

Рабочие жидкости авиационных гидросистем, их свойства.

04, апрель 2014

DOI: 10.7463/0414.0705577

профессор, д.т.н. Шумилов И. С.¹, Чурсова Л. В.², Седова Л. С.²

УДК 678-404: 629.735.063

¹Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

²ФГУП «ВИАМ»

shumilov-it@yandex.ru

sedovals@viam.ru

Введение

Основное назначение жидкости для гидравлических систем (ГС) – передача энергии от её источника к местам потребления с минимальными потерями энергии, с заданной надёжностью, с необходимым изменением величины и знака развиваемого усилия или момента. Кроме того должны удовлетворяться общие технические требования, предъявляемые к рабочим жидкостям для ГС: хорошие смазочные свойства; стабильность физико-химических характеристик при эксплуатации и хранении; хорошие низкотемпературные свойства; приемлемую температуру застывания; совместимость с материалами агрегатов и элементов ГС; хорошая теплопроводность; высокая жёсткость; низкая летучесть; минимальная вспениваемость; низкий коэффициент объёмного расширения; пожаро-взрывобезопасность; невысокая плотность; не должны быть токсичными; не должны иметь неприятного запаха; должны иметь определённый цвет; должна иметь хорошие диэлектрические свойства; хорошо противостоять деструкции молекул; иметь хорошие антикоррозионные и анти эрозионные свойства; не создавать условия для возникновения электрокинетической эрозии золотниковых и др. прецизионных устройств; обладать минимальными свойствами облитерации в дросселирующих, клапанных и золотниковых устройствах; иметь свойства минимального растворения воздуха и поглощения влаги, иметь необходимую долговечность при хранении и работе в авиационных гидросистемах (АГС).

В авиационной практике применяется достаточно широкий перечень жидкостей. Выбор конкретной жидкости определяется конструктором для конкретного самолёта на основании технических требований к нему. Для магистральных самолётов разработки 1950-1970 годов широкое применение получили жидкости на нефтяной основе, для самолётов более поздней разработки – на основе фосфоро-органических эфиров, что было вызвано, в основном, возросшими требованиями по пожаро-взрывобезопасности, большей стабильности физико-химических характеристик при эксплуатации и хранении и более высокому ресурсу, а последние жидкости (см. таблица 1) наиболее полно обеспечили эти и другие требования.

Таблица 1. Современные отечественные и аналогичные зарубежные жидкости, применяемые в АГС.

Отечественные жидкости	Зарубежные жидкости		
	Марка	Спецификация	Фирма-производитель
АМГ-10 ГОСТ 6794-75	AeroShell Fluid 41 Mobil Aero HF HYDRAUNYCOIL FH 51 ROYCO 756	MIL-PRF-5606 H	Германия, Shell Deutschland GMBH США, ExxonMobil Франция, NYCO Anderol
НГЖ-5у ТУ 38.401-58-57-93	HyJet-IV-A ^{plus} Skydrol 500B-4 Skydrol LD-4	SAE AS 1241	США, ExxonMobil Solutia Solutia
7-50С-3 ГОСТ 20734-75	NYCOLUBE 934	CG 94-0120	Франция, NYCO

Обычно состав рабочей жидкости представляет собой основу, которая смешивается со специальными добавками, позволяющими обеспечить необходимые свойства жидкости, перечисленные выше.

На рис. 1. представлен пример смешения компонентов при получении жидкости Скайдрол.



Рис. 1. Пример получения рабочей жидкости типа Скайдрол.

Выше перечислен далеко не полный перечень свойств жидкостей, который достаточно подробно изложен в литературе [1-13]; здесь же рассмотрен только некоторые наиболее важные свойства, недостаточно полно освещённые в технической литературе.

1. Общие сведения по рабочим жидкостям АГС отечественного производства[10].

Рабочая жидкость АМГ-10 представляет собой нефтяную фракцию с температурой кипения 200-320°C, загущённую полимером винилбутилового эфира, с ингибитором окисления и красителем.

Рабочая жидкость поставляется по ГОСТ 6794—75 заводами нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности и используется как жидкость для гидросистем дозвуковой и околозвуковой авиации. Как и все рабочие жидкости на нефтяной основе, рабочая жидкость АМГ-10 является горючей.

Температурный интервал использования АМГ-10 от —60 до +125° длительно и при +150° — кратковременно. В последнем случае контроль качества рабочей жидкости должен производиться через каждые 10 час работы. При нагреве до 125° допускается контакт рабочей жидкости в баке, питающем систему, как с азотом, так и с воздухом. При работе рабочей жидкости с перегревами до 150° допускается контакт его в баке только с азотом (ГОСТ 9293-74). В агрегатах, работающих с высокой степенью адиабатического сжатия — гидроаккумуляторах, амортизаторах и т. п. — при всех температурах эксплуатации допускается контакт рабочей жидкости только с азотом (ГОСТ 9293-74), что обеспечивает безопасность их использования.

Рабочие жидкости АМГ-10, как и другие гидравлические жидкости с загустителем, в процессе работы подвергается механической деструкции, что приводит к падению его вязкости. Это объясняется тем, что молекулы высокомолекулярного загустителя при прохождении через малые отверстия или щели в насосе рвутся, превращаясь в соединения с меньшим молекулярным весом, и, следовательно, меньшей загущающей способностью. Интенсивность механической деструкции зависит от условий эксплуатации; температуры, давления в системе и характера его перепадов при работе, от конструкции насоса, его производительности, наличия и характера дросселирующих устройств и их количества, а также от объёма рабочей жидкости. В соответствии с этим на основании опыта эксплуатации установлены сроки службы рабочей жидкости АМГ-10 в самолётах различных типов. Так, в гидросистеме самолёта ИЛ-18 срок службы АМГ-10 без смены составляет 5000 *час*, в гидросистеме самолёта ТУ-104 — 3500 *час*, а в гидросистеме вертолётa МИ-4 — только 800 *час*. В гидросистемах более современных машин срок службы АМГ-10 резко сокращается и может составить не более 100—200 *час*.

При эксплуатации одновременно с процессами механической деструкции протекают также процессы окисления как под действием кислорода воздуха, контактирующего с жидкостью, так и под влиянием кислорода, растворённого в самой жидкости. Эти процессы вызывают постепенное накопление в масле мелкодисперсных (обычно до 2 *мк*) твердых органических продуктов, не растворимых в нефтяных углеводородах. Кроме того, в рабочей жидкости происходит накопление механических примесей в результате истирания уплотнительных резин, металлических пар трения, механического разрушения защитных покрытий металлов из-за больших скоростей гидравлических потоков, а также других продуктов эксплуатации, в частности воды. Все это постепенно приводит к падению вязкости жидкости, увеличению её кислотного числа, содержания воды и механических примесей и вызывает необходимость периодической смены жидкости в системе.

В настоящее время эксплуатация рабочей жидкости АМГ-10 производится до падения его кинематической вязкости при 50°С до 7 мм²/с (*сст*) и появления в ней механических примесей выше допустимой нормы. Время, в течение которого рабочая жидкость АМГ-10 может проработать в гидросистеме без смены, т. е. её ресурс, определяется условиями работы в данной системе и должно устанавливаться при опытной эксплуатации нового изделия.

Уплотнительные материалы, работающие с рабочей жидкостью АМГ-10, используют уплотнительные резины на основе нитрильного каучука следующих марок В-14-1, ИРП-1078, ИРП-1353 (51-1668), ИРП-1287.

Резина для диафрагм. В качестве резины для разделительных мембран рабочая жидкость — воздух или рабочая жидкость — азот используется резина марки В-14-Д, выпускаемая заводами по ТУ38 005101—72. Время работы уплотнительных резин и резины для диафрагм зависит от условий эксплуатации и устанавливается для различных режимов на основании результатов лабораторно-стендовых испытаний и опыта эксплуатации резин.

АМГ-10 мало токсично, предельное содержание паров рабочей жидкости в воздухе в пересчёте на летучие нефтепродукты – 0,3 мг/л, длительный контакт с рабочей жидкостью в малых концентрациях безопасен. Однако АМГ-10 оказывает раздражающее действие на кожу и может вызвать дерматиты, как и все нефтепродукты, поэтому при работе с АМГ-10, как и с любыми нефтепродуктами, необходимо соблюдать обычные санитарно-гигиенические правила.

Находит применение также зарубежная жидкость Гидроникойл FH 51 (аналог АМГ-10 ГОСТ-6794-75) [16] - минеральная гидравлическая жидкость для применения в гидросистемах и стойках шасси самолётов и вертолётв. Росавиакосмос-ГСГА МТ России принял решение о внесении в эксплуатационно-техническую документацию дополнения о возможности применения ГИДРОНИКОЙЛ FH 51 и её смесей с АМГ-10 на всей авиатехнике российского производства.

Гидроникойл FH-51 предназначена для гидросистем авиационной и наземной техники, работающей в интервале температур окружающей среды от -60⁰С до +55⁰С. Вырабатывается на основе глубокодеараматизированной низкозастывающей фракции, получаемой из продуктов гидрокрекинга парафинистых нефтей, и состоящей из нафтеновой и изопарафиновых углеводородов. Содержит загущающую и антиокислительную присадки, а так же отличительный органический краситель красного цвета.

Рабочая жидкость 7-50С-3 представляет собой смесь полидиалкилсилоксановых олигомеров с органическим диэфиром, ингибиторами окисления и противоизносной присадкой [10].

Жидкость выпускается серийно и поставляется заводом нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности по ГОСТ 20734-75 с изм. 1-5. Она используется в гидросистемах некоторых сверхзвуковых самолётов. Температурный интервал использования жидкости 7-50С-3 от -60 до +175⁰ С длительно с кратковременными перегревами до +200⁰С при давлении в системе до 210-280 атм и контакте жидкости в баке, питающем систему, с азотом (ГОСТ 9293—74) или другим инертным газом. Воз-

возможность кратковременного использования части или всего рабочего объема жидкости при температурах выше 200° и давлении более 210 атм может быть установлена на основании результатов стендовых испытаний агрегатов и систем с этой жидкостью.

Жидкость 7-50С-3 не содержит высокомолекулярного загустителя, поэтому при работе она не подвержена механической деструкции. Однако процессы окисления и гидролиза жидкости, которые происходят при эксплуатации, особенно при высоких температурах в контакте с металлами, приводят к увеличению вязкости, кислотного числа жидкости и образованию в ней мелкодисперсных осадков. С другой стороны, источниками загрязнения жидкости являются продукты износа пар трения. Поэтому в процессе эксплуатации необходимо контролировать качество жидкости 7-50С-3. При этом кинематическая вязкость её не должна превышать 26 сСт, кислотное число не должно быть выше 0,8 мг КОН/1г жидкости, температура вспышки — не ниже 160°, а содержание воды — не более 0,03%. Если перечисленные характеристики не выходят за указанные пределы, работа с жидкостью может продолжаться. Если же одна из характеристик превосходит допустимые пределы, жидкость подлежит замене на свежую.

Время, в течение которого жидкость 7-50С-3 может проработать в данной гидросистеме без замены, устанавливается при опытной эксплуатации АГС. Несмотря на сравнительно высокую термостойкость, жидкость 7-50С-3 является горючей, поэтому при работе с ней необходимо исключить контакт с поверхностями, нагретыми выше 250°, и предусмотреть обязательное заполнение свободного пространства над жидкостью в агрегатах, работающих с высокими степенями адиабатического сжатия, азотом (ГОСТ 9293—74) или другим инертным газом.

Уплотнительные материалы. Для работы в контакте с жидкостью 7-50С-3 используются уплотнительные резины на основе нитрильного каучука марки ИРП-1353 (ТУ38 105331—71), фторокаучука марки ИРП-1287 (МРТУ38-5-6056—65) в сочетании с фторопластом-4.

Время работы уплотнительных резин зависит от условий эксплуатации и устанавливается на основании результатов лабораторно-стендовых испытаний и опыта эксплуатации конкретного изделия.

Токсичность жидкости. Жидкость 7-50С-3 малотоксична. При её использовании следует предусмотреть те же меры по технике безопасности, что и при работе с рабочей жидкостью АМГ10.

Рабочая жидкость НГЖ-5у (выпущена на замену жидкости НГЖ-4, которая обладала недопустимо высокими электрокинетическими эрозионными свойствами. В статье

приводятся некоторые её свойства для справки и сравнения со свойствами НГЖ-5у) пожаровзрывобезопасная и представляет собой смесь эфиров фосфорной кислоты с присадками, улучшающими вязкостные, антиокислительные, антикоррозионные и антиэрозионные свойства. Жидкость НГЖ-5у производится по ТУ 38.401-58-57-93. Она предназначена для использования в гидравлических системах в интервале температур от минус 60°С до +125°С с перегревами до +150°С при номинальных давлениях в стенде или системе до 210 кгс/см² (21 МПа) при надуве бака, питающего насос воздухом или азотом.

Поскольку жидкость НГЖ-5у содержит высокомолекулярный загуститель, в процессе работы она подвергается механической деструкции, что приводит к понижению её кинематической вязкости в процессе эксплуатации АГС.

Жидкость НГЖ-5у очень гигроскопична, поэтому в ней накапливается влага. Однако жидкость не вызывает коррозии металлов и покрытий при содержании влаги до 0,5 вес. %. При более высоком содержании воды на сталях появляются следы коррозии, поэтому систему необходимо защищать от попадания в неё влажного воздуха или конденсированной влаги. Кроме того, жидкость имеет ограниченную гидролитическую устойчивость.

Процесс гидролиза жидкости сопровождается увеличением кислотного числа. В связи с этим при эксплуатации кроме контроля содержания влаги необходим контроль кислотного числа жидкости. Кинематическая вязкость при +50°С в процессе эксплуатации не должна снижаться ниже 6 мм²/с (сст), кислотное число должно быть не более 0,6 мг KOH/1г жидкости, а содержание влаги — не более 0,5%, температура вспышки не ниже +155°С. Время, в течение которого жидкость НГЖ-5у может работать без смены, устанавливается только по результатам контроля работы её в конкретной системе при заданном режиме.

В отличие от других жидкостей жидкость НГЖ-5у взрывопожаробезопасна — она имеет высокую температуру самовоспламенения, медленно горит в пламени и гаснет при его удалении; пламя не распространяет. В процессе работы жидкости НГЖ-5у в пневмогидравлических агрегатах при высоких степенях адиабатического сжатия и местных перегревах в контакте с воздухом не исключена возможность деструкции и частичного гидролиза её с выделением горючих спиртов и образования кислых фосфорорганических эфиров, которые постепенно накапливаются в пневмо-гидроагрегате и при ударе могут привести к вспышке. Поэтому для заполнения свободного пространства над жидкостью в пневмогидроагрегатах, работающих с высокой степенью адиабатического сжатия, целесообразнее применять технический азот (ГОСТ 9293—74), чем воздух. Это обеспечивает надёжную работу агрегатов и жидкости в течение длительного времени

Уплотнительные материалы. В качестве уплотнительных материалов при работе с жидкостью НГЖ-5у могут использоваться резины на основе этиленпропиленового сополимера марок ИРП-1375 (ВТУ38-5-121—66) и ИРП-1377 (ВТУ38-5-122—66). Для изготовления диафрагм гидроаккумуляторов и резино-тканевых мембран может быть применена резина марки ИРП-1376 (ВТУ38-5-123-66).

Жидкость НГЖ-5у совместима в любых пропорциях с допущенными к применению зарубежными авиационными гидравлическими жидкостями, такими как HyJet-IV-A^{plus}, Skydrol 500B-4, Skydrol LD-4, сохраняя при этом все эксплуатационные характеристики. Дозаправка самолета смесью НГЖ-5у с зарубежными жидкостями может осуществляться без промывки гидросистем и слива отработанной жидкости. Допускается присутствие в жидкости НГЖ – 5у, используемой на технологических операциях промывки, проверки герметичности и отработки агрегатов, в качестве технологической смазки масла ОМТИ в количестве до 5%.

Токсичность жидкости. В отличие от жидкостей АМГ-10 и 7-50С-3 жидкости НГЖ-5у и их зарубежные аналоги токсичны и применение их возможно только при соблюдении определённых правил техники безопасности

2. Свойства рабочих жидкостей авиационных гидросистем

2.1. Облитерация – течение жидкости через малые зазоры при этом наблюдается явление, которое не может быть объяснено законами гидромеханики. Это явление заключается в том, что расход жидкости через зазор с течением времени уменьшается, несмотря на то, что давление и вязкость не изменяются [13]. Причина состоит в том, что зазор размером меньше 0,1 мм может зарастиваться крупными молекулами или твёрдыми частицами (рис.2 и 3) в виде твёрдой кристаллической решётки вплоть до полного закупоривания проходного сечения.

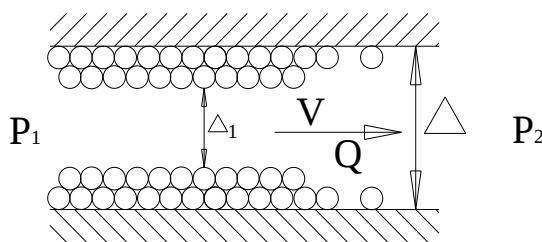


Рис.2. Течение жидкости в малом зазоре с облитерацией, где P_1 и P_2 – давление жидкости до и после зазора, Δ и Δ_1 – величина проходного сечения в зазоре до и после завершения процесса облитерации, Q и V – расход и скорость жидкости в зазоре.

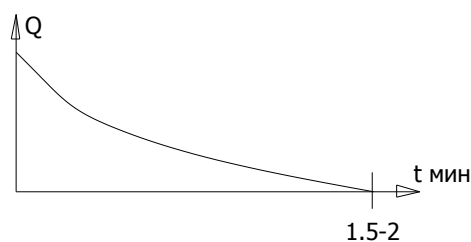


Рис.3. Зависимость расхода жидкости в малом зазоре по времени при наличии явления облитерации.

Т.е. на поверхности раздела сред под действием молекулярных и электромагнитных сил между стенкой и жидкостью происходит адсорбция – уплотнение жидкости с включением твёрдых частиц до практически твёрдого состояния на поверхности стенки. Степень облитерации зависит от молекулярной структуры жидкости. Сложные жидкости с крупными молекулами, например, на нефтяной основе имеют высокую степень облитерации и толщина слоя облитерации может достигать нескольких микрон. Степень облитерации уменьшается при повышении температуры и увеличивается при возрастании давления. При сдвиге стенок относительно друг друга адсорбционные слои разрушаются и облитерация устраняется. Но при отсутствии подвижки стенок облитерация восстанавливается в течении 1-2-х мин.

Явление облитерации приводит: к заращиванию жиклёров и искажению их характеристик или полному прекращению работы устройства; к увеличению сил страгивания золотниковых устройств. Для предотвращения облитерации и её вредного влияния на работу гидравлических устройств рекомендуется: отверстия в жиклёрах выполнять больше 0,2- 0,4 мм; вводить относительную подвижку (осцилляцию) элементов конструкции гидравлических устройств; применять жидкости с меньшей степенью облитерации.

2.2. Вязкость – важное свойство жидкости, которая может рассматриваться как сопротивление жидкости течению, и представляет собой свойство жидкости сопротивляться сдвигу (скольжению) её слоёв. Вязкость изменяется в зависимости от температуры и давления. С вязкостью связаны следующие явления, которые отражаются на работе ГС: внутренние утечки жидкости в насосах, клапанах, гидроприводах; кавитация; трение жидкости о стенки каналов и местных сопротивлений; внешние утечки жидкости и трение между подвижными элементами ГС. Жидкости слишком высокой вязкости нежелательны, так как их применение обуславливает высокое сопротивление перемещению деталей насоса, клапанов и гидроприводов. Чем выше вязкость, тем медленнее действие этих элементов, выше температура и больше перепады давления [10].

При работе ГС в значительном интервале температур важное значение приобретают вязкостно-температурные свойства жидкости, которые характеризуются индексом вязкости. У жидкостей разного типа эти свойства могут существенно различаться. Жидкости, у которых изменение вязкости с изменением температур велико, обладают низким индексом вязкости; высокий индекс вязкости имеют жидкости, которые претерпевают малые изменения вязкости с изменением температуры.

Другое важное свойство рабочих жидкостей для ГС – зависимость вязкости от давления. Однако для значительных изменений вязкости требуются очень высокие давления. Поэтому в ГС, работающих под обычным давлением до 200 кг/см^2 (20 МПа), эта зависимость может во внимание не приниматься. Изменения вязкости жидкостей, происходящие в процессе эксплуатации, так же влияют на работу ГС, как и изменения вязкости, вызванные температурой. При этом может возникнуть необратимое и временное снижение вязкости жидкости. Необратимое снижение вязкости вызывается механическим разрушением (деструкцией) основы жидкости или присадок, применяемых для улучшения вязкостно-температурных свойств, и обычно присуще жидкостям, имеющим крупные молекулы с длинными цепочками. Жидкости на нефтяной основе обладают этим недостатком, который понижает её ресурс. Временное ухудшение вязкости связано с обратимыми деформациями в объёме жидкости при действии нагрузок, после снятия которых вязкость восстанавливается. При изменении температуры в рабочем диапазоне значений (например, от -60 до $+100^\circ\text{C}$) вязкость обычно уменьшается от $3000 \dots 4000 \text{ сст (мм}^2/\text{с)}$ до $5 \dots 10 \text{ сст (мм}^2/\text{с)}$, что необходимо учитывать при проектировании ГС, применяя соответствующие конструктивные мероприятия по нагреву или охлаждению жидкости [13].

Вязкость зависит от природы жидкостей и оценивается коэффициентом μ *динамической вязкости*, выражающейся в пуазах, сантипуаз – одна сотая доля пуаза или $\text{мПа}\cdot\text{с}$ (милипаскаль-секунда). В гидравлических расчётах применяют также отношение динамической вязкости μ к плотности жидкости ρ , которое называется *кинематической вязкостью* и обозначается через ν

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Кинематическая вязкость выражается в $\text{см}^2/\text{сек}$, или стоксах. На практике чаще пользуются сантистоксом – одной сотой долей стокса. Зависимости кинематической вязкости гидравлических жидкостей от температуры и давления для применяемых в АГС жидкостей приведены на рис.4-7 и таблице 2 .

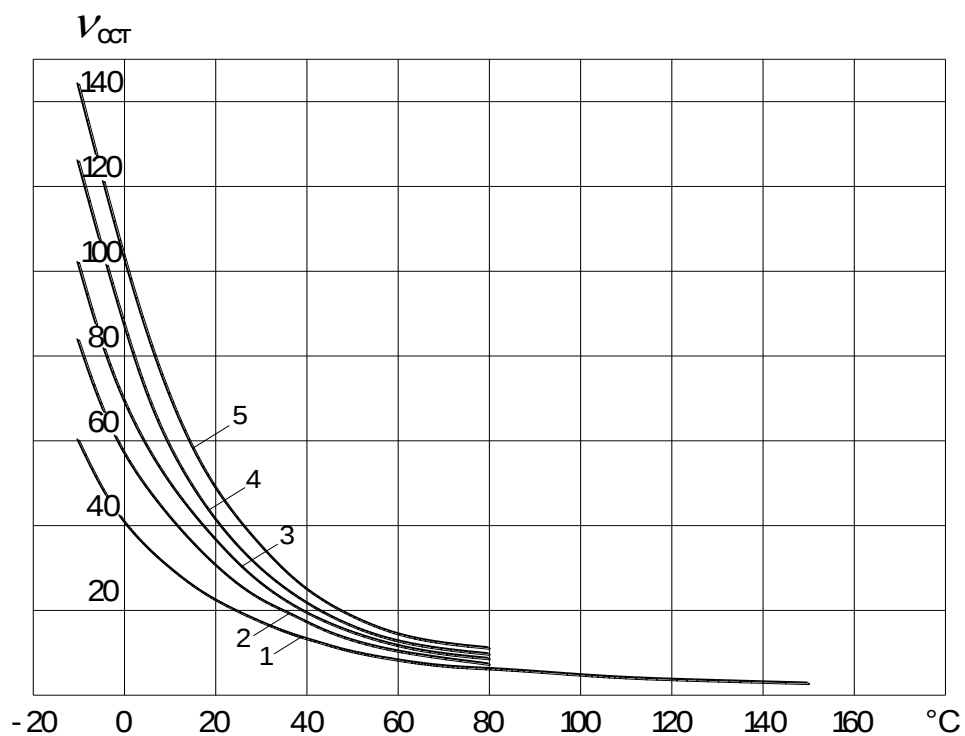


Рис. 4. Зависимость кинематической вязкости жидкости АМГ-10 от температуры при давлении 1 (1), 200 (2), 300 (3), 400 (4) и 500 kg/cm^2 (5).

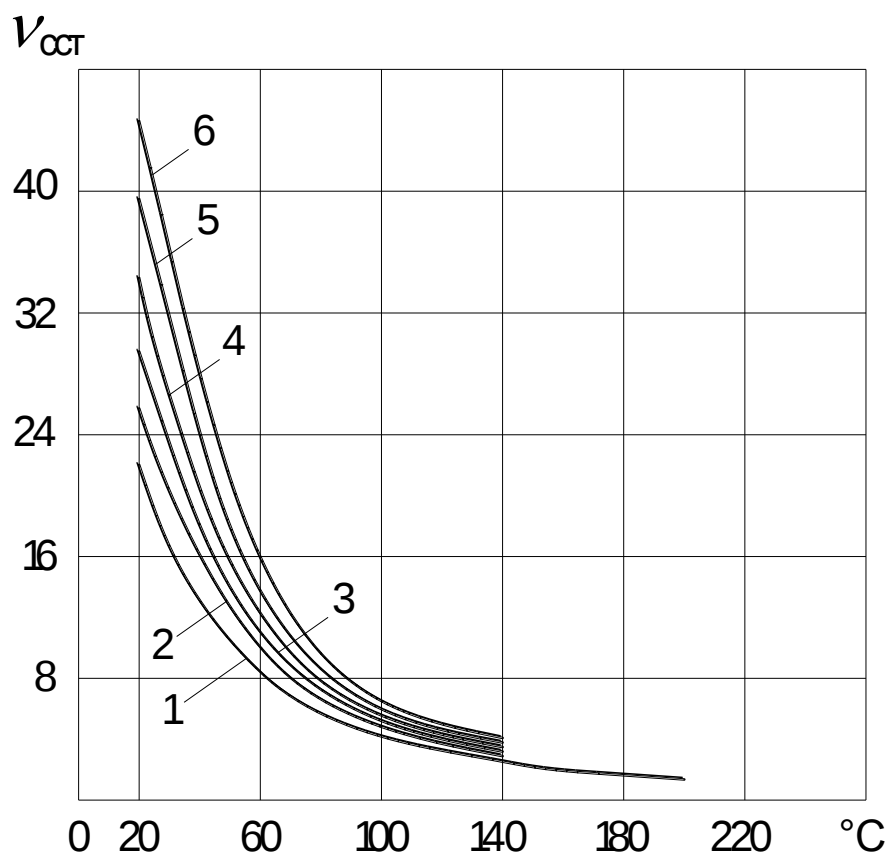


Рис. 5. Зависимость кинематической вязкости жидкости 7-50C-3 от температуры при давлении 1 (1), 100 (2), 200 (3), 300 (4), 400 (5) и 500 kg/cm^2 (6).

Таблица 2. Зависимость кинематической вязкости жидкости НГЖ-5у от температуры при давлении 1 кг/см²

Температура, °С	-60	-55	20	50	125	150
Кинематическая вязкость, сст	2904-4200	1602-1870	18,46-19,88	8,68-9,35	2,96-3,11	2,30-2,45

При температуре ниже минус 20⁰С имеет место резкое увеличение вязкости, достигая 3000-4000 сст и более при минус 50-60⁰С, при которой не обеспечивается выполнение необходимых характеристик ГС, гидроагрегатов и гидроприводов. В таблице 3 приведены кинематические вязкости жидкостей АМГ-10, FH-51, 7-50С-3 в полном диапазоне температур.

Таблица 3. Кинематические вязкости жидкостей АМГ-10, FH-51, 7-50С-3 в полном диапазоне температур.

Марка жидкости	+200 ⁰ С	+150 ⁰ С	+125 ⁰ С	+100 ⁰ С	+50 ⁰ С	-50 ⁰ С	-60 ⁰ С (-55 ⁰ С)
АМГ-10	-	2,5 сст	3,4 сст	4,5 сст	10 сст	1250сст	4100сст
FH-51	-	-	Нет сведений	5,0 сст	10 сст	1250сст	(3000)сст
7-50С-3	1,3 сст	2,15 сст	3,1 сст	4,0 сст	10,2 сст	1260сст	4200сст

На рис.6. показана (для справки) зависимость кинематической вязкости жидкости НГЖ-4 от температуры при давлении 1 кг/см² в диапазоне температур: +10⁰С ÷ +125⁰С, а на рис.7. представлены для сравнения зависимости кинематической вязкости жидкости Skydrol LD-4, Skydrol 500D-4 зарубежного производства.

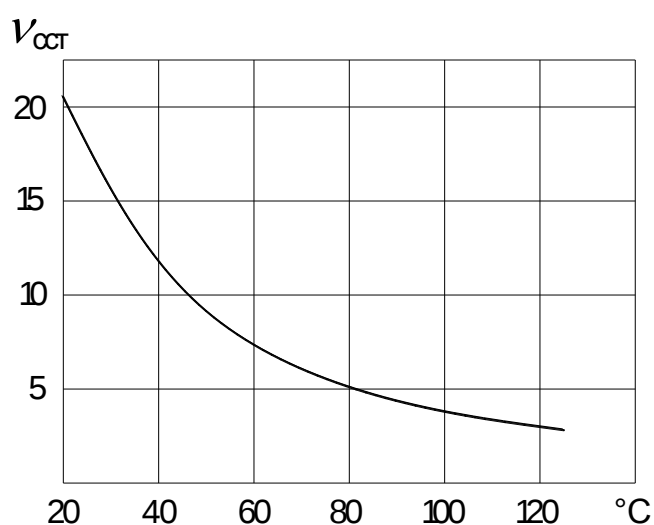


Рис. 6. Зависимость (для справки) кинематической вязкости жидкости НГЖ-4 от температуры при давлении 1 кг/см² в диапазоне температур: +10⁰С ÷ +125⁰С

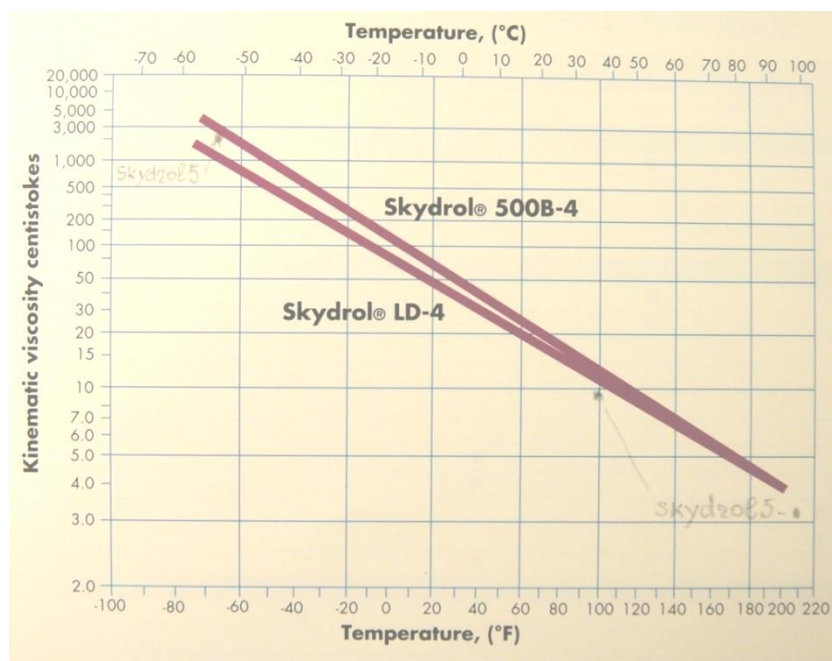


Рис.7. Зависимость кинематической вязкости от температуры жидкостей Skydrol 500B-4, Skydrol LD-4.[17]

Изменения вязкости жидкостей, происходящие в процессе эксплуатации, так же влияют на работу ГС, как и изменения вязкости, вызванные температурой. При этом может возникнуть необратимое и временное снижение вязкости жидкости. Необратимое снижение вязкости вызывается механическим разрушением (деструкцией) основы жидкости или присадки, применяемой для улучшения вязкостно-температурных свойств, и обычно присуще жидкостям, имеющим крупные молекулы с длинными цепочками. Особенно жидкости на нефтяной основе обладают этим недостатком, который понижает её ресурс. Временное ухудшение вязкости связано с обратимыми деформациями в объёме жидкости при действии нагрузок, после снятия которых, вязкость восстанавливается. При изменении температуры с минус 60°C до $+100^{\circ}\text{C}$ вязкость обычно уменьшается от 3000...4000 сСт до 5... 10 сСт, что необходимо учитывать при проектировании ГС, применяя соответствующие конструктивные мероприятия по нагреву или охлаждению жидкости [13].

2.3. Сжимаемость - так же является одним из важнейших свойств жидкости [10], зависит от её химической природы и характеризуется коэффициентом относительного объёмного сжатия β_p , под которым понимается относительное изменение объёма жидкости из-за повышения давления на 1 кг/см^2 :

$$\beta_p = -\frac{1}{V_0} \frac{\Delta V}{\Delta p} \text{ [см}^2\text{/кг], [1/Па]}$$

где $\Delta p = p - p_0$ - изменение давления; $\Delta V = V - V_0$ - изменение объёма жидкости при изменении давления на Δp ; V_0 - объём жидкости при нормальном давлении; V - объём

ём при давлении p ; $\frac{\Delta V}{V_0}$ - относительное изменение объёма под действием изменения давления.

Можно получить $V = V_0(1 - \beta_p \Delta p)$ и $\rho = \frac{\rho_0}{1 - \beta_p \Delta p}$, где ρ и ρ_0 - значения плотности при давлениях p и p_0 .

Сжимаемость жидкости приводит к снижению жёсткости систем и может быть причиной потери устойчивости следящих гидроприводов. Свойство сжимаемости жидкостей используется как полезное свойство в гидравлических пружинах и амортизаторах.

В ряде случаев применяется модуль объёмной упругости – величина обратная сжимаемости:

$$E = \frac{1}{\beta_p} [\text{кг/см}^2], [\text{Па}]$$

На рис. 8, 9, 10. представлены зависимости $\beta_p = f(t^0 c, p)$ трёх типов жидкостей.

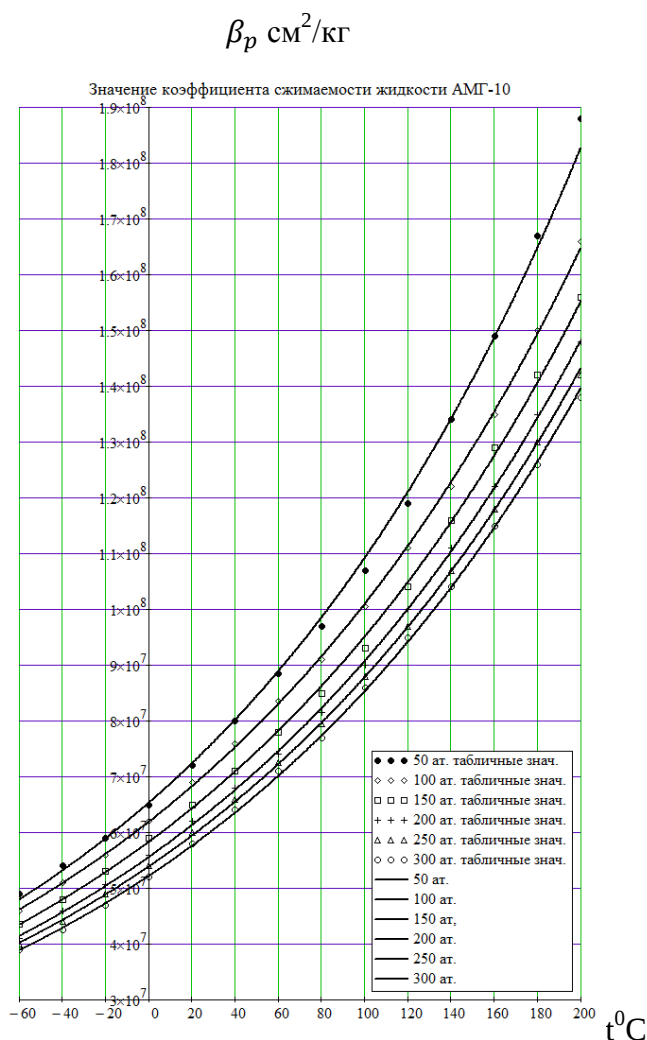


Рис.8. Зависимость коэффициента сжимаемости β_p жидкости АМГ-10 от её температуры $t^0 c$ и давления p . Точки, обозначенные на графике, представляют экспериментальные значения β_p , а линии – аппроксимацию этих значений.

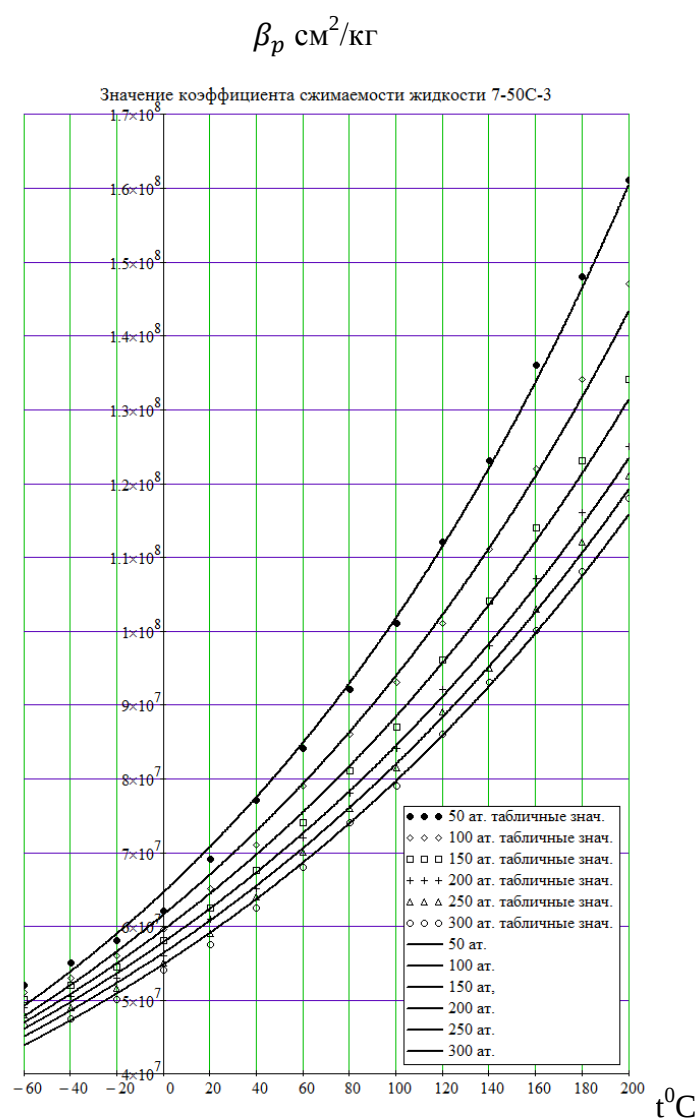


Рис. 9. Зависимость коэффициента сжимаемости β_p жидкости 7-50С-3 от её температуры $t^{\circ}\text{C}$ и давления p . Точки, обозначенные на графике, представляют экспериментальные значения β_p , а линии – аппроксимацию этих значений.

В таблице 4. приведена зависимость коэффициента изотермической сжимаемости $\beta \cdot 10^{12}$, 1/Па от температуры жидкости НГЖ-5у при $P = 200 \text{ кг/см}^2$ (20 МПа)

Таблица 4. Зависимость коэффициента изотермической сжимаемости $\beta \cdot 10^{12}$, 1/Па от температуры жидкости НГЖ-5у при $P = 200 \text{ кг/см}^2$ (20 МПа)

Температура, $^{\circ}\text{C}$	-60	-40	-20	0	20	40	60	80	100	120
Коэффициент изотермической сжимаемости	305	325	350	430	475	490	525	580	635	700

На рис.10. приведена зависимость (для справки) коэффициента сжимаемости β_p жидкости НГЖ-4 от её температуры $t^{\circ}\text{C}$ и давления p .

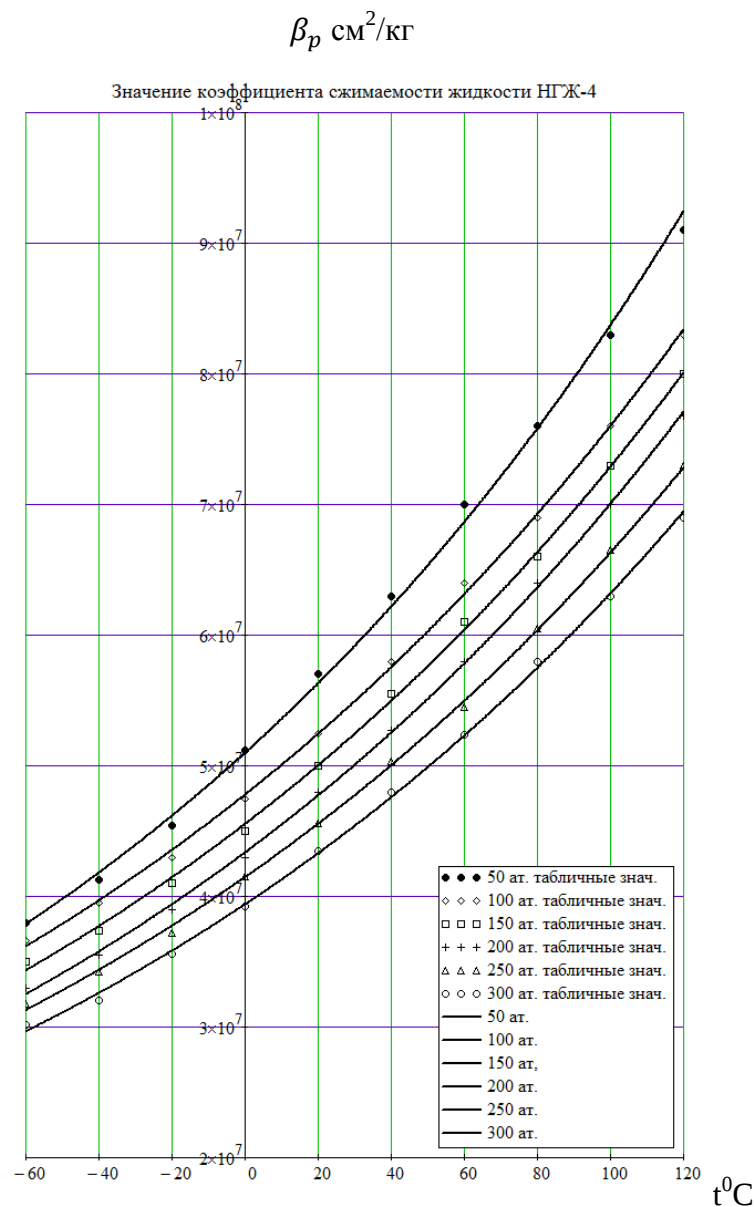


Рис.10. Зависимость (для справки) коэффициента сжимаемости β_p жидкости НГЖ-4 от её температуры $t^{\circ}\text{C}$ и давления p . Точки, обозначенные на графике, представляют экспериментальные значения β_p , а линии – аппроксимацию этих значений.

2.4. Теплофизические свойства [10] рабочих жидкостей во многом определяют тепловые процессы в гидросистеме, используются при составлении теплового баланса системы и других тепловых расчётах. К ним относятся теплопроводность, теплоёмкость и объёмное расширение. Величины теплофизических характеристик определяются химической природой жидкостей и зависят от её температуры и давления [10].

Теплоёмкость применяемых жидкостей в зависимости от температуры и давления $c_p = f(t^{\circ}\text{C}, p)$ представлены на рис. 11., 12., 13., из которых видно, что теплоёмкость при постоянном давлении существенно возрастает с повышением температуры жидкости. Указанные зависимости могут быть использованы при теплофизических расчётах ГС.

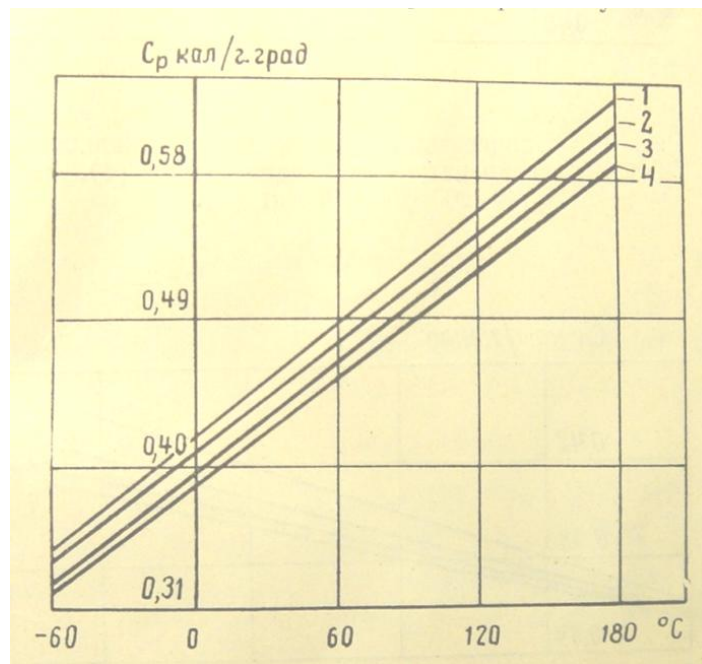


Рис.11. Зависимость теплоёмкости жидкости АМГ-10 от температуры при давлении 10 кг/см² (1), 100 кг/см² (2), 200 кг/см² (3), 300 кг/см² (4).

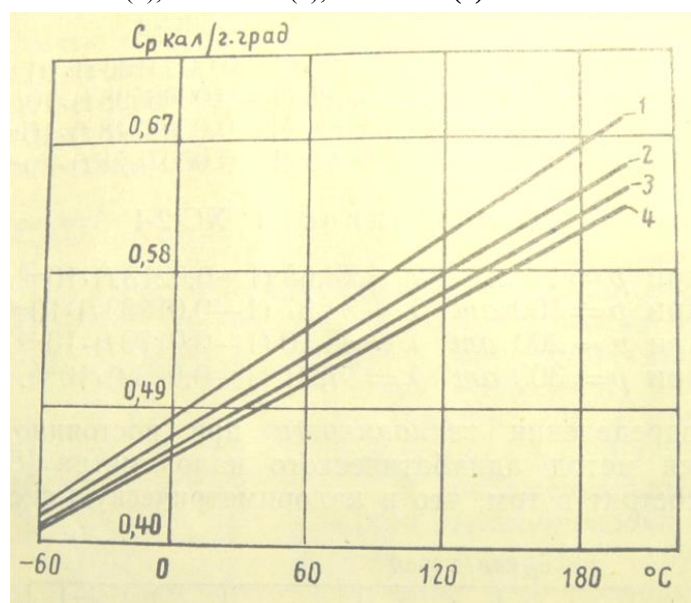


Рис.12. Зависимость теплоёмкости жидкости 7-50С-3 от температуры при давлении 10 кг/см² (1), 100 кг/см² (2), 200 кг/см² (3), 300 кг/см² (4).

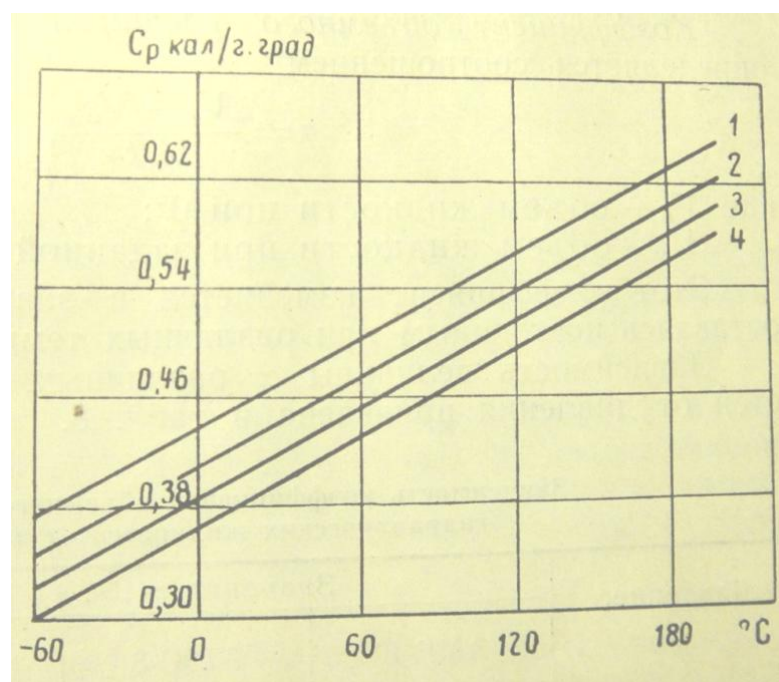


Рис.13. Зависимость (для справки) теплоёмкости жидкости НГЖ-4 от температуры при давлении 10 кг/см² (1), 100 кг/см² (2), 200 кг/см² (3), 300 кг/см² (4).

В таблице 5. приведены расчетные уравнения для определения удельной теплоемкости в зависимости от давления и температуры жидкости НГЖ-5у

Таблица 5. Расчетные уравнения для определения удельной теплоемкости в зависимости от давления и температуры жидкости НГЖ-5у

Давление, МПа	Удельная теплоёмкость C , Дж/кг·град
0,1	$1,661 (1 + 1,912 \cdot 10^{-3} t) \cdot 10^3$
10	$1,606 (1 + 1,720 \cdot 10^{-3} t) \cdot 10^3$
20	$1,596 (1 + 1,693 \cdot 10^{-3} t) \cdot 10^3$
30	$1,591 (1 + 1,638 \cdot 10^{-3} t) \cdot 10^3$

Теплопроводность для трёх типов жидкостей в зависимости от температуры и давления представлены на рис.14, 15 и 16.

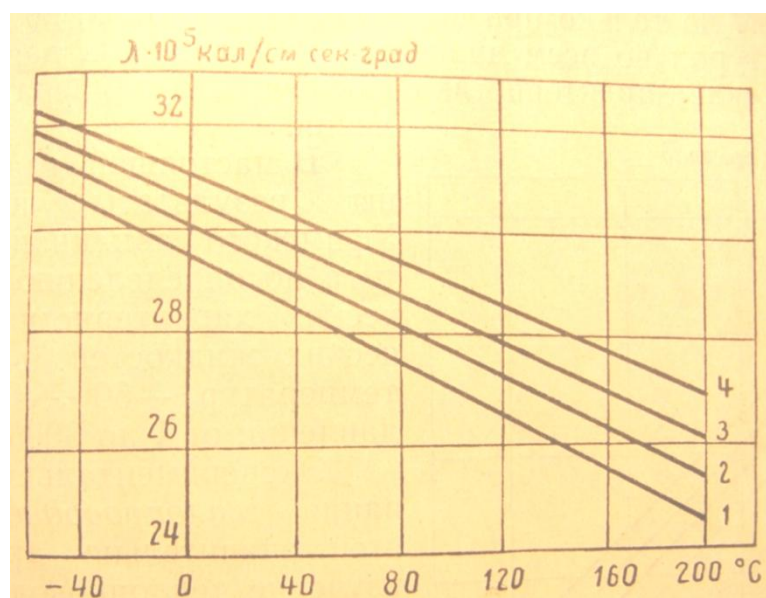


Рис.14. Зависимость теплопроводности жидкости АМГ-10 от температуры при давлении 1кг/см² (1), 100кг/см²(2), 200кг/см² (3), 300кг/см² (4).

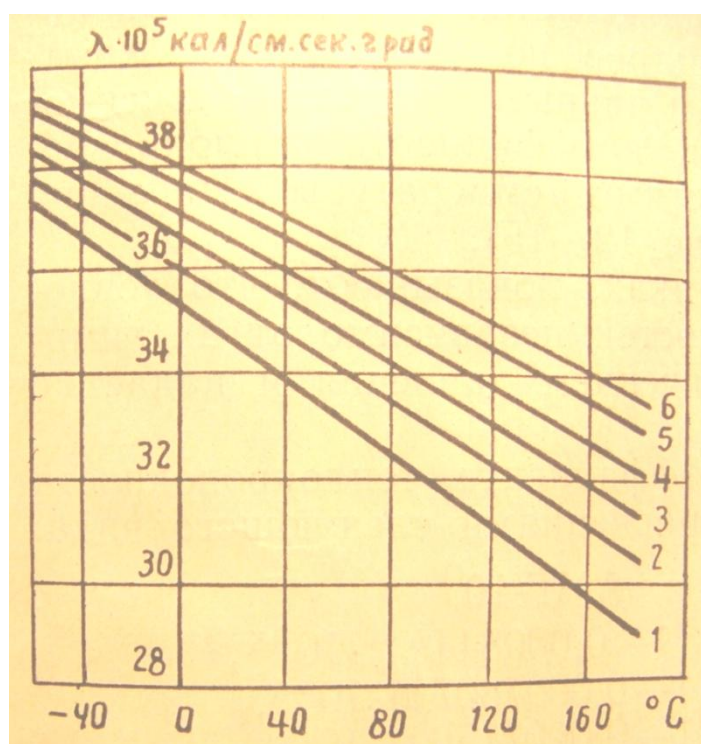


Рис.15. Зависимость теплопроводности жидкости 7-50С-3 от температуры при давлении 1кг/см² (1), 80кг/см²(2), 160кг/см² (3), 240кг/см² (4), 320 кг/см² (5) и 400 кг/см²(6).

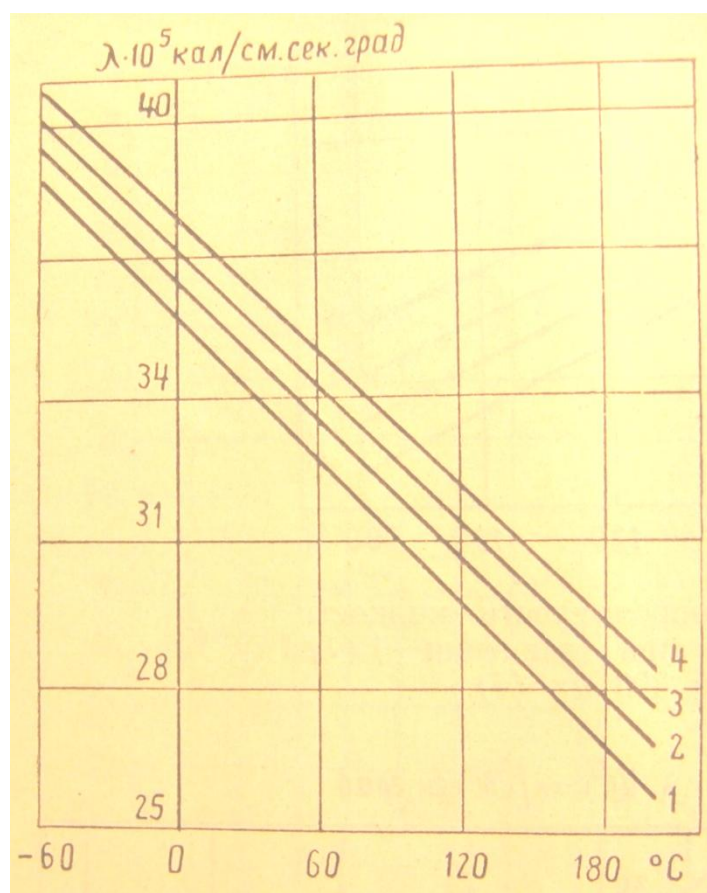


Рис.16. Зависимость теплопроводности жидкости НГЖ-4 (для справки) от температуры при давлении 1кг/см² (1), 100кг/см²(2), 200кг/см² (3), 300кг/см² (4).

В таблице 6. приведены расчетные уравнения для определения коэффициента теплопроводности в зависимости от давления и температуры жидкости НГЖ-5у

Таблица 6. Расчетные уравнения для определения коэффициента теплопроводности в зависимости от давления и температуры жидкости НГЖ-5у

Давление, кг/см ² (МПа)	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/м ·град
1 (0,1)	$146,43 (1 - 0,000439 t) \cdot 10^{-3}$
100 (10)	$152,27 (1 - 0,000419 t) \cdot 10^{-3}$
200 (20)	$156,24 (1 - 0,000399 t) \cdot 10^{-3}$
300 (30)	$159,17 (1 - 0,000369 t) \cdot 10^{-3}$

Температурное расширение жидкости характеризуется коэффициентом β_t объёмного расширения, который представляет собой относительное изменение объёма при изменении температуры жидкости на 1⁰С при неизменном давлении [10], т.е.

$$\beta_t = \frac{1}{V_0} \frac{\Delta V}{\Delta t},$$

$$V_t = V_0(1 + \beta_t \Delta t),$$

где V_t - объём жидкости при температуре t , V_0 - объём жидкости при температуре 0⁰С, β_t - коэффициентом объёмного расширения при данном давлении.

Знание коэффициента β_t объёмного расширения жидкости позволяет рассчитать изменение занимаемого ею объёма при изменении её температуры в заданных пределах и определить необходимый объём компенсаторов (баков) в гидросистемах. Количество жидкости, используемое в гидросистемах различных самолётов, для примера представлено в таблице 7.

Таблица 7. Количество жидкости, используемое в гидросистемах различных самолётов (америк. gallon=3,78л).

Самолёт	Объём жидкости в галлонах	Объём жидкости в литрах
A300	106	400,68
A310	99	374,22
A320	62	234,36
A321	66	249,48
A330	116	438,48
A340	124	468,72
B737-100, - 200	23	86,94
B737-300 ÷ 500	33	124,74
B747	178	672,84
B757	78	294,84
B767	81	306,18
MD-80	24	90,72
MD-11	133	502,74
L1011	137	517,86

Коэффициент β_t объёмного расширения меняется при изменении давления, оставаясь неизменным при различных температурах (рис.17.).

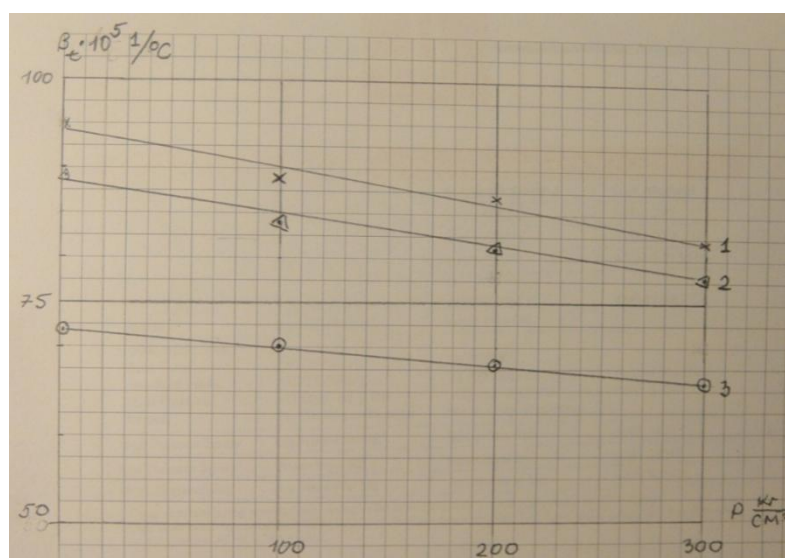


Рис.17. Зависимость коэффициента β_t объёмного расширения жидкости от её давления. 1-АМГ-10; 2- 7-50С-3; 3- НГЖ-4 (для справки)

В таблице 8. приведен коэффициент объемного расширения жидкости НГЖ-5у $\beta_t \cdot 10^5$, 1/град, при $p = 1 \text{ кг/см}^2$ (0,1 МПа) в указанном интервале температур

Таблица 8. Коэффициент объемного расширения жидкости НГЖ-5у $\beta_t \cdot 10^5$, 1/град, при $p = 1 \text{ кг/см}^2$ (0,1 МПа) в указанном интервале температур

Температура, °С	(-60)- (-40)	(-40)- (-20)	(-20)-0	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	100- 120
Коэффициент объ- емного расшире- ния	68,0	72,5	71,3	73,4	75,6	78,5	79,4	82,0	86,0

Температурные показатели рабочих жидкостей [10, 14], к которым относятся температура застывания, рабочая и максимальная температура, температура кипения жидкости, которые являются очень важными при выборе жидкости к применению на самолёте.

Температура застывания -этот показатель означает температуру потери текучести, которая в лабораторных условиях определяется по степени неподвижности уровня жидкости в пробирке при наклоне её после выдержки при отрицательной температуре в течение 1 мин под углом 45° в соответствии с ГОСТ 20287-91. При этом не должна наблюдаться образования кристаллов или расслоения жидкости.

Для обеспечения нормальной работы гидросистемы температура застывания должна быть значительно ниже допустимой, при которой обеспечивается работоспособность агрегатов с рабочей жидкостью. Быстрое приведение гидросистемы в рабочее состояние после длительного (Пребывания в условиях воздействия низких температур возможно только при работе с низко застывающей жидкостью).

Температура кипения. Этот показатель является одной из характеристик летучести рабочей жидкости. Для жидкостей с температурой кипения до 250° определение производится по ГОСТ 2177—99. Если жидкость кипит при температуре более 250°, определение начала её кипения обычно не производится и летучесть характеризуется другими параметрами.

Таблица

Марка р.ж	характеристика	показатели
АМГ-10	Интервал рабочих температур, t°С	-60÷ +125(длительно) +150(кратковременно)
АМГ-10	Температура начала кипения, t°С	205÷220

АМГ-10	Температура застывания, t ⁰ С	Ниже -70
FN-51	Температура застывания, t ⁰ С	Ниже -60
7-50С-3	Интервал рабочих температур, t ⁰ С	-60÷ +175(длительно) +200(кратковременно)
7-50С-3	Температура начала кипения, t ⁰ С	+250
7-50С-3	Температура застывания, t ⁰ С	Ниже -70
НГЖ-5У	Интервал рабочих температур, t ⁰ С	-60÷ +150
НГЖ-5У	Температура застывания, t ⁰ С	Ниже -65

2.5. Плотностью ρ называют массу жидкости, заключённую в единице её объёма, и определяют по уравнению

$$\rho = \frac{m}{V} \text{ г/см}^3 \text{ (или г·сек}^2\text{/см}^3\text{),}$$

Плотность существенно влияет на общую массу гидросистемы, в связи с чем жидкости с высокой плотностью обычно не находят применения в авиации. Из таблицы 3. видно, что на самолётах используется значительное количество жидкости и, например, снижение плотности жидкости даже на 1% может уменьшить массу ГС на десятки кг.

На рис. 18, 19, 20 представлены зависимости плотности ρ жидкости от её температуры и давления [10.].

Для сравнения приведены плотности жидкости при +20°С:

- НГЖ-5У составляет 1,020 г/см³
- FN-51 составляет 0,88 г/см³ [16]

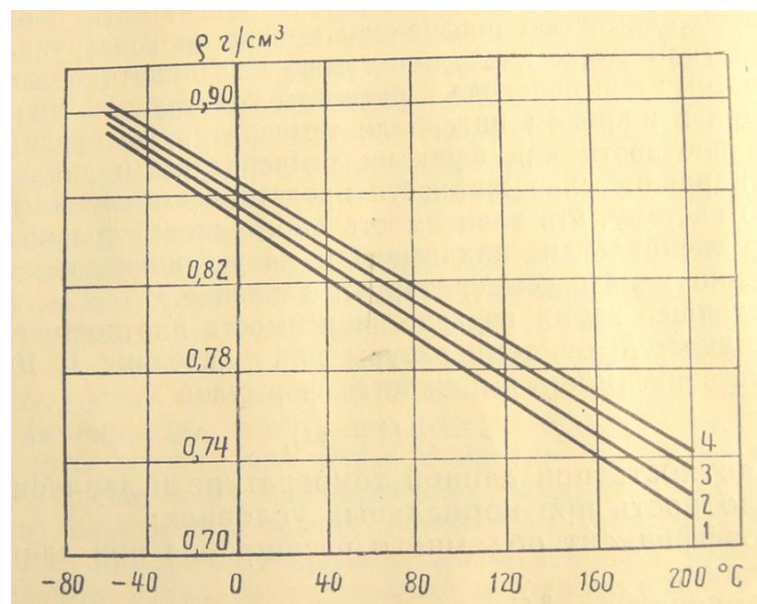


Рис.18. Зависимость плотности жидкости АМГ-10 от температуры при давлении 1 кг/см² (1), 100 кг/см² (2), 200 кг/см² (3), 300 кг/см² (4).

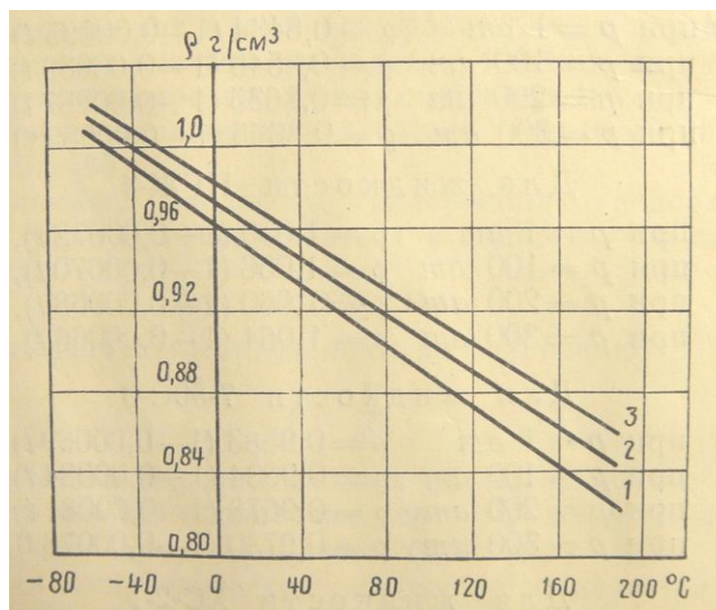


Рис.19. Зависимость плотности жидкости 7-50с-3 от температуры при давлении 1 кг/см² (1), 100 кг/см² (2), 200 кг/см² (3), 400 кг/см² (4).

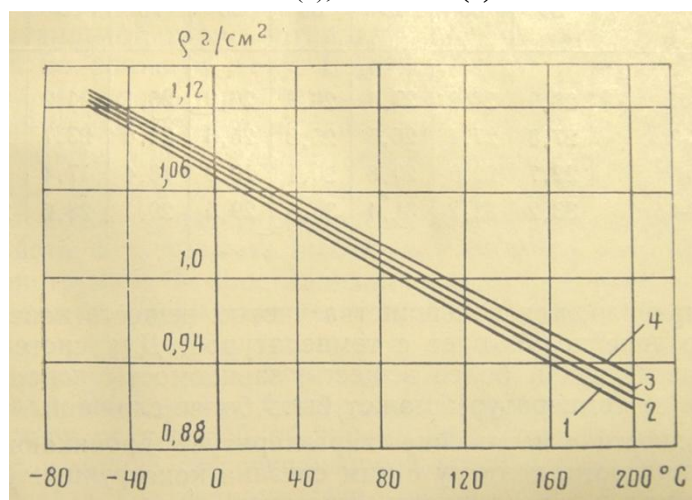


Рис.20. Зависимость плотности жидкости НГЖ-4 (для справки) от температуры при давлении 1 кг/см² (1), 100 кг/см² (2), 200 кг/см² (3), 280 кг/см² (4).

Плотность жидкости НГЖ-5у при её температуре +20⁰С составляет 1,02 г/см³.

В таблице 9. приведены расчетные уравнения для определения плотности в зависимости от давления и температуры жидкости НГЖ-5у

Таблица 9. Расчетные уравнения для определения плотности в зависимости от давления и температуры жидкости НГЖ-5у

Давление, МПа	Плотность ρ , кг/м ³
0,1	$1,030 (1-0,00080 t) \cdot 10^3$
10	$1,036 (1-0,00078 t) \cdot 10^3$
20	$1,042 (1-0,00076 t) \cdot 10^3$
30	$1,048 (1-0,00074 t) \cdot 10^3$

Для сравнения на рис.21. представлены зависимости плотности жидкостей Skydrol от их температуры

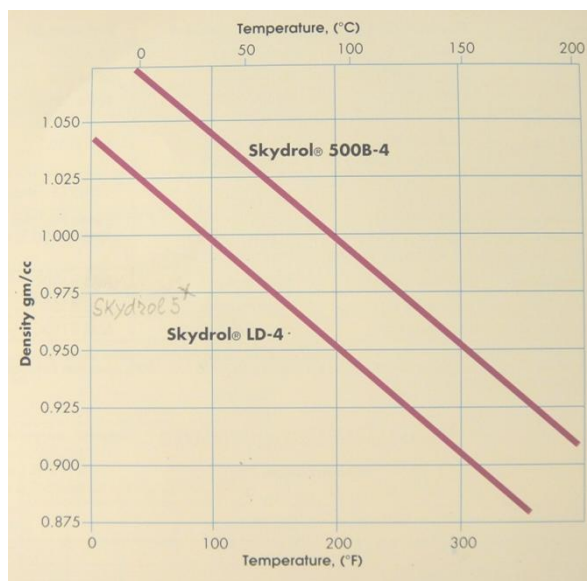


Рис.21. Зависимости плотности жидкостей Skydrol от температуры [17]

2.6. Пожаровзрывобезопасность и горючесть рабочих жидкостей является также очень важным свойством, напрямую влияющим на безопасность полётов [10]. Многолетний опыт эксплуатации самолётов показывает, что основными причинами возникновения возгораний на борту самолётов по вине жидкостей при разгерметизации элементов ГС являются:

- попадание жидкости в виде капель или аэрозоля на сильно нагретые поверхности (детали двигателя, тормозов, системы кондиционирования воздуха и т.п.);
- попадание жидкости в виде аэрозоля в искровой источник, возникающий в результате короткого замыкания в электроцепях или в результате трения планера о грунт при аварийной посадке.

Пожаровзрывобезопасность и огнестойкость рабочих жидкостей определяется комплексным методом, который в определённой степени имитирует возможные источники возгорания, их опасность и оценивается (таблица 4):

- температурой вспышки жидкости при разбрызгивании её под давлением в виде аэрозоля при поджигании искрой;
- температурой самовоспламенения жидкости при её контакте с нагретой стальной плитой;
- индукционным периодом (временем) воспламенения жидкости при контакте с открытым пламенем;

-кислородным индексом для жидкости, заключающимся в определении минимальной концентрации кислорода (в %) в смеси с азотом, при которой поддерживается устойчивое горение жидкости.

В таблице 10. приведены характеристики воспламеняемости и горючести рабочих жидкостей

Таблица 10. Характеристики воспламеняемости и горючести рабочих жидкостей АМГ-10 [10], 7-50С-3 [10], НГЖ-5у [14].

Марка жидкости	Температура вспышки паров жидкости, °С	Температура самовоспламенения жидкости, °С
АМГ-10	93	285
7-50С-3	200	35 0
НГЖ-5у	155	630

В таблице 11. приведены для сравнения характеристики воспламеняемости и горючести рабочих жидкостей Skydrol. В связи с тем, что имеется некоторые различия в методиках определения этих параметров жидкости, то целесообразно их названия представить на языке оригинала.

Таблица 11. Характеристики воспламеняемости и горючести рабочих жидкостей Skydrol LD-4, Skydrol 500B-4, Skydrol 5 [17].

Property	Skydrol LD-4	Skydrol 500B-4	Skydrol 5
Flash Point	171 ⁰ С	182 ⁰ С	164 ⁰ С
Fire Point	182 ⁰ С	210 ⁰ С	183 ⁰ С
AIT	471 ⁰ С	507 ⁰ С	482 ⁰ С
Hot Manifold Drip Manifold Temp. Results	704 ⁰ С Equivalent to Std.	704 ⁰ С Better than Std.	-
Hot Manifold Sprey Fluid Temp. Manifold Temp. Fluid Pressure Results	75 ⁰ С 593 ⁰ С 68,9 Bar No flashing or burning	75 ⁰ С 649 ⁰ С 68,9 Bar No flashing or burning	-

2.7. Пенообразующие свойства рабочих жидкостей проявляются в процессе механического перемешивания, кавитации или выделения растворённого газа в жидкости

в зонах пониженного давления возникают газовые пузыри, которые при контакте друг с другом могут давать пену, т. е. гетерогенную систему, состоящую из многочисленных пузырьков, отделенных друг от друга тонкими жидкими плёнками [10]. Свойства этих систем определяются, прежде всего, свойствами поверхностно-активных веществ (ПАВ), которые обычно присутствуют в технических жидкостях. Роль ПАВ могут играть технологические примеси, загрязнения, присадки, вода и т. п. Из эксплуатационных характеристик гидравлических жидкостей наибольший интерес представляют вспениваемость и устойчивость пен, так как образование пены может привести к разрыву гидравлической потока и нарушению работы системы.

В рабочем диапазоне температур пенообразующие свойства жидкостей существенно меняются. У большинства жидкостей в зоне положительных температур от 50 до 100° наблюдается максимальная вспениваемость, в 2—3 раза превосходящая средние значения этого показателя при других температурах, а устойчивость пен жидкости повышается при отрицательных температурах. Используемые в настоящее время гидравлические жидкости обладают сравнительно высокими характеристиками пенообразующих свойств и снижение их склонности к пенообразованию представляет большой интерес для практики. Установлено, что эффективные пеногасители, которыми являются поверхностно-активные вещества (ПАВ), могут быть одновременно и эффективными стабилизаторами пены, т. е. одни и те же вещества в любой системе могут проявлять как стабилизирующее, так и пеногасящее действие. В молекулярно растворенном состоянии они действуют как стабилизаторы пен, а в нерастворенном состоянии, наоборот, являются пеногасителями. Поскольку растворимость веществ в значительной степени зависит от температуры, то в широком температурном интервале может проявляться двойственный характер действия ПАВ.

С учётом этого для эффективного пеногашения необходимо применять поверхностно-активные вещества, нерастворимые в области рабочих температур. Но такая система будет представлять не однородную жидкость, а коллоидный раствор, что недопустимо в практике использования жидкостей для авиационных ГС. Поэтому в настоящее время наиболее радикальным способом ликвидации пены или снижения её количества до заданного уровня при эксплуатации различных гидравлических жидкостей в ГС является использование различных конструктивных решений [13], как например, применение пеногасящих перегородок в гидробаках открытого типа, применение эффективных сепараторов газа в зонах пониженного давления, ликвидация кавитационных зон в ГС, включая насосы и их всасывающие магистрали, ликвидация контакта газа с жидкостью путём при-

менения закрытых ГС, включая применение вакуумирования жидкости при её заправке в ГС.

2.8. Смазочная способность связана с большой сложностью и многообразием явлений, происходящих в зоне трения при граничной смазке, которая наблюдается в гидравлических агрегатах, и чрезвычайной трудностью экспериментального исследования их механизма [10]. Учитывая требования к гидравлическим жидкостям как к смазочным материалам и исходя из современных представлений о механизме смазочного действия, понятие, смазочная способность следует определить как свойство жидкости в заданных условиях граничной смазки при заданном сочетании материалов трущейся пары предотвращать в той или иной степени износ трущихся поверхностей, снижать трение и обеспечивать заданную длительность (ресурс) работы.

Из этого определения следует, что смазочная способность определяет совокупность физико-механических и физико-химических свойств граничного слоя, противоизносных и противозадирных свойств жидкости. Эта характеристика может быть оценена только с учётом физической природы и свойств материала пары трения, а также условий работы жидкости (температура, природа контактирующей с жидкостью газовой среды и т. п.).

Наиболее объективно смазочная способность жидкости может быть оценена при работе реальных гидроагрегатов в условиях, максимально приближающихся к условиям эксплуатации по температурам и давлениям. Для этой цели на практике обычно используются гидравлические стенды с насосами и агрегатами, на которых в заданных условиях ведётся прокачка жидкости по замкнутому контуру [12]. При таких испытаниях критерием оценки смазочной способности обычно является время работы насоса или агрегата до выхода его из строя в результате износа элементов трущихся пар. Смазочная способность жидкости АМГ-10 с повышением температуры несколько ухудшается, но остаётся удовлетворительной. Для жидкости 7-50С-3 характерно резкое ухудшение смазочной способности с повышением температуры. При $+(150 - 200)^{\circ}\text{C}$ она обладает плохой смазочной способностью и применять её в этом диапазоне температур необходимо очень осторожно и кратковременно. Жидкость НГЖ-5у имеет хорошую смазочную способность при различных температурах вплоть до максимальных рабочих температур. Указанные диапазоны температур рабочей жидкости диктуют определённые ограничения по длительности работы агрегатов и по использованию жидкостей в различных температурных диапазонах.

2.9. Растворимость газов. Наличие растворённых в жидкости газов снижает объёмный модуль упругости, усугубляет кавитационные процессы. В целях уменьшения процентного содержания газов в жидкости применяют различные конструктивные решения, к которым относятся, например: постоянная сепарация газов в сливных магистралях или гидробаках; применение ГС закрытого типа, где минимизируется контакт жидкости и газа; применение вакуумирования жидкости при её заправке в ГС закрытого типа, что позволяет предотвратить снижение жёсткости гидроприводов рулей самолётов [13]. Например, вакуумирование жидкости применённое на самолёте Конкорд позволило уменьшить площадь поршней РП элевонных и руля направления на ~10%, обеспечив необходимую безопасность от рулевых форм флаттера при меньшей мощности ГС и заданное снижение массы ГС.

Содержание растворённого в жидкости воздуха в состоянии поставки, объёмн. %, равно:

-для АМГ-10	10-11,1;
-для 7-50С-3	14;
-для НГЖ-5у	8,1.

2.10. Гидролитическая устойчивость характеризует склонность жидкости к гидролизу в контакте с водой. Эта характеристика определяется [10] качественными и количественными изменениями, происходящими в жидкости под действием воды при 94—96°C в течение 48 час: изменением внешнего вида, кислотного числа, коррозии образца меди, помещенного в слой жидкости, и кислотности водного слоя. Жидкость, склонная к гидролизу, должна допускаться к эксплуатации только в герметичных системах, в которые не возможен доступ влаги, а в авиационных ГС такие жидкости не допускаются к применению.

Вода в жидкостях ГС может содержаться в нерастворённом и растворённом состоянии. Нерастворённая вода, находящаяся в жидкости в виде отдельной фазы (эмульсия или отделившийся слой воды), может попасть в жидкость в состоянии поставки из-за негерметичности тары, неправильной транспортировки и хранения или при загрузке жидкости во влажную тару. В процессе эксплуатации это может произойти в случае нарушения герметичности системы вследствие попадания конденсационной влаги при контакте с газом повышенной влажности [10]. Обычно это происходит из систем наддува гидробаков открытого типа недостаточно осушенным воздухом системы кондиционирования. Поэтому целесообразны системы наддува сухим воздухом или азотом из специального баллона. Наличие нерастворённой воды в жидкости может привести к резкому изменению её

физико-химических свойств в результате вымывания присадок, коррозии металлов в конструкции и кристаллизации воды при низких температурах. Поэтому содержание её в гидравлической жидкости недопустимо.

Растворённая вода почти всегда присутствует в рабочих жидкостях. Она может быть в виде технологической примеси, освободиться от которой обычными методами практически невозможно, или в виде гигроскопической воды, попавшей при эксплуатации из газа, контактирующего с жидкостью.

Содержание растворённой воды допускается только в определённых пределах. Так, у жидкостей на нефтяной основе в состоянии поставки оно обычно равно тысячным долям процента, а при эксплуатации не превышает 0,01 вес. %.

В настоящее время содержание воды в гидравлических жидкостях устанавливаются и регламентируются техническими условиями и является одним из важнейших показателей свойств жидкостей, по которому определяется возможность продолжения эксплуатации жидкости в ГС самолёта или её браковка с полной или частичной её заменой на новую.

Содержание воды в состоянии поставки жидкости, вес. %, равно:

- для АМГ-10 0,0048-0,0052;
- для 7-50С-3 0,009-0,02;
- для НГЖ-5у 0,045.

В эксплуатации содержание воды, например, в жидкости НГЖ-5У допускается не более в вес. %: 0,1 [15].

2.11. Испаряемость - характеристика летучести высокотемпературных рабочих жидкостей [10] определяется методом потерь жидкости при испарении. Испытание проводится при максимальных рабочих температурах с определённой навеской жидкости, помещенной в стеклянный реактор с постоянным зеркалом испарения. По разнице в весе жидкости до и после испытаний, выраженной в процентах по отношению к её исходному весу, судят об испаряемости жидкости.

	АМГ-10	7-50С-3	НГЖ-5у
Испаряемость за 5 час нагрева при t^0C , вес. %	$t^0C = 125^0C$ ≤ 24 $t^0C = 150^0C$ ≤ 32	$t^0C = 150^0C$ $\leq 1,2$ $t^0C = 200^0C$ $\leq 5,5$	$t^0C = 125^0C$ $\leq 3,5$ $t^0C = 150^0C$ ≤ 11

2.12. Склонность жидкости к образованию твёрдых и липких плёнок.

При работе штоков и валов гидронасосов, силовых цилиндров и некоторых других деталей гидроагрегатов, попеременно работающих то в среде жидкости, то на воздухе в условиях воздействия высоких температур, большое значение имеет способность жидкости сохранять маслянистую плёнку без образования липких и твердых продуктов, что предотвращает возможность залипания и заклинивания движущихся деталей [10].

Эта характеристика определяется химической природой компонентов, входящих в состав жидкости, их испаряемостью и способностью к химическим превращениям под влиянием контакта с кислородом воздуха. В настоящее время поведение жидкости в тонких плёнках проверяется [10] после выдержки её при максимальных рабочих температурах на подложке из нержавеющей *стали*. Охлажденные до комнатной температуры образцы подвергаются визуальному и органолептическому анализу. При этом фиксируется образование твёрдых, липких или маслянистых плёнок.

В жидкостях АМГ-10 и 7-50С-3 не образуются твёрдые, липкие или маслянистые плёнки.

2.13. Токсичность жидкости. В отличие от малотоксичных жидкостей: АМГ-10, 7-50С-3, AcroShell Fluid 41, Mobil Acro HF, FH51, Nucolube 934, жидкости и её пары на фосфоро-органической основе: НГЖ-5У, Skydrol LD-4, Skydrol 500В-4, Skydrol 5, Hyjet 1V-A, признаны токсичными и применение их возможно только при соблюдении определённых правил техники безопасности по этим жидкостям [10]. Эти правила касаются контактирующих с жидкостью работников (обслуживающего персонала), которые должны быть снабжены полиэтиленовыми или резиновыми, стойкими к воздействию жидкости, фартуками, нарукавниками, перчатками, защитными мазями, защитными очками, а в ряде случаев и респираторами. Конструкция самолёта, ГС и её элементов должна обеспечивать отсутствие концентрации паров жидкости выше заданной в пассажирском салоне и кабине экипажа как в нормальном полёте, так и при возникновении отказов типа разгерметизация ГС, используя различные конструктивные решения (см., например, [13]).

2.14. Внешний вид жидкости характеризуется прозрачностью, однородностью и цветом [10]. Авиационным жидкостям придают опознавательный цвет, характерный определённым типам жидкости. Так жидкости АМГ-10, AcroShell Fluid 41, Mobil Acro HF, FH51 окрашиваются в красные тона. Жидкости 7-50С-3, Nucolube 934 – в жёлтые тона, а жидкости НГЖ-5У, Skydrol LD-4, Skydrol 500В-4, Skydrol 5, Hyjet -1V-A^{plus}, Hyjet -V – фиолетовые тона.

В процессе эксплуатации исходный цвет жидкости сохраняется, если обеспечен допустимый диапазон температур жидкости. При высоких температурах и наличии окислительных процессов отдельные компоненты жидкости претерпевают химические изменения, сопровождающихся изменением цвета жидкости. Однако изменение цвета жидкости не является браковочным параметром, поскольку основные её характеристики (вязкость, кислотное число, содержание воды, чистота, температура вспышки и др.) могут остаться в допустимых пределах. Внешний вид жидкости определяется в цилиндре из прозрачного стекла после отстаивания в течение суток. Непрозрачные и неоднородные жидкости к эксплуатации на самолётах не допускаются.

2.15. Поверхностное натяжение жидкости характеризуется поверхностным натяжением, которое выражается в Дм/м^2 или Н/м (дн/см или эрг/см^2) и обозначается σ [10]. Поверхностное натяжение характеризует проникающую способность жидкости, влияет на конструкцию уплотняющих устройств и герметичность агрегатов, на конструкцию сепараторов газа и пеногасителей. Как правило, для большинства чистых веществ поверхностное натяжение линейно убывает с температурой. Для систем, состоящих из смеси двух и более веществ, зависимость поверхностного натяжения от температуры может быть более сложной. В таблице 12 приведены экспериментально найденные значения поверхностного натяжения гидравлических жидкостей при различных температурах. Из таблицы следует, что поверхностное натяжение зависит от природы жидкости и уменьшается с повышением температуры.

Таблица 12. Поверхностное натяжение гидравлических жидкостей σ [дн/см] или [мН/м] при различных температурах

Жидкости	20 ⁰ С	30 ⁰ С	40 ⁰ С	50 ⁰ С	60 ⁰ С	70 ⁰ С	80 ⁰ С	90 ⁰ С	100 ⁰ С
АМГ-10	28,9	28,2	27,4	26,9	26,0	25,1	24,2	23,4	22,6
7-50С-3	27,6	27,1	26,5	25,8	25,3	24,4	23,7	23,1	22,5
НГЖ-5у	28,7	-	-	-	-	-	-	-	-

2.16. Электрокинетическая эрозия рабочих кромок золотников, обычно свойственна жидкостям на фосфоро-органической основе [13], может происходить лавинообразно, выводя из строя золотниковые устройства за 10-15 часов работы, и практически не проявляется у жидкостей на нефтяной основе и жидкостей типа 7-50С-3, обусловлена возникновением статического электричества на поверхностях дросселирующих щелей золотников в результате электризации потока жидкости. На границе раздела жидкой и твёрдой фаз образуется двойной электрический слой. Суммарный заряд равен нулю. При движении жидкости двойной слой час-

тично разрушается и в жидкости накапливается избыточное количество зарядов одного знака (рис.22, 23).

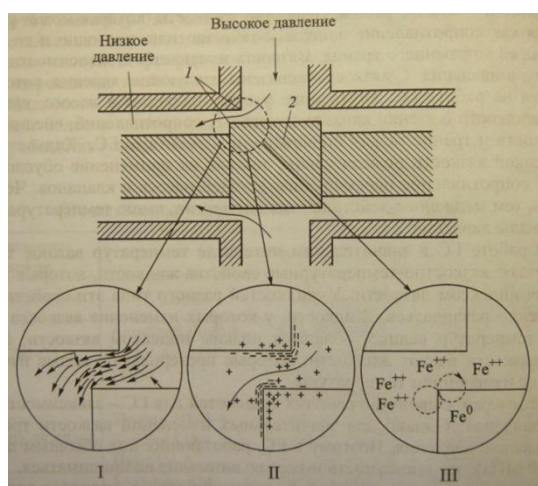


Рис.22. Схема процесса электрокинетического эрозионного процесса в золотниковых устройствах: I –поток жидкости, II-образование зарядов, III-электрокинетическая эрозия, разрушение кромок.

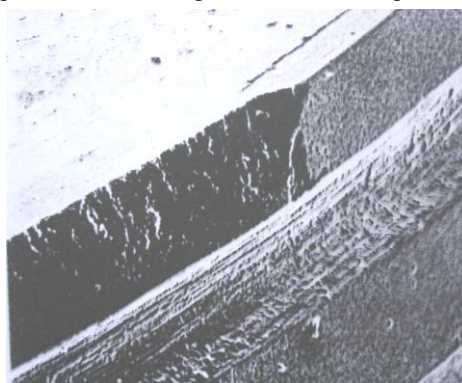


Рис.23. Пример разрушенной кромки золотника под действием электрокинетического эрозионного процесса.

Жидкость, протекая с большой скоростью через очень узкую щель золотниковой пары, вызывает появление пристенного тока, вследствие чего возникает электрокинетическая эрозия, сопровождающаяся разрушением поверхности золотника (рис.22.). Для исключения этого чрезвычайно вредного явления применяются специальные присадки. Для оценки электрокинетической эрозии служат стендовые испытания золотниковых распределительных устройств (сервоклапанов). Показателем наличия эрозии служит увеличение утечек жидкости через щель золотниковой пары через определённое время испытания. Замеряется утечка жидкости через распределитель или изменение давления при нейтральном положении золотника до начала испытаний и в процессе испытаний через заданные промежутки времени. При отсутствии эрозии значения контролируемого параметра практически не изменяется, при наличии эрозии – изменяется (рис.24.).

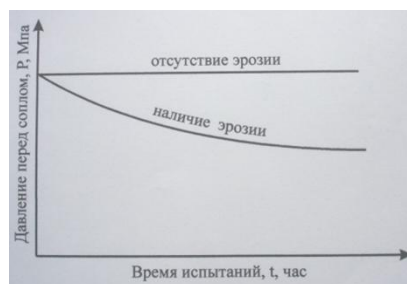


Рис.24. Стеновая проверка наличия электрокинетической эрозии.

2.17. Кислотное число характеризует среду гидравлической жидкости [10] и выражается в количестве миллиграммов едкого калия, необходимого для нейтрализации 1грамма жидкости: мг КОН/1г жидкости. В качестве характеристики среды используется также и показатель концентрации ионов водорода pH . Например, для дистиллированной воды $pH=7$. Если $pH < 7$, то среда кислая; если $pH > 7$, то среда щелочная. По изменению кислотного числа или pH можно судить об изменениях, происходящих в жидкости, а нормирование указанных показателей среды в состоянии поставки жидкости и в эксплуатации приводятся в технических условиях на жидкости, при этом их величины различны для различных жидкостей и устанавливаются определённые предельно допустимые значения КЧ, которые записываются в технические условия (ТУ) на жидкость [10]. Кислотное число или pH является одним из важнейших показателей свойств жидкостей, по которому определяется возможность продолжения эксплуатации жидкости в ГС самолёта или её браковка с полной или частичной её заменой на новую, и нормируется в руководствах по технической эксплуатации самолётов.

Кислотное число в состоянии поставки [10] регламентируется техническими условиями на жидкость и составляет в мг КОН/1г жидкости:

- для АМГ-10: 0-0,03,
- для 7-50С-3: 0,05-0,1 ,
- для НГЖ-5У: 0,08 [15].

В эксплуатации ведётся периодический контроль свойств жидкости обычно по следующим значениям, записанным в ТУ: **вязкости; кислотному числу; количеству воды и чистоты**. По этим показателям обычно принимается решение о продолжении эксплуатации жидкости или о её полной или частичной замене. В случае необходимости разработчиком могут быть добавлены и др. показатели качества жидкости. Следует отметить, что ресурс жидкости сильно зависит от её температуры как средней по ГС, так и локальной, где температура жидкости кратковременно может достигать высоких значений (например, при

схлопывании кавитационных или воздушных пузырьков, возможность образования которых была допущена при конструировании ГС).

2.18. Чистота рабочей жидкости определяется загрязнениями [10, 13], в которые входят все нежелательные вещества органического и неорганического происхождения и живые организмы (бактерии), находящиеся в жидкостях. Загрязнениями в гидравлических жидкостях могут служить влага в виде свободной или растворённой воды, газы и воздух, химические примеси, бактерии и грибки, и, наконец, частицы разной плотности и формы, отличающиеся от жидкости.

К загрязнениям последнего вида относятся все посторонние частицы, в том числе продукты смолообразования, органические частицы, колонии бактерий и продукты их жизнедеятельности. Эти частицы имеют различные свойства, химический состав и форму. Для упрощения картины размеры частиц загрязнений, кроме волокон, принято оценивать по их наибольшему размеру. Волокнами при этом считаются частицы толщиной не более 30 мк при отношении длины к толщине не менее 10: 1. Кроме того, указанные частицы различаются по твёрдости; частицы, обладающие твёрдостью более 6 по Моосу, принято считать абразивными.

Для цилиндрической золотниковой пары загрязнения, которые в нейтральном положении золотника способны попасть в зазор между золотником и гильзой и увеличить необходимое усилие страгивания, являются наиболее опасными, а загрязнения, свободно прошедшие, не касаясь кромок, в открытые окна при крайних его положениях будут менее опасными загрязнениями, но всё равно будут вызывать износ поверхностей. Главную ответственность за износ вследствие истирания несут частицы, размеры которых соизмеримы с размером зазора между двумя движущимися деталями. Они могут заклинить в зазоре, и тогда, вследствие движения деталей, они оказывают значительное воздействие на поверхность, результатом которого является отрыв новых частиц (рис.25).

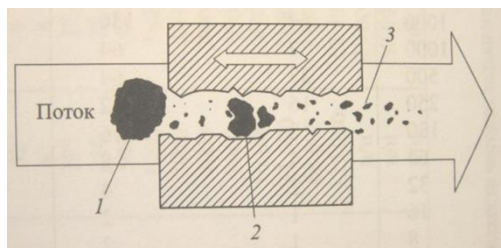


Рис. 25. Износ вследствие попадания в зазор загрязняющих частиц при движении золотника.

1-крупные частицы (слишком большие, чтобы попасть в зазор); 2-мелкие частицы (реакция с поверхностью: абразивный износ); 3-мельчайшие частицы (слишком мелкие, чтобы контактировать с поверхностью)

Решающее влияние на износ системы наряду с размерами частиц, оказывает и их количество. Чем больше частиц, тем быстрее идёт износ. Для классификации имеющейся чистоты гидросистемы существует множество методов, из которых, в основном, применяются стандарты ISO 4406, NAS 1638 - за рубежом и ГОСТ 17216-71 - в России. За рубежом наиболее признанным является стандарт ISO 4406. По этому стандарту определяется количество частиц размером $>5\text{мкм}$ и частиц размером $>15\text{мкм}$ в 100 мл жидкости. Подсчёт производится как под микроскопом, так и при помощи автоматических счётчиков. Полученное количество частиц и их размер кодируется. Так, например, выражение «чистота жидкости 15/12 по ISO 4406 означает, что в 100 мл жидкости присутствуют или допускаются от 16.000 до 32.000 частиц размером $>5\text{мкм}$ и от 2.000 до 4.000 частиц размером $>15\text{мкм}$. Классификация частиц менее 5 мкм не предусмотрена ни в каком стандарте, поскольку во времена создания стандарта не было возможности для их подсчёта.

В российском стандарте номер класса чистоты устанавливается по наихудшей фракции. Уровень чистоты рабочей жидкости устанавливается разработчиком самолёта при согласовании с разработчиками входящих в ГС агрегатов.

Загрязнения оказывают вредное воздействие не только на механизмы системы, но и на гидравлическую жидкость. Прежде всего частицы загрязнений, несущие в себе тот или иной заряд, частички влаги и воздуха, особенно атомарного кислорода, являются центрами окисления или катализаторами окислительных процессов, происходящих в жидкости. Некоторые виды загрязнений, в частности бактериальные, в процессе их жизнедеятельности вырабатывают вещества, реагирующие, например, с антикоррозионными присадками, что может вызвать коррозию материалов конструкции, омываемых жидкостью. Размеры выпадающих в результате окислительных процессов частиц смол увеличиваются, и они постепенно отвердевают. Находясь ещё в гелеобразном состоянии, эти частицы способны полностью закрыть поры фильтров и каналы малых сечений.

Заключение

В настоящей работе представлены свойства рабочих жидкостей авиационных гидросистем, полученные экспериментальным путем и имеющие важнейшее значение при расчете, проектировании и эксплуатации авиационной техники

Список литературы

1. Никитин О.Ф. Рабочие жидкости гидроприводов (классификация, свойства, рекомендации по выбору и применению): учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 148 с.
2. Аксенов А.Ф., Лозовский В.Н. Износостойкость авиационных топливно-гидравлических агрегатов. М.: Транспорт, 1986. 240 с.
3. Кондаков Л.А. Рабочие жидкости и уплотнения гидравлических систем. М.: Машиностроение, 1982. 216 с.
4. Сырицын Т.А. Эксплуатация и надёжность гидро- и пневмоприводов: учебник для студентов вузов по специальности «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика». М.: Машиностроение, 1990. 248 с.
5. Барышев В.И. Классификация, контроль и нормирование промышленной чистоты рабочих жидкостей и масел // Вестник ЮУрГУ. Сер. Машиностроение. 2005. № 1. С. 105-113.
6. Андреев А.Б., Стрельников Э.Н., Шумилов И.С. Исследование чистоты рабочей жидкости в гидравлической системе самолёта: метод. указания к лабораторной работе. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1991. 24 с.
7. Белянин П.Н., Черненко Ж.С. Авиационные фильтры и очистители гидравлических систем. М.: Машиностроение, 1964. 294 с.
8. Уплотнения и уплотнительная техника: Справочник / Л.А. Кондаков, А.И. Голубев, В.Б. Овандер, В.В. Гордеев, Б.А. Фурманов, Б.В. Кармугин; под ред. А.И. Голубева, Л.А. Кондакова. М.: Машиностроение, 1986. 464 с.
9. Прокофьев В.Н., Лузанова И.А. Экспериментальное исследование упругих свойств двухфазных рабочих жидкостей гидроприводов объёмного типа // Известия вузов. Машиностроение. 1968. № 2. С. 87-93.
10. Рабочие жидкости для гидравлических систем самолётов. Практическое руководство / под ред. А.Т. Туманова и Л.В. Горнец. М.: ОНТИ ВИАМ, 1973. 88 с.
11. Хаттон Р.Е. Жидкости для гидравлических систем: пер. с англ. М.: Химия, 1965. 364 с.
12. ГОСТ Р 53715-2009. Топлива авиационные для газотурбинных двигателей. Метод определения смазывающей способности на аппарате шар-цилиндр (BOCLE). М.: Стандартинформ, 2010. 15 с.
13. Шумилов И.С. Системы управления рулями самолётов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 469 с.

Process fluids of aero-hydraulic systems and their properties

04, April 2014

DOI: 10.7463/0414.0705577**I.S. Shumilov¹, L. V. Chursova², L. S. Sedova²**¹Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation²All-Russian scientific research institute of aviation materials, 105005, Moscow, Russian Federationshumilov-it@yandex.rusedovals@viam.ru

The article considers process fluids, which are presently applied to aviation hydraulic systems in domestic and world practice. Aviation practice deals with rather wide list of fluids. Based on the technical specification a designer makes the choice of specific fluid for the specific aircraft. Process fluids have to possess the specified properties presented in the article, namely: lubricating properties; stability of physical and chemical characteristics at operation and storage; low-temperature properties; acceptable congelation temperature; compatibility with materials of units and components of hydraulic systems; heat conductivity; high rigidity; minimum low coefficient of volume expansion; fire-explosion safety; low density. They should also have good dielectric properties, be good to resist to destruction of molecules, have good anticorrosion and anti-erosion properties, as well as not create conditions for emerging electro-kinetic erosion of spool-type and other precision devices, and a number of other properties.

The article presents materials on the oil-based process fluids with + (200-320) °C boiling temperature, gelled by a polymer of vinyl butyl ether, with aging inhibitor and dye for hydraulic systems of the subsonic and transonic aircraft which are combustible, with a temperature interval of use from — 60°C до +125°C. It also describes materials on process fluids, which are based on the mix of polydialkylsiloxane oligomers with organic diester aging inhibitors, and wear-resistant additive to be applied to the hydraulic systems of supersonic aircrafts using a fluid within the temperature interval from - 60 °C to +175°C for a long duration. The fire-explosion safety process fluids representing a mix of phosphoric esters with additives to improve viscous, anti-oxidizing, anticorrosive and anti-erosive proper-

ties are considered as well. They are used within the temperature range from - 60°C to +125°C with overheats up to +150°C.

The article shows experimentally attained properties of process fluids for the aviation hydraulic systems. These properties are essential in design engineering and operation of aircraft equipment.

Publications with keywords: [density](#), [process fluids](#), [hardness](#), [coefficient of volume expansion](#), [fire-explosion safety](#), [destruction](#), [anticorrosion and anti-erosion properties](#), [lubricating properties](#), [congelation temperature](#), [dielectric properties](#)

Publications with words: [density](#), [process fluids](#), [hardness](#), [coefficient of volume expansion](#), [fire-explosion safety](#), [destruction](#), [anticorrosion and anti-erosion properties](#), [lubricating properties](#), [congelation temperature](#), [dielectric properties](#)

References

1. Nikitin O.F. *Rabochie zhidkosti gidroprivodov (klassifikatsiya, svoystva, rekomendatsii po vyboru i primeniyu)* [Operating fluids of hydraulic drives (classification, properties, recommendations on selection and application)]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2007. 148 p. (in Russian).
2. Aksenov A.F., Lozovskiy V.N. *Iznosostoykost' aviatsionnykh toplivno-gidravlicheskiykh agregatov* [Wear resistance of aviation fuel and hydraulic units]. Moscow, Transport Publ., 1986. 240 p. (in Russian).
3. Kondakov L.A. *Rabochie zhidkosti i uplotneniya gidravlicheskiykh sistem* [Operating fluids and seals of hydraulic systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982. 216 p. (in Russian).
4. Syritsyn T.A. *Ekspluatatsiya i nadezhnost' gidro- i pnevmoprivodov* [Operation and reliability of hydraulic and pneumatic drives]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 248 p. (in Russian).
5. Baryshev V.I. [Classification, control and regulation of industrial purity of operating fluids and oils]. *Vestnik YuUrGU. Ser. Mashinostroenie*, 2005, no. 1, pp. 105-113. (in Russian).
6. Andreev A.B., Strel'nikov E.N., Shumilov I.S. *Issledovanie chistoty rabochey zhidkosti v gidravlicheskoj sisteme samoleta* [The study of purity of operating fluids in hydraulic system of aircraft]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 1991. 24 p. (in Russian).
7. Belyanin P.N., Chernenko Zh.S. *Aviatsionnye fil'try i ochistiteli gidravlicheskiykh sistem* [Aviation filters and purifiers of hydraulic systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1964. 294 p. (in Russian).
8. Kondakov L.A., Golubev A.I., Ovander V.B., Gordeev V.V., Furmanov B.A., Karmugin B.V. *Uplotneniya i uplotnitel'naya tekhnika: Spravochnik* [Seals and sealing techniques: Handbook]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 464 p. (in Russian).

9. Prokofev V.N., Luzanova I.A. [Experimental study of elastic properties of two-phase working fluids of displacement type hydraulic drives]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie - Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 1968, no. 2, pp. 87-93. (in Russian).
10. Tumanov A.T., Gornets L.V., eds. *Rabochie zhidkosti dlya gidravlicheskikh sistem samoletov. Prakticheskoe rukovodstvo* [Operating fluids for hydraulic systems of aircraft. Practical guide]. Moscow, Publ. of ONTI VIAM, 1973. 88 p. (in Russian).
11. Hatton R.E. *Introduction to Hydraulic Fluids*. Van Nostrand Reinhold, New York, 1962. (Russ. ed.: Hatton R.E. *Zhidkosti dlya gidravlicheskikh sistem*. Moscow, Khimiya Publ., 1965. 364 p.).
12. *GOST R 53715-2009. Topliva aviatsionnye dlya gazoturbinnnykh dvigateley. Metod opredeleniya smazyvayushchey sposobnosti na apparate shar-tsilindr (BOCLE)* [State Standard of RF 53715-2009. Aviation turbine fuels. Method for determination of lubricity by the ball-on-cylinder lubricity evaluator (BOCLE)]. Moscow, Standartinform Publ., 2010. 15 p. (in Russian).
13. Shumilov I.S. *Sistemy upravleniya rulyami samoletov* [Steering system of aircraft]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2009. 469 p. (in Russian).