

ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ СМАЗОЧНЫЕ МАСЛА ДЛЯ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ



Владимир Иванович Бабкин, генеральный директор ФГУП ЦИАМ им. П.И. Баранова, к.т.н.
Анатолий Александрович Алексахин, генеральный директор НИИ стандартизации и унификации, к.э.н.,
Леонид Самойлович Яновский, начальник отдела ФГУП ЦИАМ им. П.И. Баранова, д.т.н.
Сергей Васильевич Дунаев, начальник департамента НИИ стандартизации и унификации, к.в.н.,
Аида Федоровна Хурумова, начальник центра РЖСМ НИИ стандартизации и унификации, к.т.н.

Рассмотрено совершенствование эксплуатационных свойств смазочных масел для авиационных ГТД. Описаны достоинства и недостатки существующих отечественных смазочных масел для авиационных ГТД. Рассмотрены масла для турбореактивных, турбовальных и турбовинтовых авиационных двигателей. Приведено сравнение новых перспективных отечественных масел, разработанных ведущими предприятиями отрасли, с существующими отечественными и зарубежными аналогами.

The article describes the improvement of performance characteristics of lubricating oils for aircraft gas turbine engines. It was found advantages and disadvantages of the existing domestic lubricating oils for aviation gas turbine engines. The article describes oils for turbojet, turboshaft and turboprop aircraft engines. It was carried comparison of new and promising domestic oil, developed by leading companies in the sector, with the existing domestic and foreign counterparts.

Ключевые слова: масла для авиационных ГТД, авиационные масла, авиационные газотурбинные двигатели.
Keywords: oils for aviation gas turbine engines, aviation oil, aircraft gas turbine engines.

Современные авиационные газотурбинные двигатели (ГТД), как известно, характеризуются жесткими условиями работы: большие скорости вращения роторов турбокомпрессора - 12 000...20 000 мин⁻¹, высокие контактные напряжения на зубьях редукторов и коробки приводов агрегатов (КПА) - до 160 кг/мм², высокие температуры элементов конструкции в 300 °С и выше [1].

К смазочным маслам для современных авиационных ГТД предъявляются весьма жесткие требования, что обусловлено необходимостью обеспечивать надежную эксплуатацию на всех режимах работы двигателя в широком диапазоне температур. Масла для авиационных ГТД предназначены для обеспечения как надежного смазывания всех узлов двигателя, так и для охлаждения и отвода абразивных частиц износа узлов трения. Масла должны обладать хорошими вязкостно-температурными свойствами, низкой температурой застывания, высокой термической и термоокислительной стабильностью, высокими температурами вспышки и самовоспламенения, минимальными испаряемостью и вспениваемостью, а также быть инертными к конструкционным материалам [2, 3].

Из всех требований к качеству смазочных масел для авиационных ГТД наиболее важным является требование его высокой термостабильности, характеризующей способность масла сохранять на необходимом уровне физико-химические и эксплуата-

ционные свойства при длительной работе в двигателе без образования недопустимого количества отложений продуктов окисления масла на горячих деталях и узлах, омываемых маслом в ходе эксплуатации. Анализ перспектив развития авиационных ГТД показал, что в двигателях V-VI поколений (рис. 1) уровень рабочих температур масла может достигать 240...250 °С.

Исходя из условий работы двигателей и агрегатов в составе летательных аппаратов [1], масла для авиационных ГТД разделяют на три группы:

- масла для турбореактивных двигателей (ТРД) - теплонапряженных ГТД;
- масла и маслосмеси для турбовинтовых двигателей (ТВД), а также других ГТД непрямой реакции;
- масла для ГТД и редукторов вертолетов - масла этой группы используют в основном в турбовальных двигателях (ТВАД) силовых установках вертолетов;

Отметим, что ранее деление масел по типам двигателей считалось условным, существовало мнение, что во всех ГТД удобнее использовать единую марку масла, обладающую высокими эксплуатационными свойствами. По современным представлениям, решающую роль при определении возможности применения того или иного масла играют условия эксплуатации ГТД, в част-

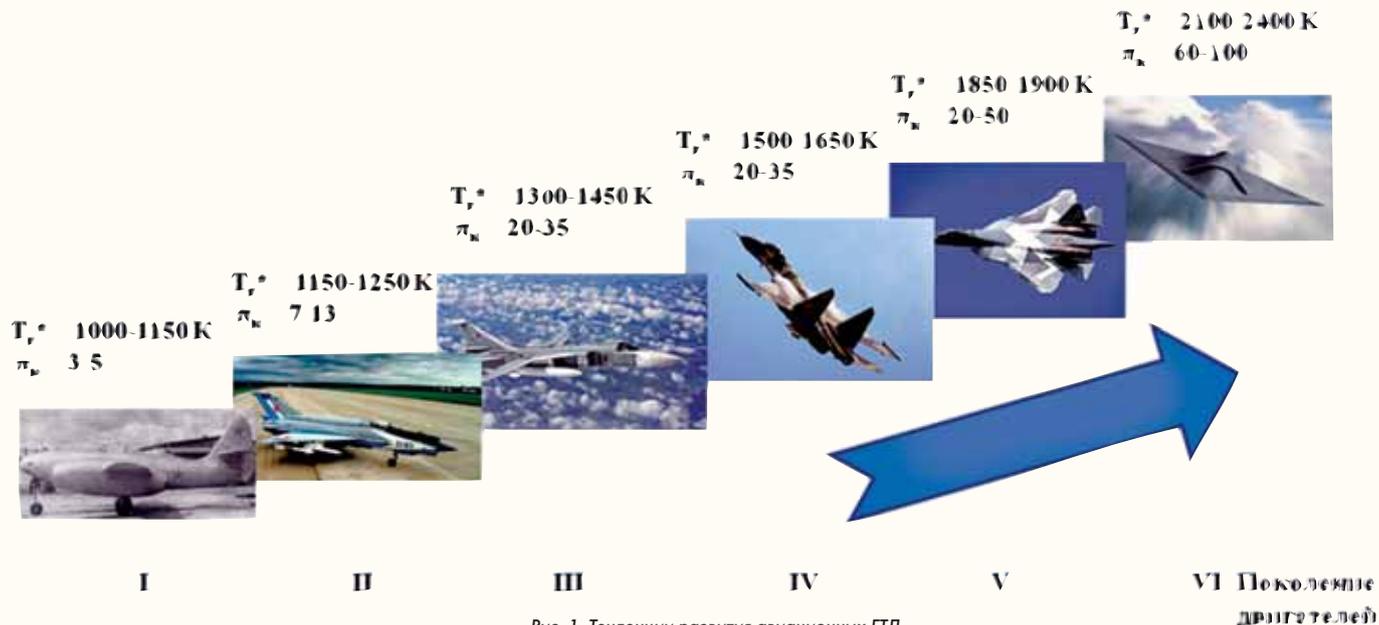


Рис. 1. Тенденции развития авиационных ГТД

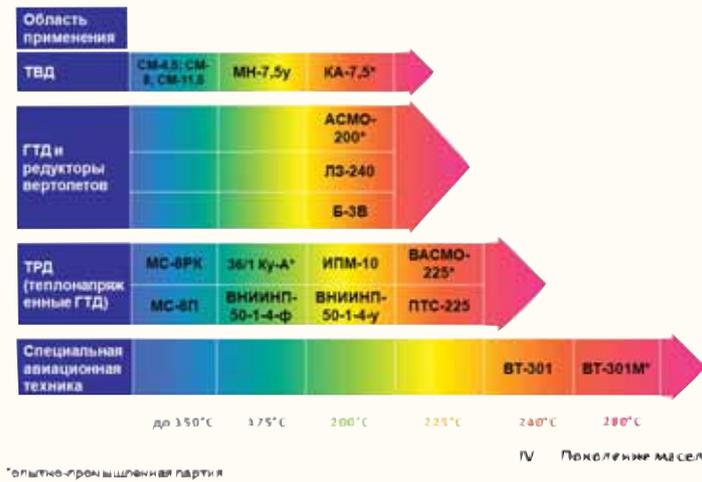


Рис. 2. Тенденции развития отечественных смазочных масел для авиационных ГТД

ности, теплонапряженность и нагрузка на узлы трения, а также температура окружающей среды [1]. В ряду "ТРД-ТВд-ТВд" теплонапряженность убывает, а нагрузка на узлы трения, наоборот, возрастает, в связи с чем к маслам для ТРД предъявляются повышенные требования по термоокислительной стабильности (ТОС), а к маслам для ТВД - повышенные требования по несущей способности [2, 3]. Для обеспечения надёжной смазки шестерен редукторов ТВД требуются масла с большей несущей способностью и, как следствие, обладающие большей вязкостью.

Разработка и внедрение в эксплуатацию новых смазочных масел для авиационных ГТД, а также совершенствование существующих масел проводились одновременно с развитием отечественного двигателестроения. Основной ассортимент и эволюция по поколениям развития отечественных смазочных масел для ГТД приведены на рис. 2. Отметим, что в нашей стране используются отечественные авиационные масла лишь II поколения, в то время как за рубежом массовая эксплуатация авиатехники осуществляется на маслах III поколения.

Основным требованием, предъявляемым к первым смазочным маслам для авиационных ГТД, было требование к их температуре застывания для обеспечения работы двигателя при низких температурах окружающей среды. В связи с этим в первых отечественных авиационных ГТД применялись маловязкие минеральные масла, обладающие невысокими эксплуатационными свойствами, предназначенные для других видов техники (типа трансформаторного или веретенного масла).

МК-8, МК-8П и МК-6 - одни из первых смазочных масел, разработанные специально для авиационных ГТД. Эти масла вырабатывались из малосернистых низкопарафинистых нефтей с применением устаревшего метода кислотно-щелочной очистки. Масло МК-8П обладало повышенными эксплуатационными характеристиками благодаря комплексу присадок различного функционального назначения (антиокислительные, противоизносные, антикоррозионные). Масло МК-6 узкого фракционного состава обладало, по сравнению с маслом МК-8, лучшими низкотемпературными свойствами. В настоящее время эти масла уже не производятся.

В 60-70 гг. XX века были разработаны и допущены к применению минеральные масла селективной очистки МК-6, МК-8, МК-8П и МК-8РК. Масло МК-8П предназначено для применения в авиационных ТРД с температурой масла на выходе из двигателя до 150 °С, и широко используется в ТРД старых выпусков гражданской и военной авиации, а также в составе маслосмесей с маслом МК-20 в ТВД типа АИ-20, АИ-24, НК-12МВ(МА). Масло МК-8 РК равноценно маслу МК-8П по эксплуатационным показателям и значительно превосходит его по консервационным свойствам.

В связи с ростом теплонапряженности авиационных ГТД уже в начале 60-х годов возникла необходимость применения более термостабильных масел. Из большого класса химических соединений предпочтение было отдано сложным эфирам моноспиртов

и двухосновных кислот, а также эфирам многоатомных спиртов и синтетических жирных кислот (СЖК) [4, 5, 6]. В результате на основе смеси эфиров диэтиленгликоля, пентаэритрита и СЖК фракции С5-С9 было разработано масло 36/1, содержащее параоксидифениламин в качестве антиокислительной присадки. Позже на основе этого масла был создан ряд масел: 36/1К, 36/1Ку и 36/1Ку-А. В состав указанных масел для улучшения смазывающей способности вводили противозадирную присадку 2-меркаптобензтиазол ("каптакс"). Наличие в маслах присадки "каптакс" обусловило ряд недостатков. Во-первых, в процессе работы двигателя при повышенных температурах "каптакс" окисляется кислородом воздуха, а образующийся при этом 2,2-дитиобисбензтиазол ("альтакс"), обладающий низкой растворимостью в масле, при низких температурах выпадает в осадок. Во-вторых, масла с "каптаксом" обладают высокой коррозионной агрессивностью по отношению к цветным металлам и магниевым сплавам. В-третьих, "каптакс" снижает термоокислительную стабильность масел.

В 60-х годах на основе сложных эфиров диоктилсебацата было разработано и допущено к применению на авиатехнике масло ВНИИ НП-50-1-4ф, превосходящее масло 36/1 по эксплуатационным характеристикам. В конце 70-х годов введением в состав ВНИИ НП-50-1-4ф модернизированного комплекса присадок были улучшены эксплуатационные свойства этого масла; обновлённой улучшенной композиции была присвоена марка ВНИИ НП 50-1-4у. Это масло предназначено для теплонапряженных ТРД и работоспособно при температуре 200 °С (кратковременно при 225 °С). Применению масла ВНИИ НП 50-1-4у препятствует дефицит исходного сырья - себаценовой кислоты, производимой за рубежом из основ растительного происхождения.

В конце 70-х годов на основе эфиров пентаэритрита и СЖК с использованием комплекса различных присадок с добавлением органосилоксановой жидкости было разработано масло ПТС-225, предназначенное для теплонапряженных ГТД. Масло ПТС-225, прошедшее стендовые и летные испытания в конце 80-х годов, было допущено к применению в авиационных ГТД, оно обладало повышенной термоокислительной стабильностью, высокими смазывающими и вязкостно-температурными свойствами. В 2003 г. масло ПТС-225, изготовленное на импортной основе, не выдержало испытаний в ЦИАМ им. П.И. Баранова и в настоящее время не производится.

С середины 70-х годов масло ИПМ-10 становится основной, наиболее широко применяемой, маркой масел в теплонапряженных ГТД военной и гражданской авиации с максимальной рабочей температурой до 200 °С; также оно было допущено для консервации топливных систем ГТД со сроком хранения до 10 лет. Данное масло обладает малой коррозионной агрессивностью по отношению к конструкционным материалам, хорошей вязкостно-температурной характеристикой и ТОС. С 1999 г. масло ИПМ-10 вырабатывается на основе поли- α -олефиновых углеводородов (ПАО) зарубежного производства. К недостатку масла ИПМ-10 относят его чувствительность к перегреву в горячих узлах двигателей, вызывающую образование повышенных количеств отложений в маслосистемах изделий.

Деформация экономических связей после распада СССР пагубно отразилась на производстве авиационных масел. Критическая ситуация сложилась с обеспечением авиационной техники маслами для теплонапряженных двигателей. Так, производство ИПМ-10 с 1978 г. по 1993 г. осуществлялось из основы ИПМА-10, производимой на Новокуйбышевском НПЗ гидроизомеризацией жидких парафинов. В 1991 г. блоки установок гидроизомеризации и депарафинизации были признаны экологически опасными и демонтированы. Большие надежды возлагались на строительство маслоблока КМ-3 на Волгоградском НПЗ (ныне ООО "ЛУКОЙЛ Волгограднефтепереработка"), однако принятые меры по возобновлению производства ИПМ-10 положительных результатов не дали. Проблема обеспечения сырьем производства масла ИПМ-10 была решена только в 1998 г. путем закупки компонентов масла за рубежом. Комплекс присадок в масле ИПМ-10 также усовершенствован для обеспечения требуемых эксплуатационных свойств. Модернизи-

рованное масло ИГМ-10 на новой основе, как и раньше, работоспособно при 200 °С и, кратковременно, при 215...220 °С.

К смазочным маслам для турбовинтовых двигателей (ТВД) предъявляются несколько иные требования, чем к маслам для ТРД. Большая передаваемая мощность авиационных редукторов ТВД в сочетании с их небольшими массой и габаритами приводит к ужесточению условий работы пар трения, росту тепловой и динамической напряженности деталей двигателя. Шестерни редукторов работают в условиях высоких контактных нагрузок, и прочность масляных плёнок маловязких авиационных масел, пригодных для смазки опор ТРД, в данных условиях оказывается недостаточной [2].

Противоречия в требованиях к качеству смазочных масел, которые должны сочетать высокую смазывающую способность с хорошей вязкостно-температурной характеристикой, привели к необходимости применения для смазки ТВД, имеющих общую маслосистему с редуктором винта, смеси из маловязких минеральных масел с высоковязкими остаточными маслами. В настоящее время в ТВД применяют маслосмеси СМ-4,5 (75 % МС-8П + 25 % МС-20), СМ-8 (50 % МС-8П + 50 % МС-20) и СМ-11,5 (25 % МС-8П + 75 % МС-20).

Маслосмеси долгие годы применялись при эксплуатации ТВД. При этом вместо масла МС-8П использовались и другие маловязкие масла: МС-8, МК-6, МС-6, трансформаторное ТК. Следует отметить, что маслосмеси в целом обладают невысокими эксплуатационными свойствами. Они не обеспечивают запуск изделий в зимнее время без подогрева, готовятся на месте без достаточного контроля качества и обладают невысокой термоокислительной стабильностью. При эксплуатации двигателей типа АИ-20 на маслосмеси СМ-4,5 отмечалось образование значительного количества отложений продуктов окисления в маслосистеме; при наработке двигателей более 2000 ч часто происходило коксование отверстий форсуночных колец опоры турбины, что приводило к досрочным съемам двигателей с крыла.

С целью создания единого масла взамен применяемых маслосмесей в середине 60-х годов были разработаны загущенные масла: минеральное масло МН-7,5, содержащее комплекс присадок, и синтетическое масло ВНИИНП-7 на основе загущенного октолом диизооктилсебацата. В качестве основы масла МН-7,5 использовалось масло МС-6. Вязкость масел МН-7,5 и ВНИИНП-7 при 100 °С составляла 7,5 мм²/с. По данным лабораторных исследований, масла МН-7,5 и ВНИИНП-7 существенно превосходили применяемые маслосмеси по основным физико-химическим и эксплуатационным показателям (ТОС, смазывающей способности и низкотемпературным свойствам). Однако при испытаниях масла МН-7,5 в эксплуатирующихся организациях гражданской авиации отмечался значительный рост вязкости масла, особенно в двигателях АИ-24, а также (при эксплуатации двигателей АИ-20 в южных районах) повышенное осадкообразование и, как следствие, появление смолоподобных отложений на фильтрах линии откачки масла из опор турбины и лобового картера.

В 1973 г. были начаты работы по созданию улучшенного масла, обладающего по сравнению с МН-7,5 более высокой ТОС и меньшей испаряемостью. В 1975 г. было разработано усовершенствованное масло МН-7,5у, однако в ходе испытаний и последующей эксплуатации двигателей НК-12МВ с использованием масла МН-7,5у отмечалось существенное снижение его вязкости при ра-

боте (до 6,4 мм²/с) вследствие механической деструкции загущающей полимерной присадки. При эксплуатации же двигателей АИ-24 был отмечен, наоборот, существенный рост вязкости масла, приводящий к ухудшению его низкотемпературных свойств. Кроме того, существенным недостатком масла МН-7,5у являлся его повышенный уровень токсичности (3 класс) вследствие использования хлорсодержащей присадки "Совол". К началу 90-х годов производство масла МН-7,5у было остановлено из-за прекращения производства его основы (установка в ОАО "Новоуфимский НПЗ" была демонтирована ввиду износа) и противозадирной присадки "Совол" (производство прекращено по экологической причине).

Анализ сырьевой и производственной базы России показал, что восстановление масла МН-7,5у старого состава не перспективно. Гражданская авиация имеет большой опыт применения зарубежных масел Turbonucoil 98 (Castrol 98), выпускаемых по спецификации DEF STAN 91-98 (Великобритания) для двигателей прямой реакции. В связи с этим была поставлена задача разработать новое унифицированное масло взамен МН-7,5у, которое сможет быть использовано как в ТВД, ТВВД самолетов, так и ТВаД и редукторах вертолетов.

Масло КА-7,5 (производства ООО "Квалитет-Авиа") было разработано 2006 г. и в настоящее время проходит контрольно-лётные испытания. В отличие от масла МН-7,5у, в состав нового масла КА-7,5 не входит токсичная присадка "Совол". По ТОС новое масло КА-7,5 превосходит отечественные и некоторые зарубежные аналоги (рис. 3). Токсикологические свойства КА-7,5 по классификации вредных веществ согласно ГОСТ 12.1.007 соответствуют 4-му классу опасности.

Рассмотрим масла для ГД и редукторов вертолётов.

Силовые установки вертолётов имеют, как правило, две отдельные маслосистемы: для турбокомпрессорной части и для редуктора. Для смазки турбокомпрессорной части могут применяться те же марки масел, что и для смазки ТРД. При этом имеют место те же тенденции развития, что и для турбореактивных двигателей: рост их теплонапряженности, повышение температуры контактирующих с маслом деталей двигателя и рабочих температур масла, необходимость применения более термостабильных масел [7].

Требования к маслам для редукторов вертолётов примерно те же, что и к маслам для ТВД. Для обеспечения надёжной смазки шестерен редукторов ТВД требуются масла с большей вязкостью и, как следствие, обладающие большей несущей способностью.

Наличие двух отдельных маслосистем предопределило и два различных подхода к обеспечению смазки силовых установок вертолётов, а именно: либо применение различных марок масел для турбокомпрессорной части и редуктора, либо, наоборот, использование единой марки масла.

В двигателях Д-136 вертолёта Ми-26, например, применяют масла ИМП-10 и ВНИИНП 50-1-4ф(у), а в редукторе - масло Б-3В (ЛЗ-240). Двигатели Д-25В вертолётов Ми-6 и Ми-10 эксплуатируются на маловязких маслах типа МС-8п. В редукторах Р-7 этих вертолётов в летнее время применяют маслосмесь СМ-11,5, а в зимнее - СМ-8. При использовании указанных смесей в редукторах вертолётов имеют место те же проблемы, что и при использовании маслосмесей в ТВД.

В силовых установках вертолётов Ми-2 и Ми-8 для смазки двигателя в течение многих лет применяют синтетическое масло Б-3В, созданное на основе сложных эфиров пентаэритрита и синтетических жирных кислот фракции С5-С9 [4, 5]. Масло Б-3В содержит в своём составе антиокислительную (параоксидифиниламин) и противозадирную (2-меркаптобензтиазол) присадки, обладает высокой несущей способностью. Существенным недостатком масла Б-3В является склонность к образованию осадков (подобно маслам 36/1К, 36/1Ку и 36/1Ку-А) вследствие окисления противозадирной присадки, особенно в зимнее время. Это масло термостабильно до 200 °С, однако высокая коррозионная агрессивность его к ряду конструкционных материалов (медные и магниевые и др. сплавы) при повышенных темпе-



Рис. 3. Сравнение эксплуатационных свойств масла КА-7,5 и отечественных и зарубежных аналогов

ратурах ограничивает температурные пределы его применения. Область применения: ТВД самолетов, ТВД вертолетов всех типов и редукторы вертолетов типа МИИ-8, с рабочей температурой до +200 °С.

Работы по устранению отмеченных недостатков масла Б-3В привели к созданию масла ЛЗ-240 на той же основе, что и Б-3В, обладающее меньшей коррозионной агрессивностью и не содержащее присадки "каптакс". По остальным показателям масла ЛЗ-240 и Б-3В близки. На основании положительных результатов испытаний как в стендовых условиях, так и в эксплуатации масло ЛЗ-240 допущено к применению в изделиях авиатехники наравне с маслом Б-3В.

Необходимость разработки новых авиационных масел была вызвана рядом причин, среди которых:

- неудовлетворительное качество современных товарных смазочных масел для авиационных ГТД;
- отсутствие товарных масел, работоспособных при температуре 225 °С и выше;
- отсутствие масел на основе сырья российского производства.

Ключевая проблема производства синтетических масел - это проблема обеспечения сырьевой базой. В настоящее время все синтетические масла для авиационных ГТД вырабатываются на синтетических основах зарубежного производства (для ВНИИ НП 50-1-4У и ВНИИ НП 50-1-4Ф основы готовятся в России из сырья зарубежного производства).

В РФ, как уже отмечалось, отсутствуют высокотермостабильные товарные масла III поколения для теплонапряженных ГТД, работоспособные при температуре 225 °С и выше, в то время как за рубежом такие масла широко используют при эксплуатации авиатехники.

К тому же, в России сложилась ситуация, когда под одним наименованием производятся масла с разными рецептурами. Так, например, имеются четыре предприятия, которые производят масло марки Б-3В по ТУ 38.101.295-85 (ЗАО "Завод им. Шаумяна", ЗАО "НК Авиасинтез", ОАО "Московский Нефтемазосзавод", ОАО "Уфанефтехим"), однако, по разным рецептурам. При этом эксплуатантам авиатехники в обязательном порядке необходимо отслеживать, каким производителем изготовлено данное масло, и имеет ли оно допуск к применению на авиатехнике, не допуская в эксплуатации смешения масел одной марки, но от разных производителей.

Для обеспечения современных и перспективных ГТД летательных аппаратов высококачественными отечественными смазочными материалами в НИИСУ совместно с ЦИАМ им. П.И. Баранова и при участии ВНИИ НП, 25ГосНИИ Минобороны и ГосНИИГА новые высокотермостабильные масла АСМО-200, ВАСМО-225 и ВТ-301М.

Масло АСМО-200 работоспособно до 200 °С и предназначено для авиационных ТВД, ТВдД, ГТД и редукторов вертолетов взамен масла Б-3В. К преимуществам нового масла относится отсутствие выпадения "альтакса", улучшенная ТОС, отсутствие коррозии на меди, низкое осадкообразование, высокие трибологические характеристики (рис. 4).

Исследования масла АСМО-200 в объеме программы квалификационных испытаний в ЦИАМ им. П.И. Баранова показали, что по трибологическим свойствам (метод ЧШМ по ГОСТ 9490) масло АСМО-200 превосходит зарубежные масла ASTO 500, BPTO 2380, Ascender и др. (рис. 4). По сравнению с Б-3В масло АСМО-200 имеет преимущество по ТОС (по ГОСТ 23797) при 200 °С. Кроме этого, масло АСМО-200 было испытано на соответствие зарубежным спецификациям. По основным показателям это масло удовлетворяет требованиям спецификаций MIL-PRF-23699/F STD и MIL-PRF-23699/F HTS, за исключением требований к ТОС по FED-STD-791-5308. По стойкости к коксообразованию данное масло эквивалентно маслам группы STD, но уступает маслам группы HTS, например, маслу Turbonucol 640 [8].

Новое высокотемпературное масло ВАСМО-225 обладает высокими эксплуатационными свойствами, длительно работоспособно при температурах 220...240 °С, превосходит масла-аналоги ИПМ-10 и ПТС-225 по термоокислительной стабильности при

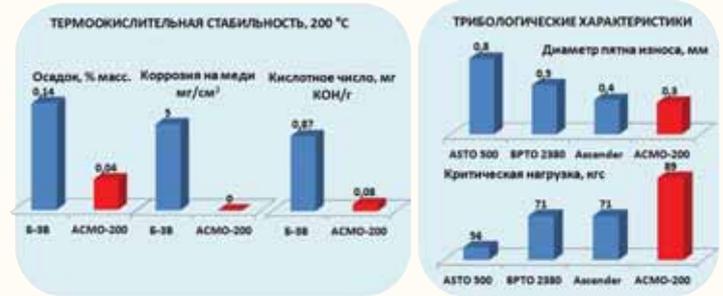


Рис. 4. Сравнение эксплуатационных свойств АСМО-200 с отечественными и зарубежными маслами - аналогами.

225 °С, а также отечественные и некоторые зарубежные аналоги по трибологическим показателям на ЧШМ по ГОСТ 9490 (рис. 5). Масло ВАСМО-225 отвечает основным требованиям зарубежной спецификации MIL-PRF-7808, за исключением требований ТОС, а также вязкости при низкой температуре. При массовом производстве масло ВАСМО-225, являющееся маслом III поколения, может стать унифицированным для большинства теплонапряженных ТРД, ТВД, ГТД и редукторов вертолетов.

Масло ВТ-301 на основе кремнийорганической жидкости применяется для работы в высокотеплонапряженных специальных ТРД с рабочей температурой до 250 °С с 80-х годов. [9, 10, 11]. В 2011 г. введение в состав этого масла антиокислительной присадки нового поколения обеспечило повышение максимальной рабочей температуры до 280 °С без снижения других эксплуатационных характеристик. Модернизированное масло относится к маслам IV поколения и получило наименование ВТ-301М.

За помощь в подготовке статьи авторы выражают благодарность сотрудникам ЦИАМ: В.М. Ежову и А.А. Молоканову

Литература

1. Яновский Л.С., Дубовкин Н.Ф., Галимов Ф.М. и др. Инженерные основы авиационной химмотологии. - Казань: Изд. Казанск. ун-та, 2005. - 714 с.
2. Яновский Л.С., Ежов В.М., Молоканов А.А. Методология допуска авиационных масел к применению на авиатехнике в России и за рубежом // Двигатель. - № 2. - 2012. - С. 20-22.
3. Киришев Е.Л., Попов В.Г., Яновский Л.С. Влияние качества горюче-смазочных материалов на работоспособность авиационных газотурбинных двигателей. - М.: МАТИ, 2008. - 102 с.
4. Харт А.В., Гундерсон Р.С. Синтетические смазочные материалы и жидкости. - Л.: Химия, 1965. - 385 с.
5. Динцес А.И., Дружинина А.В. Синтетические смазочные масла. - М.: Гостоптехиздат, 1958. - 350 с.
6. Мамедьяров М.А. Химия синтетических масел. - Л.: Химия, 1989. - 236 с.
7. Хурумова А.Ф. Вертолетные масла. Обзорная информация. - М.: ЦНИИТЭнефтехим. - 1992. - №2. - 56 с.
8. Виппер А.Б., Виленкин А.В., Гайснер Д.А. Зарубежные масла и присадки. - М.: Химия, 1981. - 192 с.
9. Соболевский М.В., Муззовская О.А., Попелева Г.С. Свойства и области применения кремнийорганических продуктов. - М.: Химия, 1975. - 279 с.
10. Харитонов Н.П., Островский В.В. Термическая и термоокислительная деструкция полиорганосилоксанов. - Л.: Наука, 1982. - 208 с.
11. Соболевский М.В., Скороходов И.И., Гриневич К.П. Органосилоксаны. Свойства, получение, применение. - М.: Химия, 1985. - 264 с.



Рис. 5. Сравнение ВАСМО-225 с отечественными и зарубежными маслами-аналогами