

- в отраслевых научно-технических журналах:

4. Митягин, В. А. Оценка стабильности рабочих жидкостей на гидравлическом стенде / В. А. Митягин, И. В. Поплавский, Е. М. Вижанков, **Е. И. Сафронова** (Гурова) // Труды Российского Государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина. – 2019. - № 3. – С. 165-173.

5. Маньшев, Д. А. Обоснование методического подхода к оценке стабильности эксплуатационных свойств гидравлических жидкостей при применении в военной авиационной технике / Д. А. Маньшев, **Е. И. Сафронова** (Гурова) // Евразийский союз ученых (ЕСУ). – 2020. – № 11 (80). – С. 40-47.

- в материалах конференций:

6. Маньшев, Д. А. Методы определения стабильности свойств рабочих жидкостей в гидравлических системах / Д. А. Маньшев, **Е. И. Сафронова** (Гурова) // Инновационные научные исследования в современном мире: теория, методология, практика. Сборник статей по материалам I международной научно-практической конференции. – 2019. – № 1. – С. 147-153.

7. **Сафронова** (Гурова), **Е. И.** Новый методический подход к исследованию стабильности свойств масла АМГ-10 для гидравлических систем авиационной техники / **Е. И. Сафронова** (Гурова), Д. А. Маньшев // Сборник статей по материалам национальной научно-практической конференции с международным участием «Нефть и газ: технологии и инновации». В 3 томах. Том 2. – 2020. – С.145-148.

8. **Сафронова** (Гурова), **Е. И.** Оценка стабильности гидравлических жидкостей военной авиационной техники на стенде с помощью программного обеспечения / **Е. И. Сафронова** (Гурова), Д. А. Маньшев // Технологии энергообеспечения. Сборник статей II Всероссийской научно-технической конференции. – 2020. – С. 411-420.

9. Маньшев, Д. А. Способ оценки стабильности эксплуатационных свойств гидравлических жидкостей для авиационной техники // Д. А. Маньшев, **Е. И. Сафронова** (Гурова) // Сборник трудов XIV Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России», Том 1 – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. – 2021. – С. 146-155.

10. **Сафронова** (Гурова), **Е. И.** Исследование изменения кинематической вязкости масла АМГ-10 в условиях эксплуатации самолета Ил-76 / **Е. И. Сафронова** (Гурова), Д. А. Маньшев // Сборник статей III научно-технической

конференции «Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «Энергетика. Технологии, аппараты и машин жизнеобеспечения». – 2021. – С. 87–97.

- в свидетельствах о государственной регистрации программ для ЭВМ:

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2019667726 РФ. Программа для оценки стабильности свойств рабочих жидкостей для гидравлических систем / Митягин В.А., Поплавский И.В., Вижанков Е.М., Калинин А.Е., Цветков К.В., **Сафронова** (Гурова) **Е.И.** – Заявка № 2019664462; заявл. 14.11.2019; опубл. 26.12.2019.