

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Российский государственный университет нефти и газа  
(национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина»

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

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, доцент  
Маньшев Дмитрий Альевич

Москва – 2025

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ МАСЕЛ В АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКЕ И АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СТАБИЛЬНОСТИ ИХ СВОЙСТВ.....	16
1.1 Анализ особенностей условий применения гидравлических масел в авиационной технике и требования к стабильности их эксплуатационных свойств.....	16
1.2 Анализ состава и технологии получения гидравлических масел и их влияния на термоокислительную стабильность и стойкость к термомеханической деструкции при применении в авиационной технике.....	31
1.3 Анализ методов оценки физико-химических и эксплуатационных свойств гидравлических масел для авиационной техники и направления их совершенствования для прогнозирования стабильности свойств в условиях эксплуатации.....	35
Выводы по Главе 1, цель, задачи и структурная схема исследования.....	46
ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ СВОЙСТВ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ МАСЕЛ ДЛЯ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ.....	49
2.1 Объекты, предмет и границы исследования.....	49
2.2 Методы испытаний и исследований стабильности свойств гидравлических масел для авиационной техники.....	65
2.2.1 Методы испытаний и исследований стабильности физико-химических и эксплуатационных свойств гидравлических масел для авиационной техники.....	65
2.2.2 Физические методы исследования состава гидравлических масел.....	66
2.3 Разработка метода прогнозирования срока применения гидравлических масел до замены в гидравлической системе авиационной техники.....	69
2.3.1 Обоснование условий приближенного подобия химмотологического процесса деградации свойств гидравлических масел при применении в авиационной технике и создание стенда как физической модели гидросистемы.....	70

2.3.2 Обоснование режимов испытания масел на стенде и разработка метода прогнозирования срока применения гидравлических масел до замены в гидравлической системе авиационной техники.....	82
Выводы по Главе 2.....	88
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ И ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ И СОСТАВА ГИДРАВЛИЧЕСКИХ МАСЕЛ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СРОКА ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКЕ ДО ЗАМЕНЫ.....	90
3.1 Исследование физико-химических свойств базовых масел с загущающими присадками и их стабильности после озвучивания на ультразвуковой установке...	90
3.2 Исследование деградации свойств и изменения состава гидравлических масел в модельных условиях эксплуатации и прогнозирование сроков их применения до замены .....	100
3.2.1 Прогнозирование сроков применения гидравлических масел в гидравлической системе авиационной техники до замены.....	100
3.2.2 Исследование зависимостей и закономерностей деградации свойств гидравлических масел в модельных условиях эксплуатации.....	103
3.2.3 Исследование изменения состава образцов масла АМГ-10 и обоснование критерия стойкости загущающих полиметакрилатных присадок к термомеханической деструкции.....	123
Выводы по Главе 3.....	131
ГЛАВА 4. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИХ ПРИМЕНЕНИЮ.....	134
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	138
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	140
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	141
Приложение А (обязательное) Перечень методов определения показателей стабильности гидравлических масел и их краткое описание .....	154

Приложение Б (обязательное) Образец протокола по результатам измерения молекулярной массы образцов масла АМГ-10 методом гель-проникающей хроматографии на хроматографе Agilent 1260 Infinity II.....	164
Приложение В (обязательное) Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019667726.....	167
Приложение Г (обязательное) Акт реализации результатов научных исследований диссертационной работы.....	168

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы исследования**

В гидравлических системах (далее – ГС) авиационной техники (далее – АТ) применяются отечественные гидравлические масла (далее – ГМ) марок: масло АМГ-10 по ГОСТ 6794 [1] (далее – масло АМГ-10), рабочие жидкости 7-50С-3 по ГОСТ 20734 [2] и НГЖ-5У по ТУ 38.401-58-57-93 [3]. В ГС зарубежной АТ используют аналогичные по свойствам маслу АМГ-10: ГМ AeroShell Fluid 41, Mobil Aero HF, HYDRA UNY COIL FH -51, ROY CO 756 [4].

По основным показателям физико-химических свойств, термоокислительной стабильности (далее – ТОС) и коррозионной активности жидкости Mobil Aero HF, Royco 756, FH 51 аналогичны требованиям ГОСТ 6794 и квалификационным нормам для масла АМГ-10.

Развитие АТ и их ГС требует особых эксплуатационных свойств (далее – ЭС) ГМ [5]. Уменьшение массы элементов ГС возможно за счет способности ГМ отводить тепло, выделяемое в результате потерь энергии. Для улучшения динамических характеристик систем управления, уменьшения габаритных размеров форсируют гидравлические насосы по давлению: используют ГС и насосы с рабочим давлением от 35 МПа до 60 МПа и выше [6]. Увеличиваются скорости полета летательных аппаратов, а вместе с тем возрастают рабочие температуры (до 150 °С). В связи с этим конструкционные материалы ГС совершенствуются, а к применяемым ГМ предъявляют повышенные требования по стабильности их ЭС свойств.

Масло на нефтяной основе АМГ-10 является самым массовым в потреблении на рынке отечественных авиационных ГМ, однако оно имеет ряд существенных недостатков. Во-первых, большинство российских производителей масла АМГ-10 (ООО «НПП Квалитет», ООО «Полиэфир» и другие) вводят в его состав зарубежные загущающие присадки (Viscoplex 7-610, IRGAFLO 6000 V) несмотря на существование отечественных аналогов данного загустителя – вязкостные

присадки ВИНПОЛ по ТУ 0258-037-05788576-2000 и Максойл ВЗ-011 по ТУ 0257-006-48328553-2014.

Согласно проведенным исследованиям, масло АМГ-10 с вязкостной присадкой Максойл ВЗ-011 не уступает по физико-химическим характеристикам маслу АМГ-10, в составе которого загущающая присадка Viscoplex 7-610.

Кроме этого, взамен маслу на нефтяной основе разработано синтетическое гидравлическое авиационное масло АСГИМ по СТО 07548712-006-2013 [7] (далее – масло АСГИМ).

В таблице 1 представлены значения основных показателей качества масла АСГИМ в сравнении с аналогичным маслом АМГ-10.

Таблица 1 – Сравнение эксплуатационных свойств синтетического масла АСГИМ и масла на нефтяной основе АМГ-10

Физико-химический показатель	Единица измерения	Гидравлическое масло		
		АСГИМ	АМГ-10 (Винипол)	АМГ-10 (Viscoplex)
Стабильность вязкости после озвучивания на УЗДН в течение 50 мин.	изменение кинематической вязкости при 50 °С, %	20	33,5	39,5
ТОС и коррозионная активность при 125 °С в течение 100 ч и расходе воздуха 5 л/час		0,3	2,14	5,74
Испаряемость при 150 °С	%	6,44	26	11
Температура вспышки	°С	151	110	106

Масло АСГИМ обладает высокой стойкостью к термомеханической деструкции, повышенными трибологическими характеристиками и стойкостью к окислению при температуре до 200 °С. По низкотемпературным свойствам и гидролитической стабильности оно превосходит зарубежные аналоги

синтетических ГМ по спецификациям MIL-PRF-83282D [8] и MIL-PRF-87257B [9], обладающая оптимальными вязкостно-температурными свойствами. Масло АСГИМ совместимо со штатными российскими и зарубежными аналогами. Одним из его преимуществ является ресурс работоспособности, подтвержденный испытаниями на насосе марки НП-128 в ОАО АК «Рубин» в течение более 1500 ч. При этом масло АМГ-10, применяемое в ГС, требует замены каждые 20 ч при работе в аналогичных условиях [10].

Рынок ГМ ежегодно пополняется новыми продуктами: взамен маслам на нефтяной основе появляются ГМ с более высоким уровнем физико-химических и эксплуатационных свойств, в составе которых все чаще используют продукты гидрокрекинга и сложноефирные компоненты, позволяющие улучшать низкотемпературные показатели масел. С целью достижения требуемого уровня вязкостно-температурных характеристик применяют загущающие присадки на основе полимеров различной химической природы.

Одним из самых важных требований, предъявляемых к ГМ, является его способность сохранять требуемый уровень физико-химических и эксплуатационных свойств в течение заданного срока службы. Однако существует ряд проблем, вызванный недостаточной информативностью оценки ЭС ГМ для прогнозирования сроков его применения в ГС.

Оценка физико-химических и ЭС ГМ проводится в статических условиях лабораторными методами [11-32]. Стабильность ГМ обычно оценивают по изменению их физико-химических свойств в процессе эксплуатации или хранения [33]. К основным показателям стабильности ГМ относятся: внешний вид, кинематическая вязкость, кислотное число, термоокислительная стабильность и коррозионная активность, стабильность вязкости после озвучивания на ультразвуковой установке, массовая доля механических примесей, содержание воды, температура застывания, температура вспышки в открытом тигле.

При квалификационных испытаниях масла АМГ-10 для комплексной оценки работоспособности ГС применяют стендовый метод оценки стабильности свойств ГМ. Однако отсутствует методика прогнозирования срока службы масла при его

эксплуатации в ГС, которая позволила бы устанавливать минимальный срок его применения до его замены.

Для получения прогнозных оценок сроков применения ГМ до замены требуется установление количественных зависимостей показателей качества, характеризующих стабильность свойств ГМ, от его состава, параметров рабочего процесса, условий эксплуатации АТ. Зависимости деградации ЭС ГМ, могут быть получены как в результате испытаний в модельных условиях, так и при применении ГМ в ГС, а также должны соответствовать и отражать функциональную связь.

Кроме того, актуальность более достоверной оценки сроков смены ГМ при его применении в ГС АТ подтверждается разработкой и модернизацией ГМ взамен маслам на нефтяной основе, об ЭС которых 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.

#### **Цели и задачи**

Цель 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.

**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.

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 новизна.**

В ходе диссертационного исследования получены новые научно-практические результаты:

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 мм<sup>2</sup>/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

( $v_{50}$ ) 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 самолета Ил-76 до его замены масла АМГ-10 с различными полиметакрилатными присадками: с отечественной присадкой Максойл В3-011 –  $1973 \pm 52$  ч, с IRGAFLO 6000 V –  $1606 \pm 42$  ч, Viscoplex 7-610 –  $1376 \pm 36$  ч; масла АСГИМ –  $4404 \pm 116$  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 В3-011), 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:**

1. Впервые в условиях приближенного подбора 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 В3-011 –  $1973 \pm 52$  ч, с IRGAFLO 6000 V –  $1606 \pm 42$  ч, Viscoplex 7-610 –  $1376 \pm 36$  ч; масла АСГИМ –  $4404 \pm 116$  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,

закрывающиеся 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 ( $P=21$  МПа,  $T=60$  °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 мм<sup>2</sup>/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 и апробация 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.

Автор выражает искреннюю признательность научному руководителю д.т.н., доценту Маньшеву Д.А., д.т.н., проф. Митягину В.А., начальнику 142 лаборатории ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России» Поплавскому И.В. за поддержку, ценные советы и помощь на протяжении всего времени подготовки диссертационной работы. Отдельная благодарность инженерному составу 142

лаборатории ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России» в проведении физико-химических исследований масел, сотрудникам отдела контроля качества и физических методов исследования горюче-смазочных материалов ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России» за помощь в исследовании физическими методами составов образцов гидравлических масел, ЦКП «Аналитический центр проблем глубокой переработки нефти и нефтехимии» ИНХС РАН» за проведение исследований образцов методом гель-проникающей хроматографии, ФГБУ «АСК МЧС России» и Федеральной службе войск национальной гвардии Российской Федерации (Росгвардия) за предоставление опытных образцов с воздушных судов Ил-76.

# **ГЛАВА 1. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ МАСЕЛ В АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКЕ И АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СТАБИЛЬНОСТИ ИХ СВОЙСТВ**

## **1.1 Анализ особенностей условий применения гидравлических масел в авиационной технике и требования к стабильности их эксплуатационных свойств**

ГМ является рабочим телом ГС; оно передает механическую энергию от источника к местам потребления, изменяя необходимые значения или направления приложенной силы [5]. ГМ должно выполнять следующие функции: защищать детали ГС от коррозионного воздействия, смазывать трущиеся поверхности деталей, отводить тепло, удалять продукты износа. Выполнение указанных функций ГМ обеспечивает работоспособность гидравлических устройств.

При эксплуатации ГМ подвергается воздействию различных видов энергии. Тепловая энергия при воздействии на ГМ определяет интенсивность статических процессов изменения его физико-химических свойств: в результате высокой температуры и присутствия катализаторов, в качестве которых выступают металлы с переменной валентностью (медь, железо, свинец), образуются вода, смолы, кислоты, сложные эфиры, увеличивающие кислотную реакцию ГМ. Присутствие перечисленных образований вызывает развитие коррозии, ухудшает смазывающие свойства ГМ.

В динамических условиях при дросселировании, сжатии и разрежении, при вибрациях, звуковых и ультразвуковых колебаниях на ГМ действуют механическая энергия. В результате этих воздействий в ГМ происходит комплекс изменений физического, химического и механохимического характера [34].

Современный отечественный авиапарк транспортных воздушных судов представлен различными моделями самолетов, которые применяются во многих

сферах и в зависимости от своего предназначения эксплуатируются при различных условиях.

Особое внимание при эксплуатации АТ уделяют ГС, основными функциями которой являются открывание и закрывание створок грузолука и входных дверей, уборка и выпуск шасси, закрылков, работа тормозов и стеклоочистителей и другие [35]. Для выполнения перечисленных действий ГС самолета снабжена источником питания, в роли которого выступает гидравлический насос. В большинстве случаев в ГС летательных аппаратов применяются насосы аксиально-поршневого типа различных конструкций, отличающиеся устройством механизмов подачи, механизмов распределения потоков жидкости [35]. Согласно инструкциям по технической эксплуатации транспортных самолетов [36-45] рабочее давление в ГС находится в пределах от 12 до 21 МПа, а источниками давления служат марки насосов 623ан, 435ф, НП-107, НП-89 и другие. Гидронасос в ГС подбирают по техническим характеристикам: рабочей температуре, давлению, производительности насоса, рабочей среде. Важно учесть совместимость ГМ с материалами конструкции, так как при длительной эксплуатации ГС в результате соприкосновения ГМ с элементами агрегатов наблюдается комплекс диффузионных, коррозионных и прочих процессов, значительная часть материалов участвует в процессах трения. Для предотвращения указанных процессов детали аксиально-поршневых насосов, в которых применяются ГМ, изготовлены из стали марок Х12Ф1, 18Х2Н4М, 12ХНЗА, 35Л; бронзы марок БрОСН10-2-3, БрАЖ9-4 и алюминиевых сплавов АЛ2, АЛ9.

В ГС транспортной авиации применяют масло АМГ-10 по ГОСТ 6794 или его зарубежные аналоги, такие как НУ-10, Aeroshell Fluid 4I по спецификации MIL-PRF-5606H [46], Royco Micronic 756D и Brayco Micronic 756D по спецификации MIL-H-5606B [47], YACCO LHM по спецификации AIR 350A, MIL-H-5606E [48], Mobil Aero HFD по спецификации MIL-H-5606A [49] и другие.

Одним из основных воздушных судов, составляющих основу транспортной авиации России, стран СНГ является тяжелый транспортный самолет Ил-76. Его

технические характеристики позволяют ему оставаться вне конкуренции среди других самолетов аналогичного класса на протяжении десятков лет.

ГС самолета Ил-76 имеет свои особенности, которые необходимо учитывать при выборе ГМ и определении режимов его эксплуатации. Она состоит из двух независимых систем: ГС № 1 (левая) и ГС № 2 (правая). От центральной части ГС № 1 и № 2 питаются все системы-потребители [36]. Обе системы обеспечены конструкционно одинаковыми источниками давления, которые соединены между собой краном кольцевания. Функциональное предназначение ГС № 1 и ГС № 2 представлено на рисунке 1.

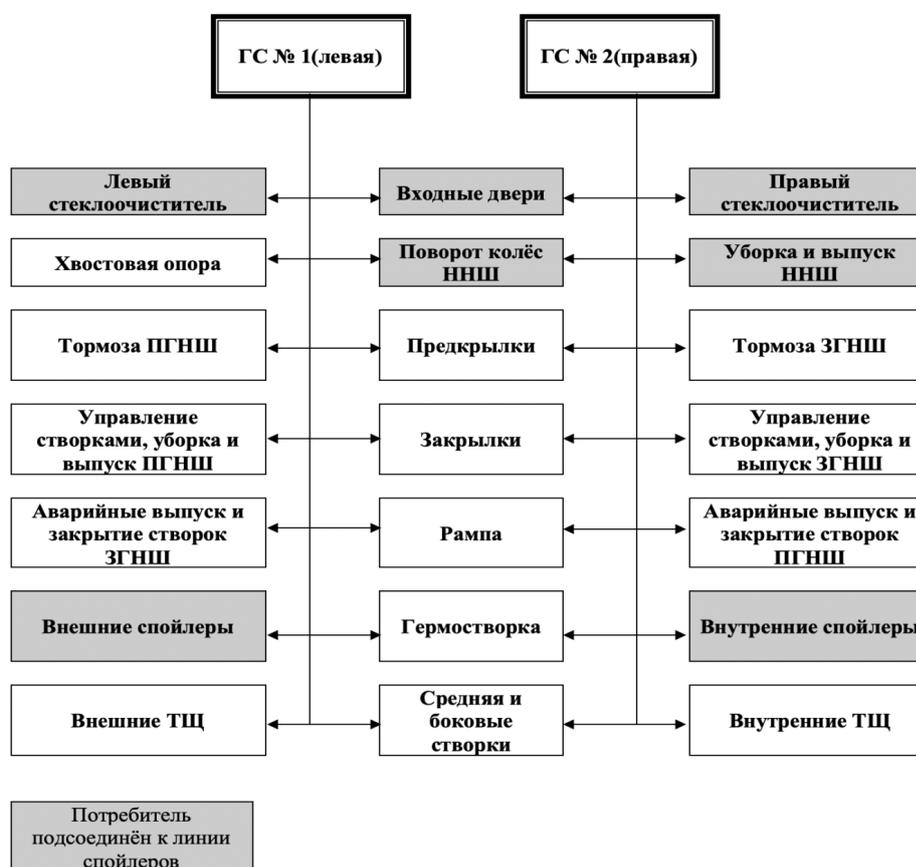


Рисунок 1 – Блок-схема гидросистемы самолета Ил-76

Отдельные потребители – колеса носовой стойки, предкрылки и закрылки, рампа, гермостворка и створки грузового люка – питаются одновременно от обеих гидросистем, получая при этом по 50 % мощности от каждой, что повышает надежность их работы [36].

Основные технические характеристики работы ГС самолета Ил-76 перечислены в таблице 2.

Таблица 2 – Технические характеристики гидросистемы Ил-76 [36]

Название параметра	Значение
Основная рабочая жидкость	масло АМГ-10
Рабочее давление, МПа	21
Общая емкость ГС, дм <sup>3</sup>	200
Максимальная производительность гидроисточников давления, дм <sup>3</sup> /мин:	
НП-89Д	55
НС-46-2	20
Минимальная производительность гидроисточников давления, дм <sup>3</sup> /мин:	
НП-89Д	2
НС-46-2	2
Давление в линии всасывания гидроисточников, МПа	от 2,5 до 4,9
Заправка гидробака по указателям, дм <sup>3</sup> (при неработающих двигателях)	16
Заправка гидробака по указателям, дм <sup>3</sup> (при работающих двигателях)	16
Температура масла в системе по указателю термометра, не более, °С	120

Принцип работы ГС самолета Ил-76 заключается в следующем: источники давления (гидронасосы НП-89), установленные на двигателях, при рабочем давлении 21 МПа забирают рабочую жидкость (масло АМГ-10) из линии всасывания и направляют ее в линию нагнетания, при этом ГМ проходит через дроссели и специальную линию радиатора. Для максимального заполнения полостей всасывания гидронасосов НП-89 насосной станцией НС51А в линии всасывания создается избыточное давление (подпор) по отношению к давлению в гидробаке. Для предотвращения прохождения ГМ от насоса в обратном направлении, в линии нагнетания каждой силовой установки используют обратный клапан. При давлении масла в линии нагнетания до 20 МПа гидронасосы работают на режиме максимальной производительности, более 20 МПа – производительность насосов уменьшается. Минимальная производительность насосов должна поддерживаться в пределах 2-3 дм<sup>3</sup>/мин с целью охлаждения и

смазки самих гидронасосов. Из линии слива ГМ подводится к сепаратору, где отделяется воздух от жидкости; далее воздух из сепаратора отводится в гидробак, а ГМ – в линию всасывания насосов [50].

В каждой ГС источники давления (насосы) направляют ГМ, поступающее на слив от потребителей, сразу к сепаратору, а далее – в линию всасывания гидронасосов. Это дает возможность использовать гидробаки с малым объемом жидкости. После силовой установки ГМ поступает к потребителям через два последовательных фильтра с тонкостью фильтрации 12-16 мкм. Давление в ГС поддерживается с помощью установленных сферических гидроаккумуляторов, заряженных азотом до давления 7,5 МПа [50]. Уменьшение пульсаций давления в линии нагнетания достигают за счет подключения гидроаккумуляторов между фильтрами.

ГС самолета Ил-76 условно делится на линии высокого давления, всасывания и слива. Линия высокого давления, в свою очередь, делится на общую и линию нагнетания спойлеров. Линия нагнетания спойлеров является самым нагруженным участком, в ней давление кратковременно может достигать 24 МПа. Высокие нагрузки на данном участке ГС обоснованы функциональным предназначением спойлеров – они являются органами непосредственного управления подъемной силой, т.е. используются в качестве воздушных тормозов. Для поддержания давления не ниже 16 МПа в линии нагнетания спойлеров установлен подпорный клапан между общей линией нагнетания и линией нагнетания спойлеров.

Принципиальная схема ГС №1 самолета Ил-76, на которой отображена максимально нагруженная линия ГС, представлена на рисунке 2.

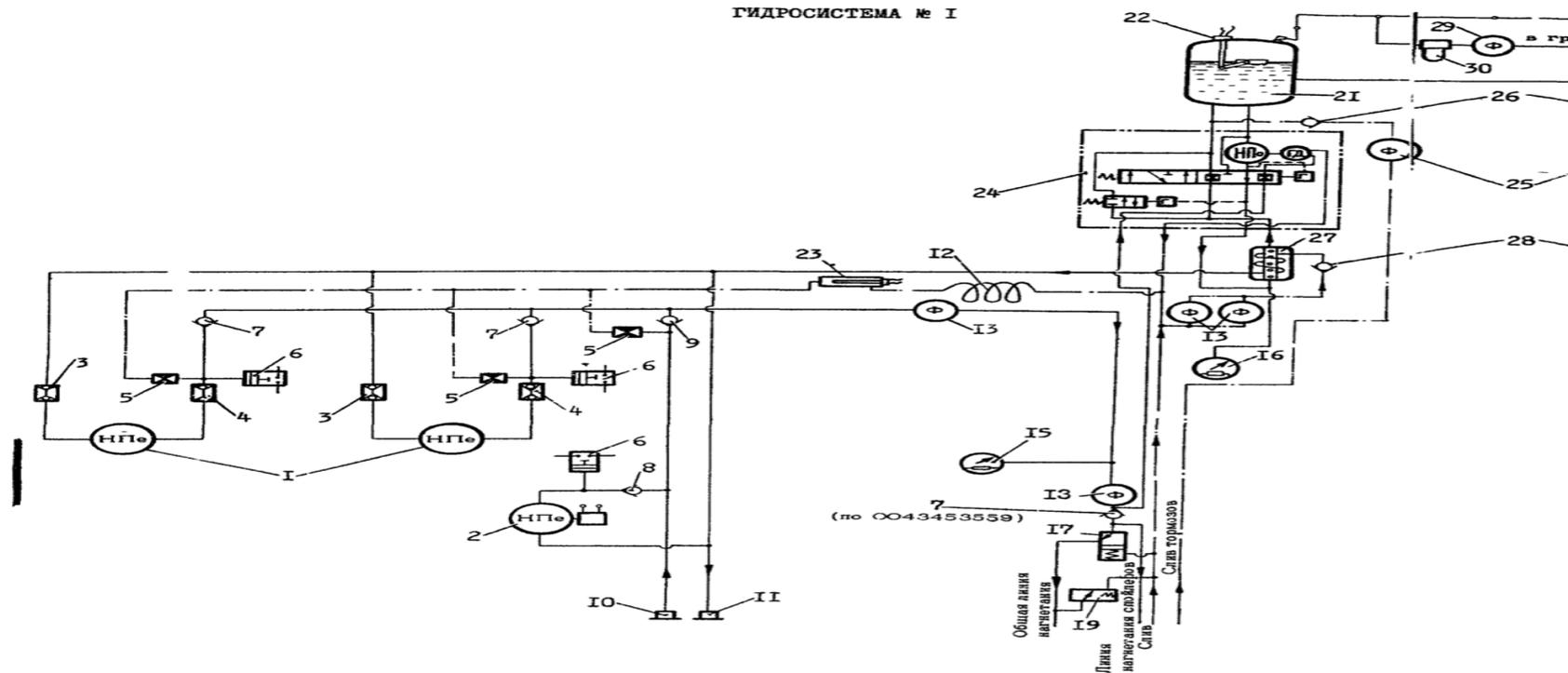


Рисунок 2 – Принципиальная схема гидросистемы № 1 самолета Ил-76

1 – гидронасос НП89; 2 – насосная станция НС46-2; 3 – разъемный клапан всасывания; 4 – разъемный клапан нагнетания; 5 – дроссель; 6 – реле давления; 7, 8, 9, 28 – обратные клапана; 10 – бортовой клапан нагнетания; 11 – бортовой клапан всасывания; 12 – радиатор; 13 – фильтр; 15 – датчик электрического манометра на гидроаккумуляторе; 16 – датчик электрического манометра; 17 – подпорный клапан; 19 – предохранительный клапан; 21 – гидробак; 22 – датчик уровнемера; 23 – датчик температуры жидкости; 24 – насосная станция НС51А; 25 – фильтр; 26 – обратный клапан; 27 – сепаратор; 29 – воздушный фильтр; 30 – отстойник.

В связи с жесткими условиями эксплуатации ГС АТ предъявляют высокие требования к качеству ГМ, работающему в условиях постоянной динамической нагрузки, с высокочастотной пульсацией давления от 6 до 35 МПа и изменениями температуры от минус 50 до 150 °С [51]. В целях надежной и бесперебойной работы самолета согласно регламенту технического обслуживания проверка ГС производится каждые 500 и 1000 ч налета [43-45], при малой востребованности воздушного судна – две сезонные проверки в год. Необходимость технического осмотра ГС самолета связана с установлением цельности конструкций объектов и оценкой работоспособности ГМ.

Одним из основных требований к ГМ является стабильность его свойств, т. е. способность сохранять свойства в условиях эксплуатации и при хранении [52].

Выделяют объективные факторы, влияющие на надежность ГС [53]:

- состояние окружающей среды (температура, влажность, осадки и т. д.);
- параметры эксплуатации ГС: рабочее давление, пульсация, перепады давлений, забросы и гидроудары;
- динамические нагрузки: от двигателей исполнительных механизмов воздушной нагрузки, шасси, колебаний скорости, колебания давления и т. д.;
- инерционные нагрузки;
- вибрация;
- температура ГМ.

На продолжительность работы ГМ влияет температура, характеризующая среднюю по гидросистеме, но также и локальная, при этом в отдельных местах масло может нагреваться до 120-130 °С. Высокие температуры (120-130 °С) способствуют протеканию процессов в ГМ, отличных от химических реакций окисления [54]. Эти процессы характеризуются образованием в жидкости нерастворимых осадков, газообразных продуктов разложения и изменением химического состава масла. Установлено, что для уменьшения окисления максимальная рабочая температура ГМ не должна превышать 80 °С [55].

В элементах ГС имеются пары трения, которые могут быть критическими с точки зрения работоспособности техники. Одним из таких элементов является

насос высокого давления. В качестве рабочего тела в большинстве из них применяют загущенные масла с маловязкой основой. Особенностью эксплуатации ГМ является тот факт, что уже при 80 °С масло начинает разрушаться и возникает нестабильное пилообразное трение, но уже при 120 °С начинает действовать противоизносная присадка и трение стабилизируется.

При повышенных температурах в масле наряду с реакциями окисления протекают реакции деструкции молекул и полимеризации непредельных соединений, приводящие к образованию твердой фазы, служащей загрязнителем ГМ [56]. Исследования влияния загрязнений на работу аксиально-плунжерных насосов показали, что снижение объемного КПД при работе на загрязненном ГМ происходит в основном в результате износа соприкасающихся между собой поверхностей распределительного золотника и блока цилиндров [57, 53]. Проникающие в зазор частицы приводят к интенсивному износу трущихся поверхностей и, как следствие, повышенной утечке. Смазочная способность масла АМГ-10 с повышением температуры ухудшается, но остается удовлетворительной: интервал рабочих температур масла АМГ-10 от минус 60 до 120 °С длительно, при 150 °С – кратковременно.

Снижение температуры ГМ вызывает резкое возрастание потерь давления, что ведет к повышению давления в нагнетательном трубопроводе и появляется опасность работы насоса в режиме перегрузки [58]. При охлаждении масла до минус 65-70 °С ухудшается его фильтруемость и прокачиваемость. Повышение вязкости при пониженных температурах вызывает увеличение потерь давления и силы трения в подвижных соединениях. Однако опыт эксплуатации многих самолетов показал, что отрицательные температуры окружающего воздуха в меньшей степени оказывают нежелательное воздействие, так как к моменту взлета температура ГМ оказывается выше 0 °С вследствие постепенного нагрева при запуске и циркуляции масла [53]. Согласно требованиям по техническому обслуживанию кинематическая вязкость при 50 °С масла АМГ-10 перед заправкой в ГС самолета должна быть не ниже 10,00 мм<sup>2</sup>/с, при минус 60 °С – не выше 4500

мм<sup>2</sup>/с. При этом в процессе эксплуатации допускается снижение кинематической вязкости при 50 °С до 7,00 мм<sup>2</sup>/с.

Рабочее давление ГС влияет на стабильность свойств ГМ: при возрастании давления значительно увеличивается степень облитерации, изменяются вязкость и плотность ГМ, а при постоянном давлении увеличивается коэффициент сжимаемости [59] и снижается плотность с повышением температуры.

Если процесс выделения воздуха из масла происходит в результате местного понижения статического давления, то возникает кавитация. Это явление заключается в образовании разрывов сплошности (каверн) [60]. Исследования показали, что производительность насосов, начиная с некоторого числа оборотов, уменьшается в результате кавитации [57, 61], что вызвано действием значительных вибрационных и инерционных нагрузок, приводящих к интенсивному перемешиванию ГМ [60].

Вследствие большой скорости и высокой степени сжатия воздушного пузырька в нем развиваются высокие температуры, которые могут достигать при адиабатном процессе сжатия от 1000 до 1500 °С и выше. При смыкании такого пузырька удары частиц масла по поверхности детали вызывают ее местный нагрев до такой температуры, при которой в сочетании с ударами может происходить интенсивное разрушение металла. Под действием этой температуры в присутствии кислорода воздуха происходит активное окисление поверхностей (коррозия). При этом интенсивность коррозионных процессов повышается в результате того, что под действием гидравлических микроударов разрушается оксидная пленка на металлических поверхностях [55].

Механическое разрушение молекул загущающих присадок в летательных аппаратах происходит при циркуляции ГМ под воздействием больших перепадов давлений (до 68 МПа) [56], а также в высоконагруженных участках ГС при наличии силы тяжести (в результате изменения геометрических характеристик гидравлического трубопровода), где возможны процессы гидродинамической турбулентности (к примеру, в ГС Ил-76 таким местом является линия нагнетания

спойлеров). <sup>1</sup>Вязкостные присадки, представляющие собой полимерные соединения, имеют большую молекулярную массу 3000-100000 а. е. м.). При этом молекулы могут быть подвержены необратимой деструкции при механических воздействиях или обратимому разрушению вследствие больших градиентов скорости сдвига [34]. Процесс сдвига запускается при достижении в полимерной цепи механической энергии, достаточной для гомолитического разрыва углерод-углеродной связи в скелете цепи. Восприимчивость полимера к механическому сдвигу в большей степени от его молекулярной массы, а именно, от расстояния между концами полимерной цепи [62]. Установлено, что в маслах, которые работают в условиях высоких механических нагрузок, для обеспечения требования незначительного снижения вязкости в ходе эксплуатации, необходимо использование низкомолекулярных полимерных загустителей [63].

Снижение вязкости ГМ приводит к его утечкам из гидросистемы, запаздыванию и отказу исполнительных механизмов ГС [64].

Загущающие присадки на основе полиалкилметакрилатов (далее – ПМА) действуют по следующему принципу: при умеренной температуре линейные макромолекулы присадки свернуты в клубки (за счет внутримолекулярных взаимодействий сегментов цепи), с повышением температуры образуются развернутые конформации (за счет слабых ковалентных внутримолекулярных связей), оказывая на масло более высокое загущающее действие [65-67]. Полиметакрилатные загустители подвержены потере вязкости из-за размера молекул в состоянии покоя и последующим их деформированием из-за сокращения занимаемого гидродинамического объема, т. е. потеря вязкости никак не связана с разрушением молекулярных ассоциаций в условиях высокоградиентного поля напряжений. Химическое строение полимерной полиалкилметакрилатной цепи (четвертичный атом углерода) приводит к тому, что при воздействии механических

---

<sup>1</sup> В ГМ применяются вязкостные присадки: виниполы, полиметакрилаты или полиизобутилены. Самыми распространенными являются полиметакрилаты, обладающие вязкостными и депрессионными свойствами одновременно.

нагрузок ПАОМ легко разрушается, снижая вязкость масла при его эксплуатации в системе [96].

Масло АМГ-10 по ГОСТ 6794-2017 в своем составе содержит до 15 % загущающей полиметакрилатной присадки, которая увеличивает вязкость масла до требуемого уровня. Согласно уравнению Стамбо, общая вязкость ГМ, загущенного полимером, связана с концентрацией и молекулярной массой следующим образом:

$$\ln \eta = KM_v^a c - k''(M_v^a)^2 c^2 + \ln \eta_0, \quad (1)$$

где  $M_v$  – усредненная по вязкости молекулярная масса вязкостной присадки;

$c$  – концентрация вязкостной присадки (или загустителя);

$\eta_0$  – вязкость базового масла;

$a$  – степенной показатель, зависящий от растворимости полимера, базового масла и температуры.

Большие сдвиговые усилия приводят к деформированию полимерных клубков, в результате чего образуются продукты с меньшей молекулярной массой и другим распределением молекулярных масс в полимере. Если оно имеет смещение в сторону более высокомолекулярных компонентов, то потеря вязкости будет больше, чем для полимера с таким же средним значением, но с гауссовым распределением молекулярной массы [96].

Для оценки загущающих присадок на основе полимеров важно учитывать значения загущающей способности ( $TE$ ) и механической стабильности [120]: механическая стабильность вязкостной присадки уменьшается с увеличением индекса механической стабильности ( $SSI$ ), загущающей способности и индекса вязкости, а также с удлинением цепи полимера. Следовательно, чем уже молекулярно-массовое распределение (далее – ММР) полимера, тем устойчивее присадка в составе масла, так как молекулярная масса подобного будет меньше.

С увеличением давления вязкость возрастает, причем тем быстрее, чем ниже температура [56]. Характер изменения вязкости от давления в большой степени зависит от химического состава масла: для ГМ на минеральной основе эта

зависимость существенная, для синтетических масел – в меньшей степени [68]. Возрастание давления в ГС приводит к увеличению нагрузки на пары трения, смазываемые маслом. При увеличении рабочих температур и скоростей полета значительно ухудшаются противоизносные свойства ГМ: увеличивается нагрузка на пары трения.

При высокой температуре и низком давлении преобладает процесс релаксации полимерной (загущающей) присадки, что приводит к частичному восстановлению вязкости ГМ [69]. С увеличением времени воздействия температуры и давления увеличивается скорость процессов окисления и деструкции полимерной присадки [51]. Согласно правилу Вант-Гоффа для химических реакций, протекающих в температурном диапазоне 10-400 °С, с энергией активации 60-120 кДж/моль, скорость реакции увеличивается в 2-4 раза при повышении температуры на 10 °С. Подобной реакцией является процесс окисления: скорость окисления возрастает с увеличением количества воздуха и воды в масле, при наличии металлических частиц, грязи и пыли [33], при увеличении объема масла [70] и уменьшении его расхода.

ГМ выполняет функцию не только носителя энергии, но и индикатора о техническом состоянии ГС: при протекании окислительных процессов и воздействии высоких температур на ГМ, отдельные его компоненты испытывают химические изменения, в результате чего внешний вид масла (цвет, агрегатное состояние) изменяется.

Окисление ГМ приводит к образованию высокомолекулярных углеводородных соединений, вызывающих изменение консистенции ГМ и появление осадка на элементах системы (на фильтрующих элементах, на распределительных устройствах). Согласно техническому регламенту обслуживания ГС самолета Ил-76 кислотное число вновь залитого масла АМГ-10 должно быть не более 0,01 мг КОН/1 г, а в процессе эксплуатации не превышать 0,15 мг КОН/ г.

Для предотвращения или уменьшения до допустимого предела проникновения сред через соединения в ГС применяют уплотнительные

устройства – эластомеры. Так как уплотнения контактируют с ГМ и окружающей средой, элементы конструкций выполняют из резины. Установлено, что резины после вулканизации лишь ограниченно набухают в жидкостях вследствие их пространственно-сшитой структуры [34].

В целях исследования воздействия ГМ на РТИ и ГМ в ОКБ «Илюшин» были проведены испытания<sup>2</sup> [71]. Исследовали поведение уплотнительных колец и пластин из резиновых смесей, применяемых в ГС самолетов Ил-76, после выдержки их в ГМ FH-51 [70] и масле АМГ-10. Испытания проводили на РТИ марок В-14 НТА и В-14-1 НТА при температуре (19-23) °С в течение 24, 72 и 120 ч. В результате определяли изменение физико-механических свойств резин и их геометрических размеров. Данные эксперимента показывают, что гидрожидкость FH-51 оказывает на геометрические размеры резиновых колец большее воздействие, чем масло АМГ-10, при этом изменения незначительные.

В процессе работы ГС образуются загрязнения. Для повышения давления, ресурса и надежности ГС необходимо обеспечить чистоту ГМ и внутренних полостей. Загрязненность ГМ твердыми частицами вызывает интенсивное абразивное изнашивание пар трения, защемление плунжеров и клапанов, гидроабразивное изнашивание кромок золотников, клапанов и дросселей, возрастание усилий на перемещение золотников и клапанов, засорение фильтров и т. д. [57, 73]. При эксплуатации масла АМГ-10 в ГС самолета массовая доля механических примесей не должна превышать 0,001 % масс.

Загрязнения, возникающие в ГС, негативно влияют как на механизмы системы, так и на ГМ [59]: положительно заряженные частицы загрязнений являются катализаторами процессов окисления, протекающих в масле. Бактериальные загрязнения способны вступать в реакцию с различными функциональными присадками, способствуя развитию коррозии металлических конструкций. С увеличением времени эксплуатации ГС частицы смол увеличиваются в количестве и отвердевают, что способствует забиванию пор фильтров и каналов малых сечений.

---

<sup>2</sup> Отчет № 927-05-98

Стабильной работой ГМ является его способность функционировать при повышенной влажности воздуха. При достижении 60 % отн. и более влажности воздуха на элементах ГС может образоваться сплошная влажная пленка, приводящая к коррозии и повреждению поверхностей. В связи с этим в конструкции ГС по возможности применяют коррозионно-устойчивые материалы [74]. Жесткие трубопроводы изготавливают из металлических труб (стальные, медные, алюминиевые сплавы); гибкие трубопроводы – шланги или рукава – производят из резины, прорезиненных тканей или синтетических материалов (например, полихлорвинил) [75].

Материалы для изготовления деталей аксиально-поршневых насосов для отечественной и гражданской авиации, представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Конструкционные материалы аксиально-поршневых насосов

Применяемые ГМ	Деталь	Материал	
		Металл	Марка
Масла: АУ по ТУ 39.1011232-89, АУП по ТУ 38.1011258-89, МГЕ-10А по ТУ 38.301-29-21-92, АМГ-10 по ГОСТ 6794	Блок цилиндров	Сталь	X12Ф1
	Распределитель Поршни	Бронза	БрОСН10-2-3 БрАЖ9-4
	Кардан	Сталь	12ХН3А
	Шатуны	Бронза	18Ч2Н4МА
	Опоры шатунов	Сталь	БрАЖ9-4
	Корпус литой		35Л
	Крышки литые		
	Корпуса литые	Алюминиевый сплав	АЛ2, АЛ9

Для улучшения приработки и уменьшения износа торцы бронзовых цилиндрических блоков и распределительных дисков покрывают тонким слоем антифрикционных материалов (серебром, индием с подслоем свинца) [55].

Таким образом, проведен анализ условий применения ГМ в ГС летательных аппаратов с аксиально-поршневым насосом. Выделены основные особенности работы ГС самолета Ил-76:

1. ГС самолета Ил-76 имеет две независимые системы, у каждой из которых особое функциональное предназначение. Основной маркой ГМ, применяемой в ГС Ил-76, является масло АМГ-10 по ГОСТ 6794. Параметры работы ГС Ил-76, при которых масло функционирует, представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Условия работы масла АМГ-10 в гидросистеме самолета Ил-76

Параметр работы ГС	Значение
Давление, МПа:	
- максимальное	24
- рабочее	21
- минимальное	16
Объем масла в ГС, дм <sup>3</sup>	200
Температура масла, °С	
- максимальная	120
- рабочая	60-90
Тонкость фильтрации, мкм	12-16
Контактирующие материалы:	
- трубопроводы линий высокого давления	Нержавеющая сталь 12Ч18Н10Т
- трубопроводы линий низкого давления	Алюминиевый сплав АМг2-М
- линии нагнетания гидронасосов	Фторопласт (тефлон)
- уплотнительные устройства	Резина марок В-14 НТА и В-14-1 НТА, ИРП-1078

2. На основании проведенного анализа определены требования к ГМ, применяемым в гидросистеме транспортного самолета Ил-76:

- стабильная работа масла при высоких давлениях (до 21 МПа, 24 МПа – кратковременно) и температурах (до 120 °С);

- хорошая прокачиваемость и фильтруемость;
- сохранение смазывающих свойств при высоких температурах в ГС;
- взаимодействие с материалами конструкции без образования коррозии.

Изучены химмотологические процессы, протекающие в ГС самолета и влияющие на стабильность свойств ГМ, включающие термомеханическую деструкцию загущающих присадок и окисление компонентов ГМ.

Определены факторы, оказывающие наибольшее влияние на изменение физико-химических свойств ГМ при его эксплуатации: жесткие условия эксплуатации (высокие значения рабочих температур и давления в ГС, скорость потока жидкости), вибрации, динамические и инерционные нагрузки на ГМ, влияние окружающей среды, а также конструкционные особенности гидросистемы.

## **1.2 Анализ состава и технологий получения гидравлических масел и их влияния на термоокислительную стабильность и стойкость к термомеханической деструкции при применении в авиационной технике**

Перспективными базовыми маслами для ГМ являются продукты гидрогенизационных процессов. Гидрокрекинговое масло приближается по свойствам к маслам на основе полиальфаолефинов. Цепочки углеводородов в таком масле однородны и стабильны, что характеризует высокий уровень их ЭС: вязкостно-температурные, антиокислительные, противоизносные, устойчивость к образованию отложений, низкая агрессивность к РТИ, совместимость с функциональными присадками. Продукты гидрокрекинга сравнительно дешевле синтетических масел.

Среди ухудшающих свойств продуктов гидрокрекинга выделяют быстрое старение и потерю эффективности, а также повышенную испаряемость в сравнении с синтетическим маслом.

Среди загущающих присадок наиболее часто применяют в ГМ полиметакрилатные присадки. Промышленные ПМА присадки выпускаются в широком ассортименте химических составов и молекулярных масс (от 20000 до 740000 а. е. м.). Высокомолекулярные присадки не только являются эффективными загустителями и обеспечивают максимальный прирост индекса вязкости, но и наиболее восприимчивы к сдвиговым эффектам, в смеси с базовыми маслами (2, 3 и 4 группа по классификации API) проявляют депрессорные свойства.

Сложные эфиры в составе ГМ обеспечивают требуемый уровень низкотемпературных и вязкостно-температурных свойств.

В качестве компонентов в составе ГМ используют:

- диоктиладипинат (далее – ДОА) – при производстве обеспечивает высокую вязкостную стабильность, устойчив к гидролизу и к воздействию кислорода воздуха.

- диоктилсебацат (далее – ДОС-Т) – ядовит, взрывобезопасен, отличается низкой летучестью.

- дибутилсебацат (далее – ДБС) – малолетучая высококипящая жидкость, практически не растворяется в воде, устойчив к гидролизу.

Наиболее предпочтительными основами при производстве масел на основе сложных эфиров считаются многоатомные спирты и одноосновные кислоты нормального и разветвленного строения. Данные продукты имеют пространственно-затрудненное строение, что благоприятно сказывается на стойкости к деструкции при высоких температурах. При этом вследствие окисления и гидролиза базовых компонентов полиэфиров они могут использоваться только с добавлением антиокислителей.

Масла на основе полиальфаолефинов (далее – ПАО) преимущественно используют в составах маловязких ГМ, применяемых в системах авиационной техники. Они обладают высоким уровнем термоокислительных, вязкостно-температурных свойств, стойкостью к окислению в присутствии ингибиторов, гидролитической стабильностью, совместимы с нефтяными маслами и присадками, имеют минимальную склонность к пенообразованию и совместимы с РТИ. При

добавлении в масло ПАО полимерных загущающих присадок, преимущественно ПМА и гидрированных сополимеров стирола с бутадиеном или изопреном, получают базовые масла требуемого класса вязкости.

ГМ, которое применяют в ГС отечественных самолетов, является масло АМГ-10 по ГОСТ 6794. Оно работает в интервале температур от минус 60 до 120 °С и давлении 21 МПа. Основными компонентами масла АМГ-10 российского производства являются базовое масло (кинематическая вязкость при 50 °С не менее 2,2 мм<sup>2</sup>/с); функциональные присадки (загущающая, антиокислительная, противоизносная); краситель.

Компонентный состав масла АМГ-10 основных отечественных производителей представлен в таблице 5.

Таблица 5 – Компонентный состав масла АМГ-10 отечественного производства

Производитель	Основа масла	Загущающая полиметакрилатная присадка
	Наименование компонента	
ООО «ЛЛК-Интернешнл»	насыщенные парафино-нафтеновые УВ – 98,6 % ароматические УВ – 1,34 % смоли – 0,06 %	Максойл ВЗ-011 – до 15 % масс.
ООО «Полиэфир»	ПАОМ-2 – 20-25 % масс.	Viscoplex 7-610 - до 15 % масс.
ООО «НПП Квалитет» ООО «Спецнефтьпродукт» ООО «Обнинскоргсинтез» ЗАО «АвиаТехМасс»	нафтенное масло – 75-80 % масс.	

Зарубежным аналогом масла АМГ-10 в России является гидравлическая жидкость HYDRAUNYCOL FH 51, применяемая в ГС и стойках шасси самолетов Ил-18, Ил-76, Ил-62, Ту-134, Ту-154.

В таблицах 6-7 представлены основные зарубежные аналоги масла АМГ-10, а также их состав и область применения.

Таблица 6 – Зарубежные аналоги масла АМГ-10 по ГОСТ 6794

Марка ГМ	Спецификация	Фирма-производитель
AeroShell Fluid 41	MIL-PRF-5606 H	Германия, Shell Deutschland GMBH
Mobil Aero HF		США, ExxonMobil
HYDRAUNYCOL FH 51		Франция, NYCO
ROYCO 756		США, Anderol Speciality Lubricants

Таблица 7 – Состав и область применения масла АМГ-10 и его зарубежных аналогов

Гидравлическое масло	Состав		Применение
	Основа	Присадки	
Масло АМГ-10	Минеральная	Загущающая, антиокислительная, противоизносная	ГС АТ с диапазоном температур от минус 60 до 120 °С
Mobil Aero HF	Минеральная	Противоизносная, антикоррозионная, антипенная, вязкостная	ГС АТ с диапазоном температур от минус 55 до 135 °С
Roуco 756	Минеральная	Противоизносная, антикоррозионная, антипенная, вязкостная	ГС АТ с диапазоном температур от минус 54 до 135 °С
HYDRAUNYCOL FH 51	Минеральная	Загущающая, антиокислительная, противоизносная	ГС АТ с диапазоном температур от минус 60 до 120 °С
AeroShell Fluid 41	Минеральная	Противоизносная, антикоррозионная, вязкостная, антипенная, деактиваторы металлов	ГС АТ с диапазоном температур от минус 54 до 135 °С

Основные физико-химические показатели масла АМГ-10 и его зарубежных аналогов представлены в Приложении А (таблица А.1).

В состав масла АМГ-10 вовлечены присадки марок Максойл В3-011, Viscoplex 7-610 и IRGAFLO 6000 V.

Технология приготовления ГМ заключается в компаундировании минеральной основы с функциональными присадками.

Таким образом, на отечественном рынке ГМ для ГС АТ наиболее применяемыми в эксплуатации являются масло АМГ-10 по ГОСТ 6794-2017 и

гидравлическая жидкость HYDRAUNYCOIL FH 51 по спецификации MIL-H-5606F с аналогичным предназначением и диапазоном рабочих температур и давлений. Указанные ГМ смешиваются в любых соотношениях и взаимозаменяемы.

### **1.3 Анализ методов оценки физико-химических и эксплуатационных свойств гидравлических масел для авиационной техники и направления их совершенствования для прогнозирования стабильности свойств в условиях эксплуатации**

Стабильность свойств ГМ зависит от их состава и условий эксплуатации. Основные физико-химические показатели, оценивающие стабильность свойств ГМ, приведены в Приложении А (таблица А.2). Свойства ГМ изменяются в процессе их применения, причем изменение некоторых из них влияют на функциональную способность масел и надежность работы ГС. Изменение (как правило, снижение) кинематической вязкости, определяемой по ГОСТ 33 или методом ASTM D 445, или повышение кислотного числа (ГОСТ 5985) может служить основанием для прекращения применения ГМ в ГС в связи с его непригодностью. Падение вязкости ниже требуемого уровня, определенного для эксплуатации ГС, вызывает внутренние утечки масла в элементах гидросистемы, кавитацию, трение жидкости о стенки каналов и местных сопротивлений, внешние утечки. Увеличение кислотного числа повышает коррозионную агрессивность ГМ.

Пожаровзрывобезопасность и горючесть ГМ является важным свойством, влияющим на безопасность полетов. Лабораторным методом по ГОСТ 4333 определяют температуру вспышки масла в открытом тигле, характеризующую степень огнеопасности и испаряемости масла.

Нижние температурные пределы применения ГМ определяют согласно ГОСТ 20287, метод Б. Для стабильной работы ГС температура застывания должна

быть значительно ниже допустимой, при которой обеспечивается работоспособность агрегатов.

Одним из основных процессов, влияющим на стабильность свойств ГМ, является окисление. Окисление ГМ характеризуется активным взаимодействием кислорода с маслом. В ГС масло вступает в контакт с прогретым воздухом, перемешивается, кислород и влага, содержащиеся в воздухе, воздействуют на металлы как катализатор, при этом чем выше давление и температура в системе, тем быстрее идет процесс окисления.

Стабильность жидкости к окислению проверяют в условиях аналогичных реальным. Для этого испытуемое ГМ выдерживают на воздухе или при повышенных температурах в контакте с различными металлами. Окисление масла в таких случаях можно рассматривать как каталитическое. Металлические пластинки для испытаний изготовлены из той же марки, что и агрегаты ГС. При определении стабильности к окислению проверяют либо изменение физико-химических показателей ГМ, либо количество кислорода, поглощенного маслом. Иногда определяют время, за которое ГМ поглощает определенный объем кислорода в замкнутой системе (метод Дорнта [81, с. 81]).

При оценке стабильности ГМ к окислению в присутствии металлов на единицу массы масла обычно приходится относительно небольшая поверхность металла, причем при испытании это соотношение аналогично условиям в ГС. В случае работы детали ГС с тонким слоем ГМ и подвергающееся воздействию атмосферы, разработан метод испытания масла на стабильность к окислению в тонкой пленке, имитирующей работу подобных механизмов. Суть метода заключается в пропускании воздуха или кислорода через пробирку с небольшим количеством ГМ, в которую помещена металлическая цепь. По истечении определенного времени фиксируют изменения, произошедшие в свойствах масла в результате окисления [81, с. 82].

Методы оценки ТОС, применяемые за рубежом, представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Зарубежные методы оценки ТОС гидравлических масел

Наименование метода	НД	Сущность метода
Стандартный метод испытаний на коррозионную стойкость и стабильность к окислению гидравлических масел, масел для авиационных турбинных двигателей и других высокоочищенных масел	ASTM D 4636 [82]	Образец выдерживают при повышенной температуре, пропускают поток воздуха в присутствии металлов, выступающих катализаторами окисления. Оценивают стабильность жидкостей к окислению и их склонности подвергаться действию коррозии различные металлы
Стандартный метод определения окислительной стабильности гидравлических и турбинных масел с использованием универсального окислительного прибора	ASTM D 5846 [83]	Образец масла нагревают до температуры 135 °С и пропускают поток воздуха со скоростью 3 л/ч в присутствии металлической катушки из железа и меди. В качестве результата испытания фиксируют количество часов, за которое кислотное число испытуемого образца увеличилось на 0,5 мг/КОН г или время до появления первого коррозионного пятна. Испытание может быть прекращено, если поверхность образца масла достигла поверхности катушки. В таком случае фиксируют количество часов, за которое масло испарилось до данного уровня.
Стандартный метод определения характеристик окисления ингибированных минеральных масел	ASTM D 943 [84]	Образец масла смешивают с 17 % воды, нагревают до 95 °С и далее пропускают поток кислорода в присутствии металлов: железа и меди, активизируя процессы окисления и гидролиза испытуемого масла. В результате отмечают время, за которое кислотное число продукта увеличилось до 2 мг КОН/г.

Перечисленные методы оценки ТОС имеют ряд недостатков, в первую очередь, вызванных статическими условиями исследования на лабораторных установках:

- испытания по оценке ТОС проводят при фиксированном объеме испытуемого масла, не учитывая различные объемы ГС при реальных условиях эксплуатации;

- температура в ходе испытания остается постоянной, при этом окисление ГМ напрямую зависит от изменений температурного режима эксплуатации ГС;

- методы позволяют лишь косвенно оценить стабильность свойств ГМ, используя точечные физико-химические показатели качества ГМ.

Применяют и другие методы, например, в Великобритании используют «Способ определения окислительной стабильности смазочной жидкости» [85], в котором определяют стабильность ГМ по изменению его вязкости.

ТОС и коррозионную активность ГМ для авиационных ГС в РФ определяют по ГОСТ 20944 [86]. В данном методе металлические пластины окисляют в ГМ в присутствии воздуха до температуры 200 °С. По результатам испытания определяют кислотное число и кинематическую вязкость, а также фиксируют изменения внешнего вида ГМ. Коррозионную активность фиксируют по изменению массы металлических пластин.

Для масла АМГ-10 испытание проводят в течение 100 ч при температуре 125 °С; в качестве катализаторов окисления используют металлические пластины из магния, алюминия, стали и меди. Однако в литературных источниках нет информации, с обоснованием условий испытания. Указанный лабораторный метод оценки стабильности ГМ не позволяет прогнозировать срок службы масла, обеспечивающий бесперебойную работу ГС самолета.

Оценка стабильности нефтяных масел против окисления по поглощению кислорода в присутствии меди предусматривается ГОСТ 981 «Масла нефтяные. Метод определения стабильности против окисления» [87].

Одним из важных показателей для ГМ является термическая стабильность – способность жидкости сохранять свои свойства только под действием

температуры. Термическую стабильность ГМ проверяют в герметичных бомбах, где кислород заменен на инертный газ, подобный азоту или гелию, и испытания проводят при условиях, аналогичных параметрам ГС.

В методе ASTM D 2160 ГМ также подвергаются высокотемпературным испытаниям [89]. Во время испытания летучие продукты разложения поддерживаются в постоянном контакте с маслом. Метод и не предусматривает измерение температуры начала разложения испытуемого продукта, но указывает на происходящее общее разложение при заданной температуре и периоде испытания.

Стабильность гидравлических масел на углеводородной основе определяют по ASTM D2070 «Стандартный метод определения термической стабильности гидравлических масел» [90].

Перечисленные лабораторные методы, используемые для оценки стабильности свойств ГМ, хотя и обладают чувствительностью и высокой точностью, недостаточно информативны и достоверны. К основным недостаткам следует отнести:

- испытания проводят в лабораторных, статических условиях, что не позволяет установить динамику изменения ЭС ГМ; не моделируются механохимические процессы воздействия на ГМ, протекающие при работе ГС;
- точечная оценка показателей качества при фиксированных режимах испытаний имеет низкую информативность о стабильности свойств ГМ;
- испытания проводят в статических условиях,
- существующие методики испытаний ГМ предоставляют лишь косвенную оценку его работоспособности и не позволяют прогнозировать срок службы масла;
- испытания ГМ в лабораторных условиях требуют много времени для обоснованных выводов о работоспособности масла, т. е. неоперативные;
- испытания проводятся по стандартам, утвержденным более 20 лет назад, в то время как в результате модернизации техники, в частности, ГС воздушных судов, требования к ГМ возрастают.

Таким образом, испытания лабораторными методами не учитывают условия эксплуатации ГС, ее конструктивные особенности, механизмы протекания процесса в ГС и характеристику масла; в качестве результата лабораторных исследований указывают соответствие значений физико-химических показателей нормам, регламентируемым технической документацией на ГМ, при этом отсутствуют данные по характеру изменений физико-химических свойств масла в зависимости от условий его эксплуатации и времени работы в ГС. В связи с этим для оценки стабильности свойств ГМ необходимо исследование его эксплуатационных и физико-химических свойств в лабораторно-стендовых и стендовых (заводских) условиях.

Комплексный подход к оценке работоспособности ГС предлагает стендовый метод оценки стабильности свойств ГМ для ГС, разработанный на базе ОКБ «Рубин». Методика испытаний ГМ в гидросистеме с аксиально-поршневым насосом проводится при положительных температурах в объеме первого этапа и квалификационной оценки [92]. Стабильность масла при работе оценивают по изменению показателей качества - кинематическая вязкости при 20 °С и максимальной рабочей температуре; кислотное число; температура вспышки; наличие осадков (определяют время работы фильтрэlementов до забивки и их состояние).

По результатам испытания визуально оценивают внешний вид жидкости. Смазочную способность оценивают по работоспособности насоса во времени: на каждом этапе испытаний рассчитывают объемный КПД насоса, проводят замеры линейных размеров и фиксируют внешний вид поверхностей трения основных элементов. Одновременно проверяют состояние уплотнительных деталей и отсутствие коррозии на деталях насоса и других агрегатов, работавших в жидкости.

Испытания проводят при условиях, характерных при эксплуатации ГС АТ:

- рабочее давление на выходе из насоса 21 или 28 МПа;
- частота вращения вала насоса 4000 об/мин;
- объем испытываемой жидкости 15-16 дм<sup>3</sup> (объем ГМ в ГС должен быть равен полуминутной подаче насоса);

- рабочая среда в баке над жидкостью: воздух (рабочая температура ниже 125 °С) или азот (при рабочей температуре выше 125 °С).

Рабочая температура жидкости задается программой испытаний в соответствии с нормативными документами на ГМ.

По результатам испытаний проверяют:

- характеристики насоса: время сохранения работоспособности, износ и наличие коррозии деталей;

- стабильность физико-химических показателей ГМ;

- склонность ГМ к осадкообразованию по времени сохранения работоспособности фильтров и наличию осадка на поверхностях деталей насоса и других элементов ГС.

Результаты стендовых испытаний устанавливают ресурс работы гидравлического насоса, однако данная методика не позволяет сделать выводов о стабильности свойств и ресурсоспособности ГМ. К тому же по причине высокой стоимости и длительного времени на проведение исследований указанную методику включают в перечень испытаний только при допуске новых масел к применению в ГС АТ.

Известны также зарубежные стендовые методы оценки стабильности свойств ГМ. Оценивают стабильность масла по изменению вязкости, степени окисления и наличию/отсутствию утечки ГМ. Для различных ГМ и одинаковых условий проведения испытания в течение определенного периода времени, сравнивают процент снижения давления масла в системе, скорость изменения вязкости, кислотное число [93].

Процесс циркуляции ГМ в ГС осуществляется следующим образом: ГМ циркулирует по трубопроводу из масляного бака и обратно через гидравлический насос, манометр и расходомер. В приборе предусмотрено использование различных насосов в зависимости от режимов испытания (температуры, давления, расхода и других параметров).

Условия для проведения испытаний:

- выходное давление до 30 МПа;

- рабочая температура в масляном баке до 95 °С;
- расход ГМ от 3 до 120 м<sup>3</sup>/ч.

Установка для проведения испытаний представлена на рисунке 3.

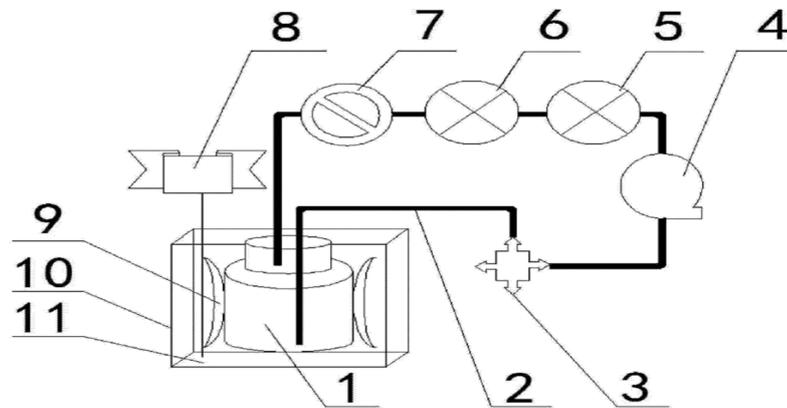


Рисунок 3 – Установка для определения стабильности ГМ

- 1 – масляный бак; 2 – гидравлический трубопровод; 3 – фильтр;  
 4 – гидравлический насос; 5 – манометр; 6 – расходомер; 7 – система управления потоком; 8 – система контроля температуры и нагрева; 9 – эластичный зажим;  
 10 – слой самоизоляции; 11 – масляная ванна термостата.

Стабильность ГМ устанавливают по скорости изменения вязкости масла.

Основными недостатками данного метода являются ограничения по параметрам работы установки: невысокие температура и давление не дают возможность исследовать ГМ во всем его рабочем диапазоне, не приведен способ оценки производительности ГМ в реальных условиях на основе модельной установки.

Вышеперечисленные недостатки исключены в способе оценки стабильности ГМ для АТ с помощью установки, основанной на ультразвуковом воздействии на ГМ [94]. Способ заключается в заполнении ГМ термостатируемой емкости, испытании масла под воздействием ультразвуковых колебаний с заданной амплитудой и частотой в течение определенного времени и оценивании стабильности вязкости и термоокисляемости ГМ по изменению кинематической вязкости и кислотного числа. Сущность данного метода в том, что для оценки

стабильности ГМ для АТ используют совокупность воздействия факторов (температура, ультразвуковое воздействие, объем пробы и длительность этапа цикла испытаний). В результате экспериментальных исследований, проведенных по плану эксперимента Бокса-Бенкена, были получены уравнения, отражающие зависимость изменения кинематической вязкости и кислотного числа ГМ от факторов условий испытаний.

Представленный метод обладает достаточной информативностью. Однако данная методика использует воздействие ультразвуковых колебаний при постоянной частоте с разными значениями амплитуд и рассматривает его взамен давлению, одному из основных факторов, характеризующих эксплуатацию ГМ в ГС АТ, а также отсутствует корреляция результатов испытаний ГМ с его эксплуатацией в натурном агрегате.

Среди известных методов оценки стабильности свойств ГМ отсутствуют методики, позволяющие прогнозировать срок службы ГМ в ГС АТ и устанавливать ресурс работы масла с учетом конструктивных особенностей гидросистемы, протекающих в ней ХП и характеристик ГМ.

Прогнозирование сроков применения ГМ в ГС затруднено в связи с недостаточной информативностью оценки ЭС ГМ. Анализ состояния в области оценки соответствия ГМ сопровождается рядом недостатков [76]:

- оценки показателей ЭС, как правило, не полностью отражают реальную динамику изменения состояний ГМ при эксплуатации в ГС;
- низкая информативность состояния ЭС, вызванная получением точечных оценок показателей качества при фиксированных режимах испытаний;
- недостаточное использование прогностических математических моделей, характеризующих особенности применения ГМ в гидросистеме и представляющих изменение их ЭС.

Указанные выше недостатки обуславливают неполную информацию об уровне ЭС ГМ, получаемой в ходе испытаний. В результате практические сроки смены ГМ назначают на основании опыта эксплуатации аналогичных ГС АТ. Чтобы избежать экономических и материальных потерь при эмпирическом

решении подобных задач, повысить качество полученной информации при лабораторно-стендовых испытаниях, необходимо решить следующие задачи:

- применять функциональное моделирование химмотологических процессов (далее – ХП) при создании методов исследования ГМ;

- использовать методические приемы при проведении исследований, обеспечивающие информативность и достоверность прогнозных оценок о свойствах ГМ;

- проводить испытания по экономичным методикам, сокращающим затраты времени и ресурсов.

Для повышения информативности оценки уровня ЭС горюче-смазочных материалов (далее – ГСМ) при лабораторно-стендовых испытаниях, обеспечивающих комплексное решение указанных выше задач, предложено моделирование ХП в функционально подобных физических моделях (далее – ф-модель) объектов применения ГСМ в зависимости от совокупности факторов, учитывающих условия ХП, значения которых независимо задаются и варьируются в границах их изменения при применении ГМ.

Установление условий подобия процессов, влияющих на стабильность физико-химических свойств ГМ при различных условиях, и получение зависимостей изменения показателей качества от воздействия на ГМ реализуется с помощью приближенного моделирования [77, 78]. Приближенное подобие характеризуется упрощающими допущениями, заведомо приводящими к искажениям, заранее оцениваемым как допустимые на основании дополнительных аналитических или экспериментальных исследований [79]. Это позволит описать процессы с помощью обобщенных функций и распространить результаты ускоренных испытаний ГМ на другие условия или аналогичные масла.

Планирование эксперимента представляет собой кибернетический подход к организации и проведению экспериментальных исследований сложных систем, заключается в рациональном построении плана проведения серии расчетов для получения математического описания и характеристик изучаемого процесса. Наиболее распространенным и проработанным планом эксперимента является

полиномиальное моделирование. На основании многочисленных исследований по изучению свойств различных нефтепродуктов установлено, что ХП могут быть описаны с помощью нелинейных функций, поэтому для получения моделей ХП целесообразно использовать полиномиальные планы второго порядка [114-117]. Применение теории планирования эксперимента позволяет повысить точность и информативность результатов эксперимента, сократить необходимое число опытов, кратчайшим путем найти оптимальные условия или параметры системы, представить результаты в виде удобном для анализа и обобщения [80]. Используют системный подход к исследованию объектов в химмотологии, целью которого являются получение оценок скорости и результата ХП (показателя ЭС).

Несмотря на многочисленность методов оценки стабильности ГМ, для оптимизации контроля состояния ГМ следует применять методы непрерывного или периодического контроля, характеризующиеся низкой стоимостью и достаточной достоверностью анализа. Для оценки пригодности ГМ для ГС необходим совершенный химмотологический анализ с комплексом разносторонних исследований, возможных на базе современных средств математического обеспечения. Более информативное исследование реализуется при условии построения модели химмотологической системы (далее – ХС) по функциональному принципу. Функциональная модель системы должна с определенной точностью обладать такими же преобразующими свойствами, как и моделируемая система [78]; учитывается взаимосвязь особенностей применения ГМ и изменения их физико-химических показателей.

Таким образом, проведен анализ существующих методов оценки стабильности свойств ГМ для АТ, на основе которого выявлена необходимость в разработке более информативного и полного метода оценки ЭС ГМ.

## Выводы по Главе 1

1. Анализ условий эксплуатации ГС АТ показал, что ГМ работают при постоянной динамической нагрузке и стабильность свойств ГМ является одним из основных показателей, характеризующих бесперебойную и надежную работу техники.

2. В ГС применяют ГМ различной химической природы, которые должны обладать высоким уровнем стабильности свойств для надежной и безопасной эксплуатации техники. Для оценки влияния основ и присадок в составе ГМ необходимо исследовать образцы базовых масел по ряду физико-химических показателей.

3. На основе анализа методов оценки стабильности свойств ГМ определены основные недостатки существующих методик. Лабораторные методы проводятся в статических условиях, не обеспечивают оценки стабильности свойств ГМ с учетом основных определяющих факторов (температуры, давления, продолжительности эксплуатации ГМ) на их работоспособность, особенности работы ГС с аксиально-поршневым насосом; испытания на заводах изготовителей длительные и дорогостоящие. Отсутствуют методики прогнозирования сроков смены масла до замены при его работе в ГС АТ.

Возникает потребность в разработке на базе существующих нового, высокоинформативного метода прогнозирования стабильности свойств ГМ.

4. Для достоверной и информативной оценки ЭС ГМ необходимо разработать метод, учитывающий соответствие результатов применения и испытания ГМ в ГС [95]. Целесообразным является применение научно-методического подхода, основанного на физическом и математическом моделировании ХС. Сущность методологического подхода должна заключаться в обосновании условий приближенного подобия ХП и определении условий испытаний.

Таким образом, **целью** настоящей диссертационной работы является прогнозирование срока применения масла до замены в гидравлической системе

авиационной техники методом, разработанным на основе физического и математического моделирования химмотологического процесса деградации свойств масла.

Определены следующие **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.

Исследования в рамках настоящей диссертационной работы проведены по структурной схеме, представленной на рисунке 4.

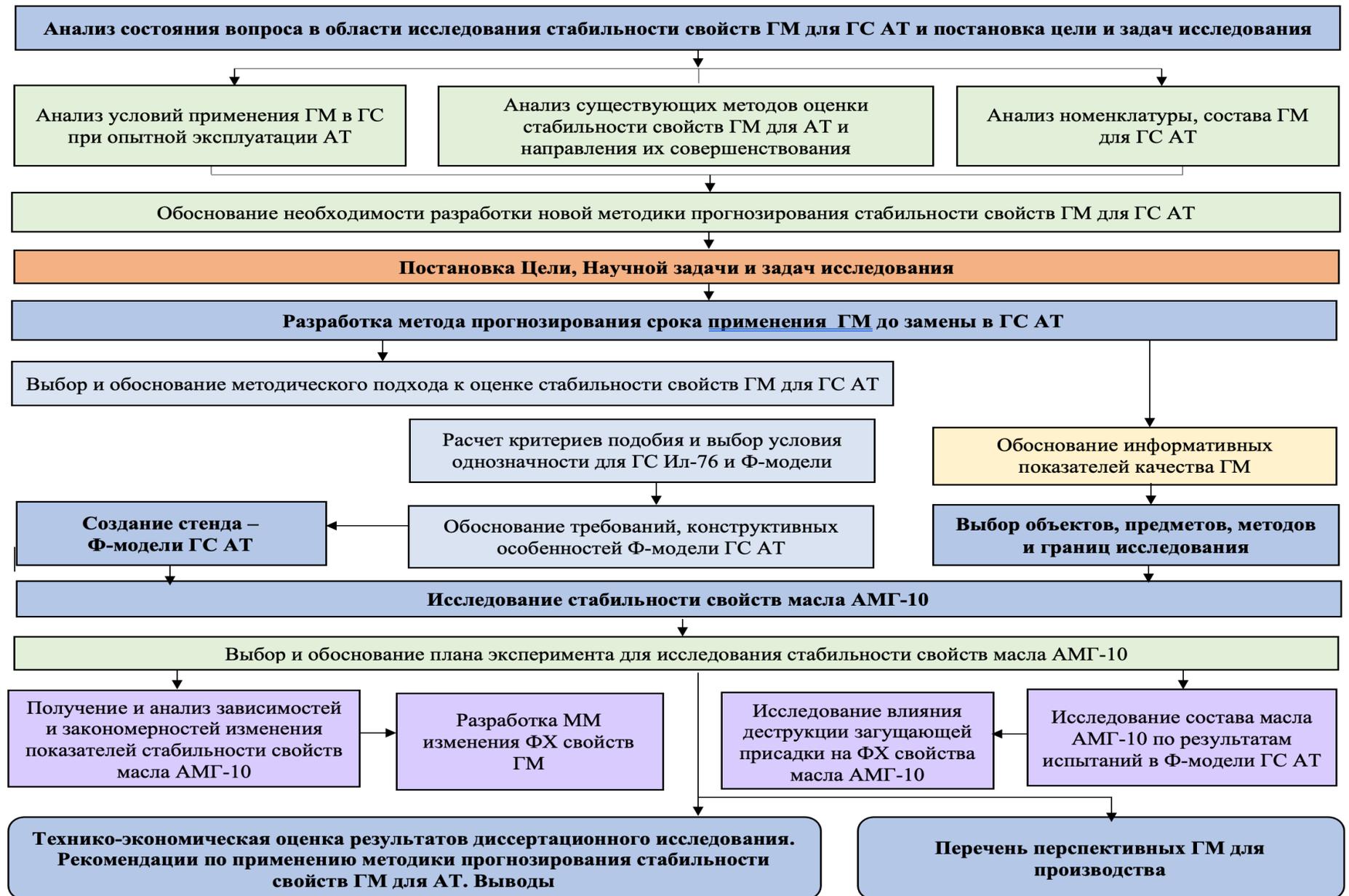


Рисунок 4 – Структурная схема исследования

## ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ СВОЙСТВ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ МАСЕЛ ДЛЯ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

### 2.1 Объекты, предмет и границы исследования

В соответствии с целью и поставленными задачами исследования в качестве **объектов исследования** определено масло АМГ-10 по ГОСТ 6794-2017, являющееся самым востребованным ГМ, применяемым в ГС транспортной АТ. Масло АСГИМ по СТО 07548712-006-2013 исследовано как перспективная, планируемая к внедрению марка с целью прогнозирования срока применения в ГС АТ до замены в сравнении с маслом АМГ-10.

Масло АМГ-10 предназначено для использования в гидросистемах авиационной и наземной техники, работающей в интервалах температур окружающей среды от минус 60 °С до 55 °С. Представляет собой основу, полученную из глубокодеараматизированной низкозастывающей фракции, с вовлечением загущающей, антиокислительной и противоизносной присадок. Технологический процесс производства является периодическим и заключается в изготовлении базового масла, его загущения путем добавления вязкостной полиметакрилатной присадки, и последующим компаундированием с функциональными присадками. Для проведения исследования на стендовой установке использованы образцы масла АМГ-10 производства ООО «Полиэфир» (паспорт качества № 906/1 от 06.11.2020 г.), ООО «ЛЛК-Интернешнл» (паспорт качества № ЛЛК2103840 от 27.03.2021 г.) и АО «НПЦ Спецнефтьпродукт» (паспорт качества № 01/1 от 10.08.2023 г.). Компонентный состав образцов масла АМГ-10 производства ООО «Полиэфир» и АО «НПЦ Спецнефтьпродукт» представлен в таблице 9.

Таблица 9 – Компонентный состав масла АМГ-10 производства АО «Спецнефтьпродукт» и ООО «Полиэфир»

№	Наименование компонента	НД используемого сырья	Количество, % масс.	
			АО «НПЦ Спецнефтьпродукт»	ООО «Полиэфир»
1	Загущающая присадка:			
	Присадка IRGAFLO 6000 V	Спецификация производителя	12,976	-
	Присадка Viscoplex 7-610	Спецификация Viscoplex 7-610 фирмы Evonik Oil Additives GMBH и СТО 77820966-022-2013		13,0
2	Трикрезилфосфат технический	СТО 002-2014 и Спецификация производителя	0,453	0,51
3	Неозон «А»	ТУ 6-14-202-74	0,305	0,34
4	Краситель органический жирорастворимый темно-красный марки Ж	ТУ 2463-413-05800142-2014	0,009	0,01
5	Основа масла АМГ-10:	СТО 52764037-034-2018	86,257	86,14
	базовое масло NS 3	СТО 52764037-035-2018	70,01	64,605
	SPECTRASYN 2	СТО 52764037-036-2018 и Спецификация производителя	29,99	21,535

Основа масла АМГ-10 представляет собой смесь двух базовых масел. Nynas NS 3 – это гидроочищенное нафтеное масло, классифицированное как базовое масло API группы V. Углеводородно-групповой состав Nynas NS 3 включает циклопарафины и арены, парафины. Нафтеное масло Nynas NS 3 имеет удовлетворительный уровень низкотемпературных свойств (температура застывания минус 70 °С), хорошую растворимость присадок, однако для него характерны низкая устойчивость к окислению и плохая смазывающая способность.

Базовое масло SPECTRASYN 2 – это ПАОМ-2, получаемое путем синтеза мономеров этилена и бутилена из мономеров в длинные стабильные цепи. У масла низкая температура застывания (до минус 60 °С), высокая стабильность к окислению, широкий диапазон рабочих температур – от минус 50 до 150 °С.

В качестве противоизносной присадки используют трикрезилфосфат технический – трикрезиловый эфир ортофосфорной кислоты. Он хорошо растворим в органических растворителях, жирах, некоторых маслах, но нерастворим в воде. Рабочие температуры при его использовании не превышают 160 °С.

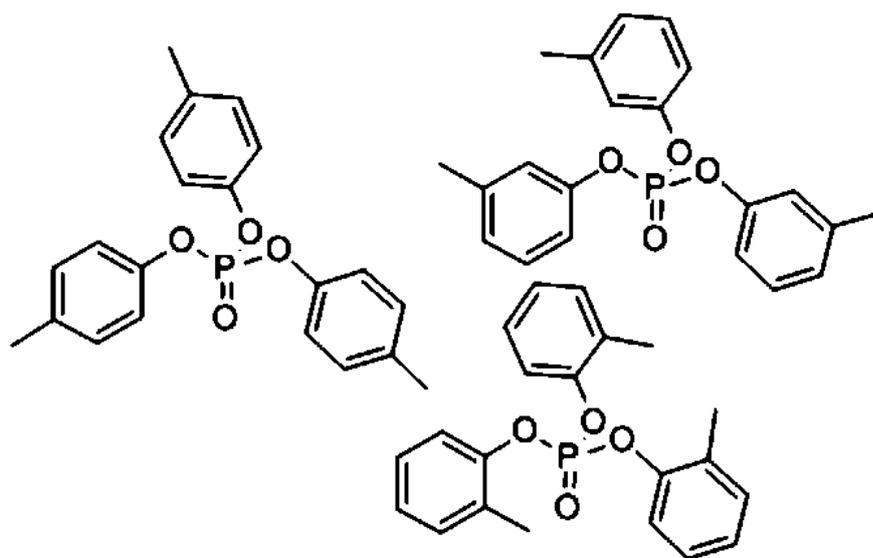


Рисунок 5 – Структурная формула присадки трикрезилфосфат технический

Ингибитором окисления в составе масла АМГ-10 служит фенил-альфа-нафтиламин (Неозон «А»). Присадка хорошо растворима в хлороформе, бензоле, спирте и не растворима в воде.

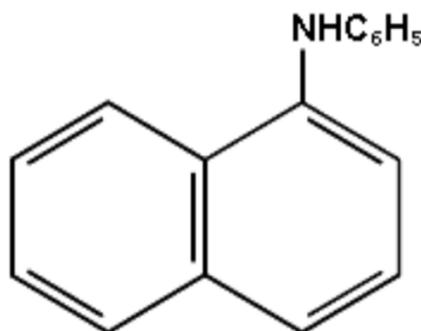


Рисунок 6 – Структурная формула присадки Неозон «А»

Вариант компонентного состава масла АМГ-10 по ГОСТ 6794-2017 производства ООО «ЛЛК-Интернешнл» представлен в таблице 10. Состав отличается применяемыми базовым маслом и загущающей присадкой (полиметакрилатная присадка Максойл В3-011 отечественного производства).

Таблица 10 – Компонентный состав масла АМГ-10 производства ООО «ЛЛК-Интернешнл»

№	Наименование компонента	НД используемого сырья	Количество, % масс.
1	Основа масла АМГ-10	ТУ 38.301-29-21-92	84,871
	насыщенные парафино-нафтеновые УВ		98,6
	ароматические УВ		1,34
	смолы		0,06
2	Присадка полиметакрилатная Максойл В3-011	ТУ 0257-006-48328553-2014	14,356
3	Присадка фенил-альфа-нафтиламин (Неозон «А»)	ТУ 6-14-202-75	0,287
4	Присадка трикрезилфосфат технический	ГОСТ 5728-76	0,479
5	Краситель жирорастворимый темно-красный марки Ж	ТУ 2463-413-05800142-2014	0,007

Присадка Максойл В3-011, также как и Viscoplex 7-610, представляет собой продукт полимеризации алкилметакрилатов, имеет линейные алкильные заместители в сложноэфирных группах состава  $C_{12}-C_{18}$ . Молекулярная масса полиалкилметакрилата находится в диапазоне от 5000 до 12000 а. е. м.

На рисунке представлен фрагмент полиметакрилатной присадки, который является мономерным звеном для «Максойл В3-011» и Viscoplex 7-610.

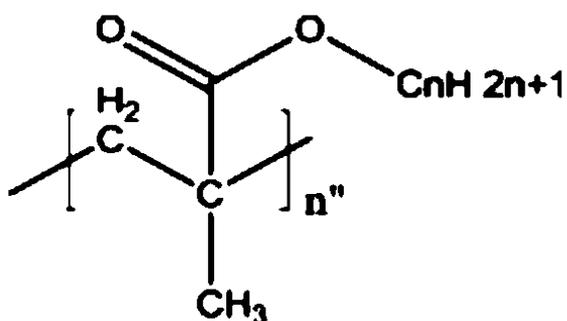


Рисунок 7 – Мономерное звено полиметакрилатной присадки

В составе масла АМГ-10 отечественные производители в качестве загущающего компонента используют присадка IRGAFLO 6000 V, представляющая собой сополимер алкилметакрилата в высокоочищенном минеральном масле с молекулярной массой 50000. Исследования физическими методами данной присадки показали высокую термическую стабильность в сравнении с присадками Максойл В3-011 и Viscoplex 7-610, высокую стабильность к деструкции на ультразвуковой установке УЗДН в составе масла АМГ-10.

Физико-химические показатели масла АМГ-10 указанных отечественных производителей представлены в таблице 11.

Таблица 11 - Значения показателей качества масла АМГ-10 в объеме ГОСТ 6794-2017 отечественных производителей

№	Наименование показателей	Метод испытания	Нормы ГОСТ 6794-2017	Результаты испытаний		
				ООО «Полиэфир»	АО «НПЦ Спецнефтьпродукт»	ООО «ЛЛК-Интернешнл»
1	Внешний вид	п. 5.2 ГОСТ 6794	Прозрачная однородная жидкость красного цвета			
2	Температура начала кипения, °С	ГОСТ 2177 при загрузке см <sup>3</sup>	Не ниже 210	236	228	229
3	Вязкость кинематическая, мм <sup>2</sup> /с, при температуре: 50 °С минус 50 °С	ГОСТ 33 с дополнением п. 5.3 ГОСТ 6794	не менее 10,00 не более 1250	10,48 897,3	10,90 1233	10,63 853,6
4	Кислотное число, мг КОН/1 г	ГОСТ 5985 с дополнением п. 5.4 ГОСТ 6794	Не более 0,030	0,01	Менее 0,01	Менее 0,01

## Продолжение таблицы 11

5	Испытание на коррозию	ГОСТ 2917 с дополнением п. 5.5 ГОСТ 6794- 2017	Выдерживает	Выдерживает	Выдерживает	Выдерживает
6	Термоокислительная стабильность и коррозионная активность, испытание 100 часов, 125 °С, воздух:	ГОСТ 20944				
	вязкость кинематическая после окисления при 50 °С, мм <sup>2</sup> /с	ГОСТ 33	Не менее 9,50	10,92	11,12	10,93
	кислотное число после окисления, мг КОН/1 г	ГОСТ 5985	Не более 0,150	0,02	0,02	0,01
	весовой показатель коррозии, мг/см <sup>2</sup>	ГОСТ 20944	Не более ±0,1 для всех металлов, сплавов и покрытий			

Продолжение таблицы 11

	магнийевый сплав МЛ-5			Отсутствие	Отсутствие	Отсутствие
	сталь 30ХГСА			Отсутствие	Отсутствие	Отсутствие
	медь М-1			Отсутствие	Отсутствие	Отсутствие
	алюминиевый сплав Д-16			Отсутствие	Отсутствие	Отсутствие
7	Содержание водорастворимых кислот и щелочей	ГОСТ 6307	Отсутствие	Отсутствие	Отсутствие	Отсутствие
8	Массовая доля механических примесей, %	ГОСТ 10577	Не более 0,003	0,001	0,001	0,002
9	Содержание воды, %	ГОСТ 2477	Отсутствие	Отсутствие	Отсутствие	Отсутствие
10	Температура вспышки, определяемая в открытом тигле, °С	ГОСТ 4333	Не ниже 93	116	101	107
11	Температура застывания, °С	ГОСТ 20287	Не выше минус 70	Минус 70	Минус 70	Минус 70
12	Качество пленки масла после его нагревания при температуре (65±1) °С в течение 4 часов	п. 5.6 ГОСТ 6794	Пленка должна быть твердой и липкой по всей поверхности пластины	Пленка не твердая и не липкая по всей поверхности пластины	Пленка не твердая и не липкая по всей поверхности пластины	Пленка не твердая и не липкая по всей поверхности пластины

## Продолжение таблицы 11

13	Стабильность вязкости после озвучивания на ультразвуковой установке УЗДН в течение 50 мин, %	п. 5.7 ГОСТ 6794	Не более 42	34,3	19,3	33,5
14	Плотность при 20 °С, г/см <sup>3</sup>	ГОСТ 3900	Не более 0,850	0,847	0,847	0,848
15	Диаметр пятна износа (Ди) при нагрузке 196 Н (20 кгс), температуре (20±5) °С в течение 1 ч, мм	ГОСТ 9490	Не более 0,60	0,39	0,51	0,45

Для исследования на стенде выбрано масло АСГИМ на синтетической основе производства АО «НПЦ Спецнефтьпродукт» как перспективное ГМ с пониженной пожароопасностью, улучшенными низкотемпературными и вязкостно-температурными свойствами, более высокой стойкостью к деструкции в сравнении в маслом АМГ-10.

Компонентный состав образца масла АСГИМ и его физико-химические показатели качества согласно СТО 07548712-006-2013 представлены в таблицах 12 и 13 соответственно.

Таблица 12 – Компонентный состав масла АСГИМ производства АО «Спецнефтьпродукт»

№	Наименование компонента	НД используемого сырья	Количество, % масс.
1	Базовая смесь синтетических углеводов (БССУ):	ТУ 0253-004-07548712-2010	98,4
	Spectrasyn 2	Спецификация Mobil Chemical Products Intl Inc.	61,9 ± 0,5
	Реологический концентрат Nycoperf RA 655	ТУ 0253-003-07548712-2010	36,5 ± 0,5
2	Присадка Ethanoх 4702	Спецификация компании ALBEMARLE Corp.	0,5 ± 0,05
3	Противоизносная присадка DURAD 150	Спецификация компании Lanxess	0,93 ± 0,02
4	Ингибитор коррозии IRGAMET 39	Спецификация компании BASF	0,05 ± 0,01
5	Антипенная присадка Synative AC AMH-2	Спецификация компании Cognis	0,05 ± 0,01
6	Краситель Automate blue 8 AHF	Спецификация компании Rohm & Haas	0,0006 ± 0,0001
7	Краситель Sudan M yellow 150 FR	Спецификация компании Rohm & Haas	0,0006 ± 0,00001

В составе масле АСГИМ в качестве основы используют ПАОМ-2 и реологический концентрат Nycoperf RA 655, состоящий из смеси маловязких моноэфиров C<sub>5</sub>-C<sub>10</sub>-карбоновых кислот и C<sub>8</sub>-C<sub>13</sub>-спиртов, стабилизированных полиметакрилатом. Основа такого состава обеспечивает маслу АСГИМ высокую стойкость к деструкции и удовлетворительные вязкостно-температурные свойства.

Таблица 13 - Значения показателей качества масла АСГИМ в объеме СТО 07548712-006-2013

№	Наименование показателей	Метод испытания	Нормы СТО 07548712-006-2013	Результаты испытаний
1	Внешний вид	Визуально	Прозрачная жидкость синевато-зеленоватого цвета	Прозрачная жидкость синевато-зеленоватого цвета
2	Вязкость кинематическая, мм <sup>2</sup> /с, при температуре: 125 °С 50 °С минус 50 °С	ГОСТ 33	Не менее 2,3 Не менее 9,00 Не более 1250 Не более 4200	2,401 8,767 1098 4004
3	Температура застывания, °С	ГОСТ 20287, метод Б	Не выше минус 65	71
4	Температура вспышки, определяемая в открытом тигле, °С	ГОСТ 4333	Не ниже 150	158
5	Кислотное число, мг КОН/1 г	ГОСТ 5985	Не более 0,03	0,01
6	Содержание воды, %	ГОСТ 2477	Отсутствие	Отсутствие
7	Содержание водорастворимых кислот и щелочей	ГОСТ 6307	Отсутствие	Отсутствие

## Продолжение таблицы 13

8	Термоокислительная стабильность и коррозионная активность, испытание 100 часов, 125 °С, воздух:	ГОСТ 20944			
	изменение кинематической вязкости при 50 °С, %		Не более +8,0	+1,8	
	увеличение кислотного числа, мг КОН/1 г		Не более +0,15	+0,01	
	весовой показатель коррозии, мг/см <sup>2</sup>		Не более ±0,1 для всех металлов, сплавов и покрытий	Отсутствие	
	магниевый сплав МЛ-5				Отсутствие
	сталь 30ХГСА				Отсутствие
	медь М-1				Отсутствие
	алюминиевый сплав Д-16				Отсутствие
	внешний вид		Однородная прозрачная жидкость без осадка	Соответствует	
9	Плотность при 20 °С, г/см <sup>3</sup>	ГОСТ 3900	В пределах 0,825-0,940	0,845	
10	Трибологические характеристики на четырехшариковой машине: диаметр пятна износа (Ди) при осевой нагрузке 196 Н (20 кгс), температуре: (20±5) °С, мм (100±5) °С, мм	ГОСТ 9490	Не более 0,60	0,42	
			Не более 0,80	0,65	
11	Устойчивость к механической деструкции на ультразвуковой установке Уменьшение кинематической вязкости за 50 мин., %	п. 5.7 ГОСТ 6794-2017	Не более 20	17,0	

Для исследования стабильности свойств ГМ разработаны образцы, представляющие собой основу различной химической природы, загущенную вязкостными присадками.

В качестве основы выбраны:

1. Базовое синтетическое полиальфаолефиновое масло ПАОМ-2 производства ООО «ТАИФ СМ» (далее – масло ПАОМ-2): основа для ГМ, эксплуатируемых при низких температурах окружающей среды, в частности, в ГС АТ, производится по ТУ 0253-014-54409843-2007.

2. Базовое изопарафиновое масло HVI-2 производства АО «ТАНЕКО» (далее – масло HVI-2): масло HVI-2 (TANECO BASE 2) – базовое масло II группы (по API). Применяется в качестве основы при производстве трансформаторных, гидравлических масел и специальных охлаждающих жидкостей, производится по ТУ 38.401-58-416-2014.

3. Базовое изопарафиновое масло VHVI-4 производства АО «ТАНЕКО» (далее – масло VHVI-4): масло VHVI-4 (TANECO base 4) – базовое масло III группы (по API), получаемое путем гидрооблагораживания остатка гидрокрекинга, производится по ТУ 38.401-58-415-2014.

4. Дибутилсебацинат производства ООО «Росполихим»: дибутиловый эфир себаценовой кислоты (далее – ДБС). Вязкая, прозрачная жидкость без посторонних примесей, без запаха. Применяют в производстве пластмасс для пищевой и медицинской отрасли, изготавливается по ГОСТ 8728-88.

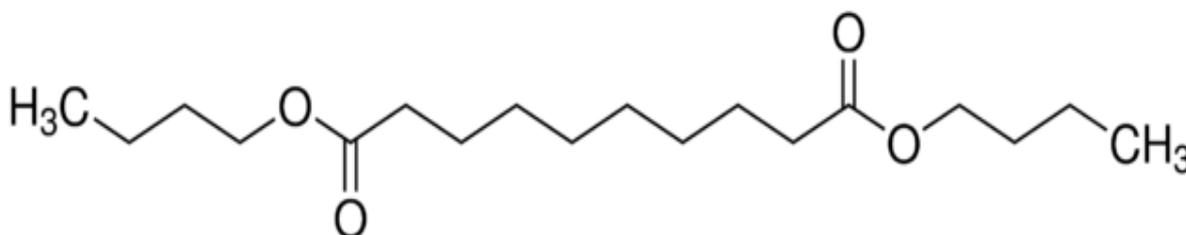


Рисунок 8 – Структурная формула дибутилсебацата

5. Диоктилтерефталат производства АО «СИБУР-Пермь»: диоктилтерефталат (далее – ДОТФ) – прозрачная бесцветная жидкость с умеренным запахом, повышенной морозостойкостью и низкой вязкостью;

неканцерогенный пластификатор общего назначения, производится по ТУ 20.59.56-029-53505711-2018.

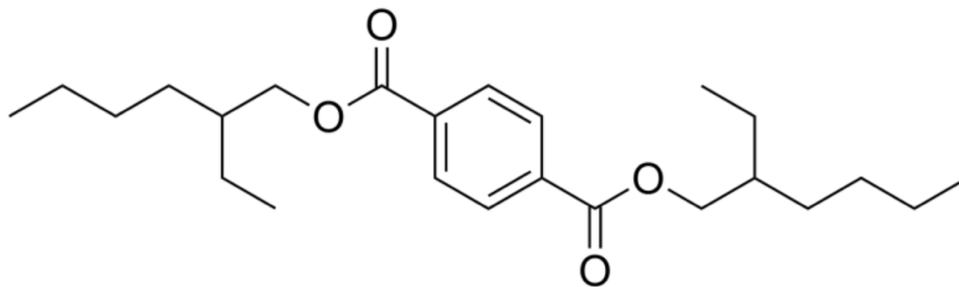


Рисунок 9 – Структурная формула диоктилтерефталата

Данные основы были загущены вязкостными присадками – полиметакрилатными присадками Viscoplex 7-610 и Максойл В3-011, а также присадкой Синтолюкс В-20.

Загущающие присадки Viscoplex 7-610 и Максойл В3-011 представляют собой полиметакрилаты с кинематической вязкостью 950 и 400-2000 мм<sup>2</sup>/с при 100 °С соответственно; среднечисловая ММ полиметакрилатных присадок составляет 40000-45000 а. е. м.

Присадка Синтолюкс В-20 производства ООО «Росполихим» изготавливается согласно СТО 57175009-005-2011, представляет собой поливинил-н-бутиловый эфир с кинематической вязкостью 3200-9000 мм<sup>2</sup>/с при 100 °С и ММ от 15000 до 25000 и применяется в качестве загустителя базовых масел.

Физико-химические показатели свойств перечисленных основ представлены в таблице 14.

Таблица 14 – Физико-химические показатели основ для гидравлических масел

№	Наименование показателей	Результаты испытаний				
		ПАОМ-2	HVI-2	VHVI-4	ДОТФ	ДБС
1	Вязкость кинематическая, мм <sup>2</sup> /с, при:					
	100 °С	2,000	2,501	4,400	4,781	1,820
	50 °С	-	7,002	-	-	-
	40 °С	5,534	10,33	18,80	30,03	5,256
	минус 30 °С	-	Соответствует	-	-	-
2	Индекс вязкости	106	106	147	70	
3	Плотность, кг/м <sup>3</sup> , при:					
	20 °С	790,9	-	826,5	0,982	0,937
	15 °С	-	824,0	829,0	-	-
4	Температура вспышки в закрытом тигле, °С	156	175	-	-	-
5	Температура вспышки в открытом тигле, °С	161	179	224	228	190
6	Кислотное число, мг КОН/г масла	Отсутствие	0,002	-	-	0,02
7	Температура застывания, °С	Минус 70	Минус 48	Минус 19	Минус 34	Минус 70

Продолжение таблицы 14

8	Содержание механических примесей	Отсутствие	Отсутствие	Отсутствие	Отсутствие	-
9	Содержание воды	Отсутствие	Отсутствие	Отсутствие	Следы	-
10	Цвет, ед. ЦНТ, не более	Менее 0,5	Менее 0,5	-	-	-
11	Содержание серы, мг/кг, не более	-	Менее 3	5	-	-
12	Коррозионная сера	-	Соответствует	-	-	-
13	Испаряемость по Ноак, % масс., не более	-	-	10	-	-
14	Показатель преломления при 20 °С	-	-	-	1,489	-

**Предметом исследования** являются:

- методы оценки стабильности ЭС ГМ;
- эксплуатационные и физико-химические свойства масла АМГ-10 согласно ГОСТ 6794-2017;
- количественные и качественные зависимости и закономерности изменения показателей стабильности свойств ГМ (кинематическая вязкость при 50 °С по ГОСТ 33 и кислотное число по ГОСТ 5985);

**Границами исследований** приняты условия эксплуатации ГМ в ГС самолета Ил-76.

## **2.2 Методы испытаний и исследования стабильности свойств гидравлических масел для авиационной техники**

Для исследования стабильности свойств ГМ для ГС АТ применены физико-химические и физические методы оценки.

### **2.2.1 Методы испытаний и исследований физико-химических и эксплуатационных свойств гидравлических масел для авиационной техники**

Для исследования свойств ГМ, применяемых в ГС самолета Ил-76, используют физико-химические методы, основанные на определении показателей, характеризующих стабильность свойств ГМ. Данные методики разработаны для экспериментального анализа в лабораторных условиях с целью определения состояния ГМ, оценки его технико-экономической целесообразности применения.

Масло АМГ-10, выбранное в качестве объекта исследования, проверено по показателям, соответствующим нормам ГОСТ 6794-2017.

Физико-химические исследования основаны на изменении физических параметров вещества под воздействием различных внешних факторов: температуры, рабочей среды, присутствия катализаторов окисления и других. Эти способы отличаются универсальностью и высокой скоростью.

Основными ХП, протекающими в ГС при работе ГМ, являются термомеханическая деструкция молекул загущающих присадок, приводящая к падению кинематической вязкости до предельно допустимого значения, а также процессы окисления, сопровождающиеся образованием высокомолекулярных углеводородных соединений в виде отложений и осадков на элементах ГС. Для масла, применяющегося в ГС АТ, основными показателями качества являются кинематическая вязкость при 50 °С, кислотное число и массовая доля механических примесей. Масло АМГ-10 является работоспособным, если кинематическая вязкость при 50 °С не менее 7,00 мм<sup>2</sup>/с, кислотное число при этом не выше 0,15, а массовая доля механических примесей менее 0,003 %.

В рамках настоящего исследования определены показатели качества: кинематическая вязкость при 50 °С (ГОСТ 33) и кислотное число (ГОСТ 5985).

### **2.2.2 Физические методы исследования состава гидравлических масел**

Для исследования изменения состава ГМ при его эксплуатации в ф-модели использованы следующие методы:

1. Метод ИК-спектроскопии, в основе которого лежат процессы поглощения, отражения и рассеивания энергии инфракрасного излучения при прохождении через вещество [97-99]; данный метод является одним из основных способов изучения строения органических и неорганических соединений [100].

Для каждой структурной группы и связи молекул соответствуют характеристические полосы поглощения, выявляющиеся при соответствующих частотах инфракрасного спектра. Именно в ИК-области спектра находятся основные гармоники колебательных спектров углеводородов, входящих в состав ГМ [101].

Исследования в ближнем инфракрасном диапазоне с применением математических методов анализа многомерных данных в рамках хемометрического подхода лежат в основе методики экспресс-анализа показателей качества продуктов нефтехимии [102]. ИК-спектр позволяет более надежно, чем химический анализ, определять функциональные группы, особенно когда требуется совместно провести качественный и количественный анализы [103].

Исследование проведены на ИК-Фурье-спектрометре «Nicolet-670» (фирмы «Thermo Electron Corporation», США) в диапазоне волновых чисел от 4000 до 400 см<sup>-1</sup>, разрешающей способностью 1 см<sup>-1</sup>. Сканирование ИК-спектров проб осуществляли с использованием абсорбционной кюветы с толщиной поглощающего слоя 0,1 мм с окнами из бромида калия (KBr). Обработку данных проводили в программном обеспечении «TQ Analyst». Испытания проведены по СТО 08151164-0311-2018 «Масло гидравлическое АМГ-10 Определение концентрации загущающей присадки Viscoplex 7-610 методом инфракрасной спектроскопии» [110].

2. Эксклюзионная хроматография – вид жидкостной хроматографии, при которой разделение молекул веществ происходит за счет их способности проникать в поры неподвижной фазы. Если неподвижной фазой является гель, то такую разновидность эксклюзионной хроматографии называют гелем-проникающей хроматографией (далее – ГПХ). Распределение молекул происходит между растворителями, один из которых содержится внутри пор сорбента, а другой протекает между его частицами. Разделение молекул происходит за счет различного взаимодействия компонентов с поверхностью сорбента. Данный вид анализа применяется для высокомолекулярных веществ,

ММ которых может достигать  $10^8$  [104-108]. С помощью метода ГПХ определяют молекулярные массы и индекс полидисперсности полимеров [109].

Особенностями эксклюзионной хроматографии являются предсказуемая продолжительность анализа, известный заранее порядок элюирования компонентов по размеру молекул, похожая ширина пиков во всем диапазоне селективного разделения и выход всех компонентов пробы за короткий промежуток времени, соответствующий объему удерживания.

Механизм ГПХ представлен на рисунке 10.

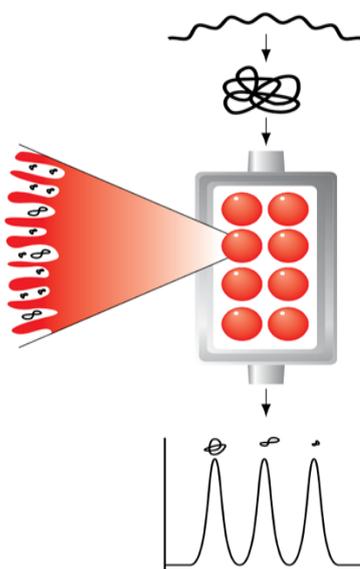


Рисунок 10 – Механизм гель-проникающей хроматографии

С помощью ГПХ определены молекулярные массы загущающей присадки в образцах масла АМГ-10. По полученным результатам возможно сделать выводы о влиянии деструктивных процессов, протекающих при эксплуатации масла АМГ-10 в ГС, на вязкость ГМ, которая напрямую зависит от молекулярной массы полимерного загустителя.

Для исследования загущающих присадок Viscoplex 7-610, IRGAFLO 6000 V и Максойл ВЗ-011, используемых в масле АМГ-10 в качестве загустителя, применен метод ГПХ с рефрактометрическим детектором. Исследования проведены на хроматографе Agilent 1260 Infinity II (PLgel 10um MiniMIX-B). В качестве элюента применен тетрагидрофуран; скорость потока

0,3 мл/мин, объем пробы 50 мкл, концентрация образцов 1 мг/мл. Молекулярные массы и полидисперсность рассчитаны по стандартной методике относительно узких полистирольных стандартов.

3. Термическая стабильность – это способность химического соединения выдерживать высокие температуры не разлагаясь. Для оценки термической стабильности присадок Viscoplex 7-610, IRGAFLO 6000 V и Максойл ВЗ-011 проведены испытания на приборе синхронного термического анализа STA 449 F3 Jupiter производства Netzsch по СТО 08151164-0209-2016. В результате испытаний выделены экзотермические эффекты вследствие начала окисления, получены графики термогравиметрического анализа и дифференциально-сканирующей калориметрии.

### **2.3 Разработка метода прогнозирования срока применения гидравлических масел до замены в гидравлической системе авиационной техники**

В результате анализа существующих методов оценки стабильности свойств ГМ установлено, что проведение исследований при выборочных режимах и фиксированных условиях опосредованно характеризуют протекание ХП в ГС. Поэтому распространение однофакторных результатов оценки стабильности свойств ГМ, полученных в ограниченной области испытания, на реальные условия применения затруднено.

Для более полной оценки стабильности свойств ГМ применен комплекс исследований с использованием средств математического обеспечения. Использован научный подход к изучению закономерностей изменения показателей качества ГМ и разработке на их основе метода прогнозирования стабильности свойств масел. Определены закономерности влияния

конструктивных и эксплуатационных факторов на состав и свойства ГМ, взаимное влияние этих факторов на работу ГС.

Для оценки стабильности свойств ГМ изучены:

- условия работы ГМ в ГС (рабочие температура и давление, расход);
- конструкция ГС и ее характерные элементы, в которых на ГМ оказывают воздействие максимальные нагрузки, контактирующие материалы;
- механизм протекания ХП в ГС, связанный с изменением физико-химических и эксплуатационных свойств ГМ.

### **2.3.1 Обоснование условий приближенного подобия химмотологического процесса деградации свойств гидравлических масел при применении в авиационной технике и создание стенда как физической модели гидросистемы**

Для разработки высокоинформативного метода оценки стабильности свойств ГМ, учитывающего конструктивные особенности ГС самолета, режимы ее работы и физико-химические свойства масла, применяемого в ГС, позволяющего повысить достоверность результатов и сократить ресурсные затраты при проведении исследований и испытаний, был выбран научно-методический подход, основанный на физическом и математическом моделировании ХС «ГМ – ГС – условия эксплуатации» и протекающего в ней ХП, определяющего стабильность свойств ГМ при их применении [111].

Физическое моделирование характеризуется тем, что исследования проводятся на установках, обладающих физическим подобием, т. е. сохраняющих природу явлений. При приближенном физическом моделировании возможно получить характеристики для условий применения в натурной ГС путем расчета критериев подобия и установления корреляции.

Для физического моделирования ХП, протекающих в ГС самолета Ил-76, использовано приближенное подобие, пространственно-временное моделирование [79], заключающееся в обосновании условий подобия процесса в модели и объекте. Аналитический вид уравнения процесса изменения стабильности физико-химических свойств ГМ неизвестен, поэтому применение теории подобия в чистом виде невозможно.

Для определения критериев подобия явлений, протекающих в ф-модели и в процессе эксплуатации ГМ в натурном агрегате, применена  $\pi$ -теорема. Данная теорема подобия позволяет получать критерии подобия в случае, когда уравнение процесса представлено в виде функциональной зависимости между параметрами системы [112]:

$$F(y, x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_{n-1}) = 0. \quad (2)$$

Для оценки стабильности свойств ГМ на основании морфологического описания процессов необходимо получить значения физико-химических показателей, определяющих работоспособность конкретных ГМ в определенных условиях [113, 114].

Для этого требуется изучить взаимосвязь особенностей применения ГМ и изменения его физико-химических показателей, суть которой отражена в зависимости:

$$W = F_1(f_{\text{усл.}}, f_{\text{констр.}}, f_{\text{механ.}}, \chi_{\text{ГМ}}), \quad (3)$$

$$R = F_2(f_{\text{усл.}}, f_{\text{констр.}}, f_{\text{механ.}}, \chi_{\text{ГМ}}), \quad (4)$$

где  $W (R)$  – скорость (результат) изменения качества ГМ при эксплуатации в ГС;

$f_{\text{усл.}}$  – факторы, учитывающие условия эксплуатации исследуемой ХС;

$f_{\text{констр.}}$  – факторы, учитывающие конструктивные особенности;

$f_{\text{механ.}}$  – факторы, учитывающие механизмы протекания процесса эксплуатации ГМ;

$\chi_{\text{ГМ}}$  – характеристика состава и совокупность физико-химических свойств ГМ.

В качестве определяющих факторов, учитывающих условия эксплуатации ГС, принята температура, скорость потока жидкости и время работы системы.

К факторам, учитывающим конструктивные особенности, относятся диаметр трубопроводов ГС и объем ГМ. Показатели, характеризующие стабильность ГМ, меняются вследствие процессов окисления, термического разложения и дросселирования молекул масла.

Характер протекания перечисленных процессов обуславливает в том числе объем ГМ в ГС: чем он больше, тем быстрее происходит релаксация полимерной присадки после ее деструкции, следовательно, и изменение вязкости будет менее значительно.

Чтобы определить скорость потока жидкости, соответствующую оптимальным условиям эксплуатации, необходимо подобрать диаметр трубопровода ГС. Правильно выбранный диаметр позволит избежать значительных потерь энергии ГМ и не вызовет критического изменения его физико-химических свойств.

Фактором, учитывающим механизмы протекания процесса эксплуатации ГМ, является перепад давления в системе, который наблюдается в местах дросселирования масла. При этом вся мощность объемных потерь затрачивается на нагрев и модификацию жидкости. В полостях высокого давления происходит обновление ГМ, причем интенсивность данного процесса зависит от элемента ГС [115].

На основании анализа ХП, протекающих в ГС, в качестве основных характеристик показателей качества ГМ определены кинематическая вязкость и плотность.

Изменение и упрощение условий работы ГС при моделировании должны обеспечить реализацию следующих требований [116]:

- возможность по результатам экспериментов объяснить основные факты, наблюдаемые в ГС;
- критические условия эксплуатации испытуемого ГМ;

- высокую чувствительность параметров ХП к изменению состава ГМ и условий процесса;

- независимое задание и варьирование уровнями факторов, определяющих процесс.

Моделирование процессов, протекающих в реальной ГС, удалось достичь применением теории подобия.

Опираясь на морфологическое описание процессов, влияющих на стабильность ГМ, и анализ факторов ХП, создана ф-модель [51].

Явления, происходящие в процессе эксплуатации ГМ в ГС, рассмотрены как комплекс процессов, которые описаны уравнениями, связывающими параметры процесса и параметры ХС «ГМ – ГС – условия эксплуатации», записанными в выбранной системе координат [78, 80]:

$$R = \varphi (T, V, U, d, \rho, \Delta P, \tau, \nu) \quad (5)$$

где  $R$  – результат изменения ЭС ГМ;

$f_{\text{усл.}}$ :  $T$  – рабочая температура ГМ, °С;

$U$  – скорость потока жидкости, м/с;

$\tau$  – время работы ГС, ч;

$f_{\text{констр.}}$ :  $V$  – объем ГМ в системе, м<sup>3</sup>;

$d$  – диаметр трубопроводов ГС, м;

$f_{\text{механ.}}$ :  $\Delta P$  – перепад давления в системе, МПа;

$\chi_{\text{ГМ}}$ :  $\rho$  – плотность ГМ, кг/м<sup>3</sup>;

$\nu$  – кинематическая вязкость ГМ, мм<sup>2</sup>/с.

ХС «ГМ – ГС – условия эксплуатации» в ГС реальной АТ и ф-модели являются подобными в результате воспроизведения конструктивных особенностей конструкции ГС самолета в ф-модели, а также в связи с равенством соответствующих критериев подобия, составленных из параметров процесса эксплуатации ГМ [51].

Основные критерии процесса работы ГМ в ГС получены с помощью анализа размерностей.

В описании явлений процесса эксплуатации ГМ в ГС учтено 8 величин, характеризующих ХС ( $m = 8$ ):

$$P_1 = T; P_2 = V; P_3 = U; P_4 = d; P_5 = \rho; P_6 = \Delta P; P_7 = \tau; P_8 = \nu. \quad (6)$$

Функциональная зависимость имеет вид:

$$f(T, V, U, d, \rho, \Delta P, \tau, \nu) = 0. \quad (7)$$

В качестве независимых единиц измерения применительно к системе измерений (М, L, T,  $\Theta$ ) выбраны:  $P_1 = T$ ;  $P_2 = V$ ;  $P_3 = \rho$ ;  $P_4 = \tau$ .

Выражения единиц измерения всех участвующих величин запишем через формулы размерности:

для группы независимых величин:

$$[T] = [M]^0 [L]^0 [T]^0 [\Theta]^1, \quad (8)$$

$$[V] = [M]^0 [L]^3 [T]^0 [\Theta]^0, \quad (9)$$

$$[\rho] = [M]^1 [L]^{-3} [T]^0 [\Theta]^0, \quad (10)$$

$$[\tau] = [M]^0 [L]^0 [T]^1 [\Theta]^0, \quad (11)$$

для группы зависимых величин ( $m - k = 4$ ):

$$[\nu] = [M]^0 [L]^2 [T]^{-1} [\Theta]^0, \quad (12)$$

$$[d] = [M]^0 [L]^1 [T]^0 [\Theta]^0, \quad (13)$$

$$[\Delta P] = [M]^1 [L]^{-1} [T]^{-2} [\Theta]^0, \quad (14)$$

$$[U] = [M]^0 [L]^1 [T]^{-1} [\Theta]^0, \quad (15)$$

Правильность выбора числа независимых параметров ( $k=4$ ) определена составлением матрицы размерностей уравнений и проверкой неравенства нулю ее определителя ( $D_{(1-4)}$ ):

$$D_{(1-4)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & -3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = -3. \quad (16)$$

т.е  $D \neq 0$ , следовательно, значение  $k=4$  выбрано правильно и величины  $T$ ,  $V$ ,  $\rho$  и  $\tau$  действительно независимы.

Критерии подобия ( $\pi_1 - \pi_4$ ) получены в виде отношения каждого из определяющих параметров процессов к группе независимых величин в соответствующих степенях размерностей:

$$\pi_1 = \frac{U}{\dim T^U \cdot \dim V^{\lambda U} \cdot \dim \rho^{\delta U} \cdot \dim \tau^{\gamma U}} = \frac{[M]^0 [L]^1 [T]^{-1} [\Theta]^0}{[M]^{\delta U} [L]^{3\lambda U - 3\delta U} [T]^{\gamma U} [\Theta]^{\varphi U}} = \frac{U \cdot \tau}{\sqrt[3]{V^2}}, \quad (17)$$

$$\pi_2 = \frac{d}{\dim T^{\varphi d} \cdot \dim V^{\lambda d} \cdot \dim \rho^{\delta d} \cdot \dim \tau^{\gamma d}} = \frac{[M]^0 [L]^1 [T]^0 [\Theta]^0}{[M]^{\delta d} [L]^{3\lambda d - 3\delta d} [T]^{\gamma d} [\Theta]^{\varphi d}} = \frac{d}{\sqrt[3]{V^2}}, \quad (18)$$

$$\pi_3 = \frac{\Delta P}{\dim T^{\varphi \Delta P} \cdot \dim V^{\lambda \Delta P} \cdot \dim \rho^{\delta \Delta P} \cdot \dim \tau^{\gamma \Delta P}} = \frac{[M]^1 [L]^{-1} [T]^{-2} [\Theta]^0}{[M]^{\delta \Delta P} [L]^{3\lambda \Delta P - 3\delta \Delta P} [T]^{\gamma \Delta P} [\Theta]^{\varphi \Delta P}} = \frac{P \cdot \tau^2}{\rho \cdot \sqrt[3]{V^2}}, \quad (19)$$

$$\pi_4 = \frac{\nu}{\dim T^{\varphi \nu} \cdot \dim V^{\lambda \nu} \cdot \dim \rho^{\delta \nu} \cdot \dim \tau^{\gamma \nu}} = \frac{[M]^0 [L]^2 [T]^{-1} [\Theta]^0}{[M]^{\delta \nu} [L]^{3\lambda \nu - 3\delta \nu} [T]^{\gamma \nu} [\Theta]^{\varphi \nu}} = \frac{\nu \cdot \tau}{\sqrt[3]{V^2}}. \quad (20)$$

Для упрощения дальнейших расчетов произведем некоторые математические действия с полученными критериями подобия:

$$\pi_I = \frac{\pi_1 \cdot \pi_2}{\pi_4} = \frac{U \cdot d}{\nu} = \text{Re}, \quad (21)$$

$$\pi_{II} = \frac{\pi_2}{\pi_1} = \frac{d}{\tau \cdot U} = \text{Sh}, \quad (22)$$

$$\pi_{III} = \frac{\pi_3}{(\pi_1)^2} = \frac{\Delta P}{\rho \cdot U^2} = \text{Eu}. \quad (23)$$

Полученные путем преобразований критерии являются известными критериями гидродинамического подобия:

$Re = \frac{U \cdot d}{\nu}$  – критерий Рейнольдса, описывающий характер потока жидкости и характеризующий соотношение между инерционными силами и силами вязкости, является критерием Рейнольдса [112].

$Sh = \frac{L(d)}{\tau \cdot U}$  – критерий динамического подобия Струхала для неустановившегося движения жидкости; равен отношению дополнительной (локальной) силы к силе инерции [112].

$Eu = \frac{\Delta P}{\rho \cdot U^2}$  – критерий Эйлера, характеризующий гидравлическое сопротивление системы, описывает отношение между силами давления на единичный объем жидкости и инерционными силами [112].

Следовательно, исследуемый ХП, протекающий в ГС в условиях стендовых испытаний, характеризуется 2 безразмерными критериями:

$$F(Re, Eu) = 0. \quad (24)$$

Для обеспечения подобия ХП при исследовании стабильности свойств ГМ в натуральных и модельных условиях, для соблюдения условий однозначности выбрано равенство кинематической вязкости масла, температуры и давления в реальной ГС и ф-модели:

$$\frac{\nu}{\nu^*} = 1, \nu = idem, \quad (25)$$

$$\frac{\rho}{\rho^*} = 1, \rho = idem, \quad (26)$$

$$\frac{T}{T^*} = 1, T = idem, \quad (27)$$

$$\frac{P}{P^*} = 1, P = idem, \quad (28)$$

где  $\nu$  – кинематическая вязкость ГМ в ГС самолета, мм<sup>2</sup>/с;

$\nu^*$  – кинематическая вязкость ГМ на стенде, мм<sup>2</sup>/с;

$\rho$  – плотность ГМ в ГС самолета, кг/м<sup>3</sup>;

- $\rho^*$  – плотность ГМ на стенде, кг/м<sup>3</sup>;  
 T – температура ГМ в ГС самолета, °С;  
 T\* – температура ГМ на стенде, °С;  
 P – давление в ГС самолета, МПа;  
 P\* – давление на стенде, МПа.

Изложенный подход не определяет жестких соотношений параметров ф-модели, а устанавливает границы значений этих параметров, характеризующих критические условия подобия физико-химических превращений ГМ в ГС. Реализуется подобие по функциональному признаку: приведенные критерии и их численные значения обеспечивают протекание ХП в ф-модели в том же направлении, что и в реальной системе, при этом ф-модель выполняет преобразующую функцию, аналогичную функции ГС агрегата.

С помощью анализа размерностей получены гидродинамические критерии подобия. На основании данных о технических параметрах ГС самолета Ил-76, рассчитываем их значения и устанавливаем требования к условиям работы ф-модели (Таблица 15):

Таблица 15 – Расчет критериев подобия и требований к параметрам работы ГС ф-модели

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

Число Струхаля рассчитано для участка ГС, на котором установлено дросселирующее устройство (характерный линейный размер для участка ГС Ил-76 и ф-модели принят за 0,07 м). Его значение составило  $Sh=0,086$ , что позволило сделать вывод о незначимости критерия Струхаля для характеристики ф-модели ГС АТ в рамках исследования.

На основе расчетов создана установка для оценки стабильности свойств ГМ для ГС [118], выполняющая следующие рабочие операции: регулируемая перекачка ГМ с измерением основных параметров процесса; регулируемый нагрев и охлаждение масла; отбор проб ГМ; опорожнение ГС от ГМ; заправка, промывка и сушка ГС.

Испытательная установка представляет собой гидравлический контур и конструктивно включать следующие элементы:

- силовая часть (силовой агрегат, преобразователь частоты, пульта управления, сменные насосы);
- система измерения (датчики, расходомеры, манометры);
- запорная арматура (вентили);
- фильтры;
- дополнительное оборудование (компрессор, насос заправки, баллоны с воздухом и азотом).

Условно стенд представлен тремя составными частями: силовой электропривод с дистанционным управлением и регулированием, основной гидравлический экспериментальный контур, пульт управления. Принцип работы стенда предусматривает непосредственное энергетическое воздействие на ГМ при его транспортировке по элементам ГС, включающей: гидронасос с регулируемым силовым приводом, расходную емкость, терморегулирующий блок (теплообменник), дросселирующие устройства, клапаны, трубопроводы и другие элементы системы. При больших перепадах давления в дросселирующих устройствах скорость потока велика и жидкость в процессе эксплуатации может многократно подвергаться большим механическим и тепловым воздействиям, что вызывает ее интенсивное старение с потерей требуемых эксплуатационных

свойств. Температурный режим стенда регулируется дистанционно приводными дросселями и теплообменником. Для обеспечения различных режимов подачи ГМ гидравлический контур системы стенд комплектуется насосным агрегатом.

Принципиальная схема ф-модели представлена на рисунке 11.

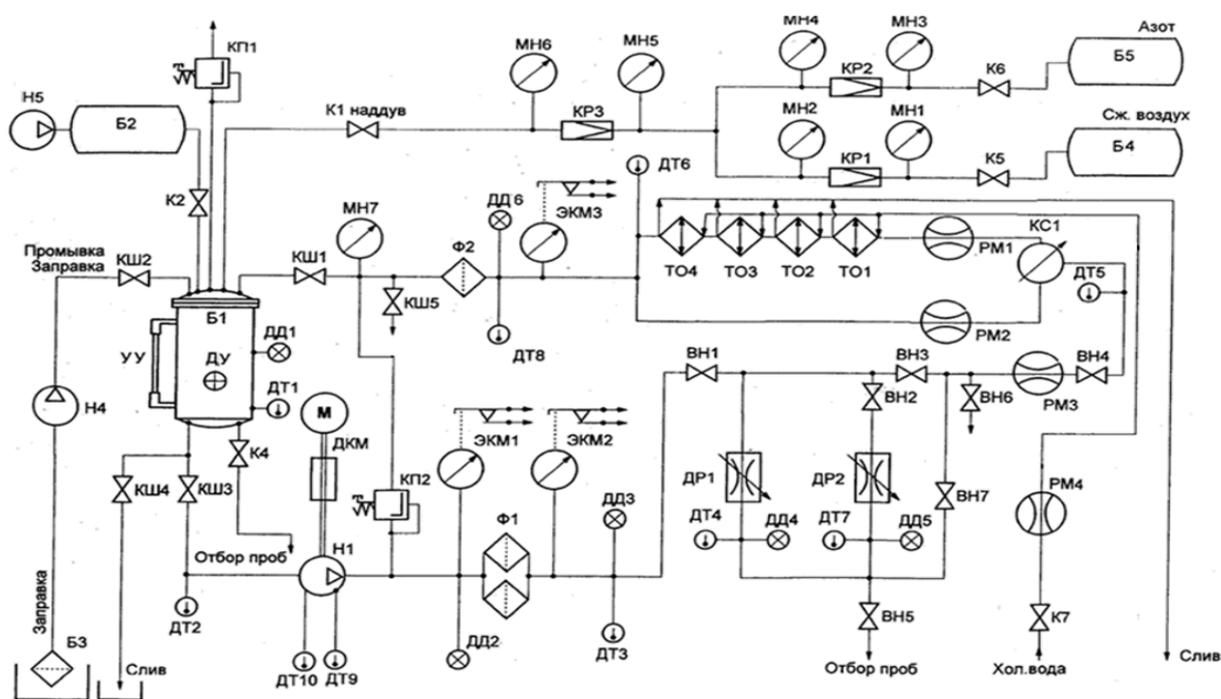


Рисунок 11 – Гидравлическая схема стенда для оценки стабильности свойств гидравлических масел

Б1 – бак с ГМ; Б2 – ресивер для размещения осушителя; Б3 – бак с ГМ для заправки; Б4 – баллон о сжатым воздухом; Б5 – баллон с азотом; Н1 – силовая установка (насос); М – электродвигатель; Н4 – насос для заполнения бака ГМ; Н5 – компрессор безмасляный; ДР1, ДР2 – дроссели на линии ГМ; ВН1 – ВН7 – вентили; К1 – К7 – краны; КШ1 – КШ5 – краны шаровые; КС1 – трехходовой кран-смеситель; Ф1 – фильтр высокого давления; Ф2 – фильтр низкого давления; ДТ1 – ДТ11 – датчики температуры; ДД1 – ДД6 – датчики давления; ДКМ – датчик крутящего момента; РМ1 – РМ4 – расходомеры; ДУ – датчик уровня; КР1 – КР3 – редукторы; МН1 – МН7 – манометры; ЭКМ1 - ЭКМ3 – электроконтактный манометр; УУ – уровнемер.

Моделирование установки реализовано с использованием реальных гидравлических систем с учетом влияния различных эксплуатационных факторов (температуры, давления, механического воздействия и др.) на ГМ при его контакте с конструктивными элементами и агрегатами гидросистемы. Разработанная конструкция обеспечивает создание требуемых температурных и нагрузочных режимов, используемой мощности исполнительных органов, влияющих на сохранение свойств ГМ в процессе его эксплуатации.

В ходе испытаний с помощью контрольно-измерительной и управляющей аппаратуры должны задаваться и контролироваться следующие параметры: температура ГМ, давление на выходе из насоса, продолжительность испытания, частота оборотов вала насоса, расход ГМ, крутящий момент.

Заданное давление отображается на датчике ДДЗ – перед дросселирующим устройством. Максимальный перепад давления в гидросистеме стенда наблюдается между датчиками ДДЗ и ДД4. Рабочей температурой ГМ является температура, отображающаяся на датчике ДТ5 – на участке между расходомером РМЗ и трехходовым краном-смесителем КС1. После крана-смесителя ГМ идет двумя потоками – часть масла охлаждается в теплообменных аппаратах, другая часть (горячий поток) идет по байпасу; далее два потока смешиваются и в бак поступает охлажденное масло.

На фильтрах высокого давления Ф1 (входной) и низкого давления Ф2 (выходной), представляющих собой фильтрующие элементы из нержавеющей стали с сетчатым каркасом и рейтингом фильтрации 20 и 40 мкм, во время работы стенда возникает перепад давления. Согласно ГОСТ 3968-2011 на перепад давлений на фильтре влияют вязкость жидкости, ее удельная плотность, расход, фильтрующий материал фильтроэлемента, а также конструкции фильтроэлемента и корпуса фильтра. Допустимый перепад давлений на фильтрах высокого (Ф1) и низкого (Ф2) давления в стенде составляет 2 и 0,6 МПа соответственно.

Управление и контроль за работой стенда осуществляется с помощью программного блока управления (далее – ПБУ). Для проведения испытаний

разработано программное обеспечение (далее – ПО) [119], которое обеспечивает подачу ГМ, поддержание давления и температуры в системе, контроль за перепадом температуры ГМ в редукторе-теплообменнике в заданном диапазоне. Результатом работы являются записи данных в формате числовых и графических значений, характеризующих ХП, протекающий в гидравлическом стенде, при этом частота сохранения точек измерения устанавливается через ПО [120, 121].

В ПО стенда также предусмотрено две опции для снятия параметров работы:

- перевод системы в автоматический режим, задав требуемые данные по давлению и температуре, а также установив параметры работы насоса;
- ручное регулирование степени открытия клапанов в активном окне программы.

Во время проведения испытаний все данные по работе фиксируются в ПО, а также записываются в log-файл, причем частота сохранения точек измерения устанавливается оператором, контролирующим работу ф-модели.

Блок-схема функциональных связей ПБУ стенда оценки стабильности свойств ГМ представлена на рисунке 12.

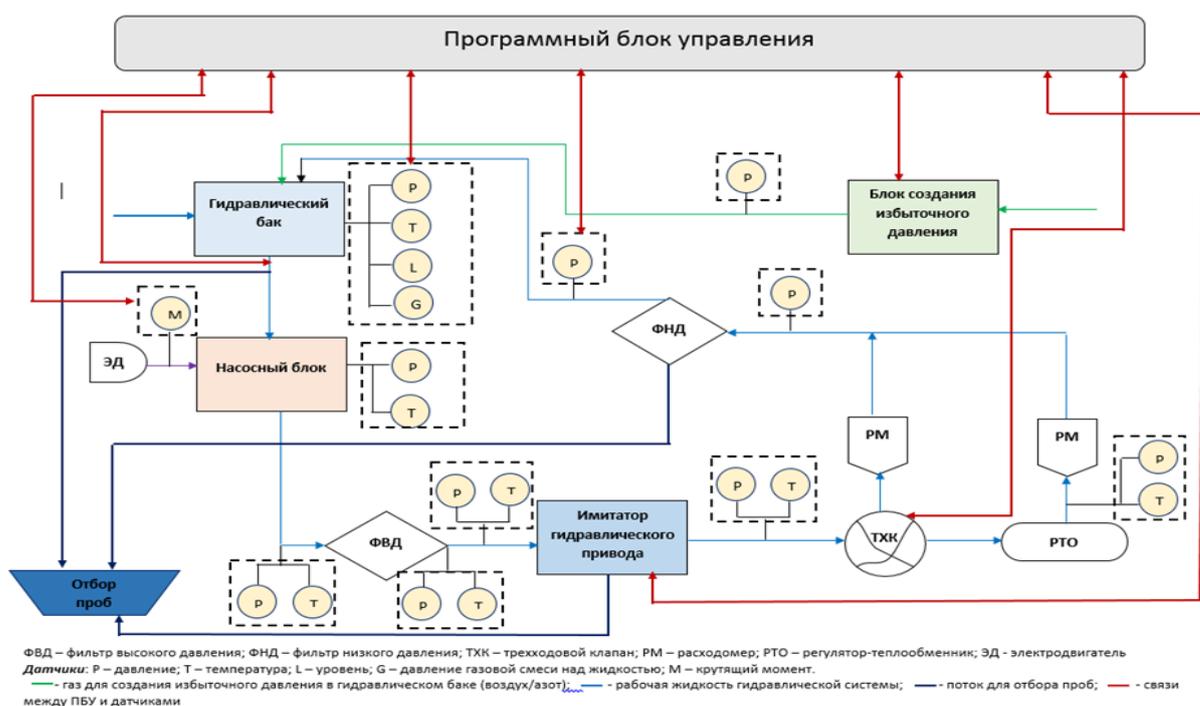


Рисунок 12 – Блок-схема функциональных связей программного блока управления стенда

Основные технические характеристики разработанной ф-модели представлены в таблице 16.

Таблица 16 – Рабочие параметры работы стенда

Наименование показателя	Значение
Диапазон измерения расхода рабочей жидкости, дм <sup>3</sup> /с	от 0,12 до 0,67
Диапазон измерения избыточного давления рабочей жидкости, МПа	от 0 до 45
Рабочая жидкость	ГМ с вязкостью от 13,50 мм <sup>2</sup> /с до 24,20 мм <sup>2</sup> /с по ГОСТ 17479.3
Давление газа в баке над рабочей жидкостью, МПа, более	от 1,5 до 1,7
Среда в баке над рабочей жидкостью при температуре до 125 °С	сжатый воздух
Среда в баке над рабочей жидкостью при температуре более 125 °С	азот, ГОСТ 9293-74
Диапазон температуры в системе гидравлической блока, °С	от 20 до 250
Диапазон регулирования частоты вращения электрического двигателя, мин <sup>-1</sup>	от 500 до 5500
Шаг регулирования частоты вращения электрического двигателя, мин <sup>-1</sup>	100
Питающее напряжение стенда, В/Гц	380/50
Максимальная потребляемая мощность стенда, кВт	50
Тонкость фильтрации рабочей жидкости, мкм	от 5 до 25

### **2.3.2 Обоснование режимов испытания масел на стенде и разработка метода прогнозирования срока применения гидравлических масел до замены в гидравлической системе авиационной техники**

При разработке метода оценки стабильности свойств ГМ исходили из того, что значения физико-химических показателей ГМ в процессе эксплуатации ГС

существенно изменяются и, в конечном итоге, могут выходить за пределы норм согласно эксплуатационной документации. Установление зависимости изменения значений этих показателей качества ГМ, наиболее склонных к изменению под воздействием температуры и давления, от времени работы модельной установки и определения по полученным зависимостям ресурсоспособности ГМ, позволит с достаточной степенью достоверности оценить срок смены масла при его эксплуатации до замены в ГС самолета.

Показателями, характеризующими термоокислительную и механо-химическую стабильность ГМ при эксплуатации, являются кислотное число, кинематическая вязкость и массовая доля механических примесей. Согласно эксплуатационной документации, масло АМГ-10 пригодно для работы в ГС самолета Ил-76, если значения его кинематической вязкости при 50 °С выше 7 мм<sup>2</sup>/с, кислотного числа – не более 0,15 мг КОН/1 г масла.

По проведенному анализу физико-химических свойств ГМ для ГС показателями качества, наиболее склонными к изменению в процессе эксплуатации и характеризующими его пригодность при дальнейшем использовании, приняты кинематическая вязкость при 50 °С и кислотное число. Установлено, что при эксплуатации масла АМГ-10 в ГС самолетов предельное значение по кислотному числу наступает позже, чем снижение вязкости до критических 7,00 мм<sup>2</sup>/с. Массовая доля механических примесей масла АМГ-10 при эксплуатации на стенде не определяется в связи с отсутствием образования механических примесей при работе ф-модели.

Ресурс работы масла АМГ-10 и, следовательно, срок его применения до замены в ГС, определяется в большинстве случаев по кинематической вязкости при 50 °С. Данному правилу придерживаются при техническом обслуживании транспортных самолетов Ил-76, за исключением определения массовой доли механических примесей по ГОСТ 10577 при плановой проверке ГС.

На основании рассчитанных критериев подобия, установлены основные параметры для исследований на ф-модели:

1) объем ГМ в баке составляет 20 дм<sup>3</sup>. Это достаточно для заполнения всех элементов системы с условием поддержания достаточного уровня жидкости в баке;

2) температура ГМ от 60 до 120 °С, где 60 °С – средняя температура масла в режиме полета, 120 °С – максимально допустимая температура ГМ при эксплуатации самолета Ил-76;

3) рабочее давление от 16 до 21 МПа, где 16 МПа – минимально допустимое рабочее давление, 21 МПа – требуемое давление в ГС при эксплуатации самолета Ил-76;

Требуемый режим испытания на установке достигается при определенных значениях частоты вращения вала насоса и температуры охлаждающей воды, устанавливаемых опытным путем при выходе стенда на режим.

Предложен метод прогнозирования срока применения ГМ до замены в ГС АТ [122], 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 прогнозного допустимого срока эксплуатации масла в ГС, при котором кинематическая вязкость при 50 °С достигает критического значения, равного 7,00 мм<sup>2</sup>/с.

Метод заключается в проведении следующих последовательных операций:

1. Испытание ГМ на стенде в режиме максимальной нагрузки (P=21 МПа и T=60 °С) с отбором проб масла каждые 5 ч в количестве, необходимом для определения выбранных показателей качества (кинематическая вязкость при 50 °С по ГОСТ 33 и кислотное число по ГОСТ 5985). Испытания завершаются при достижении значений кинематической вязкости при 50 °С 7,00 мм<sup>2</sup>/с и менее.

2. Построение графической зависимости кинематической вязкости при 50 °С от времени испытаний ГМ на стенде.

3. Определение прогнозного срока применения исследуемого образца ГМ в ГС самолета до замены по корреляционной зависимости.

По результатам проведения испытаний на стенде масла АМГ-10 при давлении  $P=21$  МПа и температуре  $T=60$  °С (Таблица 17)

Таблица 17 – Значения кинематической вязкости при 50 °С и кислотного числа для масла АМГ-10 при испытании на стенде в режиме  $P=21$  МПа и  $T=60$  °С

№ п/п	Время работы стенда, ч	Кинематическая вязкость при 50 °С, мм <sup>2</sup> /с	Кислотное число, мг КОН/г масла
1	0	10,32	0,01
2	5	8,073	0,01
3	10	7,382	0,01
4	15	7,001	0,02
5	20	6,749	0,01
6	25	6,558	0,02
7	30	6,411	0,02
8	35	6,291	0,02

Для сравнения результатов отобраны образцы масла АМГ-10 из ГС Ил-76<sup>3</sup> и определены их физико-химические показатели (таблицы 18-19).

Таблица 18 – Физико-химические показатели масла АМГ-10 при его работе в ГС самолета Ил-76 в/ч 3694 ФСВНГ РФ (Росгвардия)

Место отбора пробы	Наработка масла, ч	Кинематическая вязкость при 50 °С, мм <sup>2</sup> /с	Кислотное число, мг КОН / 1 г
Самолет №1, ГС №1	16	10,16	0,01
Самолет №1, ГС №2	16	10,16	0,01

<sup>3</sup> Самолеты Ил-76 обслуживаются на аэродроме, принадлежащему войскам Федеральной службы войск национальной гвардии, и на авиационно-технической базе ФГБУ «АСК МЧС России»

## Продолжение таблицы 18

Самолет №2, ГС №1	266	10,16	0,01
Самолет №2, ГС №2	266	10,14	0,01
Самолет №3, ГС №1	1197	7,104	0,03
Самолет №3, ГС №2	1197	7,104	0,03

Таблица 19 – Физико-химические показатели масла АМГ-10 при его работе в ГС самолета Ил-76 ФГБУ «АСК МЧС России»

Место отбора пробы	Время работы двигателя, ч	Количество посадок	Кинематическая вязкость при 50 °С, мм <sup>2</sup> /с	Кислотное число, мг КОН / 1 г
Самолет №1, ГС №1	9228	2941	7,606	0,04
Самолет №1, ГС №2			7,657	0,04
Самолет №2, ГС №1	6192	2033	7,046	0,04
Самолет №2, ГС №2			7,106	0,03
Самолет №3, ГС №1	5902	2089	7,346	0,04
Самолет №3, ГС №2			7,431	0,05
Самолет №4, ГС №1	5325	2018	7,275	0,06
Самолет №4, ГС №2			7,309	0,06

На рисунке 13 представлена корреляционная зависимость между сроком эксплуатации ГМ в ГС Ил-76 и продолжительностью испытаний масла АМГ-10 в стенде при значениях давления 21 МПа и температуре 60 °С, отражающая изменение кинематической вязкости при 50 °С масла АМГ-10 при его эксплуатации и при испытаниях на стенде в режиме критичной для стабильности ГМ нагрузки и позволяющая прогнозировать срок смены ГМ при его работе в ГС самолета Ил-76, учитывая основные параметры работы гидросистемы.

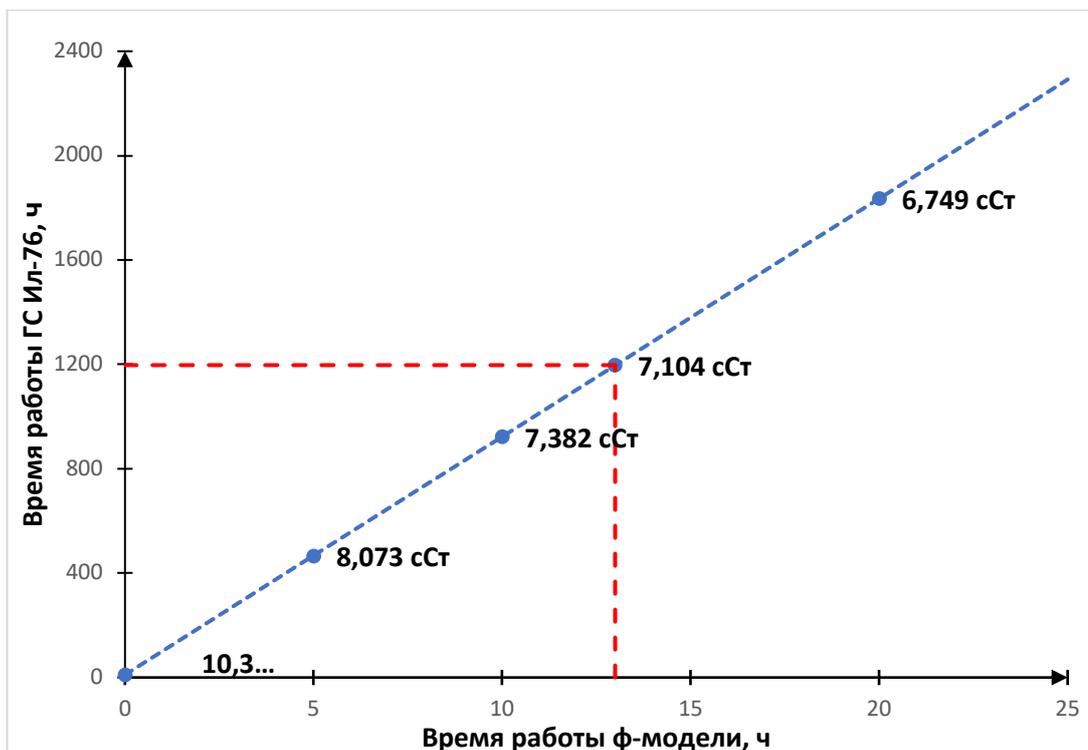


Рисунок 13 – Корреляционная зависимость между сроком эксплуатации масла в гидросистеме Ил-76 и продолжительностью испытания на стенде

По зависимости кинематической вязкости при 50 °С от продолжительности испытаний до предельного значения, равного 7,00 мм<sup>2</sup>/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:

$$\tau_{\text{самолет}} = 91,75 \cdot \tau_{\text{исп}} \quad (29)$$

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

$\tau_{\text{исп}}$  – время работы масла АМГ-10 на стенде.

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

$$\tau_{\text{самолет}} = f_{\text{корр}}(\tau_{\text{исп}}), \text{ где } \tau_{\text{исп}} = \lim_{v_{50} \rightarrow 7,00} F_v(T_{\text{min}}, P_{\text{max}}) \quad (30)$$

где  $T_{\min}$  – рабочая температура в режиме критичной для стабильности ГМ нагрузки, 60 °С;

$P_{\max}$  – рабочее давление в режиме критичной для стабильности ГМ нагрузки, 21 МПа;

$\tau_{\text{исп}}$  – время испытаний на стенде, ч, при котором  $v \leq 7 \text{ мм}^2/\text{с}$ .

$\tau_{\text{самолет}}$  – время работы масла в ГС самолета Ил-76, ч.

## Выводы по Главе 2

1. В качестве объектов исследования для разработки метода прогнозирования срока применения ГМ до замены в ГС АТ и исследования стабильности состава и свойств ГМ выбраны:

- образцы масла АМГ-10 по ГОСТ 6794-2017 производства ООО «Полиэфир», ООО «ЛЛК-Интернешнл» и АО «НПЦ Спецнефтьпродукт», в составе которых содержатся различные загущающие присадки – Viscoplex 7-610, Максойл ВЗ-013 и IRGAFLO 6000 V соответственно.

- базовые масла (ПАОМ, изопарафиновые масла HVI-2 и VHVI-4, ДОТФ, ДБС) и загущающие присадки - полиметакрилатные Viscoplex 7-610 и Максойл ВЗ-011, на основе поливинил-н-бутилового эфира – Синтолукс В-20.

2. Для исследований и испытаний использованы методы определения физико-химических показателей по ГОСТ 6794-2017.

Для исследования изменений структурно-группового состава масла АМГ-10 при его эксплуатации выбраны физические методы исследования: ИК-спектроскопия, ГПХ и термический анализ.

3. На основе информационного, морфологического и функционального описания химмотологического процесса деградации свойств ГМ при применении в ГС самолета Ил-76 обоснованы условия приближенного подобия протекания ХП, заключающиеся в равенстве критериев гидродинамического

подобия, температуры ( $T$ ), давления ( $P$ ), плотности ( $\rho$ ) и вязкости ГМ ( $\nu$ ) в ГС и ф-модели. С помощью полученных критериев подобия и условий однозначности определены требования к конструктивным особенностям ф-модели – объем ГМ, диаметр трубопроводов, расход масла. Установлен диапазон значений давления и температуры испытаний как основных факторов, определяющих условия протекания ХП в ГС. В качестве ф-модели использован стенд.

4. 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.

5. Определены условия проведения испытаний для исследования стабильности свойств ГМ: объем ГМ в баке составляет 20 дм<sup>3</sup>; температура ГМ от 60 до 120 °С; рабочее давление от 16 до 21 МПа.

Разработан метод прогнозирования срока применения масла в ГС АТ, сущность которого заключается в установлении времени эксплуатации ГМ в ГС до замены с помощью 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 ( $P=21$  МПа,  $T=60$  °С).

### ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ И ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ МАСЕЛ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СРОКА ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКЕ ДО ЗАМЕНЫ

#### 3.1 Исследование физико-химических свойств базовых масел с загущающими присадками и их стабильности после озвучивания на ультразвуковой установке

С целью исследования стабильности свойств ГМ для АТ приготовлены образцы базового ГМ, представляющие собой основу, загущенную 10 % вязкостной присадки. Для основ при разработке перспективного ГМ выбраны масло ПАОМ-2, изопарафиновые масла HVI-2 и VHVI-4, ДБС, ДОТФ. В качестве вязкостных присадок определены полиметакрилатные присадки Максойл ВЗ-011 и Viscoplex 7-610, а также присадка Синтолюкс В-20.

Полученные образцы представлены на рисунке 14.

<b>Масло ПАОМ-2</b>	+ Viscoplex 7-610	Образец №1
	+ Максойл ВЗ-011	Образец №2
	+ Синтолюкс В-20	Образец №3
<b>Масло HVI-2</b>	+ Viscoplex 7-610	Образец №4
	+ Максойл ВЗ-011	Образец №5
	+ Синтолюкс В-20	Образец №6
<b>Масло VHVI-4</b>	+ Viscoplex 7-610	Образец №7
	+ Максойл ВЗ-011	Образец №8
	+ Синтолюкс В-20	Образец №9
<b>ДБС</b>	+ Viscoplex 7-610	Образец №10
	+ Максойл ВЗ-011	Образец №11
	+ Синтолюкс В-20	Образец №12
<b>ДОТФ</b>	+ Viscoplex 7-610	Образец №13
	+ Максойл ВЗ-011	Образец №14
	+ Синтолюкс В-20	Образец №15

Рисунок 14 – Состав образцов базового ГМ

Физико-химические показатели качества разработанных образцов представлены в таблице 20.

Таблица 20 – Физико-химические показатели основ и образцов базового гидравлического масла

Образец	Кинематическая вязкость, мм <sup>2</sup> /с		Плотность при 20 °С, кг/м <sup>3</sup>	Показатель преломления, n <sub>d</sub> <sup>20</sup>	Температура застывания, °С	Стабильность вязкости после озвучивания на УЗДН в течение 30 мин, %
	40 °С, мм <sup>2</sup> /с	100 °С				
Масло ПАОМ-2	5,534	2,040	790,9	1,442	-70	X
Масло НVI-2	10,33	2,733	822,4	1,456	-37	X
Масло VHVI-4	23,53	4,463	826,7	1,461	-19	X
ДБС	5,256	1,820	937,2	1,442	-70	X
ДОТФ	30,03	4,781	981,3	1,489	-34	X
Образцы основ с добавлением 10 % вязкостных присадок						
1. Основа – масло ПАОМ-2						
Масло ПАОМ-2 + 10 % Синтолюкс В-20	29,02	8,413	805,8	1,445	-55	22,0
Масло ПАОМ-2 + 10 % Viscoplex 7-610	14,48	5,250	805,5	1,446	-64	23,6
Масло ПАОМ-2 + 10 % Максойл В3-011	15,08	4,955	804,4	1,447	-72	20,7

## Продолжение таблицы 20

2. Основа – масло HVI-2						
HVI-2 + 10 % Синтолюкс В-20	44,78	11,20	829,9	1,456	-34	23,5
HVI-2 + 10 % Viscoplex 7-610	26,22	11,45	826,4	1,457	-49	26,4
HVI-2 + 10 % Максойл В3-011	26,25	9,203	828,8	1,457	-49	23,7
3. Основа – масло VHVI-4						
VHVI-4 + 10 % Синтолюкс В-20	81,92	16,40	836,4	1,460	-18	22,4
VHVI-4 + 10 % Viscoplex 7-610	43,12	10,53	836,1	1,461	-44	22,4
VHVI-4 + 10 % Максойл В3-011	47,28	10,47	836,8	1,461	-42	21,1
4. Основа – ДОТФ						
ДОТФ + 10 % Синтолюкс В-20	159,2	18,30	977,0	1,487	-33	35,8
ДОТФ + 10 % Viscoplex 7-610	91,57	15,00	975,9	1,488	-48	27,4
ДОТФ+ 10 % Максойл В3-011	88,86	13,96	976,7	1,488	-48	24,3
5. Основа – ДБС						
ДБС + 10 % Синтолюкс В-20	33,78	9,616	937,0	1,443	-71	27,8
ДБС + 10 % Viscoplex 7-610	17,72	6,094	937,2	1,442	-49	27,5
ДБС + 10 % Максойл В3-011	16,05	5,397	937,8	1,444	-70	23,8

Установлено, что полиметакрилатные присадки Максойл В3-011 и Viscoplex 7-610 обладают одинаковой загущающей способностью для выбранных основ; загущающая способность присадки Синтолюкс В-20 в среднем на 17% выше (Рисунок 15).

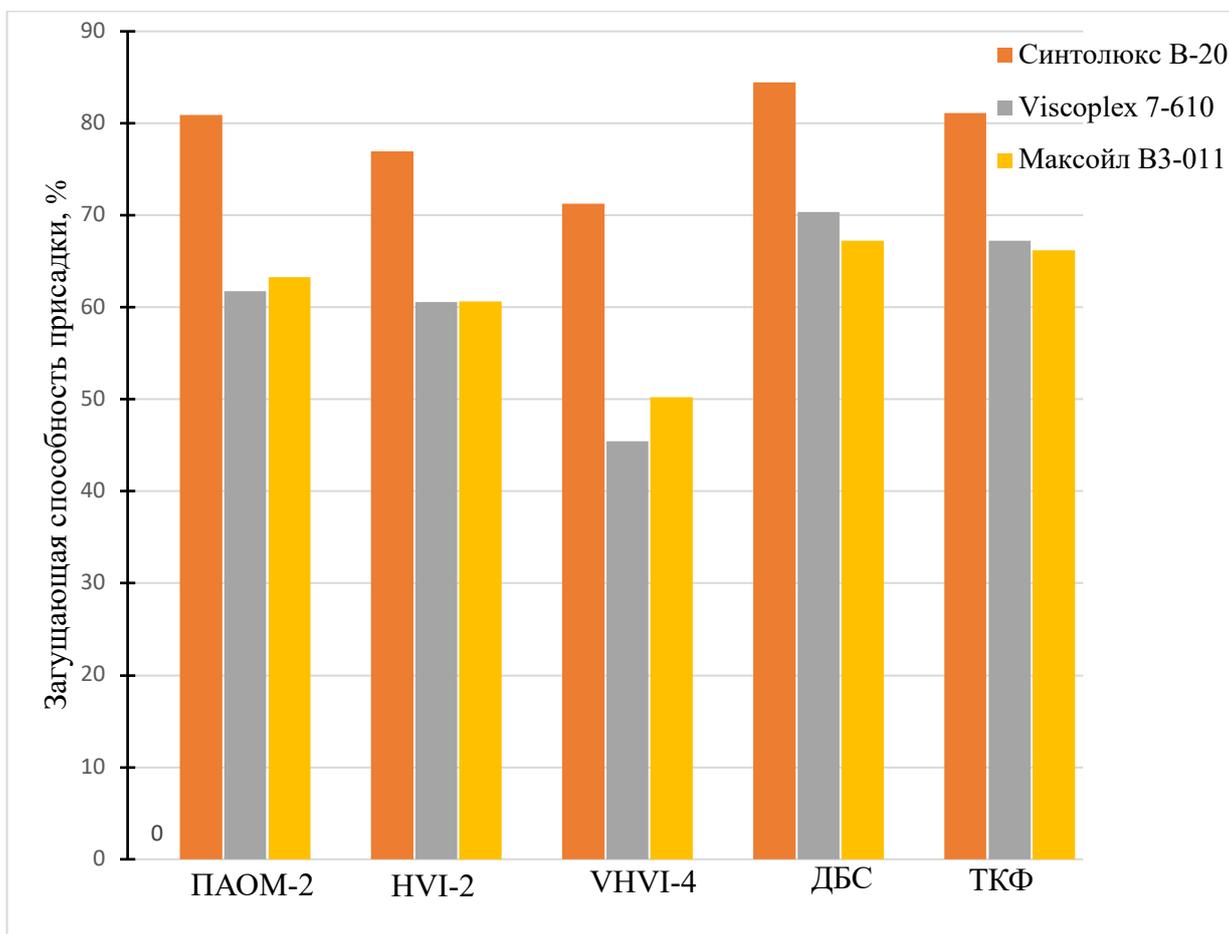


Рисунок 15 – Результаты исследования загущающей способности вязкостных присадок марок Синтолюкс В-20, Viscoplex 7-610 и Максойл В3-011 в смеси с различными основами

Температуры застывания исследуемых образцов свидетельствуют о том, что полиметакрилатные присадки Viscoplex 7-610 и Максойл В3-011 в смеси с различными основами проявляют депрессорные свойства: температура застывания смесей в 1,5-2 раза ниже по сравнению с чистыми основами. При этом присадка Синтолюкс В-20 напротив повышает температуру застывания, ухудшая низкотемпературные показатели ГМ (Рисунок 16).

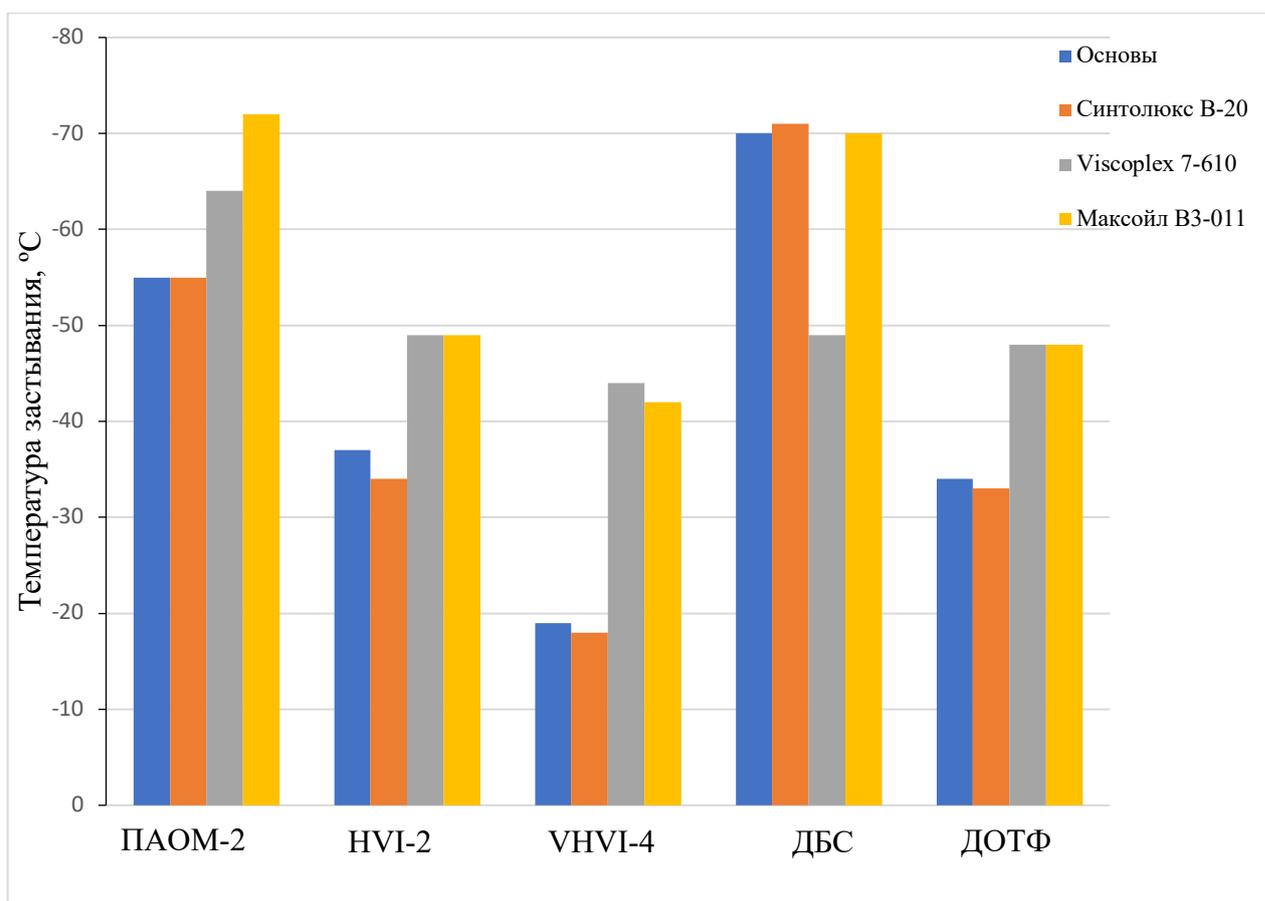


Рисунок 16 – Результаты исследования низкотемпературных свойств (температуры застывания) образцов различных основ с вязкостными присадками марок Синтолюкс В-20, Viscoplex 7-610 и Максойл В3-011

Стабильность вязкости загущающих присадок исследована на установке УЗДН согласно п. 5.7 ГОСТ 6794-2017. В результате установлено, что полиметакрилатная присадка Максойл В3-011 устойчивее к термомеханической деструкции по сравнению с Viscoplex 7-610 и Синтолюкс В-20 в составе основ различной химической структуры. Максимальная деструкция загущающих присадок наблюдается в ДОТФ: строение молекулы ДОТФ и высокое значение кинематической вязкости данной основы приводят к более быстрому разрыву углеводорода при воздействии ультразвука по сравнению с основами другой химической природы. Результаты исследований представлены на рисунке 17.

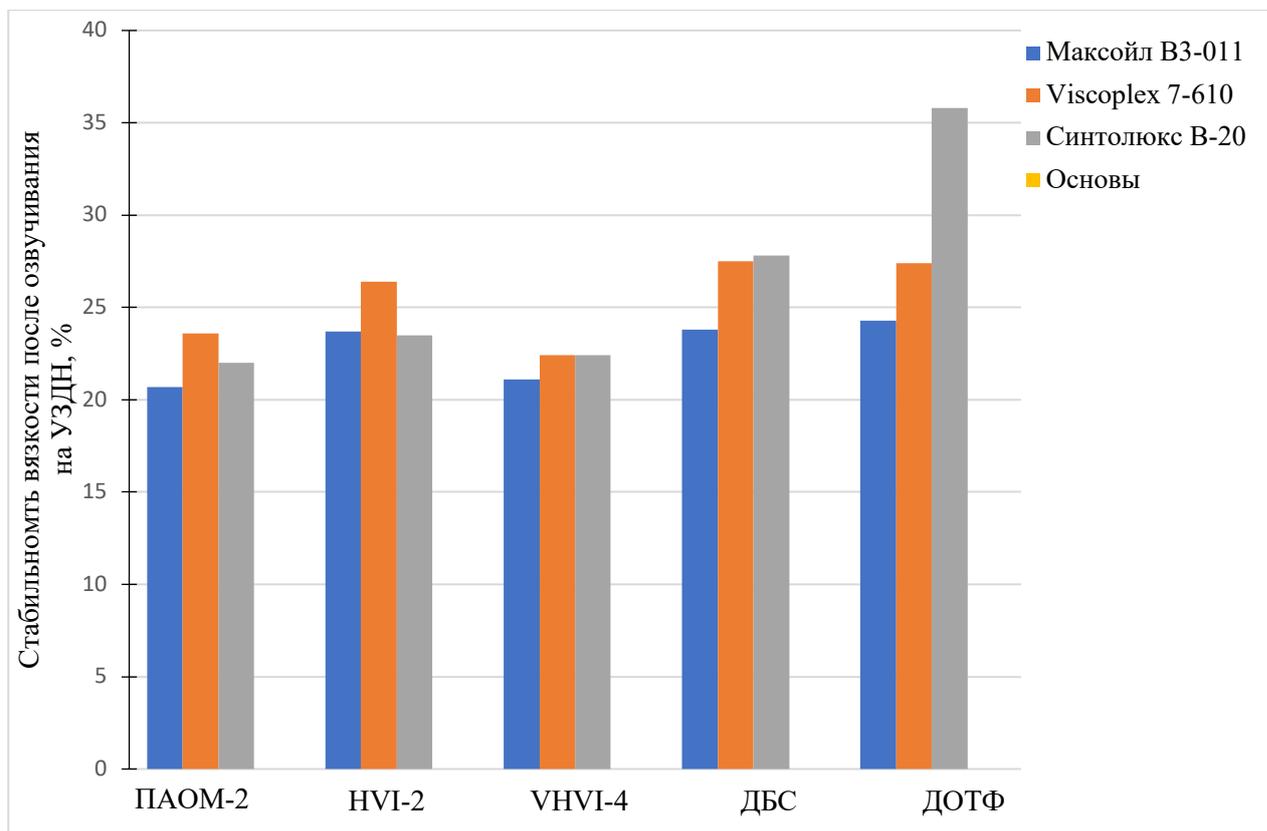


Рисунок 17 – Результаты исследования стабильности вязкости после озвучивания на УЗДН образцов различных основ с вязкостными присадками марок Синтолюкс В-20, Viscoplex 7-610 и Максойл В3-011

На основе проведенных исследований установлено:

- присадка Синтолюкс В-20 обладает большей загущающей способностью чем полиметакрилатные присадки Максойл В3-011 и Viscoplex 7-610;
- максимальное снижение температуры застывания выявлено в образцах с базовыми изопарафиновыми маслами VHVI-4 и HVI-2, загущенными полиметакрилатными присадками Максойл В3-011 и Viscoplex 7-610;
- минимальное снижение вязкости после озвучивания на УЗДН в образцах с основами ПАОМ-2 и маслом изопарафиновым VHVI-4, загущенных присадкой Максойл В3-011.

### ***Исследование загущающих полиметакрилатных присадок на ультразвуковой установке УЗДН***

С целью исследования стабильности к механической деструкции загущающих присадок Максойл В3-011 и Viscoplex 7-610 в составе основ ГМ

различной химической природы, приготовлены и исследованы образцы основ масла АМГ-10 (Таблица 21) с указанными загустителями (Таблица 21) и исследованы по п.5.7 ГОСТ 6794-2017 на стабильность вязкости после озвучивания на ультразвуковой установке УЗДН.

Таблица 21 – Кинематическая вязкость основ масла АМГ-10

Наименование образца	Компонентный состав	Кинематическая вязкость при 50 °С, мм <sup>2</sup> /с
Основа № 1	Нафтенное масло Nynas NS 3 – 75 %	2,677
	Масло базовое SPECTRASYN 2 – 25 %	
Основа № 2	Насыщенные парафино- нафтенные УВ – 98,6 %	2,284
	Ароматические УВ – 1,34 %	
	Смолы – 0,06 %	

Таблица 22 – Образцы основ масла АМГ-10 с вязкостными присадками Максойл В3-011 и Viscoplex 7-610

Наименование образца	Наименование компонента	НД используемого сырья	Количество, % масс.
Образец № 1	Основа № 1	Спецификация NS-3 NYNAS	66,4
		SPECTRASYN 2 Mobil Chemical Products Intl Inc.	22,1
	Максойл В3-011	ТУ 0257-006-48328553-2014	11,5
Образец № 2	Основа № 1	Спецификация NS-3 NYNAS	65,9
		SPECTRASYN 2 Mobil Chemical Products Intl Inc.	21,9
	Viscoplex 7-610	Спецификация Viscoplex 7-610 фирмы Evonik Oil Additives GMBH	12,2

## Продолжение таблицы 22

Образец № 3	Основа № 2	ТУ 38.301-29-21-92	87
	Максойл ВЗ-011	ТУ 0257-006-48328553-2014	13
Образец № 4	Основа № 2	ТУ 38.301-29-21-92	86,2
	Viscoplex 7-610	Спецификация Viscoplex 7-610 фирмы Evonik Oil Additives GMBH	13,8

Результаты исследования образцов основ масла АМГ-10 с полимерными загустителями Максойл ВЗ-011 и Viscoplex 7-610 представлены в таблице 23.

Таблица 23 – Исследование основ масла АМГ-10 с вязкостными присадками Максойл ВЗ-011 и Viscoplex 7-610 на стабильность вязкости

Наименование образца	Кинематическая вязкость при 50 °С до озвучивания на УЗДН, мм <sup>2</sup> /с	Кинематическая вязкость при 50 °С после озвучивания на УЗДН, мм <sup>2</sup> /с	Стабильность вязкости после озвучивания на УЗДН в течение 50 мин., %
Образец № 1	10,25	7,186	29,9
Образец № 2	10,33	6,562	36,5
Образец № 3	10,12	7,086	30,0
Образец № 4	10,47	6,536	37,6

В результате лабораторных исследований установлено, что на стабильность вязкости масла АМГ-10 влияет природа полимерного загустителя: полиметакрилатная присадка Максойл ВЗ-011 устойчивее к деструкции на 7 % по сравнению с Viscoplex 7-610 в составе обеих основ, используемых при отечественном производстве в составе масла АМГ-10 (Рисунок 18). При этом основа ГМ АМГ-10, в составе которой применяют как нефтяные продукты (нафтеновое масло), так и синтетического происхождения (ПАОМ-2), не оказывает влияния на его вязкость.

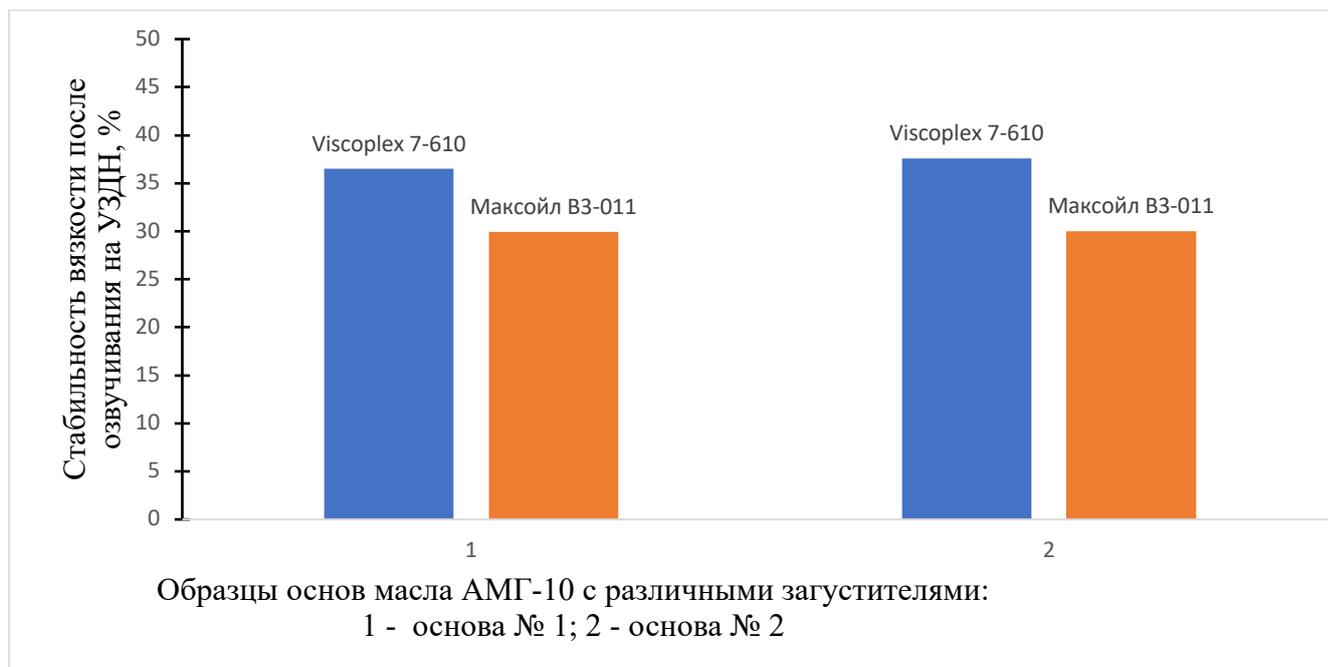


Рисунок 18 – Стабильность вязкости после озвучивания на УЗДН различных основ масла АМГ-10 с присадками Максойл В3-011 и Viscoplex 7-610

### *Исследование загущающих полиметакрилатных присадок методом гель-проникающей хроматографии*

Для определения стабильности к деструкции полимерных загустителей, входящих в состав масла АМГ-10, проведены исследования вязкостных полиметакрилатных присадок Viscoplex 7-610, IRGAFLO 6000 V и Максойл В3-011 методом ГПХ (Таблица 24).

Таблица 24 – Молекулярно-массовые характеристики загущающих присадок Viscoplex 7-610, IRGAFLO 6000 V и Максойл В3-011

Название присадки	Средне- весовая ММ, $M_w$ , г/моль	Средне- вязкостная ММ, $M_v$ , г/моль	$\frac{M_v - M_w}{M_v}$	Степень поли- дисперности, PD	Степень деструкции полимера после 35 ч испытаний в стенде, %
Viscoplex 7-610	140093	253382	0,447	3,14	39,9
IRGAFLO 6000 V	154386	289420	0,467	3,04	38,3
Максойл В3-011	101505	193437	0,475	2,47	34,4

Результаты исследований, представленные в таблице 24, подтверждают, что присадка Максойл В3-011 с более узким ММР по сравнению с Viscoplex 7-610 и IRGAFLO 6000 V, имеет большую стойкость к термомеханической деструкции.

***Исследование термической стабильности заугущающих полиметакрилатных присадок***

Полиметакрилатные присадки, применяемые в составе масла АМГ-10 при его производстве, проанализированы на приборе синхронного термического анализа STA 449 F3 Jupiter методом оценки термической стабильности по СТО 08151164-0209-2016.

В динамическом режиме нагрева от 25 до 800 °С со скоростью 5 град/мин в воздушной среде получены следующие результаты испытаний (Таблица 25):

Таблица 25 – Результаты испытаний оценки термической стабильности полиметакрилатных присадок

№	Наименование показателя	Наименование присадки		
		Viscoplex 7-610	Максойл В3-011	IRGAFLO 6000 V
1	Температура начала реакции, °С	208,05	212,91	251,52
2	Температура 10 % потери массы, °С	152,44	207,36	236,81
3	Температура 50 % потери массы, °С	259,64	259,64	325,35
4	Максимальная потеря массы образца, %	100,00	100,00	100,00
5	Температура первого максимума, °С	313,77	314,56	399,44
6	Температура окончания тепловых эффектов, °С	544,51	544,22	597,05

Экзотермические эффекты вследствие начала окисления наблюдаются в одинаковых диапазонах температур для образцов с небольшой разницей в значении площади термических эффектов 3047 мкВтс/мг для Viscoplex 7-610, 4092 мкВтс/мг для Максойл В3-011 и 5770 мкВтс/мг для IRGAFLO 6000 V, что характеризует

увеличение термической стабильности исследуемых присадок в ряду Viscoplex 7-610 – Максойл В3-011 – IRGAFLO 6000 V.

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.

### **3.2 Исследование деградации свойств и изменения состава гидравлических масел в модельных условиях эксплуатации и прогнозирование сроков их применения до замены**

#### **3.2.1 Прогнозирование сроков применения гидравлических масел в гидравлической системе авиационной техники до замены**

В составе масла АМГ-10 отечественного производства в качестве загущающих присадок используют полиметакрилатные присадки: Максойл В3-011, Viscoplex 7–610 и IRGAFLO 6000 V. Концентрация присадки в ГМ составляет 12-15 % мас., при этом концентрация основного компонента (полиметакрилата) в присадке составляет 55 % [129].

С помощью разработанного метода получены количественные зависимости изменения кинематической вязкости при 50 °С от продолжительности испытаний на стенде при значениях давления и температуры (P=21 МПа, T=60 °С), соответствующих критичной для стабильности ГМ нагрузки. Установлено, что кинематическая вязкость при 50 °С для АМГ-10 снизилась до 7,00 мм<sup>2</sup>/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 продолжительности испытаний на

стенде; для масла АСГИМ кинематическая вязкость при 50 °С снизилась до 7,00 мм<sup>2</sup>/с после 48 ч его эксплуатации на стенде (рисунок 19). Результаты свидетельствуют о повышенной устойчивости к деструкции полиметакрилатной присадки Максойл ВЗ-011 в составе масла АМГ-10 по сравнению с Viscoplex 7-610 и IRGAFLO 6000 V. При этом масло синтетическое АСГИМ обладает наибольшим ресурсом работы в ГС по сравнению с маслом АМГ-10. Это связано с тем, что в качестве загущающего компонента в составе масла АСГИМ применяют реологический концентрат NYCOPERF RA 655, который включает смесь маловязких моноэфиров C<sub>5</sub>-C<sub>10</sub>-карбоновых кислот и C<sub>8</sub>-C<sub>13</sub>-спиртов, стабилизированных полиметакрилатом, причем концентрация ПМА менее 10 %. В основе масла АСГИМ 60-65 % ПАОМ-2, что также обеспечивает маслу АСГИМ повышенную стойкость к деструкции по сравнению с маслом АМГ-10.

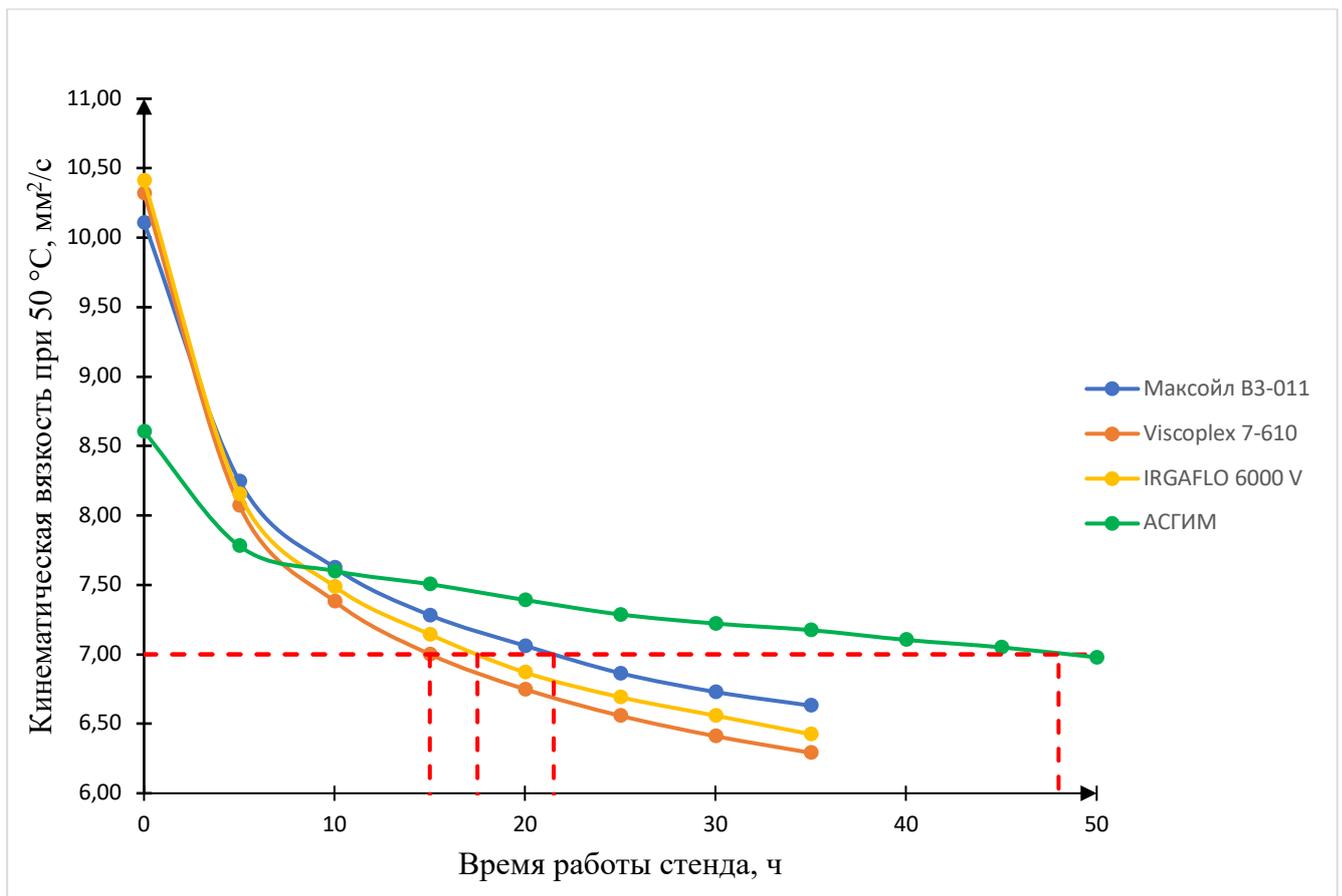


Рисунок 19 – Зависимости изменения кинематической вязкости при 50 °С масла АМГ-10 с различными загустителями и масла АСГИМ при испытании на стенде в условиях T=60 °С и P=21 МПа

Установлены прогнозные сроки<sup>4</sup> применения масла АМГ-10 в ГС самолета Ил-76 до его замены с различными полиметакрилатными присадками: с Максойл ВЗ-011 –  $1973 \pm 52$  ч, с IRGAFLO 6000 V –  $1606 \pm 42$  ч, с Viscoplex 7-610 –  $1376 \pm 36$  ч; масла АСГИМ –  $4404 \pm 116$  ч.

На рисунке 20 представлены зависимости скорости изменения кинематической вязкости при 50 °С масла АМГ-10 с разными загущающими присадками от времени испытаний на стенде в режиме  $T_u = 60$  °С,  $P_u = 21$  МПа.

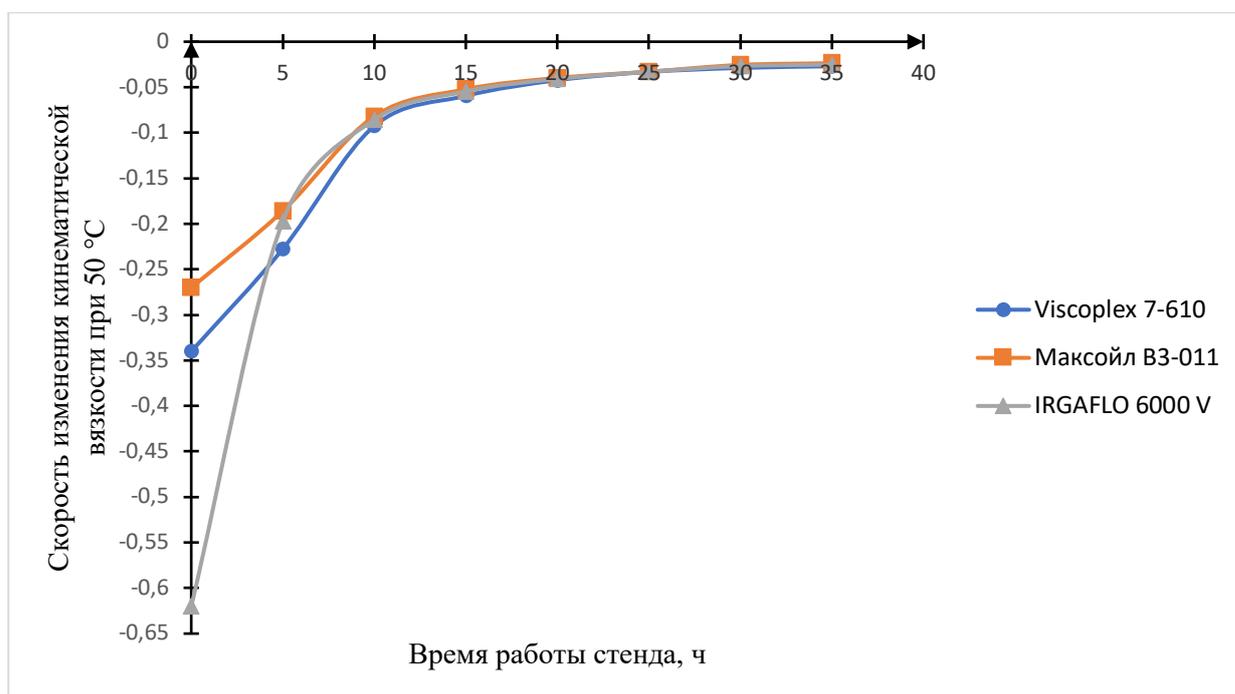


Рисунок 20 – Скорости изменения кинематической вязкости при 50 °С масла АМГ-10 с различными загустителями при испытании в ф-модели в условиях  $T=60$  °С и  $P=21$  МПа

Представленная графическая зависимость подтверждает, что минимальной скоростью деструкции обладает вязкостная присадка Максойл ВЗ-011. Скорость изменения кинематической вязкости при 50 °С у ГМ с загущающими присадками равна: для Максойл ВЗ-011 –  $0,0046$  ( $\text{мм}^2/\text{с}$ )/ч, для Viscoplex 7-610 –  $0,0081$  ( $\text{мм}^2/\text{с}$ )/ч, для IRGAFLO 6000 V –  $0,0124$  ( $\text{мм}^2/\text{с}$ )/ч.

<sup>4</sup> 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

В таблице 26 представлены данные, отражающие время работы и характеристики по деструкции загущающих присадок масла АМГ-10 с различными загустителями в ф-модели (при  $T=120$  °С и  $P=21$  МПа) и ГС самолета Ил-76.

Таблица 26 – Характеристики масла АМГ-10 и его компонентов при работе в гидросистеме самолета Ил-76 и ф-модели

Наименование показателя	Значения				
	0	5	20	40	45
Время работы масла в стенде, ч	0	5	20	40	45
Время работы масла в ГС Ил-76, ч	0	217	867	1735	1950
Степень деструкции полимерного загустителя, %					
Присадка Максойл В3-011, %	0	13,4	21,1	30,1	32,5
Присадка IRGAFLO 6000 V, %	0	16,6	27,6	32,7	33,6
Присадка Viscoplex 7-610, %	0	19,5	29,7	41,5	44,9
Кинематическая вязкость при 50 °С масла АМГ-10 с присадкой:					
Максойл В3-011	10,11	8,759	7,729	7,164	7,086
Viscoplex 7-610	10,30	8,288	7,032	6,465	-
IRGAFLO 6000 V	10,41	8,681	7,538	7,005	6,914

### 3.2.2 Исследование зависимостей и закономерностей деградации свойств гидравлических масел в модельных условиях эксплуатации

Для исследования стабильности свойств масла АМГ-10 выбран план эксперимента, основанный на описании ХП с помощью нелинейных функций. Наиболее целесообразным и часто встречающимися в химмотологии являются D-оптимальные планы второго порядка.

Для построения моделей ХП по результатам на стенде выбран план Бокса-Бенкена. D-оптимальный план Бокса-Бенкена с тремя факторами позволяет провести математико-статистическую обработку данных при варьировании трех компонентов на трех уровнях. Функции D-оптимальных планов позволяют подбирать точки матрицы с обеспечением одинаковой точности предсказания

значений функций отклика и независимости от направления исследования. План Бокса-Бенкена используют для получения полинома второго порядка при непоследовательном планировании [123-125], что уменьшает ошибки эксперимента, сокращает количество опытов и имеет оптимальные свойства.

Исследование изменения стабильности свойств масла АМГ-10 в Ф-модели проведено в условиях работы ГС самолета Ил-76 и на основе рассчитанных критериев подобия. Условия проведения испытаний масла АМГ-10 представлены в таблице 27.

Таблица 27 – Параметры проведения испытаний масла АМГ-10 на стенде

Параметры	Диапазон значений		
Объем пробы, $\text{дм}^3$	20		
Среда в баке над рабочей жидкостью	воздух		
Температура рабочей жидкости, $^{\circ}\text{C } T_u$	60	90	120
Давление, МПа $P_u$	16	18,5	21
Время проведения испытания, ч $\tau_u$	30	35	40

На основании значений факторов для проведения испытаний в Ф-модели определены факторы эксперимента на варьируемых уровнях (Таблица 28).

Таблица 28 – Уровни варьирования и условия кодирования факторов

Факторы	Температура, $T_u, ^{\circ}\text{C}$	Давление, $P_u, \text{МПа}$	Время проведения испытания, $\tau_u, \text{ч}$
Основной уровень «0»	90	18,5	35
Верхний уровень «+1»	120	21	40
Нижний уровень «-1»	60	16	30
Шаг варьирования	30	2,5	5
Кодовые обозначения	$X_1$	$X_2$	$X_3$

План полного факторного эксперимента (далее – ПФЭ)  $3^3$  в натуральных переменных представлен в таблице 29.

Таблица 29 – План полного факторного эксперимента в натуральных переменных

Номер опыта	Факторы		
	$X_1$	$X_2$	$X_3$
1	120	21	40
2	120	21	30
3	120	21	35
4	120	16	40
5	120	16	30
6	120	16	35
7	120	18,5	40
8	120	18,5	30
9	120	18,5	35
10	60	21	40
11	60	21	30
12	60	21	35
13	60	16	40
14	60	16	30
15	60	16	35
16	60	18,5	40
17	60	18,5	30
18	60	18,5	35
19	90	21	40
20	90	21	30
21	90	21	35
22	90	16	40
23	90	16	30
24	90	16	35
25	90	18,5	40
26	90	18,5	30
27	90	18,5	35

С целью упрощения расчетов произведено преобразование уровней факторов к безразмерным кодированным переменным по формуле:

$$x_i = \frac{(x_i^H - x_{oi}^H)}{\Delta x_i^H}, \quad (31)$$

где  $x_i^H$  – значения факторов в натуральных (размерных) переменных;

$x_{oi}^H$  – значения факторов на основном уровне;

$\Delta x_i^H$  – интервал варьирования в натуральных значениях;

$x_i$  – значения кодированных (нормированных) переменных.

Интервал варьирования фактора  $\Delta x_i^H$  для фактора с номером  $i$  служит для перехода от натурального масштаба к безразмерному. Вместе с основным уровнем фактора он задаёт область действия для данного плана:

$$(x_{oi}^H + x_i^H; x_{oi}^H - x_i^H) \quad (32)$$

Рассчитаны значения основных уровней факторов, исходя из плана ПФЭ  $3^3$  в натуральных переменных, представленного в таблице 35. Единицами измерения по кодированным переменным являются интервалы варьирования  $\Delta x_i^H$ .

$$x_{01}^H = \frac{(120+60)}{2} = 90, \quad (33)$$

$$x_{02}^H = \frac{(21+16)}{2} = 18,5, \quad (34)$$

$$x_{03}^H = \frac{(40+30)}{2} = 35, \quad (35)$$

Рассчитаны значения интервалов варьирования:

$$\Delta x_1^H = \frac{(120-60)}{2} = 30, \quad (36)$$

$$\Delta x_2^H = \frac{(21-16)}{2} = 2,5, \quad (37)$$

$$\Delta x_3^H = \frac{(40-30)}{2} = 5. \quad (38)$$

Значения нормированных переменных равны +1 и -1:

$$\Delta x_1^{(+)} = \frac{(120-90)}{30} = +1, \quad (39)$$

$$\Delta x_2^{(-)} = \frac{(60-90)}{30} = -1, \quad (40)$$

$$\Delta x_1^{(+)} = \frac{(21-18,5)}{2,5} = +1, \quad (41)$$

$$\Delta x_2^{(-)} = \frac{(16-18,5)}{2,5} = -1, \quad (42)$$

$$\Delta x_1^{(+)} = \frac{(40-35)}{5} = +1, \quad (43)$$

$$\Delta x_2^{(-)} = \frac{(30-35)}{5} = -1. \quad (44)$$

Условия опытов для кодированных значений факторов можно записать в виде таблицы, называемой матрицей кодирования ПФЭ  $3^3$  (Таблица 30).

Таблица 30 – Матрица планирования полного факторного эксперимента  $3^3$

Значения факторов					
Кодированное	Натуральное	Кодированное	Натуральное	Кодированное	Натуральное
$\Delta x_1$	$x_1$	$\Delta x_2$	$x_2$	$\Delta x_3$	$x_3$
-1	60	-1	16	-1	30
0	90	0	18,5	0	35
+1	120	+1	21	+1	40

После рандомизации плана по ПФЭ  $3^3$  к плану Бокса-Бенкена получаем матрицу эксперимента. Рандомизация опытов представлена в таблице 31.

Таблица 31 – Рандомизация опытов по плану Бокса-Бенкена

№	Нату- ральное	Кодиро- ванное	Нату- ральное	Кодиро- ванное	Нату- ральное	Кодиро- ванное
	$x_1$	$\Delta x_1$	$x_2$	$\Delta x_2$	$x_3$	$\Delta x_3$
1	90	0	21	+1	30	-1
2	90	0	21	+1	40	+1
3	90	0	16	-1	30	-1
4	90	0	16	-1	40	+1
5	120	+1	18,5	0	30	-1
6	120	+1	18,5	0	40	+1
7	60	-1	18,5	0	30	-1
8	60	-1	18,5	0	40	+1
9	120	+1	16	-1	35	0
10	120	+1	21	+1	35	0
11	60	-1	16	-1	35	0
12	60	-1	21	+1	35	0
13	90	0	18,5	0	35	0
14	90	0	18,5	0	35	0
15	90	0	18,5	0	35	0

Согласно выбранному плану эксперимента для образцов масла АМГ-10, отобранных после стендовых испытаний с интервалом 5 ч, определены значения кинематической вязкости при 50 °С [126] и кислотного числа (Таблицы 32-34, Рисунки 21-23). При анализе результатов стендовых испытаний установлено, что определяющим показателем качества является кинематическая вязкость при 50 °С – в процессе испытаний ГМ на стенде вязкость уменьшилась ниже нормы; максимальное значение кислотного числа – не более 0,02 мг КОН/г, что соответствует значениям в пределах сходимости метода определения <sup>5</sup>.

<sup>5</sup> Согласно ГОСТ 5985 при значении кислотного числа до 0,5 мг КОН/г сходимость метода составляет 0,06.

Таблица 32 – Кинематическая вязкость при 50 °С масла АМГ-10 при испытании на стенде в условиях  $T=120\text{ °С}$  и  $P=16, 18,5$  и  $21\text{ МПа}$

№	Время работы стенда, ч	Кинематическая вязкость при 50 °С, мм <sup>2</sup> /с		
		$T=120\text{ °С}, P=16\text{ МПа}$	$T=120\text{ °С}, P=18,5\text{ МПа}$	$T=120\text{ °С}, P=21\text{ МПа}$
1	0	10,28	10,33	10,17
2	5	8,847	8,684	8,469
3	10	8,288	8,101	7,894
4	15	7,964	7,728	7,543
5	20	7,742	7,515	7,299
6	25	7,559	7,307	7,120
7	30	7,431	7,169	6,967
8	35	7,260	7,048	6,832
9	40	–	6,939	–

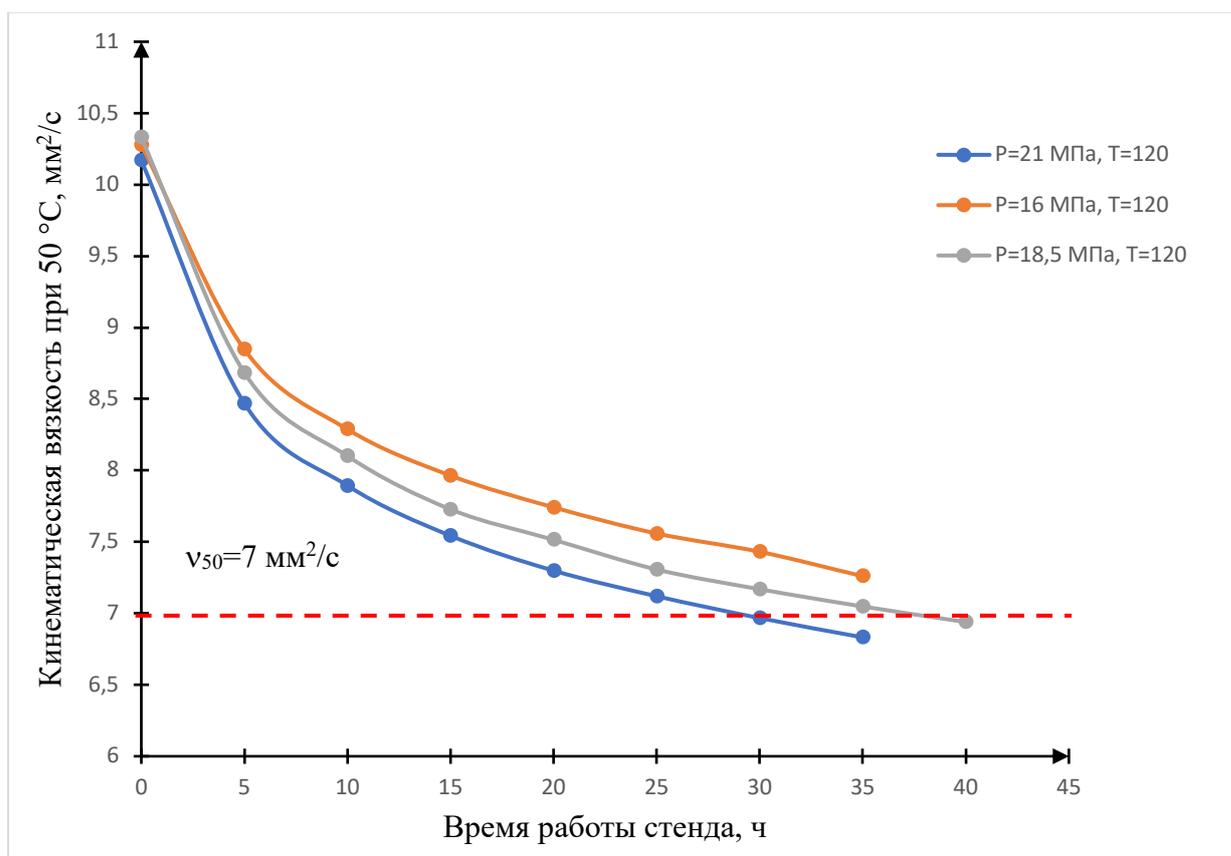


Рисунок 21 – Зависимости изменения кинематической вязкости масла АМГ-10 при испытании в ф-модели в условиях  $T=120\text{ °С}$  и  $P=16, 18,5$  и  $21\text{ МПа}$

Таблица 33 – Кинематическая вязкость при 50 °С масла АМГ-10 при испытании на стенде в условиях T=90 °С и P=16, 18,5 и 21 МПа

№	Время работы стенда, ч	Кинематическая вязкость при 50 °С, мм <sup>2</sup> /с		
		T=90 °С, P=16 МПа	T=90 °С, P=18,5 МПа	T=90 °С, P=21 МПа
1	0	10,29	10,26	10,30
2	5	8,595	8,481	8,288
3	10	8,022	7,827	7,647
4	15	7,674	7,472	7,299
5	20	7,421	7,207	7,032
6	25	7,259	7,023	6,867
7	30	7,075	6,874	6,701
8	35	6,930	6,737	6,577
9	40	6,822	–	6,465

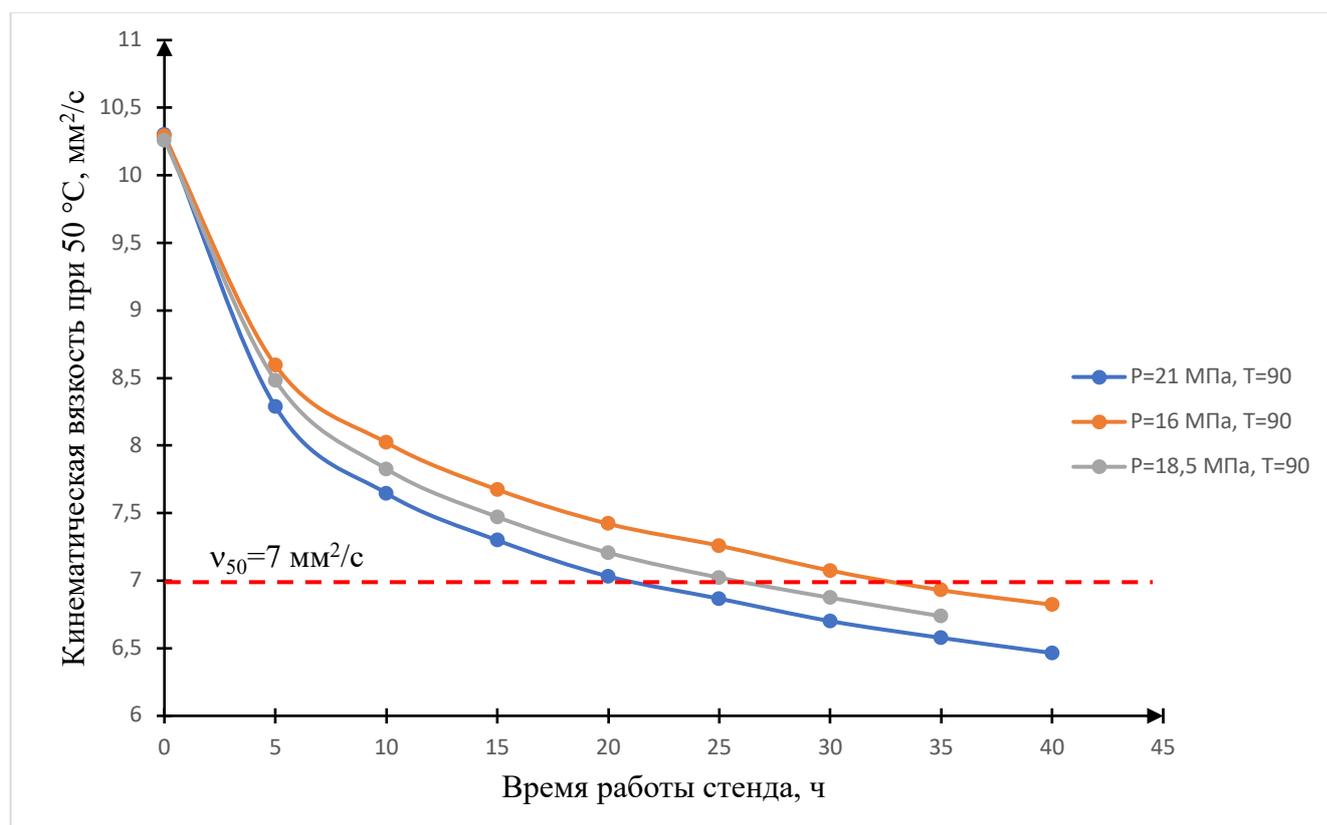


Рисунок 22 – Зависимости изменения кинематической вязкости масла АМГ-10 при испытании в ф-модели в условиях T=90 °С и P=16, 18,5 и 21 МПа

Таблица 34 – Кинематическая вязкость при 50 °С масла АМГ-10 при испытании на стенде в условиях  $T=60\text{ °С}$  и  $P=16, 18,5$  и  $21\text{ МПа}$

№	Время работы стенда, ч	Кинематическая вязкость при 50 °С, мм <sup>2</sup> /с		
		T=60 °С, P=16 МПа	T=60 °С, P=18,5 МПа	T=60 °С, P=21 МПа
1	0	9,917	10,15	10,32
2	5	8,199	8,309	8,073
3	10	7,607	7,643	7,382
4	15	7,198	7,245	7,001
5	20	6,93	6,988	6,749
6	25	6,728	6,77	6,558
7	30	6,574	6,604	6,411
8	35	6,436	6,475	6,291
9	40	–	6,349	–

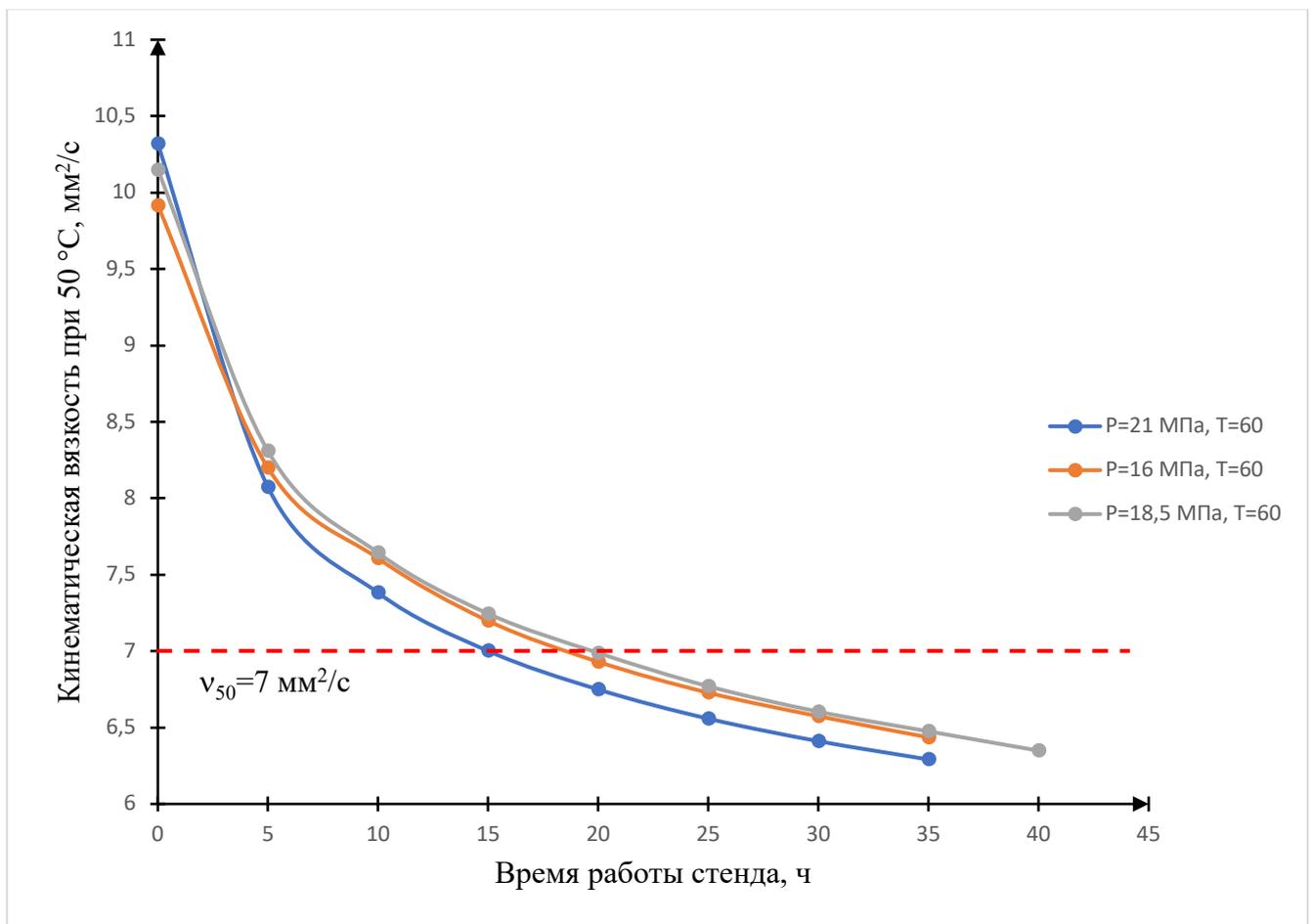


Рисунок 23 – Зависимости изменения кинематической вязкости масла АМГ-10 при испытании в ф-модели в условиях  $T=60\text{ °С}$  и  $P=16, 18,5$  и  $21\text{ МПа}$

Полученные графические зависимости подтверждают, что скорость снижения кинематической вязкости возрастает при:

- постоянной температуре с увеличением давления;
- постоянном давлении со снижением температуры.

Установлено, что максимальная скорость снижения кинематической вязкости масла АМГ-10 происходит при испытаниях в режиме максимального давления  $P=21$  МПа и минимальной температуре  $T=60$  °С: при механическом воздействии на полимер, в частности, дросселировании, протекают процессы механо-химической деструкции. При понижении температуры эксплуатации ГМ скорость снижения вязкости масла повышается при постоянно высоком давлении. Это связано с тем, что энергия при механическом разрушении полимера больше по сравнению с энергией, выделяющейся при температурном воздействии на него. Под влиянием давления скорость течения раствора полимера увеличивается, длинные молекулы ориентируются по направлению потока и оказывают меньшее сопротивление течению жидкости, вязкость становится меньше.

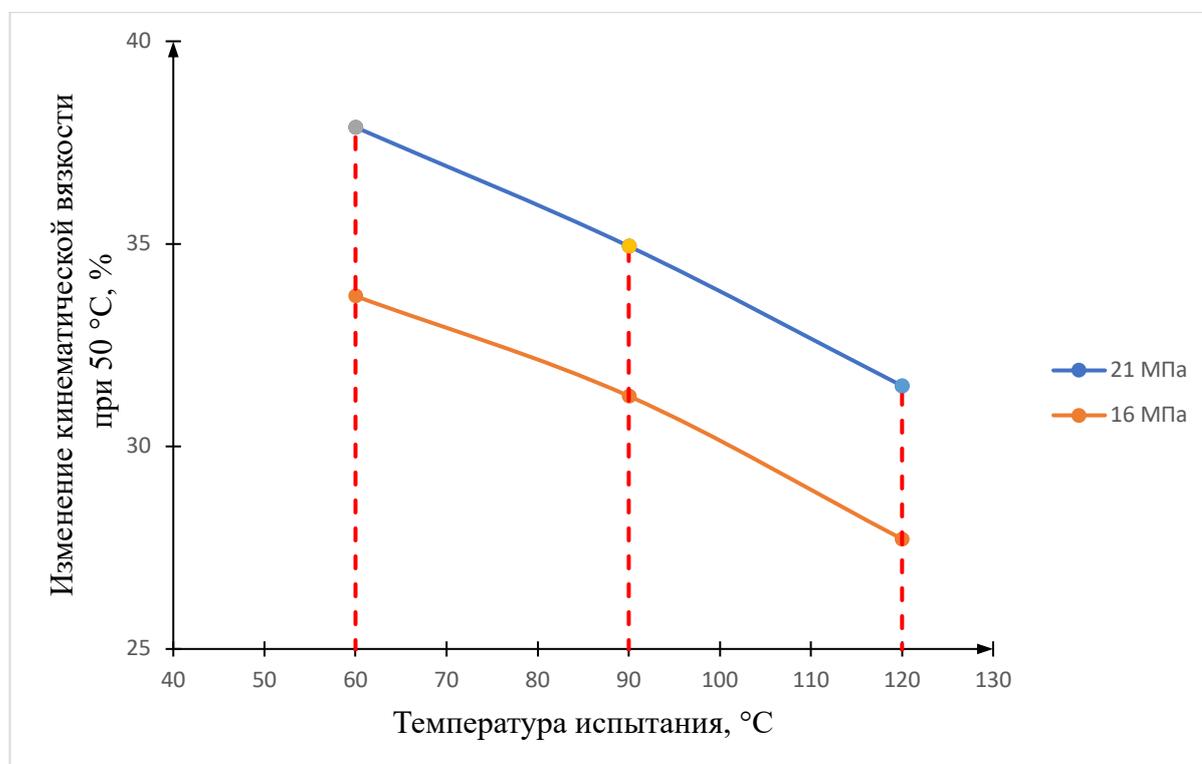


Рисунок 24 – Зависимости изменения кинематической вязкости масла АМГ-10 при испытании в ф-модели в течение 30 ч от температуры при  $P=16$  и  $21$  МПа

С использованием теории планирования эксперимента определены условия проведения испытаний на стендовой установке для оценки стабильности ЭС ГМ.

Суть исследования заключается в получении уравнений регрессии второго порядка, отражающих взаимосвязь изменений кинематической вязкости масла АМГ-10 с воздействующими факторами: температура рабочей жидкости ( $T_u$ ), давление ( $P_u$ ) и время проведения испытания ( $\tau_u$ ). Адекватность полученных уравнений регрессии экспериментальным данным проверяется с помощью дисперсионного анализа.

Проведен регрессионный анализ, на основе которого получены математические модели изменения качественного состояния ГМ при работе в ГС.

Исходя из поставленных задач исследования, свойств описываемых объектов и начальных условий, выбран план многофакторного анализа с тремя управляемыми факторами: рабочая температура  $T_u$ , рабочее давление  $P_u$  и продолжительность испытания  $\tau_u$ . В качестве откликов выбрана кинематическая вязкость при 50 °С ( $Y_1$ ).

Задачами проведения ускоренных испытаний образцов масла АМГ-10, моделирующих его работу в ГС при натуральных условиях на стендовой установке, являлись:

- установление значений факторов, влияющих на процесс испытаний образцов масла АМГ-10 на гидравлическом стенде;
- определение оптимальных условий проведения экспериментальных исследований на стендовой установке.

Исследования проведены при определенных значениях параметров испытания, на трех уровнях оценки результатов. Значения кинематической вязкости при 50 °С масла АМГ-10 согласно плану Бокса-Бенкена представлены в таблице 35. Полученные результаты обработаны с получением уравнения регрессии и проведением статистической оценки достоверности результатов.

Таблица 35 – Результаты измерения кинематической вязкости при 50 °С масла АМГ-10 по результатам эксперимента по плану Бокса-Бенкена

№	Факторы $x_i$			Кинематическая вязкость при 50 °С, мм <sup>2</sup> /с $y_1$
	$\Delta x_1$	$\Delta x_2$	$\Delta x_3$	
1	0	+1	-1	6,701
2	0	+1	+1	6,465
3	0	-1	-1	7,075
4	0	-1	+1	6,822
5	+1	0	-1	7,169
6	+1	0	+1	6,939
7	-1	0	-1	6,604
8	-1	0	+1	6,349
9	+1	-1	0	7,260
10	+1	+1	0	6,832
11	-1	-1	0	6,436
12	-1	+1	0	6,291
13	0	0	0	6,737
14	0	0	0	6,732
15	0	0	0	6,741

Результаты эксперимента представлены в виде полной квадратичной модели (модели второго порядка с взаимодействиями) вида:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2, \quad (45)$$

где  $b_0$  – коэффициент, отражающий средневзвешенный уровень влияния факторов  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$ ;

$b_1$ ,  $b_2$  и  $b_3$  – коэффициенты, отражающие степень индивидуального линейного влияния факторов  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$ ;

$b_{12}$ ,  $b_{13}$ ,  $b_{23}$  – коэффициенты, отражающие степень совместного влияния факторов  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$ ;

$b_{11}$ ,  $b_{22}$ ,  $b_{33}$  – коэффициенты, отражающие степень индивидуального квадратичного влияния факторов  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$ ;

$x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$  – факторы (переменные модели).

По методике планирования эксперимента<sup>6</sup> получены числовые значения коэффициентов (Таблица 36).

Таблица 36 – Коэффициенты уравнения регрессии, описывающего изменение кинематической вязкости при 50 °С масла АМГ-10 от условий испытания

№	Коэффициент	Значение коэффициента для кинематической вязкости при 50 °С
1	$b_0$	6,737
2	$b_1$	0,315
3	$b_2$	-0,163
4	$b_3$	-0,122
5	$b_{12}$	-0,071
6	$b_{13}$	0,006
7	$b_{23}$	0,004
8	$b_{11}$	-0,016
9	$b_{22}$	-0,016
10	$b_{33}$	0,045

Оценка значимости коэффициентов регрессии установлена с помощью t-критерия Стьюдента. Для каждого коэффициента регрессии определено расчетное значение t-критерия по формуле:

$$t_{\text{расч.}b_i} = \frac{|b_i|}{S_b}, \quad (46)$$

где  $b_i$  – коэффициент уравнения регрессии;

$S_b$  – стандартная ошибка коэффициента уравнения регрессии  $b_i$ ,  $b_{ij}$ ,  $b_{ii}$  или  $b_0$ .

Расчет стандартной ошибки  $S_b$  произведен по следующим формулам:

1) дисперсия нулевых точки эксперимента  $S_E$ :

$$S_E = \sum_{u=1}^{N_0} (y_{ou} - \bar{y}_0)^2, \quad (47)$$

$$\bar{y}_0 = \frac{1}{n_0} \sum_{n=1}^{n_0} y_{ou}, \quad (48)$$

где  $y_{ou}$  – значение отклика нулевых точек;

<sup>6</sup> 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)

$n_0$  – число нулевых точек в эксперименте ( $n_0=3$ ).

2) дисперсия воспроизводимости  $S_y^2$ :

$$S_y^2 = \frac{S_E}{n_0 - 1}. \quad (49)$$

3) дисперсия коэффициентов регрессии  $S_b^2$ :

$$S_{b_0}^2 = \frac{1}{n_0} \cdot S_y^2, \quad (50)$$

$$S_{b_i}^2 = A \cdot S_y^2, \quad (51)$$

$$S_{b_{ij}}^2 = D \cdot S_y^2, \quad (52)$$

$$S_{b_{ii}}^2 = (B + \frac{1}{4} \cdot n_0) \cdot S_y^2. \quad (53)$$

Значения констант А, В, D для расчета коэффициентов регрессии при числе факторов, равное 3, равны:  $A = 1/8$ ,  $B = 1/4$ ,  $D = 1/4$  [55, с.52].

4) среднеквадратичное отклонение коэффициентов регрессии  $S_b$ :

$$S_b = \sqrt{S_b^2}. \quad (54)$$

Рассчитанные значения t-критерия сравнены с табличным значением t-критерия (Таблица 37) при доверительном интервале  $\alpha = 0,95$  и числа степеней свободы  $f = 15$  ( $t_{0,95}(15) = 2,131$ ).

Таблица 37 – Оценка значимости коэффициентов регрессии по t-критерию Стьюдента для уравнения, отражающего зависимость изменения кинематической вязкости при 50 °С масла АМГ-10 от факторов испытания

№	Коэффициент	$t_{\text{расчетный}}$	Оценка значимости коэффициента
1	$b_0$	2587,625	> 2,131
2	$b_1$	197,584	> 2,131
3	$b_2$	102,242	> 2,131

Продолжение таблицы 37

4	$b_3$	17,205	> 2,131
5	$b_{12}$	31,380	> 2,131
6	$b_{13}$	2,772	> 2,131
7	$b_{23}$	1,885	< 2,131
8	$b_{11}$	6,226	> 2,131
9	$b_{22}$	6,034	> 2,131
10	$b_{33}$	17,205	> 2,131

Значимыми являются коэффициенты регрессии, расчетное значение  $t$ -критерия которых больше  $t$ -критерия табличного.

Таким образом, незначимым коэффициентом является коэффициент  $b_{23}$ , отражающий совместное влияние фактора  $x_2$  (давление,  $P_u$ ) и  $x_3$  ( $\tau_u$ ).

Уравнение регрессии, отражающее зависимость изменения кинематической вязкости при 50 °С масла АМГ-10 от факторов испытаний имеет вид:

$$Y_1 = 6,737 + 0,315 \cdot X_1 - 0,163 \cdot X_2 - 0,122 \cdot X_3 - 0,071 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,006 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,016 \cdot X_1^2 - 0,016 \cdot X_2^2 + 0,045 \cdot X_3^2 \quad (55)$$

Оценка адекватности уравнения регрессии экспериментальным данным проведена с помощью дисперсионного анализа по критерию Фишера, который определяется как отношение дисперсии, обусловленной регрессией, т.е. дисперсии адекватности ( $S_{ад.}$ ) к остаточной дисперсии ( $S_{ост.}$ ):

$$S_{ад.}^2 = \frac{\sum(y_i - \check{y}_i)^2}{(k+1)}, \quad (56)$$

$$S_{ост.}^2 = \frac{\sum(\check{y}_i - \bar{y})^2}{(n-k-1)}, \quad (57)$$

где  $y_i$  – значение отклика по результатам эксперимента;

$\check{y}_i$  – расчетное значение отклика по уравнению регрессии;

$\bar{y}$  – среднее значение отклика;

$n$  – число испытаний;

$k$  – число значимых коэффициентов регрессии.

В результате дисперсионного анализа установлено, что  $F_{\text{расч.}} = 1,38$ ,  $F_{\text{табл.}} = 4,74$  (при уровне значимости  $\alpha=0,05$ ,  $f_1=10$ ,  $f_2=5$ ). Таким образом, регрессионная модель адекватна и может быть использована для расчета значений кинематической вязкости 50 °С масла АМГ-10 при всех значениях факторов ( $T_u$ ,  $P_u$  и  $\tau_{\text{н}}$ ) в пределах наблюдавшихся при эксперименте значений.

Полученное уравнение регрессии продифференцировано по факторам:

$$\frac{dv}{dX_1} = 0,315 - 0,071 \cdot X_2 + 0,006 \cdot X_3 - 0,032 \cdot X_1 \quad (58)$$

$$\frac{dv}{dX_2} = -0,163 - 0,071 \cdot X_1 - 0,031 \cdot X_2 \quad (59)$$

$$\frac{dv}{dX_3} = -0,122 + 0,006 \cdot X_1 + 0,090 \cdot X_3 \quad (60)$$

В таблице 38 представлены значения скорости изменения кинематической вязкости при 50 °С в зависимости от значений факторов испытаний в кодированном значении:

Таблица 38 – Значения скоростей изменения кинематической вязкости при 50 °С

№	Значения дифференциалов функции			Факторы $x_i$		
	$\frac{dv}{dX_1}$	$\frac{dv}{dX_2}$	$\frac{dv}{dX_3}$	$\Delta x_1$	$\Delta x_2$	$\Delta x_3$
1	0,238	-0,194	-0,211	0	+1	-1
2	0,250	-0,194	-0,032	0	+1	+1
3	0,380	-0,132	-0,211	0	-1	-1
4	0,392	-0,132	-0,032	0	-1	+1
5	0,277	-0,234	-0,205	+1	0	-1
6	0,289	-0,234	-0,026	+1	0	+1
7	0,341	-0,092	-0,218	-1	0	-1
8	0,353	-0,092	-0,039	-1	0	+1
9	0,354	-0,202	-0,116	+1	-1	0
10	0,212	-0,265	-0,116	+1	+1	0
11	0,418	-0,061	-0,128	-1	-1	0
12	0,276	-0,124	-0,128	-1	+1	0
13	0,315	-0,163	-0,122	0	0	0

Подтверждено, что на скорость изменения кинематической вязкости изменение температуры оказывает наибольшее влияние по сравнению с давлением и временем эксплуатации ГМ.

На основе полученных уравнений регрессии для кинематической вязкости при 50 °С построены диаграммы поверхностей отклика. Это возможно по причине непрерывности взаимодействующих факторов. Полученные графики отражают прогнозные модели, соответствующие постоянству одного из факторов при изменении двух других.

На рисунках 25-27 представлены поверхности, отражающие зависимость значений кинематической вязкости при 50 °С от различных факторов, представленных в кодированном виде согласно плану Бокса-Бенкена.

Графики построены в программном пакете статистического анализа Statistica.

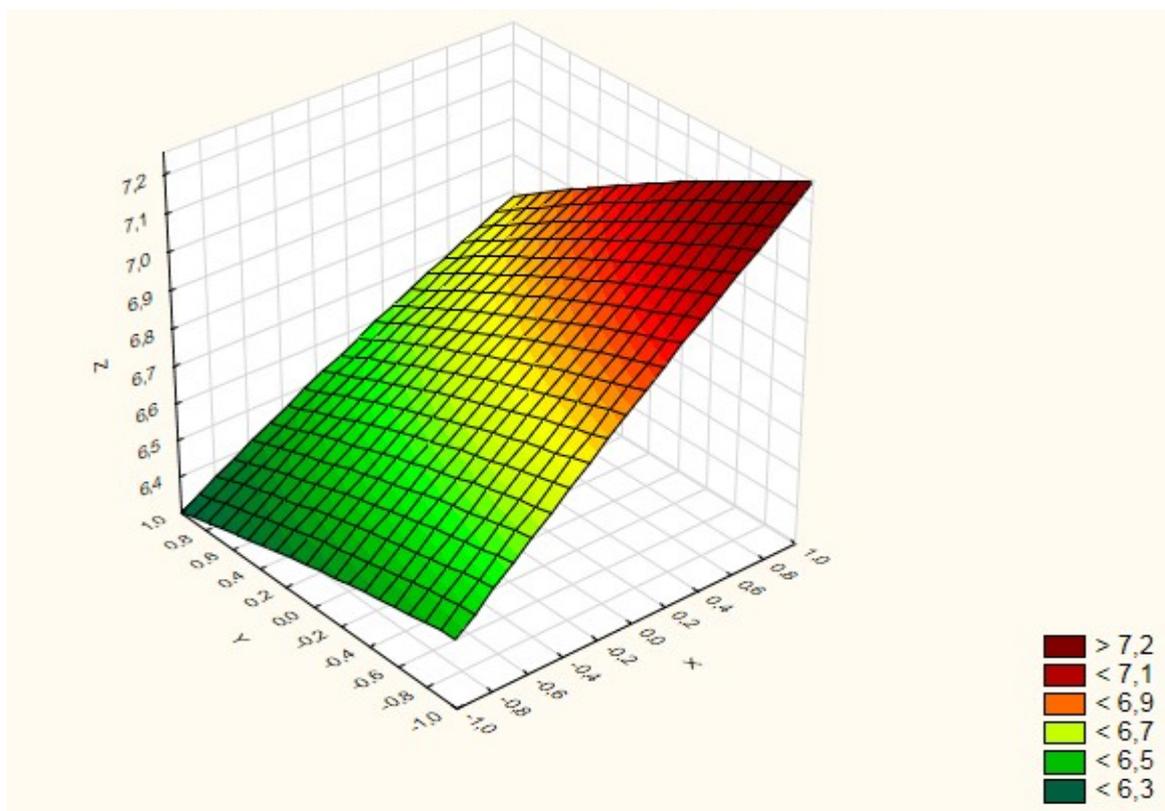


Рисунок 25 – Зависимость кинематической вязкости при 50 °С (Z) от температуры  $T_u$  (X) и давления  $P_u$  (Y) при времени  $\tau_u = \text{const}$

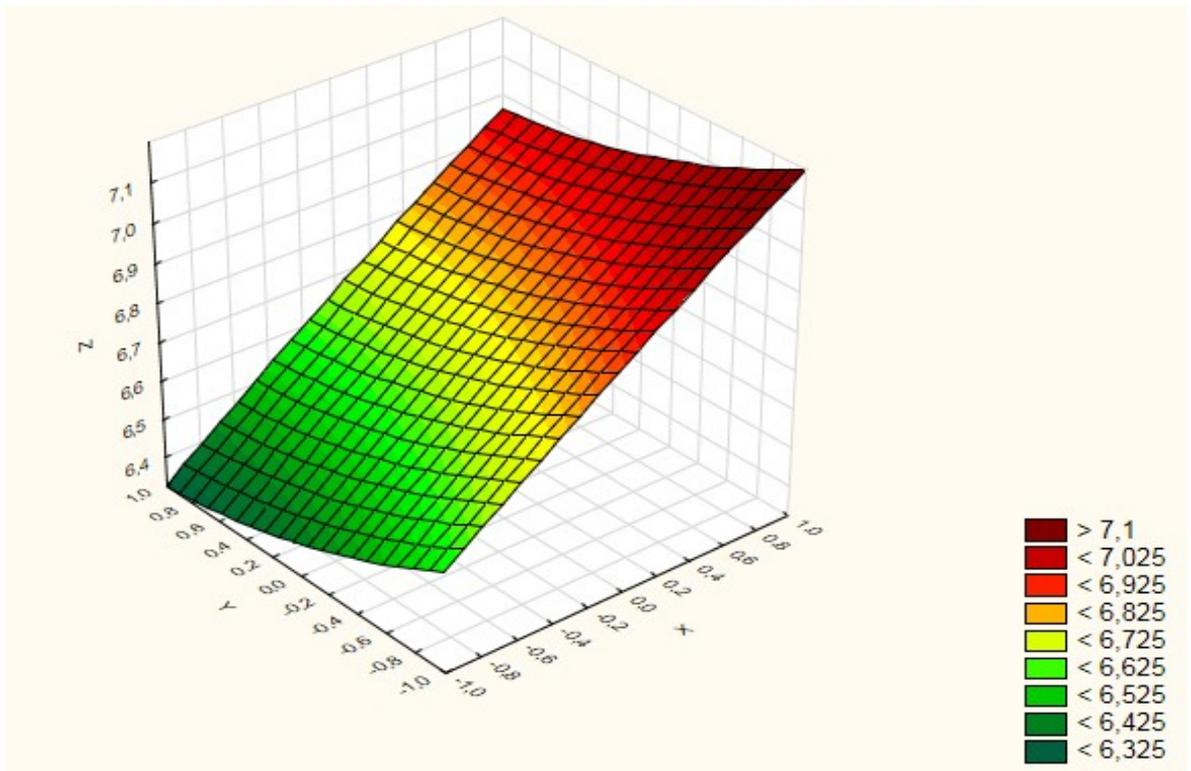


Рисунок 26 – Зависимость кинематической вязкости при 50 °С ( $Z$ ) от температуры  $T_u$  ( $X$ ) и времени  $\tau_u$  ( $Y$ ) при давлении  $P_u = \text{const}$

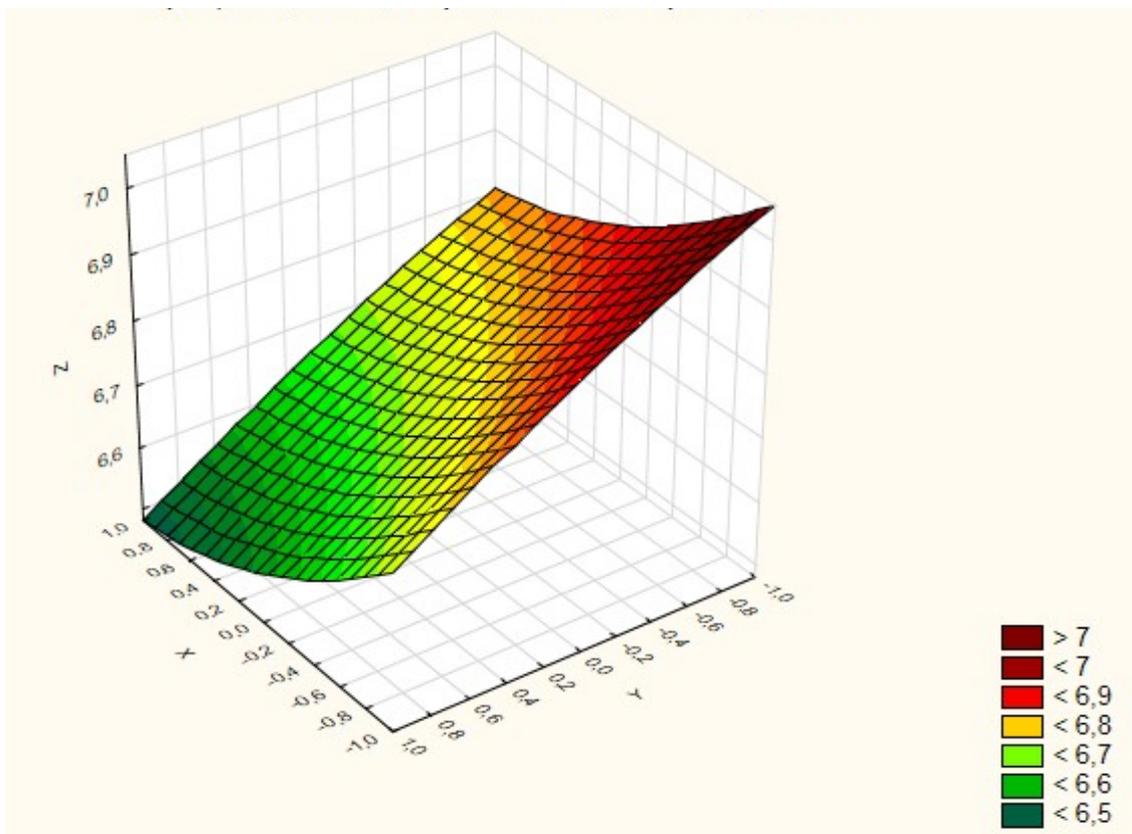


Рисунок 27 – Зависимость кинематической вязкости при 50 °С ( $Z$ ) от давления  $P_u$  ( $Y$ ) и времени  $\tau_u$  ( $X$ ) при температуре  $T_u = \text{const}$

Анализ полученных зависимостей кинематической вязкости при 50 °С от трех факторов (температуры, давления и времени испытания) при варьировании двух из них с фиксированным третьем показал, что температура оказывает наибольшее влияние на изменение вязкостных характеристик масла АМГ-10. Аналогичный результат представляет уравнение регрессии для кинематической вязкости при 50 °С, в котором коэффициент  $b_1$ , отражающий степень влияния фактора температура, имеет наибольшее значение.

Таким образом, на снижение кинематической вязкости наибольшее влияние оказывает температура и давление: чем ниже температура испытания и выше давление, тем больше деструкция загущающей присадки.

Стенд для исследования стабильности свойств ГМ представляет собой гидравлический контур с фильтрующими элементами. Принципиальная технологическая схема стенда для исследования ГМ представлена на рисунке 28.

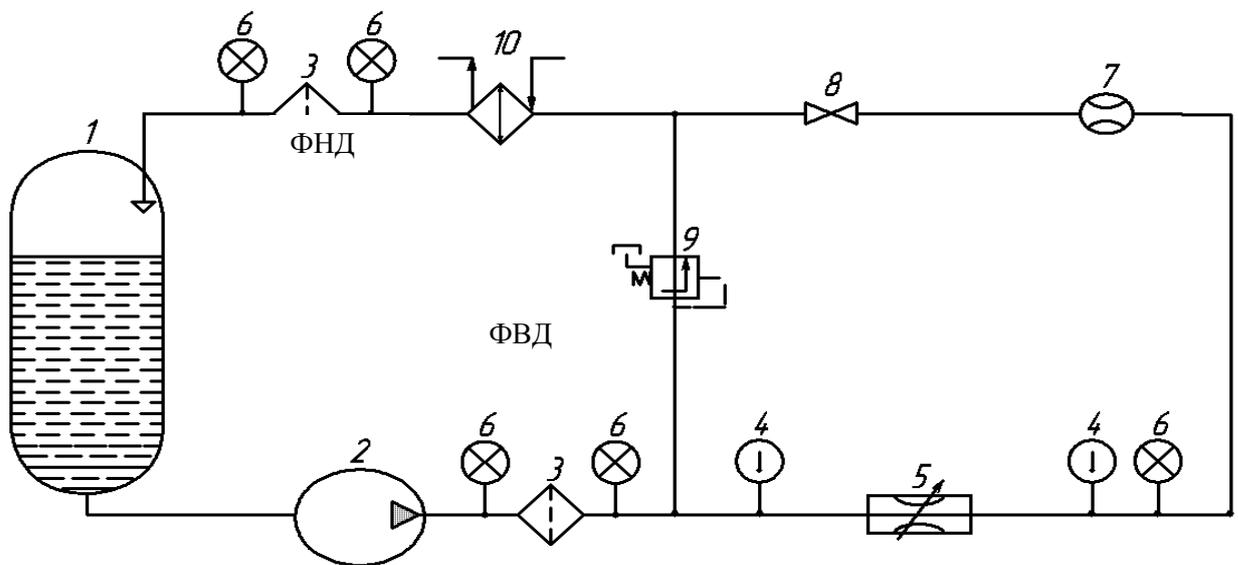


Рисунок 28 – Принципиальная технологическая схема стенда для исследования ГМ: 1 – бак; 2 – насос; 3 – фильтр гидравлический; 4 – датчик температуры; 5 – дроссель; 6 – датчик давления; 7 – преобразователь расхода; 8 – вентиль; 9 – клапан предохранительный; 10 – блок охлаждения

По уравнению Дарси-Вейсбаха рассчитана потеря давления на линии ГС, где установлен ФВД (длина участка принята за 1 м).

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{U^2}{2} \cdot \rho \quad (61)$$

где  $\lambda$  – коэффициент потерь на трение по длине;

$L$  – длина участка ГС, м;

$D$  – диаметр трубы ГС, м;

$U$  – средняя скорость течения жидкости, м/с;

$\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

Для турбулентного течения ( $Re=6060-8657$ ) рассчитан коэффициент потерь на трение по формуле:

$$\lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}} \quad (62)$$

Расчетное значение потери давления на ФВД в условиях критичной нагрузки для масла АМГ-10 ( $T=60$  °С,  $P=21$  МПа) составляет  $\Delta P=1,56$  МПа, что соответствует фактическим параметрам со стендовых испытаний.

Значения перепада давления, фиксируемое манометрами, в результате стендовых испытаний, представлены в таблице 39.

Таблица 39 – Значения перепада давления на фильтрах высокого и низкого давления при различных режимах работы стенда

№	Режим работы стенда			Перепад давления на фильтрах, МПа	
	T, °С	P, МПа	$\tau$ , ч	Фильтр высокого давления	Фильтр низкого давления
1	90	21	40	1,10	0,05
2	90	16	40	1,20	0,06
3	120	18,5	40	1,70	0,05
4	60	18,5	40	1,30	0,06
5	120	16	35	0,03	0,05
6	120	21	35	1,40	0,06
7	60	16	35	0,01	0,06
8	60	21	35	1,20	0,06
9	90	18,5	35	1,30	0,06

По результатам испытаний рассчитаны коэффициенты и получена регрессионная зависимость, являющейся математической моделью для перепада давлений ( $Y_2$ ) от факторов условий испытаний ( $T=X_1$ ,  $P=X_2$  и  $\tau=X_3$ ):

$$Y_2 = 1,30 + 0,13 \cdot X_1 + 0,30 \cdot X_2 - 0,05 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,15 \cdot X_1^2 - 0,50 \cdot X_2^2 \quad (63)$$

На значение перепада давления в системе наибольшее влияние оказывает рабочее давление в системе: чем оно больше, тем больше перепад, что подтверждает регрессионная зависимость (63). Вязкость ГМ снижается с течением времени в результате деструкции загущающей присадки, при этом в полученном уравнении отсутствует фактор времени. Значение критерия Фишера для уравнения регрессии вязкости масла АМГ-10 и для перепада давления:  $F_{\text{расч.}} = 1,38 < F_{\text{расч.}} = 1,97$ . Следовательно, оценка стабильности свойств ГМ, характеризуемой стойкостью к термомеханической деструкции, наиболее достоверной является по изменению кинематической вязкости, зависящей в большей мере от температуры.

### **3.2.3 Исследование изменения состава образцов масла АМГ-10 и обоснование критерия стойкости загущающих полиметакрилатных присадок к термомеханической деструкции**

#### ***Исследования образцов масла АМГ-10 методом ИК-спектроскопии***

Образцы масла АМГ-10, отобранные с интервалом 5 ч в результате стендовых испытаний при фиксированном давлении  $P=21$  МПа и разной температуре ( $T=60, 90$  и  $120$  °С), исследованы методом ИК-спектроскопии. Значения площадей пика и концентрация загущающей присадки Viscoplex 7-610 для выше указанных образцов масла АМГ-10 представлены в таблице 40.

Таблица 40 – Результаты исследования образцов масла АМГ-10 после стендовых испытаний методом ИК-спектроскопии

Условия проведения испытания (Т, Р)	Время, ч	Площадь пика на 722 см <sup>-1</sup>	Площадь пика на 1620 см <sup>-1</sup>	Концентрация Viscoplex 7-610
60 °С 21 МПа	0	3,703	0,081	11,942
	5	3,658	0,079	11,804
	10	3,669	0,077	11,962
	15	3,634	0,095	11,478
	20	3,659	0,090	11,695
	25	3,560	0,085	11,386
	30	3,623	0,089	11,661
	35	3,612	0,090	11,688
90 °С 21 МПа	0	3,685	0,093	11,665
	5	3,644	0,090	11,720
	10	3,655	0,093	11,666
	15	3,594	0,092	11,635
	20	3,597	0,089	11,654
	25	3,631	0,093	11,642
	30	3,666	0,086	11,543
	35	3,650	0,085	11,453
120 °С 21 МПа	0	3,650	0,086	11,568
	5	3,603	0,090	11,613
	10	3,616	0,091	11,640
	15	3,683	0,091	11,568
	20	3,594	0,086	11,550
	25	3,533	0,087	11,557
	30	3,524	0,085	11,606
	35	3,491	0,0790	11,609

Область поглощения 722 см<sup>-1</sup> характерна для связи  $-(\text{CH}_2)_n$ , отражающей изменение состояния базовой основы масла АМГ-10. В результате наложения спектров исследуемых свидетельствует о составе основы масла (Рисунки 29-31).

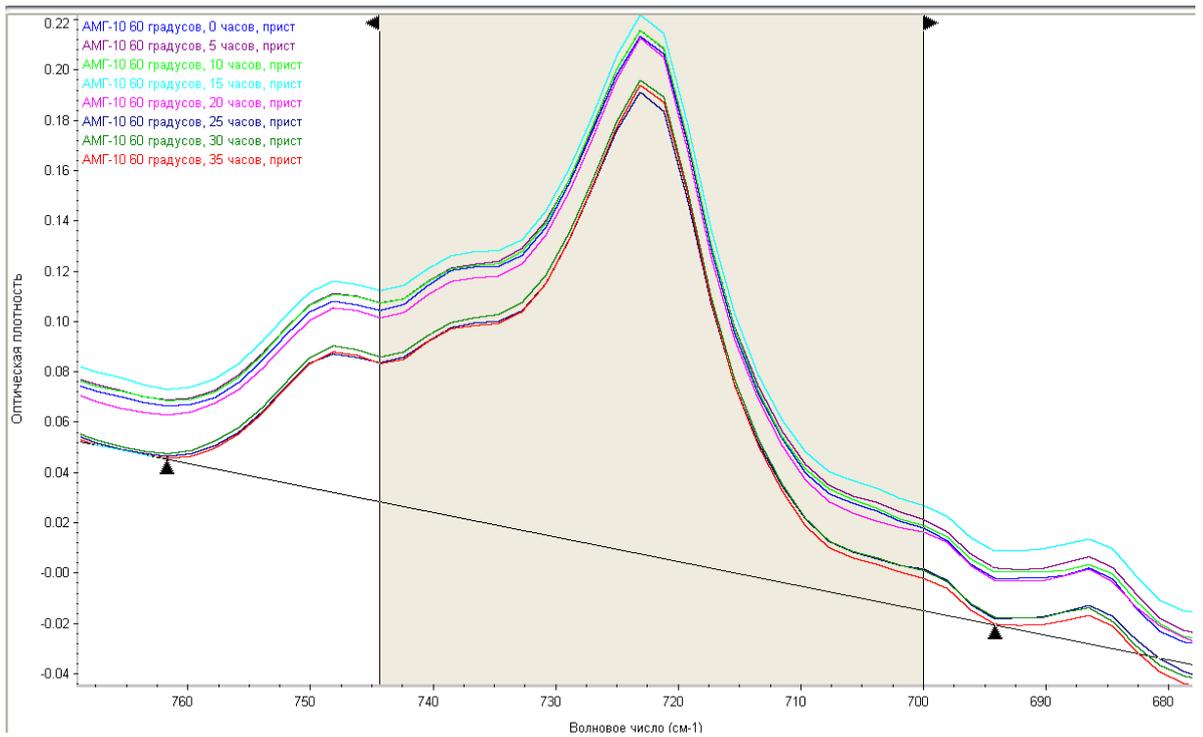


Рисунок 29 – ИК-спектры образцов масла АМГ-10 после стендовых испытаний в течение 35 ч при температуре  $T=60\text{ }^{\circ}\text{C}$  в диапазоне волновых чисел  $760\text{-}680\text{ см}^{-1}$

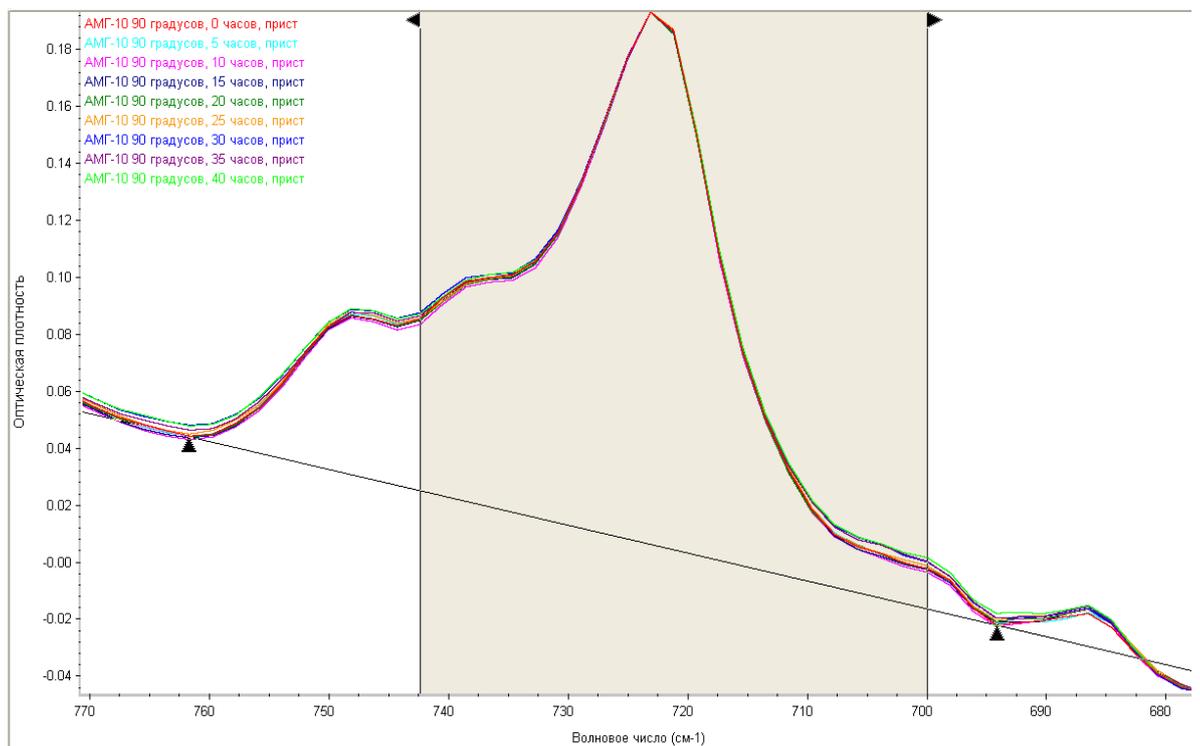


Рисунок 30 – ИК-спектры образцов масла АМГ-10 после стендовых испытаний в течение 40 ч при температуре  $T=90\text{ }^{\circ}\text{C}$  в диапазоне волновых чисел  $760\text{-}680\text{ см}^{-1}$

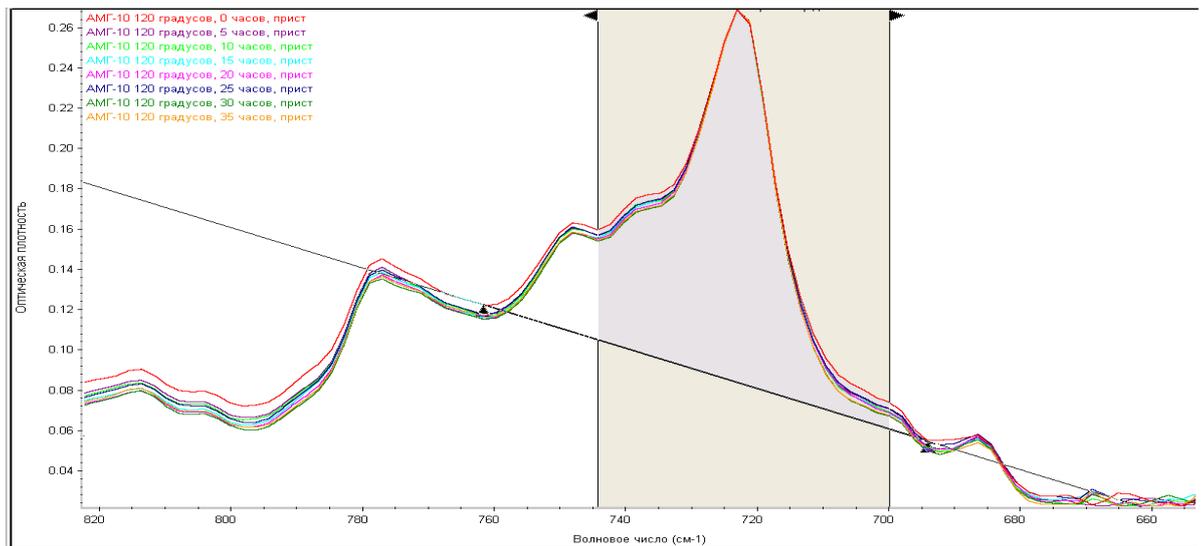


Рисунок 31 – ИК-спектры образцов масла АМГ-10 после стендовых испытаний в течение 35 ч при температуре  $T=120\text{ }^{\circ}\text{C}$  в диапазоне волновых чисел  $760\text{-}680\text{ см}^{-1}$

Полоса поглощения  $1620\text{ см}^{-1}$  относится к присадке трикрезилфосфат (ароматические УВ, С–С) [128-129]. Полученные ИК-спектры и их наложение указывают на отсутствие процессов окисления, что подтверждается неизменностью значений кислотного числа образцов масла АМГ-10 по результатам стендовых испытаний, так как оптическая плотность не отличается для всех исследуемых образцов (Рисунки 32-34).

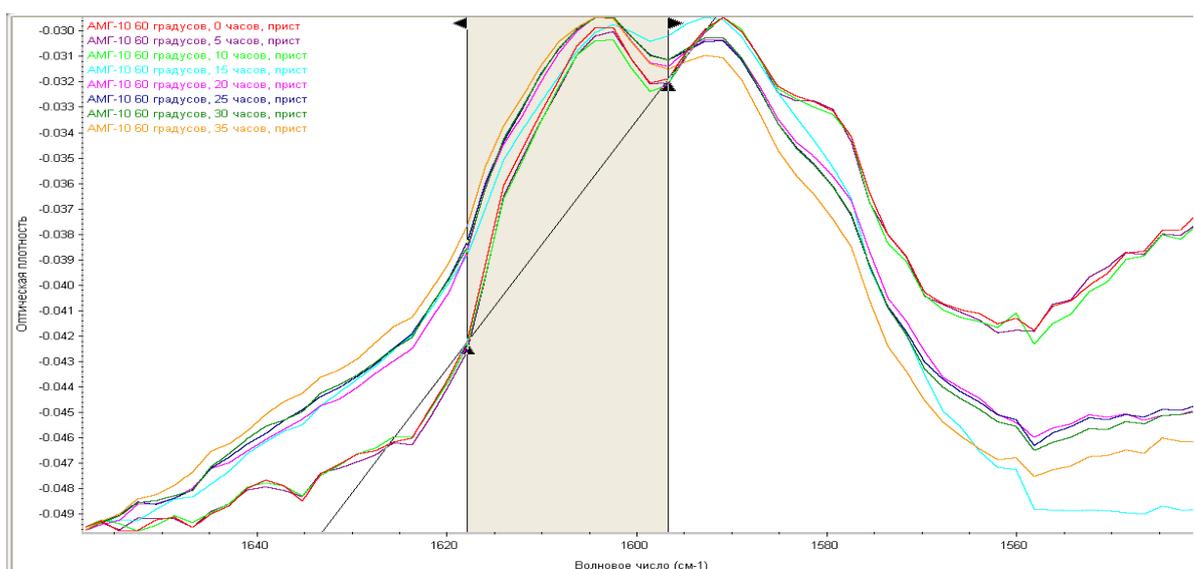


Рисунок 32 – ИК-спектры образцов масла АМГ-10 после стендовых испытаний в течение 35 ч при температуре  $T=60\text{ }^{\circ}\text{C}$  в диапазоне волновых чисел  $1700\text{-}1500\text{ см}^{-1}$

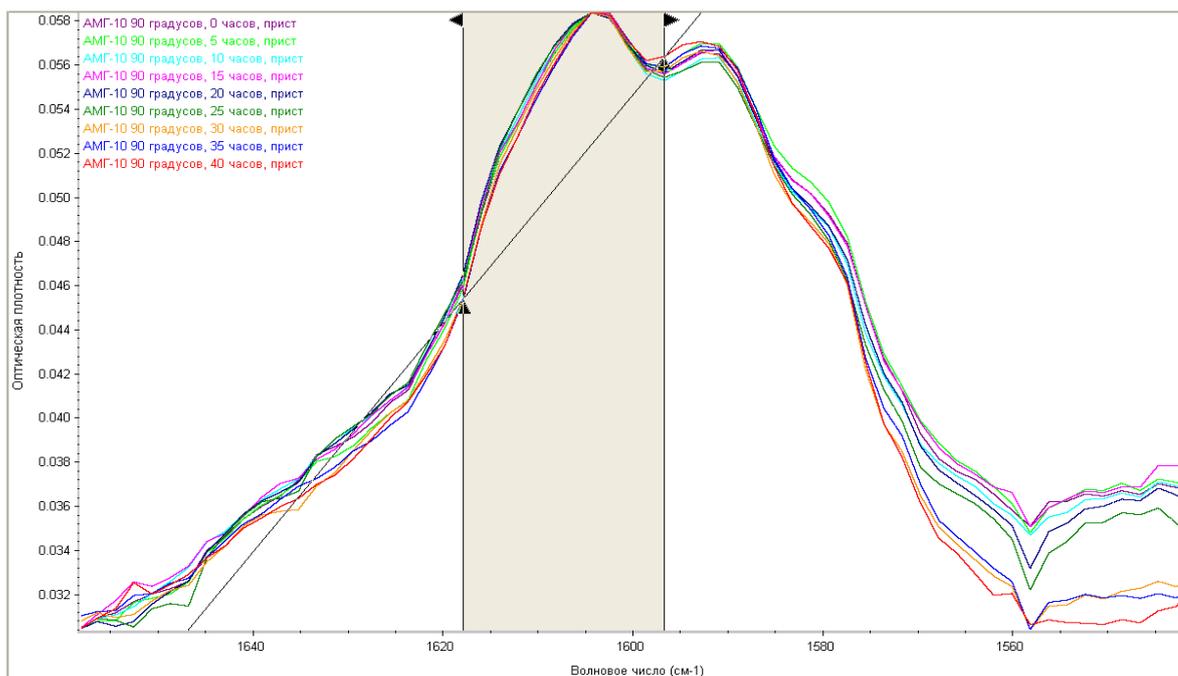


Рисунок 33 – ИК-спектры образцов масла АМГ-10 после стендовых испытаний в течение 40 ч при температуре  $T=90\text{ }^{\circ}\text{C}$  в диапазоне волновых чисел  $1700\text{--}1500\text{ см}^{-1}$

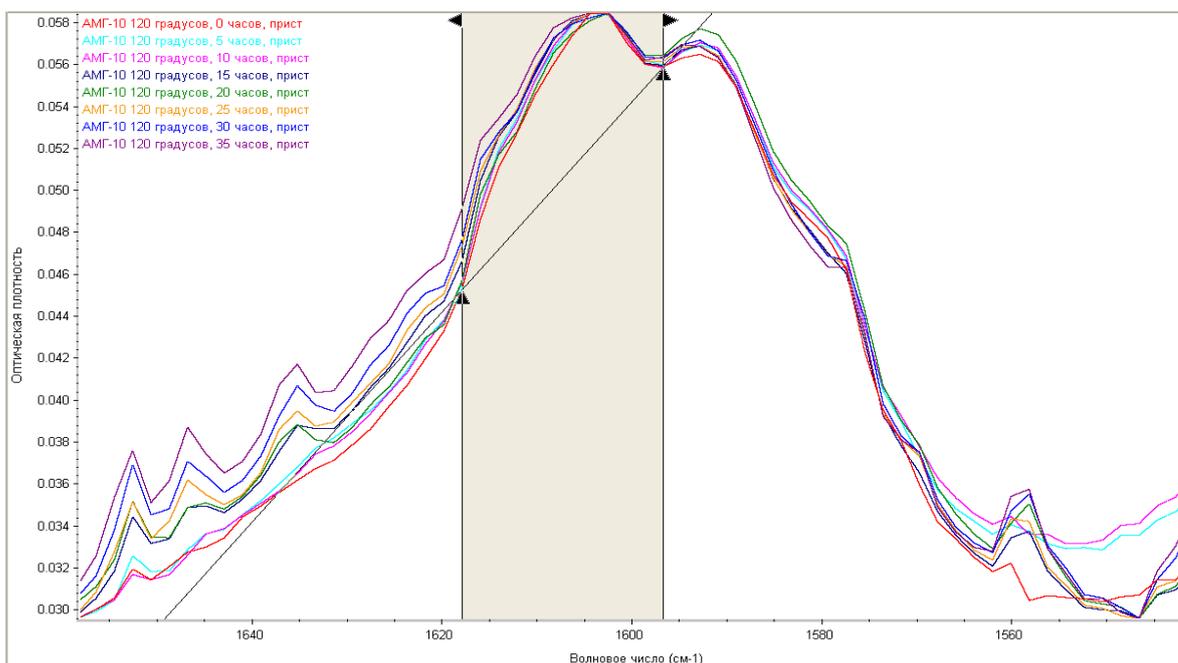


Рисунок 34 – ИК-спектры образцов масла АМГ-10 после стендовых испытаний в течение 35 ч при температуре  $T=120\text{ }^{\circ}\text{C}$  в диапазоне волновых чисел  $1700\text{--}1500\text{ см}^{-1}$

Присадка Viscoplex 7-610 представляет собой полиметакрилатный полимер с боковыми алкильными цепями [96], для которой наиболее интенсивной и

характерной областью поглощения является диапазон волновых чисел 1732-1652 см<sup>-1</sup>, характерной для непредельных сложных эфиров (валентные колебания С=О)[128-129]. Концентрация присадки в исследуемых образцах масла АМГ-10 рассчитана согласно СТО 08151164-0311-2018 [110]. Результаты представлены в таблице 48. Согласно приведенным данным, массовая доля загущающей присадки Viscoplex 7-610 в образцах оставалась неизменной на протяжении всего времени проведения стендовых испытаний и сохранялась в пределах нормы, соответствующей требованиям технологии производства масла АМГ-10 по ГОСТ 6794-2017.

В результате исследований образцов масла АМГ-10, отобранных со стенда после испытаний при давлении Р=21 МПа и различных температурах (Т=60, 90 и 120 °С), значимых отличий ИК-спектрограмм в пределах точности метода ИК-спектроскопии не установлено, что характеризует отсутствие продуктов окисления структурно-группового состава испытуемого масла при изменении кинематической вязкости.

#### *Исследование образцов масла методом гель-проникающей хроматографии*

На стойкость к деструкции полимерного загустителя влияют его вязкостные и молекулярные характеристики.

Согласно уравнению Марка-Хаувинка, ММ растворенного полимера равна:

$$M_v = \left[ \frac{\eta}{K} \right]^{\frac{1}{\alpha}} \quad (64)$$

где  $K$  – коэффициент, постоянный для растворов полимеров одного полимергомологического ряда в данном растворителе;

$\alpha$  – постоянная, характеризующая форму макромолекул в растворе.

Значение  $\alpha$  зависит от гибкости цепей полимеров – для жесткоцепных полимеров оно выше, чем для более гибких. Согласно формуле [69], чем больше  $\alpha$ , тем меньше ММ. Разные значения характеристической вязкости обусловлены

растворимостью полимеров в растворителе – в «хорошем» растворителе клубки полимера набухают, что вызывает увеличение вязкости; если цепи полимеров жесткие, то клубки не сворачиваются и, соответственно, вязкость меньше.

Полимерные загустители в составе ГМ тем устойчивее к деструкции, чем лучше полимер распределен в растворителе и однороднее его свойства. Однородность свойств полимерных загустителей характеризует степень полидисперсности, а также разность ММ – для однородных полимеров значения средневесовой, среднечисловой и средневязкостной ММ близки по значениям, при повышении полидисперсности увеличиваются отличия ММ.

В рамках диссертационных исследований рассмотрены вязкостные присадки Максойл ВЗ-011 разных партий. Результаты сравнения присадок методом ГПХ представлены в таблице 41. При вовлечении присадки № 2 в состав масла АМГ-10 готовый продукт ГМ имел неудовлетворительную фильтруемость.

Таблица 41 – Значения молекулярных масс присадки Максойл ВЗ-011 разного производства методом ГПХ

Образец	Среднечисловая ММ, $M_n$ , г/моль	Средневесовая ММ, $M_w$ , г/моль	Средневязкостная ММ, $M_v$ , г/моль	Степень полидисперсности, PD	$1 - M_w / M_v$
Присадка №1	41088	101505	193437	2,47	0,475
Присадка № 2	14139	47423	163964	3,35	0,721

Результаты ГПХ показывают, что разница между средневесовой ММ и средневязкостной ММ полиметакрилатной присадки с неудовлетворительной фильтруемостью более 70 %, а также высокая степень полидисперсности, что свидетельствуют о неоднородности молекулярного состава полимера.

Для идентификации структурно-группового состава масла АМГ-10 исследованы образцы масла с вязкостными присадками Viscoplex 7-610 и Максойл ВЗ-011 различной вязкости методом ГПХ. В таблице 42 представлены молекулярно-массовые характеристики выбранных объектов исследования.

Образец протокола по результатам исследований методом ГПХ представлен в Приложении Б.

Таблица 42 – Молекулярно-массовые характеристики образцов масла АМГ-10 с присадками Viscoplex 7-610 и Максойл ВЗ-011 после стендовых испытаний

Значения кинематической вязкости при 50 °С, мм <sup>2</sup> /с	Средневесовая ММ, M <sub>w</sub> , г/моль	Средне-вязкостная ММ, M <sub>v</sub> , г/моль	$\frac{M_v - M_w}{M_v}$	Степень полидисперсности, PD	Степень деструкции полимера, %
масло АМГ-10 с присадкой Viscoplex 7-610					
10,30 мм <sup>2</sup> /с	130444	207596	0,372	1,933	–
8,288 мм <sup>2</sup> /с	89237	116094	0,231	1,504	19,5
6,465 мм <sup>2</sup> /с	57825	71396	0,190	1,340	37,2
масло АМГ-10 с присадкой Максойл ВЗ-011					
10,11 мм <sup>2</sup> /с	113115	220648	0,487	2,266	–
8,759 мм <sup>2</sup> /с	79140	110681	0,285	1,771	13,4
7,086 мм <sup>2</sup> /с	56234	71595	0,215	1,471	29,9

По результатам исследований установлено, что при снижении кинематической вязкости масла уменьшаются значения ММ и степень полидисперсности: состав макромолекул полимерного загустителя становится более однородным, а полимер – устойчивее к деструкции.

Таким образом, 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<sub>v</sub>) и средневесовой (M<sub>w</sub>) ММ к средневязкостной ММ (M<sub>v</sub>), стремящееся к максимуму, а степень полидисперсности (PD) – к минимуму:

$$\left[ \begin{array}{l} \frac{M_v - M_w}{M_v} \rightarrow \max \\ PD \rightarrow \min \end{array} \right. \quad (65)$$

где  $M_w$  – средневесовая молекулярная масса;

$M_v$  – средневязкостная молекулярная масса;

PD – степень полидисперсности.

### Выводы по Главе 3

1. По результатам исследования физико-химических свойств образцов базовых масел с загущающими присадками установлено, что загущающая способность присадки на основе поливинил-н-бутилового эфира Синтолукс В-20 на 17 % выше, чем у полиметакрилатных присадок Максойл В3-011 и Viscoplex 7-610. При этом присадки Максойл В3-011 и Viscoplex 7-610 в разработанных образцах проявляют депрессорные свойства (понижают температуру базового масла до 25 °С). Стабильность вязкости после озвучивания на УЗДН выше у образцов, загущенных присадкой Максойл В3-011. Смесь ПАОМ-2 + 10 % Максойл В3-011 является перспективной основой для ГМ.

ГМ, в основе которых используют ДОТФ в качестве основного компонента, являются перспективными для разработки отечественных аналогов взамен импортным ГМ более высокого класса вязкости (32, 46 классов вязкости согласно ISO 3448).

2. Исследованы базовые масла АМГ-10 различных производителей. Установлено, что на стабильность вязкости масла АМГ-10 влияет не природа основы масла, а природа полиметакрилатной присадки: присадка Максойл В3-011 устойчивее к механической деструкции на 7 % по сравнению с Viscoplex 7-610 в составе разных основ отечественного производства.

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

4. Проведены исследования стабильности свойств масла АМГ-10 на созданном стенде как ф-модели ГС АТ. Для планирования эксперимента выбран D-оптимальный план второго порядка Бокса-Бенкена:

4.1 Установлено, что показателем, определяющим срок применения до замены масла АМГ-10 в ГС самолете Ил-76, является кинематическая вязкость при 50 °С. При этом изменение кислотного числа масла АМГ-10 по результатам испытаний на стенде находятся в пределах сходимости метода определения;

4.2 По результатам исследований установлено, что относительное снижение кинематической вязкости ( $dv_{50}/d\tau$ ) масла АМГ-10 с присадкой Viscoplex 7-610 при 21 МПа и 60 °С больше на 7 %, чем при 21 МПа и 120 °С;

4.3 Получены регрессионные модели изменения кинематической вязкости при 50 °С масла АМГ-10 и перепада давления от условий применения масла в ГС (Т, Р, продолжительность испытаний). Регрессионные модели адекватны и могут быть использованы для получения значений кинематической вязкости при 50 °С масла АМГ-10 и перепада давления при всех значениях факторов в диапазоне их варьирования. Установлено, что прогнозирование срока применения до замены ГМ по изменению кинематической вязкости имеет большую достоверность;

4.4 Полученные регрессионные модели изменения кинематической вязкости при 50 °С продифференцированы по трем факторам: температура, давление и время проведения испытаний. Определено, что на скорость снижения кинематической вязкости при 50 °С максимально влияние оказывает одновременное повышение температуры и давления (режим максимальной нагрузки на ГС).

Графические поверхности, построенные по регрессионной зависимости изменения кинематической вязкости при 50 °С масла АМГ-10 от времени работы стенда, показывают, что температура и давление оказывают противоположное влияние на снижение кинематической вязкости: чем ниже температура испытания и выше давление, тем больше деструкция загущающей присадки.

4.5 Относительное снижение кинематической вязкости ( $dv_{50}/d\tau$ ) масла АМГ-10 с присадкой 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.

4.6 Оценка стабильности свойств ГМ, характеризуемой стойкостью к термомеханической деструкции, по перепаду давления на ФВД является менее достоверной по сравнению с оценкой по изменению кинематической вязкости, так как на значение перепада давления в ГС не влияет продолжительность испытаний, наибольшее влияние оказывает рабочее давление в системе, а не температура, что не в полной мере соответствует условиям термомеханической деструкции загущающей присадки.

5. При исследовании образцов масла АМГ-10, отобранных после стендовых испытаний при различных режимах работы, методом ИК-спектроскопии в областях поглощения  $722\text{ см}^{-1}$  (связь  $-(\text{CH}_2)_n$ ),  $1620\text{ см}^{-1}$  (присадка противоизносная трикрезилфосфат) и  $1732\text{-}1652\text{ см}^{-1}$  (полиметакрилатная присадка с боковыми алкильными цепями) значимых отличий в пределах точности метода не установлено, что характеризует неизменность структурно-группового состава испытуемого масла при изменении кинематической вязкости.

6. Испытания на термическую стабильность полиметакрилатных присадок по СТО 08151164-0209-2016 показали, что термическая стабильность присадок уменьшается в ряду IRGAFLO 6000 V – Максойл ВЗ-011 – Viscoplex 7-610, подтверждая, что деструкция полимерной присадки в составе ГМ обусловлена больше механическим воздействием на полимерный загуститель, чем температурой, что подтверждает процессы термомеханической деструкции загущающей присадки при эксплуатации ГМ в ГС.

7. Методом ГПХ доказано, что снижение кинематической вязкости ГМ при его эксплуатации в ГС связано с уменьшением ММ загущающей присадки, вызванной деструкцией полимера. Чем ниже степень полидисперсности полимера, уже ММР, тем однороднее свойства полимера и выше его устойчивость в ГМ.

Предложен комплексный критерий стабильности вязкости загущающей присадки, характеризующий повышенную стойкость к термомеханической деструкции при большем значении отношения разности  $M_w$  и  $M_v$  к  $M_v$  и меньшем значении PD.

Экспериментально доказано, что чем выше PD и больше относительная разность между  $M_w$  и  $M_v(1 - M_w / M_v)$ , тем хуже фильтруемость ГМ.

## ГЛАВА 4. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИХ ПРИМЕНЕНИЮ

Технико-экономическая эффективность применения нового метода оценки стабильности свойств ГМ для АТ определяется следующими факторами:

### 1. Повышение информативности и достоверности оценки.

Использование нового метода прогнозирования стабильности свойств ГМ повышает информативность и достоверность принятия решений по срокам службы ГМ в ГС. Ф-модель ГС, представленная в виде гидравлического стенда, дает возможность воспроизвести условия работы реальной ГС, что повышает достоверность эксперимента. Выбранный методологический подход позволяет прогнозировать свойства ГМ за счет установления зависимости и закономерностей их изменения при протекании процессов термомеханической деструкции и окисления.

### 2. Сокращение времени испытаний по оценке срока службы ГМ в ГС АТ.

Предложенный метод прогнозирования стабильности свойств ГМ для АТ позволит существенно сократить продолжительность испытаний по допуску к применению ГМ в ГС. В основе предложенного метода лежит физическое и математическое моделирование работы ГС. Стендовые испытания обеспечивают протекание ХП, характерных для ГС АТ, в ускоренном режиме. Переход от физических к математическим моделям системы и объекта допускает реализацию стендовых испытаний в виде численного эксперимента.

### 3. Экономическая целесообразность использования нового метода.

Условная стоимость применения метода оценки стабильности свойств ГМ при применении в ГС АТ с использованием гидравлического стенда, представляющим собой ф-модель ГС, составляет (таблицы 43–46):

Таблица 43 – Расчет затрат на проведение испытания

Работы и материалы	Ед. изм.	Цена за ед., руб.	Кол-во	Сумма, руб.
Проведение испытания		500 000	1	500 000
Стенд	шт	10 000 000	1	10 000 000
Итого				10 500 000

При определении условной стоимости проведения одного испытания по оценке стабильности свойств ГМ в течение максимум 50 часов по новому методу используем следующую формулу:

$$P = C_R + C_C + C_O + C_A, \quad (66)$$

где  $C_R$  – материальные расходы, руб;

$C_C$  – расходы на оплату труда, руб;

$C_O$  – прочие расходы, руб;

$C_A$  – суммы начисленной амортизации, руб.

Таблица 44 – Расчет затрат на материалы для проведения испытания

Материалы	Ед. изм.	Цена за ед., руб.	Кол-во на 1 исп.	Всего на эксперимент	Сумма, руб.
Нефрас С2-80/120 по ГОСТ 443	л	150	20	20	3 000,00
<i>Измерение кинематической вязкости по ГОСТ 33</i>					
Нефрас С2-80/120 по ГОСТ 443	л	150	0,15	1,65	247,50
Ацетон технический по ГОСТ 2768	л	228	0,07	0,77	175,56
<i>Определение кислотного числа по ГОСТ 5985</i>					
Нефрас С2-80/120 по ГОСТ 443	л	150	0,2	2,2	330,00
Ацетон технический по ГОСТ 2768	л	228	0,05	0,55	125,40
Спирт этиловый по ГОСТ 55878	л	500	0,15	1,65	825,00
Бифталат калия ЧДА	г	3,0	0,07	0,77	2,31
Нитрозиновый желтый ЧДА	г	48	0,005	0,055	2,64
Итого					4 708,41

Таблица 45 – Расчет затрат на приобретение потребление всех видов энергии

Ресурсы		Ед. изм.	Кол-во	Цена за ед., руб.	Сумма, руб.
Электроэнергия в течение 50 часов испытания	силовой привод (насос)	кВт	16	6,43 руб. за 1 кВт*ч	102,88
	компрессор		1,1		7,07
	блок управления		4,5		28,94
	прочее		0,5		3,22
Всего					
Холодная вода		м <sup>3</sup>	18,0	50,93 руб. за 1 м <sup>3</sup>	916,74
Итого по коммунальным услугам					1058,85

Таблица 46 – Расчет затрат на оплату труда для проведения испытания

Персонал	Кол-во	ч	Стоимость 1 чел/ч, руб.	Сумма, руб.
Инженер	1	61	190,0	11 590,0
Научный сотрудник	1	8	275,0	2 200,0
Лаборант	1	16,5	192,0	3 151,5
Расходы на обязательное и добровольное страхование (18 %)				3 049,47
Итого				19 990,97

Всего без учета амортизационных начислений стоимость составит 25 758,23 рубля.

В настоящее время работоспособность опытного образца модернизированного масла АМГ-10 в гидросистеме оценивают по методу испытаний работоспособности ГМ в гидросистеме с аксиально-поршневым насосом при положительных температурах в объеме первого этапа и квалификационной оценки. Общая продолжительность стендовых испытаний составляет более 100 ч, стоимость – 1 500 000 рублей.

*Рекомендации по применению результатов исследования для прогнозирования стабильности свойств гидравлических масел для авиационной техники и технологии их получения*

Предложенный метод прогнозирования стабильности свойств ГМ может быть рекомендован для включения в объем квалификационных испытаний масла АМГ-10 с целью оценки соответствия физико-химических показателей и ЭС масла требованиям эксплуатации АТ и нормам ГОСТ 6794-2017. Объем квалификационных испытаний для масла АМГ-10 включает определение показателей физико-химических свойств согласно требованиям ГОСТ 6794-2017 и 18 методов оценки ЭС масла. Общая стоимость проведения испытаний с целью допуска к применению ГМ для АТ составляет более 4 000 000 рублей. Разработанный метод с использованием созданного стенда позволяет прогнозировать срок его применения до замены с высокой достоверностью, а также повысить оперативность проведения работ по допуску к применению масел в ГС АТ.

Предложен критерий стабильности вязкости загущающей присадки, позволяющий на основе молекулярно-массовых характеристик полимера выбирать загущающую присадку с более высокой стойкостью к термомеханической деструкции в составе ГМ. По результатам исследований установлена целесообразность применения отечественной полимерной загущающей присадки Максойл ВЗ-011 в составе масла АМГ-10 взамен импортной Viscoplex 7-610, что позволяет увеличить срок применения масла на 60 % и заметно сократить затраты на обслуживание ГС АТ.

Исследования позволяют рекомендовать использование сложных эфиров в качестве основного компонента для высоковязких ГМ. Разработанные отечественные ГМ (ГМ НFD-U 46 для гидротрансформатора, ГМ МГ-32-В для экскаватора)) на основе ДОТФ превосходят импортные продукты (ГМ Renosafe DU 46, Shell Tellus S4 VX 32) по вязкостно-температурным и антиокислительным свойствам, а также по времени эксплуатации в ГС.

## 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.

При этом 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  $P$ ,  $\Delta P$  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 –  $1973 \pm 52$  ч, с IRGAFLO 6000 V –  $1606 \pm 42$  ч, с Viscoplex 7-610 –  $1376 \pm 36$  ч; масла АСГИМ –  $4404 \pm 116$  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 ( $dv_{50}/d\tau$ ) 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 НVI-2 и VHVИ-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 ( $dv_{50}/d\tau$ ) 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 СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

ГС – гидравлическая система

АТ – авиационная техника

ГМ – гидравлическое масло

ТОС – термоокислительная стабильность

ЭС – эксплуатационное свойство

ПМА – полиметакрилаты

ММР – молекулярно-массовое распределение

ДОА – диоктиладипинат

ДОС-Т – диоктилсебацинат

ДБС – дибутилсебацинат

ПАО – полиальфаолефины

ХП – химмотологический процесс

ГСМ — горюче-смазочный материал

Ф-модель – физическая модель

ХС – химмотологическая система

ММ – молекулярная масса

ГПХ – гель-проникающая хроматография

ПБУ – программный блок управления

ПО – программное обеспечение

ПФЭ – полный факторный эксперимент

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. ГОСТ 6794-2017 Масло АМГ-10. Технические условия. – М.: Стандартиформ, 2019. – 10 с.
2. ГОСТ 20734-75 Жидкость рабочая 7-50С-3. Технические условия. – М.: ИПК Издательство стандартов. – 1976. – 7 с.
3. ТУ 38.401-58-57-93 (с изменениями № 1–6) Технические условия. Рабочая жидкость НГЖ-5у. – ФГУП «Стандартиформ». – 2005. – 7 с.
4. Зарубежные масла, смазки, присадки, технические жидкости: Международный каталог. Вып. 3/000 «Издательский центр «Техинформ» МАИ». – М.: «Издательский центр «Техинформ» МАИ». – 2005. – 380 с.
5. Раскин, Ю. Е. Рабочие жидкости для гидравлических систем авиационной техники. Справочное издание / Ю. Е. Раскин, Е. М. Вижанков. – М.: ООО «ПЕРВЫЙ ТОМ», 2017. – 96 с.
6. Пименов, Ю.М. Метод исследования стабильности свойств гидравлических жидкостей для авиационной техники / Ю. М. Пименов, И. В. Поплавский // Мир нефтепродуктов. – 2020. - № 3. – С. 54-63.
7. СТО 07548712-006-2013 Стандарт организации. Авиационное синтетическое гидравлическое масло АСГИМ. – ФГУП «Научно-исследовательский институт стандартизации и унификации», 2013. – 10 с.
8. MIL-PRF-83282D Performance specification. Hydraulic fluid, fire resistant, synthetic hydrocarbon base, metric, NATO code number H-537. The Department of Defense Index of Specifications and Standards (DoDISS), 1997. – 21 p.
9. MIL-PRF-87257B Performance specification. Hydraulic fluid, fire resistant; low temperature, synthetic hydrocarbon base, aircraft and missile. DoD Single Stock Point (DODSSP), 2004. – 17 p.
10. Заявка на участие в конкурсе соискание премии «Авиастроитель года» в номинации: «За создание нового образца» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.aviationunion.ru/Files/Nom\\_6\\_Hurumova.pdf](http://www.aviationunion.ru/Files/Nom_6_Hurumova.pdf) (дата обращения 10.09.2019).

11. ГОСТ 20284-74 Нефтепродукты. Метод определения цвета на колориметре ЦНТ. – М.: Стандартиформ, 1976. – 5 с.
12. ASTM D 1500 Standard test method for ASTM color of petroleum products (ASTM color scale). – ASTM International, 2017. – 16 p.
13. ГОСТ 33-2000 Нефтепродукты. Прозрачные и непрозрачные жидкости. Определение кинематической вязкости и расчет динамической вязкости. – М.: Издательство стандартов, 2001. – 23 с.
14. ASTM D445 Standard test method for kinematic viscosity of transparent and opaque liquids (and calculation of dynamic viscosity). – ASTM International 2019. – 19 p.
15. ГОСТ 4333 Нефтепродукты. Методы определения температур вспышки в воспламенения в открытом тигле – М.: Стандартиформ, 2019. – 17 с.
16. ASTM D92 Standard test method for flash and fire points by Cleveland open cup tester. – ASTM International, 2018. – 11 p.
17. ГОСТ 20287-91 Нефтепродукты. Методы определения температур текучести и застывания. – М.: Издательство стандартов, 1992. – 14 с.
18. ГОСТ 2477-65 Нефть и нефтепродукты. Метод определения содержания воды. – М.: Издательство стандартов, 1966. – 11 с.
19. ГОСТ 6370-83 Нефть, нефтепродукты и присадки. Метод определения механических примесей. – М.: Издательство стандартов, 1984. – 10 с.
20. ГОСТ 10577-78 Нефтепродукты. Методы определения содержания механических примесей. – М.: Издательство стандартов, 1984. – 15 с.
21. ГОСТ 21058-75 Жидкости для авиационных гидросистем и масла авиационные. Методы определения пенообразующих свойств. – М.: Издательство стандартов, 1976. – 6 с.
22. ASTM D892 Standard test method for foaming characteristics of lubricating oils. – ASTM International, 2018. – 10 p.
23. ASTM D91 Standard test method for precipitation number of lubricating oils. – ASTM International, 2019. – 3 p.

24. ГОСТ 1461 Нефть и нефтепродукты. Метод определения зольности. – М.: Издательство стандартов, 1975. – 5 с.
25. ASTM D482 Standard test method for ash from petroleum products. – ASTM International, 2019. – 4 p.
26. ГОСТ 11362-96 Нефтепродукты и смазочные материалы. Число нейтрализации. Метод потенциометрического титрования. – М.: Издательство стандартов, 1997. – 29 с.
27. ASTM D664 Standard test method for acid number of petroleum products by potentiometric titration. – ASTM International, 2018. – 38 p.
28. ГОСТ 19932-99 Нефтепродукты. Определение коксуемости методом Конрадсона. – М.: Издательство стандартов, 1999. – 11 с.
29. ASTM D189 Standard test method for Conradson carbon residue of petroleum products. – ASTM International, 2019. – 7 p.
30. ASTM D524 Standard test method for Ramsbottom carbon residue of petroleum products. – ASTM International, 2019. – 9 p.
31. ГОСТ 9.030 ЕСЗКС. Резины. Методы испытаний на стойкость в ненапряженном состоянии к воздействию жидких агрессивных сред – М.: Стандартиформ, 2008. – 12 с.
32. ГОСТ 32332-2013 Нефтепродукты. Определение коксового остатка по Рамсботтому. – М.: Стандартиформ, 2014. – 31 с.
33. Митягин, В. А. Стабильность гидравлических жидкостей – параметр оценки их применения / В. А. Митягин, И. В. Поплавский, Е. А. Тишина // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. – 2017. – № 3. – С. 24-28.
34. Кондаков, Л. А. Рабочие жидкости и уплотнения гидравлических систем / Л. А. Кондаков. – М.: Машиностроение, 1982. – 215 с.
35. Системы оборудования летательных аппаратов. Учебник для студентов технических учебных заведений / М. Г. Акопов [и др.]; под ред. А. М. Матвеевко, В. И. Бекасова. – М.: Машиностроение, 2005. – 558 с.

36. Самолет Ил-76ТД Руководство по аэродромному обслуживанию. – М.: УНПЛГ ГВС ФСНСТ МТ РФ, 1978. – 206 с.
37. Ан-12. Эталон ГС ГА. Инструкция по технической эксплуатации. Книга 1. Планер, системы самолет, транспортное оборудование. – М.: ЗАО «АНТЦ «ТЕХНОЛОГ», 2001. – 726 с.
38. Ан-22 [Электронный ресурс] // – Режим доступа: Свободная энциклопедия «Википедия»: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Ан-22#> (дата обращения: 09.12.2019).
39. Гурьянов, Е. М. Конструкция и летная эксплуатация самолета Ан-26 / Е. М. Гурьянов. – Ульяновск: УВАУ ГА, 2008. – 48 с.
40. Самолет Ан-32. Руководство по летной эксплуатации. – М.: АСЦ ГосНИИ ГА, 1986. – 656 с.
41. Ан-72 Руководство по технической эксплуатации. Руководство по летной эксплуатации. – М.: Министерство гражданской авиации, 1991. – 335 с.
42. Самолет Ан-124-100. Руководство по технической эксплуатации. – М.: ГП АНТК им. О.К. Антонова, 1993. – 542 с.
43. Бондаренко, А. А. Самолет Ил-76МД: учеб. пособие в 4 ч., ч. 1 / А. А. Бондаренко, Э. А. Рева, А. В. Сучков, А. С. Павлык. – Ульяновск: УВАУ ГА(И), 2014. – 164 с.
44. Самолет Ан-12. Регламент технического обслуживания. Ч. 2. Периодическое техническое обслуживание. – Киев, 1999. – 219 с.
45. Самолет Ан-124-100. Регламент технического обслуживания. Ч. 2. Периодическое техническое обслуживание. – Киев: ГК Антонов, 1999. – 214 с.
46. Спецификация MIL-PRF-5606H Performance specification. Hydraulic fluid, petroleum base; aircraft, missile, and ordnance. The Department of Defense Index of Specifications and Standards (DoDISS), 1994. – 25 p.
47. Спецификация MIL-H-5606H Military specification. Hydraulic fluid, petroleum base; aircraft, missile, and ordnance. The Department of Defense Index of Specifications and Standards (DoDISS), 1963. – 9 p.

48. Спецификация MIL-H-5606E Amendment 1. Military specification. Hydraulic fluid, petroleum base; aircraft, missile, and ordnance. The Department of Defense Index of Specifications and Standards (DoDISS), 1984. – 2 p.
49. Спецификация MIL-H-5606A Military specification. Hydraulic fluid, petroleum base, aircraft and ordnance. The Department of Defense Index of Specifications and Standards (DoDISS), 1957. – 7 p.
50. Корнеев, В. М. Самолет Ил76ТД. Особенности конструкции и летной эксплуатации / В. М. Корнеев. – ISBN 978-5-4483-3855-7, 2018. – 223 с.
51. 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.
52. 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.
53. Комаров, А. А. Надежность гидравлических систем / А. А. Комаров. – М.: «Машиностроение», 1969. – 235 с.
54. Большаков, Г. Ф. Физико-химические основы образования осадков в реактивных топливах / Г. Ф. Большаков. – Л. «Химия», 1972. – 261 с.
55. Башта, Т. М. Гидравлические приводы летательных аппаратов / Т. М. Башта. – М.: Машиностроение, 1967. – 495 с.
56. Аксенов, А. Ф. Применение авиационных технических жидкостей / А. Ф. Аксенов, А. А. Литвинов. – М.: «Транспорт», 1974. – 156 с.
57. Чирков, С. В. Исследование влияния загрязнения рабочей жидкости на работы насосов и гидромоторов. Вопросы надежности гидравлических систем. Вып. III. / С. В. Чирков, Н. Д. Копа. - Изд.: КНИГА, 1964.

58. Тимохов, Р. С. Влияние температуры рабочей жидкости на потери давления в гидравлической системе лесных машин / Р. С. Тимохов, В. А. Бурмистров // Электронный научный журнал «Современные проблемы науки и образования», 2014. – №6. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=16585> (дата обращения: 05.07.2019).

59. Шумилов, И. С. Рабочие жидкости авиационных гидросистем, их свойства / И. С. Шумилов, Л. В. Чурсова, Л. С. Седова // Научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана «Наука и Образование», 2014. – №4. – С. 187-226.

60. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности / В. Н. Хмелев [и др.]. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. – 203 с.

61. Сивченко, И. А. К вопросу о кавитации жидкости в насосах гидравлических систем / И. А. Сивченко, Г. П. Вовк // Гидравлические машины и гидропривод, Республиканский научно-технический сборник. – Киев, 1965. – № 1. – С. 120-129.

62. Kinker, B.G. Automatic transmission fluid shear stability trends and viscosity index improver trends / B. G. Kinker // Proceedings of 98th International Symposium of Tribology of Vehicle Transmissions, Yokohama. – 1998. – P. 5-10.

63. Большакова, Е.А. Разработка полиметакрилатного загустителя для низкозастывающего трансмиссионного масла / Е. А. Большакова, К. В. Ширшин, А. А. Мойкин, А. С. Меджибовский, О. Р. Ожогина, А. В. Шишулина, Л. Г. Лазарева // Пластические массы. – 2020. - № 11. – С. 45-47.

64. Раскин, Ю. Е. Рабочие жидкости для гидросистем современных самолетов / Ю. Е. Раскин // Авиационные материалы. – М.: ОНТИ ВИАМ, 1983. – С. 136-141.

65. Кламанин Д. Смазки и родственные продукты. Синтез. Свойства. Применение. Международные стандарты / Кламанин Д. – Пер. с англ. – М.: Химия, 1988. – 488 с.

66. Peeble J. C.H. Molecular Weight Distributions in Polymers / Peeble J. C.H. – New York : Interscience, 1967.
67. E. Koch, Erdol Kohle 8. 1955. p. 793. The use of viscosity-index improvers and pour-point depressants.
68. Резников, М. Е. Топлива и смазочные материалы для летательных аппаратов / М. Е. Резников. – М.: Воениздат, 1973. – 232 с.
69. Бартенев, Г. М. Трение и износ полимеров / Г. М. Бартенев, В. В. Лаврентьев. – М.: Химия, 1972. – 240 с.
70. 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.
71. Применение рабочей жидкости FH-51 HYDRAUNYCOIL. Производственная инструкция ПИ 1.2. 518-98. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.tupolevservis.ru/product/technical\\_support/fh\\_hudrounicoil.shtml](http://www.tupolevservis.ru/product/technical_support/fh_hudrounicoil.shtml) (дата обращения: 10.10. 2019).
72. Спецификация MIL-PRF-5606G Military specification. Hydraulic fluid, petroleum base; aircraft, missile and ordnance. The Department of Defense Index of Specifications and Standards (DoDISS), 1994. – 17 p.
73. Никитин, Г. А. Влияние загрязненности жидкости на надежность работы гидросистем летательных аппаратов / Г. А. Никитин. – М. : Транспорт, 1969. – 182 с.
74. Шишков, И. Н. Авиационные горюче-смазочные материалы и специальные жидкости / И. Н. Шишков, В. Б. – М.: Транспорт, 1979. – 247 с.
75. Схитладзе, А. Г. Гидравлические и пневматические системы / А. Г. Схитладзе, В. И. Иванов, В. Н. Кареев. – М.: Высшая школа, 2006. – 534 с.
76. Пименов, Ю. М. Проблемы повышения информативности оценки уровня эксплуатационных свойств горюче-смазочных материалов / Ю. М. Пименов, В. А. Середа, А. В. Улитко // Мир нефтепродуктов. – 2019. – № 6. – С.19-27.

77. Гулин Е.И., Якубо Д.П., Сомов В.А. и др. Справочник по горюче-смазочным материалам в судовой технике. – Л.: Судостроение, 1987. – 224 с.
78. Пименов, Ю. М. Основы системного анализа и моделирования в химмотологии: учеб. пособие / Ю. М. Пименов. – СПб.: ВАТТ, 1999. – 268 с.
79. Веников В. А. Теория подобия и моделирования / В. А. Веников – М.: Высшая школа, 1976. – 479 с.
80. Пименов, Ю. М. Планирование эксперимента в задачах химмотологии: учеб. пособие / Ю. М. Пименов. – С-Пб.: ВАТТ, 1994. - 108 с.
81. Хаттон Р. Е. Жидкости для гидравлических систем: пер. с англ. яз. Р. А. Левенто и Е. Л. Пономаревой / Р. Е. Хаттон, под ред. В. В. Вайнштока. – М.: «Химия», 1965. – 364 с.
82. ASTM D4636 Standard test method for corrosiveness and oxidation stability of hydraulic oils, aircraft turbine engine lubricants, and other highly refined oils. – ASTM International, 2017. – 11 p.
83. ASTM D5846 Standard test method for universal oxidation test for hydraulic and turbine oils using the universal oxidation test apparatus. – ASTM International, 2017. – 6 p.
84. ASTM D943 Standard test method for oxidation characteristics of inhibited mineral oils. – ASTM International, 2020. – 11 p.
85. Pat. 20080090296, USA. Method for the determination of the oxidative stability of a lubricating fluid / / Kinker, Bernard, Romaszewski, Raymond. Заявл. 11.10.2006; опубл. 17.04.2008.
86. ГОСТ 20944-75 Жидкости для авиационных гидросистем. Метод определения термоокислительной стабильности и коррозионной активности – М.: Издательство стандартов, 2000. – 7 с.
87. ГОСТ 981-75 Масла нефтяные. Метод определения стабильности против окисления – М.: Издательство стандартов, 1992. – 11 с.

88. Спецификация MIL-H-27601 Military specification. Hydraulic fluid, fare resistant, hydrogenated polyalphaolefin base, high temperature, flight vehicle, metric. The Department of Defense Index of Specifications and Standards (DoDISS), 1993. – 15 p.
89. ASTM D2160 Standard test method for thermal stability of hydraulic fluids. – ASTM International, 1997. – 4 p.
90. ASTM D2070 Standard test method for thermal stability of hydraulic oils. – ASTM International, 2016. – 5 p.
91. СТО 08151164-095-2011 Метод определения стабильности при минусовых температурах. – ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России», 2011. – 5 с.
92. Метод испытаний работоспособности жидкостей в гидросистеме с аксиально-поршневым насосом при положительных температурах в объеме 1-го этапа и квалификационной оценки. – Москва, 2008. – 9 с.
93. Pat. CN203894227 (U) China. Hydraulic oil stability determinator / Wu Xian, Wei Qigui, Tan Yan, Hu Xiuzhi. Guangxi Liugong Premium Grade Lubricating oil Co LTD. Заявл. 04.05.2014; опубл. 22.10.2014.
94. Пат. 2712230 РФ. Способ оценки стабильности гидравлических жидкостей для авиационной техники / Пименов Ю.М., Митягин В.А., Поплавский И.В. – № 2019122792; заявл. 19.07.2019; опубл. 27.01.2020. Бюл. № 3. – 15 с.
95. Пименов, Ю. М. Метод повышения информативности оценки эксплуатационных свойств горюче-смазочных материалов / Ю. М. Пименов, Улитко А. В., Серeda В. А. // Химия и технология топлив и масел. – 2020. – № 2. – С. 39-47.
96. Рудник, Л. Р. Присадки к смазочным материалам. Свойства и применение: пер. с англ. яз. 2-го изд. под ред. А. М. Данилова. – СПб.: ЦОП «Профессия». – 2013. – 928 с.
97. Беллами, Л. Инфракрасные спектры сложных молекул / Л. Беллами. – М.: Иностранная литература, 1963. – 592 с.

98. Пентин, Ю. А. Физические методы исследования в химии / Ю. А. Пентин, Л. В. Вилков. – М.: Мир, 2003. – 683 с.
99. Казанина, Л. А. Применение инфракрасной, ультрафиолетовой и ЯМР-спектроскопии в органической химии / Л. А. Казанина, Н. Б. Куплетская. – М.: Высшая школа, 1971.
100. Иванова, Л. В. ИК-спектрометрия в анализе нефти и нефтепродуктов / Л. В. Иванова, Р. З. Сафиева, В. Н. Кошелев // Вестник Башкирского университета, 2008. Т.13. – № 4. – С. 869-874.
101. Выхованец, Е. П. Исследование эксплуатационных жидкостей автомобиля методом ИК-спектроскопии / Е. П. Выхованец, Л. В. Мосталыгна, Ю. С. Русаков // Вестник Курганского государственного университета. – 2013. – № 2. – С. 65-67.
102. Бровко, Е. А., Разработка экспресс-метода определения показателей качества и состава продуктов нефтехимии на основе регрессионного линейного анализа спектров в ближнем инфракрасном диапазоне / Е. А. Бровко, С. Пурэвсурэн, Р. З. Сафиева, Р. З. Сюняев, О. Г. Чулюков, К. А. Жаринов, А. А. Крашенников // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2004. – № 1. – С. 36-42.
103. Шен Хань. Механизм окисления гидрированного нефтяного базового масла при высокой температуре / Шен Хань, Хинго Чен, Шут Ма, Тьенхуи Джен // Химия и технология топлив и масел. – 2009. – № 4. – С. 30-32.
104. Ахмедов, Р. Л. Применение твердофазной экстракции для определения присадок в автомобильных смазочных маслах методом ГХ/МС / Р. Л. Ахмедов, С. С. Кравцова, К. А. Дычко, И. В. Рамусь // Аналитика и контроль, Т. 23. – 2019. – № 3. – С. 532-538.
105. Темердашев, З. А. Хроматографическое разделение и определение функциональных присадок в турбинном масле / З. А. Темердашев, Ю. А. Иванова, И. А. Колычев, Е. С. Аверина и др. // Журнал аналитической химии, Т. 74. – 2019. – № 12. – С. 922-929.

106. Rudnick, R. L. Synthetics, Mineral Oils, and Bio-Based Lubricants. Chemistry and Technology. / R. L. Rudnick. – Taylor and Francis group, 2020. – 1194 p.
107. Johnson, D. W. Applications of Mass Spectrometric Techniques to the Analysis of Fuels and Lubricants / D. W. Johnson // Mass-Spectrometry: edited by G.Sh. Kamble. Intech Open. – 2017. – P. 208-228.
108. ГОСТ Р 57268.1–2016 Композиты полимерные. Определение средней молекулярной массы и молекулярно-массового распределения полимеров методом эксклюзионной хроматографии. Часть № 1 Основы метода. – М.: Стандартиформ, 2016. – 22 с.
109. Иванова, Ю. А. Определение полимерных функциональных присадок в дизельном топливе методом гель-проникающей хроматографии / Ю. А. Иванова, З. А. Темердашев, И. А. Колычев, Н. В. Киселева // Аналитика и контроль, Т. 25. – 2021. – № 1. – С. 53–62.
110. СТО 08151164-0311-2018 Масло гидравлическое АМГ-10 Определение концентрации загущающей присадки Viscoplex 7–610 методом инфракрасной спектроскопии. – ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России», 2019. – 8 с.
111. Пименов, Ю. М. Методы испытания горюче-смазочных материалов / Ю. М. Пименов, Д. А. Маньшев, Р. В. Швыков // Труды 25 ГосНИИ МО РФ. – 2018. – № 58. – С. 231-237.
112. Санников, Р.Х. Теория подобия и моделирования. Планирование инженерного эксперимента: учеб. пособие / Р. Х. Санников. – Уфа, 2010. – 271 с.
113. 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». Нефть и газ: технологии и инновации: материалы Национальной научно-практической конференции. В 3 томах. Том 2. – 2020. – 216 с.

114. 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.
115. Башта, Т. М. Объемные гидравлические приводы / Т. М. Башта. – М.: Машиностроение, 1969. – 628 с.
116. Пименов, Ю. М. Методы моделирования химмотологических процессов: учеб. пособие / Ю. М. Пименов. – С-Пб.: ВАТТ, 2000. – 179 с.
117. Рузинов, Л. П. Статистические методы оптимизации химических процессов / Л. П. Рузинов. – М.: «Химия», 1972. – 200 с.
118. Пат. 2693053 РФ. Установка для испытания гидравлических жидкостей / Митягин В.А., Калинин А.Е., Улитко А.В., Вижанков Е.М., Поплавский И.В. – № 2018141121; заявл. 22.11.2018; опубл. 01.07.2019. Бюл. № 19. – 18 с.
119. А. с. 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. – № 2019664462; заявл. 14.11.2019; опубл. 26.12.2019.
120. 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.
121. 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.
122. 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.

123. Саутин, С. Н. Планирование эксперимента в химии и химической технологии / С. Н. Саутин. – Л.: «Химия», 1975. – 48 с.

124. Ахназарова, С. Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии: учеб. пособие для хим.-технол. спец. вузов. / С. Л. Ахназарова, В. В. Кафаров. – М.: Высш. шк., 1985. – 327 с.

125. Христофорова, И. А. Проведение активного эксперимента при разработке состава шихты для производства керамических изделий. Методические указания к лабораторным занятиям по дисциплине «Статические методы исследования шихт в стекольной промышленности» / И. А. Христофорова. – Владимир, 2000. – 24 с.

126. 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.

127. Петрухина, Н. Н. Гидрированные сополимеры стирола и диенов как загущающие присадки к смазочным маслам (обзор) / Н. Н. Петрухина, О. Н. Цветков, А. Л. Максимов // Журнал прикладной химии. – 2019. – Т. 92. – Вып. 9. – С. 1091–1103.

128. Тарасевич, Б. Н. ИК-спектры основных классов органических соединений. Справочные материалы / Б. Н. Тарасевич. – Москва, 2012. – 54 с.

129. Тарасевич, Б. Н. Основы ИК-спектроскопии с преобразованием Фурье. Подготовка проб в ИК-спектроскопии / Б. Н. Тарасевич. – Москва, 2012. – 22 с.

130. Красная, Л. В. Определение загущающей присадки «Максойл ВЗ-011» в гидравлических маслах методами ИК-спектроскопии и ВЭЖХ / Л. В. Красная, А. В. Чернышева, П. А. Гаврилов, В. Д. Зуева, Г. М. Балак, О. Ю. Кузнецова, А. Н. Приваленко // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 12. – С. 68-73.

Приложение А  
(обязательное)

Сравнительная характеристика гидравлических масел для гидравлических систем авиационной техники и перечень методов определения показателей стабильности гидравлических масел и их краткое описание

Таблица А.1 – Значения показателей качества масла АМГ-10 в объеме квалификационных норм и его зарубежных аналогов по спецификации MIL-H-5606F

Наименование показателей		Гидравлические масла			
		АМГ-10	Mobil Aero HF	Royco 756	HYDRAU-NUCOIL FH 51
1	Внешний вид	Прозрачная однородная жидкость красного цвета	Прозрачная однородная жидкость красного цвета	Прозрачная однородная жидкость красного цвета	Прозрачная однородная жидкость красного цвета
2	Плотность при 20 °С, г/см <sup>3</sup>	Не более 0,850	0,856	0,877	0,864
3	Вязкость кинематическая, мм <sup>2</sup> /с, при температуре: 150 °С 125 °С 50 °С минус 50 °С минус 60 °С	Не менее 2,5 Не менее 3,3 Не менее 10,0 Не более 1250 Не более 4100	3,07 3,92 11,21 1008 3747	3,02 3,83 11,29 1032 3560	3,23 4,07 11,32 1028 3812
4	Кислотное число, мг КОН/1 г	Не более 0,03	0,03	0,02	0,02
5	Содержание ВКЦ	Отсутствие	Отсутствие	Отсутствие	Отсутствие
6	Содержание воды, %	Отсутствие	Отсутствие	Отсутствие	Отсутствие
7	Температура застывания, °С	Не выше минус 70	Минус 70	Минус 68	Минус 70
8	Температура самовоспламенения, °С	Не ниже 285	315	315	335

## Продолжение таблицы А.1

9	Температура вспышки, °С	Не ниже 92	102	90	97
10	Испаряемость за 5 часов нагрева, потеря массы, %, при температуре: 125 °С 150 °С	Не более 24,0	8,0	23,8	22,3
		Не более 32,0	28,0	30,0	29,8
11	Стабильность при минусовых температурах:				
	внешний вид	Однородная прозрачная жидкость без расслоения и осадка, цвет без изменения	Соответствует	Соответствует	Соответствует
	кислотное число, мг КОН/1 г	Не более 0,03	0,03	0,02	0,03
	кинематическая вязкость, мм <sup>2</sup> /с, при 50 °С	Не менее 10,0	11,18	11,29	11,28

## Продолжение таблицы А.1

12	Термоокислительная стабильность и коррозионная активность, испытание 100 часов, 125 °С, воздух:				
	показатель коррозии, мг/см <sup>2</sup>				
	магниевый сплав МЛ-5	Не более ±0,1 для всех металлов, сплавов и покрытий	0,00	-0,02	0,00
	сталь 30ХГСА		0,00	-0,01	+0,01
	медь М-1		+0,01	-0,02	-0,01
	серебро		-0,01	-0,01	+0,01
	сталь хромированная		+0,02	-0,01	0,01
	сталь кадмированная		+0,01	-0,02	-0,01
	бронза БРОФ 7-0,2		-0,01	-0,03	-0,02
	бронза БРОС 10-10		+0,01	-0,05	-0,05
	сталь оцинкованная		0,00	-0,02	0,00
	латунь Л-63		0,00	-0,02	0,00
	изменение кислотного числа, мг КОН/1 г		Не более +0,12	+0,03	0,00
	изменение вязкости в % при температуре:				
50 °С	Не более ±8,0	+3,6	+4,0	+3,5	
минус 50 °С	Не более ±8,0	+5,6	+4,0	+2,7	

## Продолжение таблицы А.1

13	Термоокислительная стабильность и коррозионная активность, испытание 50 часов, 150 °С, азот: показатель коррозии, мг/см <sup>2</sup>				
	магниевый сплав МЛ-5	Не более ±0,1 для всех металлов, сплавов и покрытий	+0,03	-0,01	+0,02
	сталь 30ХГСА		-0,01	+0,01	+0,01
	медь М-1		-0,01	-0,01	-0,02
	алюминиевый сплав Д-16		+0,02	-0,01	-0,01
	серебро		-0,02	+0,01	-0,01
	сталь хромированная		-0,01	-0,01	-0,01
	сталь кадмированная		-0,02	0,00	-0,01
	бронза БРОФ 7-0,2		+0,02	-0,02	-0,03
	бронза БРОС 10-10		0,00	+0,01	-0,01
	сталь оцинкованная		0,00	+0,01	-0,01
	латунь Л-63		+0,01	+0,02	0,00
	сталь оксидно-фосфатированная		-0,01	+0,01	-0,01
	изменение кислотного числа, мг КОН/1 г	Не более +0,12	+0,04	+0,01	0,00
изменение вязкости в % при температуре:					
50 °С	Не более ±8,0	+3,6	+4,5	+1,5	
минус 50°С	Не более ±8,0	+6,3	+4,0	+1,2	
14	Гидролитическая устойчивость: внешний вид жидкости	Однородная прозрачная жидкость без осадка и смол	Соответствует	Соответствует	Соответствует
	изменение кислотного числа, мг КОН/1 г	Не более +0,02	+0,01	+0,01	+0,01
	реакция водного слоя по индикатору	Нейтральная	Нейтральная	Нейтральная	Нейтральная

## Продолжение таблицы А.1

	показатель коррозии меди М-1, мг/см <sup>2</sup>	Не более ±0,1	-0,01	-0,02	-0,01
	изменение вязкости в % при температуре 50 °С	Не более ±5,0	+1,0	+1,0	+1,5
15	Смазочные свойства на четырехшариковой машине трения. противоизносные свойства: диаметр пятна износа при нагрузке 196 Н, мм				
	при 20 °С	Не более 0,6	0,41	0,63	0,62
	при 100 °С	Не более 0,8	0,48	0,82	0,83
	противозадирные свойства при 100 °С: диаметр пятна износа, мм	Не более 1,45	1,41	0,79	0,78
	работа трения, кДж	Не более 9,0	5,8	6,83	6,63
16	Устойчивость к механической нагрузке на ультразвуковой установке: уменьшение вязкости, %, за время в минутах:				
	15	Не более 30	15,8	22,1	21,8
	30	Не более 38	24,9	26,7	26,2
	50	Не более 43	29,8	34,2	33,6
17	Пенообразующие свойства: высота столба пены, мм	Не более 15	6	12	11
	время разрушения пены, с	Не более 60	5	59	57

## Продолжение таблицы А.1

18	Воздействие резины: характеристики резин В-14-1 и ИРП-1353 после испытаний при 100 °С, 100 часов				
	изменение массы, %				
	В-14-1	Не более 6,0	8,0	7,5	6,8
	ИРП-1353	Не более 6,0	7,97	6,5	8,93
	изменение объема, %				
	В-14-1	Не более 10,0	12,44	11,8	10,14
	ИРП-1352	Не более 10,0	13,93	10,5	17,26
	напряжение при сжатии, кг/см <sup>2</sup>				
	В-14-1	6,93	14,1	10,4	7,32
	ИРП-1353	8,06	7,9	8,3	7,55
	остаточная деформация при сжатии, %				
	В-14-1	Не более 53	16	30	37
	ИРП-1353	40	5	40	36
	твердость по «ШОР», у.е.				
В-14-1	77	76	78	79	
ИРП-1353	75	67	76	80	

Таблица А.2 – Методы определения показателей стабильности гидравлических масел

Наименование метода	НД	Сущность метода
Нефтепродукты. Метод определения цвета на колориметре ЦНТ	ГОСТ 20284	Визуальное сравнение цвета нефтепродукта или его раствора с цветными стеклянными светофильтрами
Стандартный метод определения цвета нефтепродуктов по ASTM (цветовая шкала ASTM)	ASTM D 1500	Визуальное определение цвета различных нефтепродуктов по цветовой шкале ASTM

## Продолжение таблицы А.2

Нефтепродукты. Прозрачные и непрозрачные жидкости. Определение кинематической вязкости и расчет динамической вязкости	ГОСТ 33	Измерение калиброванным стеклянным вискозиметром времен истечения, в секундах, определенного объема испытуемой жидкости под влиянием силы тяжести при постоянной температуре
Стандартный метод определения кинематической вязкости прозрачных и непрозрачных жидкостей (и расчет динамической вязкости)	ASTM D 445	Определение кинематической вязкости жидких нефтепродуктов, прозрачных и непрозрачных жидкостей путем измерения времени истечения определенного объема жидкости под действием силы тяжести через калиброванный стеклянный капиллярный вискозиметр. Динамическую вязкость вычисляют как произведение кинематической вязкости жидкости на ее плотность
Нефтепродукты. Методы определения температур вспышки и воспламеня в открытом тигле	ГОСТ 4333	Нагревание пробы нефтепродукта в открытом тигле с установленной скоростью до тех пор, пока не произойдет вспышка паров нефтепродукта над его поверхностью от зажигательного устройства и пока при дальнейшем нагревании не произойдет загорание продукта с продолжительностью горения не менее 5 с.
Стандартный метод определения температуры вспышки и температуры воспламенения нефтепродуктов в открытом тигле Кливленда	ASTM D 92	Определение температуры вспышки и температуры воспламенения нефтепродуктов ручным или автоматическим методом в приборе с открытым тиглем Кливленда (Cleveland). Метод применим к нефтепродуктам с температурой вспышки выше 79 °С и ниже 400 °С, за исключением жидких топлив
Нефтепродукты. Методы определения температур текучести и застывания	ГОСТ 20287, метод Б	Предварительное нагревание образца испытуемого нефтепродукта с последующим охлаждением его с заданной скоростью до температуры, при которой образец остается неподвижным
Нефть и нефтепродукты. Метод определения содержания воды	ГОСТ 2477	Нагрев пробы нефтепродукта с нерастворимым в воде растворителем и измерении объема сконденсированной воды

## Продолжение таблицы А.2

Нефть, нефтепродукты и присадки. Метод определения механических примесей	ГОСТ 6370	Фильтрация испытуемого нефтепродукта в предварительным растворением медленного фильтрующихся продуктов в бензине или толуоле, промывании осадка на фильтре растворителем с последующим высушиванием и взвешиванием
Нефтепродукты. Методы определения содержания механических примесей	ГОСТ 10577	Определение массы механических примесей, задерживаемых мембранными фильтрами при фильтрации через них испытуемого нефтепродукта (для анализа н/п, содержащих более 0,1 % нерастворенной воды)
Жидкости для авиационных гидросистем и масла авиационные. Метод определения пенообразующих свойств	ГОСТ 21058	Диспергирование газа с испытуемым продукте при 25 или 95 °С и определении высоты столба пены и времени его разрушения при заданном расходе газа
Стандартный метод испытания для определения пенообразующих свойств смазочных масел	ASTM D 892	Определение пенообразующих свойств смазочных масел при 24 и 93,5 °С. Описаны эмпирические методы определения свойств пены и устойчивости пены.
Стандартный метод определения числа осаждения смазочных масел	ASTM D 91	Определение числа осаждения как путем измерения количества нерастворимого в лигроине материала
Нефть и нефтепродукты. Метод определения зольности	ГОСТ 1461	Сжигание массы испытуемого нефтепродукта и прокаливании твердого остатка до постоянной массы
Стандартны метод определения золы в нефтепродуктах	ASTM D 482	Метод испытаний охватывает определение золы в диапазоне от 0,010 до 0,180 % масс., применяется для работающих масел и масел, не содержащих присадки
Нефтепродукты и смазочные материалы. Число нейтрализации. Метод потенциометрического титрования	ГОСТ 11362	Растворение испытуемого нефтепродукта в определенном растворителе и титрование смеси потенциометрическим спиртовым раствором гидроокиси калия или соляной кислоты при использовании стеклянного, каломельного (хлорсеребряного) электродов. Строят график зависимости показаний измерительного прибора от объемов титрующего раствора, выбирают только четкие точки перегиба. Если нет точных точек, принимают показания для неводных кислотных и щелочных буферных растворов

## Продолжение таблицы А.2

Стандартный метод определения кислотного числа нефтепродуктов с помощью потенциометрического титрования	ASTM D 664	Способы определения компонентов кислотного характера в нефтепродуктах. Используется для смазочных масел, полностью или частично растворимых в смесях толуола и пропанола-2 (метод А) и для биодизельных топлив с пониженной кислотностью с помощью автотитратора, определяющего конечную точку титрования (метод Б)
Нефтепродукты. Определение коксуемости методом Конрадсона	ГОСТ 19932	Взвешенную массу нефтепродукта помещают в тигель и подвергают выпариванию и пиролизу нефтепродукта. Остаток подвергают реакциям распада и коксования при интенсивном нагревании, затем тигель с углеродистым остатком охлаждают в эксикаторе и взвешивают
Стандартный метод определения коксуемости методом Конрадсона	ASTM D 189	Метод предназначен для определения количества углеродного остатка после испарения и пиролиза масла, характеризующего склонность нефтепродукта к коксообразованию. Метод применим к нелетучим нефтепродуктам
Нефтепродукты. Определение коксового остатка по Рамсботтому	ГОСТ 32332	Образец взвешивают в специальной стеклянной колбе с капиллярным отверстием, затем помещают в нагревательный блок при температуре 550 °С (при этой температуре все летучие вещества испаряются из колбы с разложением или без него, оставшийся тяжелый остаток подвергают крекингу и коксованию). В конце нагревания кокс или коксовый остаток подвергают дальнейшему медленному разложению или небольшому окислению, обусловленному попаданием воздуха в колбу. После установленного периода нагревания удаляют колбу из нагревательного блока, охлаждают в эксикаторе и снова взвешивают. Вычисляют остаток в процентах от первоначальной массы образца и регистрируют как коксовый остаток по Рамсботтому

## Продолжение таблицы А.2

Стандартный метод определения коксового остатка по Рамсботтому	ASTM D 524	Метод предназначен для определения относительной склонности к коксообразованию продуктов процессов пиролиза и испарения
Стандартный метод определения антикоррозионной стойкости ингибированного минерального масла в присутствии воды	ASTM D 665	Метод предназначен для оценки антикоррозионной стойкости ингибированных минеральных масел в присутствии воды.
Стандартный метод определения коррозионной стойкости нефтепродуктов на медной пластинке	ASTM D 130	Метод предназначен для определения коррозионной стойкости нефтепродуктов с давлением паров не более 124 кПа при 37,8 °С.
Единая система защиты от коррозии и старения. Резины. Методы испытания на стойкость в ненапряженном состоянии к воздействию жидких агрессивных сред	ГОСТ 9.030	Сущность метода заключается в том, что образцы в ненапряженном состоянии подвергают воздействию сред при заданных температуре и продолжительности и определяют их стойкость к указанному воздействию по: изменению массы, объема или размеров (метод А); массе веществ, экстрагированных средой из образцов (метод Б); изменению значения одного или нескольких показателей физико-механических свойств условной прочности при растяжении, относительного удлинения при разрыве, условного напряжения при заданном удлинении, твердости по Шору А или в единицах IRHD, сопротивление раздиру и т.п. (метод В).

Приложение Б  
(обязательное)

Образец протокола по результатам измерения молекулярной массы  
образцов масла АМГ-10 методом гель-проникающей хроматографии на  
хроматографе Agilent 1260 Infinity II

**Agilent GPC/SEC Software  
Sample GPC Analysis Report**



**Agilent Technologies**

**СКР-АМГ-10 #1**

**Workspace Details**

Workspace name AW april 2021  
Location C:\ProgramData\Agilent Technologies\GPC\Workspaces\AW april 2021\  
Comments  
Created by Lab at 10:35:35 AM on Thursday, April 29, 2021

**Sample Properties**

Sample name СКР-АМГ-10 #1  
File name ICF\_12\_8\_2021-0001.sample  
Collected by Lab at 11:46:09 AM on Wednesday, December 8, 2021  
Instrument name Instrument 1

**Column Calibration Details**

Name Narrow (mini columns, detectors successivly connected)  
Created by Lab at 5:55:19 PM on Thursday, April 29, 2021  
Last modified by Lab at 6:33:01 PM on Wednesday, July 7, 2021  
Comments GPC Column Calibration created Thursday, April 29, 2021 by Lab  
GPC Column Calibration amended Thursday, April 29, 2021 by Lab  
GPC Column Calibration amended Friday, April 30, 2021 by Lab  
GPC Column Calibration amended Friday, April 30, 2021 by Lab  
GPC Column Calibration amended Friday, April 30, 2021 by Lab  
GPC Column Calibration amended Friday, April 30, 2021 by Lab  
GPC Column Calibration amended Friday, April 30, 2021 by Lab  
GPC Column Calibration amended Friday, April 30, 2021 by Lab  
GPC Column Calibration amended Friday, April 30, 2021 by Lab  
GPC Column Calibration amended Friday, April 30, 2021 by Lab  
GPC Column Calibration amended Wednesday, July 7, 2021 by Lab  
GPC Column Calibration amended Wednesday, July 7, 2021 by Lab  
GPC Column Calibration amended Wednesday, July 7, 2021 by Lab  
GPC Column Calibration amended Wednesday, July 7, 2021 by Lab  
GPC Column Calibration amended Wednesday, July 7, 2021 by Lab

Calibration Type	Narrow Standard	Curve Fit Used	1
Calibration Curve	$y = - 0.3491x + 12.98$		
High Limit MW RT (mins)	17.63333	Low Limit MW RT (mins)	28.31667
High Limit MW (g/mol)	6570000	Low Limit MW (g/mol)	1140
Flow Rate Marker Name		Flow Marker RT (mins)	0.00000
K (Input) ((10e-5) dL/g)	16.100		
Alpha (Input)	0.701		
Residual Sum Of Squares	0.00829851	Corrected Sum Of Squares	19.6073
Coeff. Of Determination	0.999577	Standard Y Error Estimate	0.0252655
Linear Correlation Coeff	-0.999788		

**Column Calibration Data Points**

**Analyst:** ..... **Date:** .....  
**Checked By:** ..... **Date:** .....

Agilent GPC/SEC Software  
Sample GPC Analysis Report



Point	Peak Max RT (mins)	MW	Log MW	Point in Use?	Percent Error
1	17.63333	6570000	6.82	Yes	-1.88
2	18.30000	3507000	6.54	Yes	-11.68
3	18.48333	3187000	6.50	Yes	-6.05
4	18.96667	2189000	6.34	Yes	-4.69
5	19.18333	1956000	6.29	Yes	1.57
6	19.95000	1074000	6.03	Yes	3.21
7	20.43333	729500	5.86	Yes	3.38
8	20.68333	602000	5.78	Yes	4.23
9	21.00000	482000	5.68	Yes	7.27
10	21.71667	269500	5.43	Yes	6.78
11	23.38333	67600	4.83	Yes	2.67
12	24.53333	27060	4.43	Yes	3.54
13	25.76667	9820	3.99	Yes	1.38
14	27.28333	2790	3.45	Yes	-2.56
15	28.31667	1140	3.06	Yes	-9.37

#### Processing Parameters

Method	Last modified by Lab at 10:35:34 AM on Thursday, April 29, 2021
Using Flow Rate Correction	No
Mark-Houwink K ((10e-5) dL/g)	16.100
Mark-Houwink Alpha	0.701
Concentration Detector Used in Analysis	RI
Injection volume (µL)	50.00
Flow rate (mL/min)	0.30

#### MW Ranges Method

Calculate MW Ranges No

#### Percentage Fractions Method

Calculate Percentage Fractions No

### Results

Analysed by Lab at 2:52:44 PM on Wednesday, December 8, 2021  
Comments

#### Molecular Weight Averages

Peak	Mp (g/mol)	Mn (g/mol)	Mw (g/mol)	Mz (g/mol)	Mz+1 (g/mol)	Mv (g/mol)	PD
Peak 1	99670	67492	130444	221913	326527	207596	1.933

#### Peak Information

	Start (mins)	End (mins)
Baseline region 1	15.11667	15.30000
Baseline region 2	27.61667	27.75000
Peak 1	20.01667	25.78333

#### Peak Trace Information

Peak	Trace	Peak Max RT (mins)	Peak Area (mV.s)	Peak Height (mV)
Peak 1	VS DP	22.51667	262.890	2.442
Peak 1	VS IP	21.93333	42.618	-0.750
Peak 1	RI	22.86667	195.600	1.280
Peak 1	LS 90°	22.03333	909.539	6.563
Peak 1	LS 15°	22.31667	270.236	1.993

Analyst: .....

Date: .....

Checked By: .....

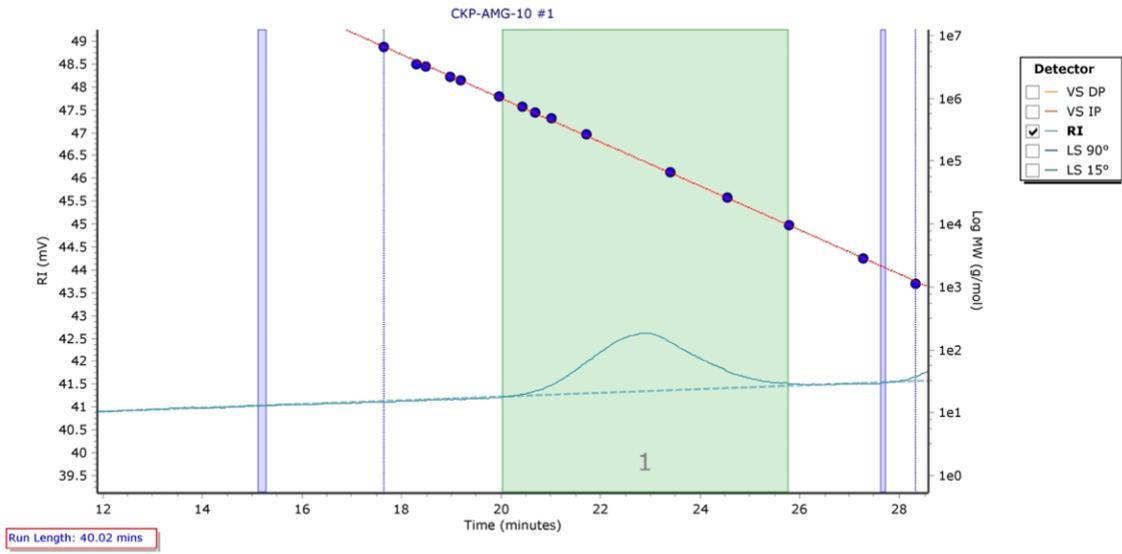
Date: .....

Agilent GPC/SEC Software  
Sample GPC Analysis Report

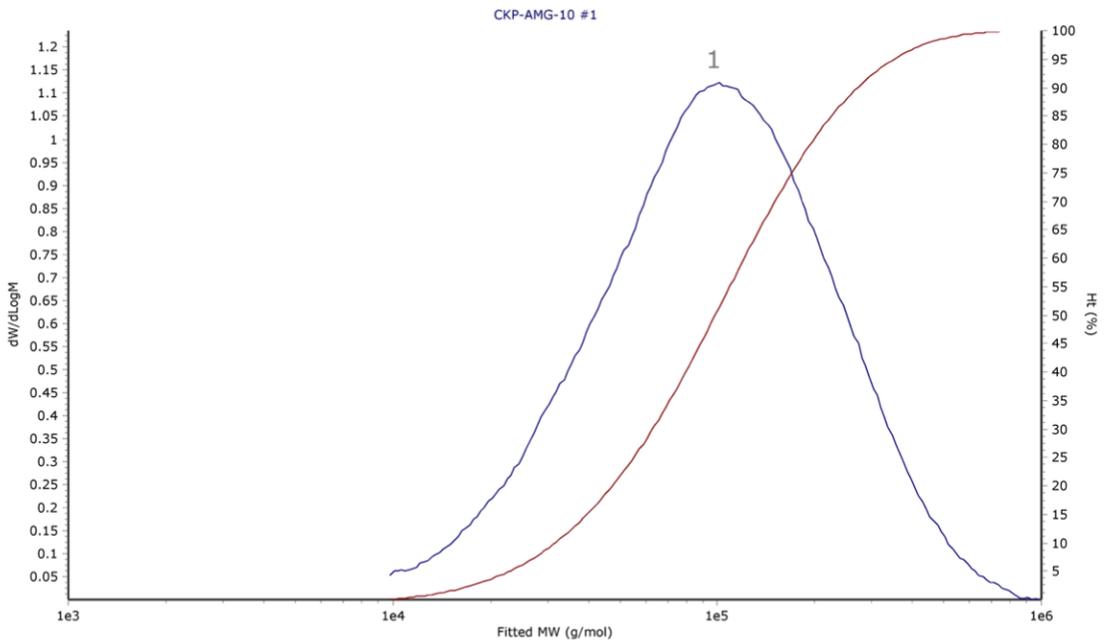


Agilent Technologies

Chromatogram Plot



Distribution Plot



Analyst: .....

Date: .....

Checked By: .....

Date: .....

Приложение В  
(Обязательное)

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ  
№ 2019667726

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**СВИДЕТЕЛЬСТВО**

о государственной регистрации программы для ЭВМ

**№ 2019667726**

**«Программа для оценки стабильности свойств рабочих жидкостей для гидравлических систем»**

Правообладатель: *Федеральное автономное учреждение «25 Государственный научно-исследовательский институт химмотологии Министерства обороны Российской Федерации» (RU)*

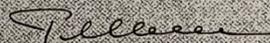
Авторы: *Митягин Валерий Александрович (RU), Поплавский Игорь Витальевич (RU), Вижанков Евгений Михайлович (RU), Калинин Александр Евгеньевич (RU), Цветков Кирилл Владимирович (RU), Сафронова Елена Игоревна (RU)*

Заявка № **2019664462**

Дата поступления **14 ноября 2019 г.**

Дата государственной регистрации  
в Реестре программ для ЭВМ **26 декабря 2019 г.**

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев

Приложение Г  
(Обязательное)

Акт реализации результатов научных исследований диссертационной работы

УТВЕРЖДАЮ

Директор

ООО «ИИИ КВАЛИТЕТ»



В.В. Дементьев

2022 г.

А К Т

реализации результатов  
научных исследований диссертационной работы  
ГУРОВОЙ Елены Игоревны

Результаты исследований Гуровой Е.И. по разработке методики прогнозирования стабильности свойств гидравлических масел для авиационной техники:

разработан гидравлический стенд, который является физической моделью гидравлической системы авиационной техники (Патент № 2693053 РФ). Управление гидравлическим стендом реализовано с помощью программы для оценки стабильности свойств рабочих жидкостей для гидравлических систем (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019667726);

обоснованы условия подбора химмотологического процесса изменения эксплуатационных свойств гидравлического масла при применении в гидравлической системе авиационной техники, учитывающие параметры работы гидравлической системы и ее конструктивные особенности;

получены зависимости и закономерности изменения кинематической вязкости при 50 °С и кислотного числа масла АМГ-10 в гидравлической системе авиационной техники в рабочем диапазоне значений температуры (60–90 °С), давления (16–21 МПа) и продолжительности испытаний (30–60 ч) в виде полиномов второй степени;

установлена корреляционная зависимость между временем работы масла АМГ-10 в гидравлической системе самолета Ил-76 и

продолжительностью испытаний на стенде в режиме максимальной нагрузки ( $P=21$  МПа,  $T=120$  °С) с коэффициентом корреляции, равным 0,99;

разработан стендовый метод прогнозирования срока смены гидравлического масла при его эксплуатации в гидравлической системе авиационной техники;

проведены исследования, характеризующие устойчивость к деструкции загущающих присадок, вовлекаемых в состав масла АМГ-10 отечественного производства. Установлено, что:

- стабильность кинематической вязкости масла АМГ-10 с загущающей присадкой Максойл ВЗ-011 выше на 7% чем с Viscoplex 7-610. Химическая природы базовой основы не влияет на устойчивость масла к деструкции. Изменения кислотного числа находятся в пределах сходимости;

- методом гель-проникающей хроматографии получено, что отечественная вязкостная присадка Максойл ВЗ-011 в составе масла АМГ-10 на 30 % устойчивее к деструкции, чем аналогичная зарубежная присадка Viscoplex 7-610;

- предложен критерий стабильности загущающей присадки, характеризующий устойчивость к механической деструкции масла при его применении в гидравлической системе авиационной техники, равный отношению изменения среднемолекулярной массы к степени полидисперсности загустителя ( $dM_w/dPD$ );

технико-экономическая эффективность новой методики прогнозирования стабильности свойств гидравлических масел с применением гидравлического стенда заключается в повышении информативности и достоверности результатов при квалификационной оценке гидравлических масел, сокращается время проведения стендовых испытаний до 50 %, снижаются затраты до 20 %.

ООО «НПП КВАЛИТЕТ» является производителем масла авиационного АМГ-10. Проблема оперативной оценки технических характеристик масла при изменении состава посредством проведения испытаний на стендовом

оборудовании крайне актуальна. Разработка и создание новых стендов, позволяющих оценить качественные характеристики масел в условиях, коррелирующих с эксплуатационными испытаниями, позволяет в короткий срок провести испытания нового масла. Это дает возможность принимать оперативные решения и сократить время и расходы на допуск к применению в авиационной технике смазочных материалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Особенно актуальны результаты в настоящее время для принятия оперативных решений по замене импортных компонентов на отечественные в рамках реализации программы импортозамещения для обеспечения бесперебойного производства смазочных материалов для разных видов техники (авиационной, военной и специальной).

Результаты экспериментальных исследований по методике прогнозирования стабильности свойств гидравлических масел научно обоснованы и разработаны **рекомендации**:

внедрить методику прогнозирования стабильности свойств гидравлических масел в квалификационную программу испытаний для масла АМГ-10;

рассмотреть возможность вовлечения отечественной присадки Максойл ВЗ-011 в производство масла АМГ-10 на ООО «НПП КВАЛИТЕТ» взамен импортной Viscoplex 7-610.

**Председатель:**

Директор, к.т.н.  А.В. Дементьев

**Члены комиссии:**

Зам. директора по маркетингу, к.х.н.  А.А. Мойкин

1-й Зам. директора по производству  А.И. Гуцин

Главный технолог  Е.А. Коблов