

Научная статья

УДК 661.177

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-3-76-90

ЗАРУБЕЖНЫЕ ГИДРОЖИДКОСТИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ РФ

Л.С. Седова¹, А.М. Шестаков¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Приведена информация о зарубежных гидрожидкостях, применяемых на территории Российской Федерации в гражданской авиации. Приведены свойства зарубежных гидрожидкостей: Skydrol LD-4, Skydrol 500B-4, HyJet-IV-A^{plus}, AeroShell Fluid 41, Mobil Aero HF, Hydraunycoil FH 51, ROYCO 756, Nycolube 934. Представлены сведения о российских аналогах: рабочих жидкостях 7-50С-3 и НГЖ-5У, маслах АМГ-10 и МГЕ-10А. Приведены характеристики отечественных гидрожидкостей в сравнении с импортными аналогами. Указана информация по имеющимся зарубежным патентным исследованиям.

Ключевые слова: гидравлическая система (гидросистема), гидравлическая жидкость, самолет, гидрожидкости Skydrol LD-4, HyJet-IV-A^{plus}, AeroShell Fluid 41, Mobil Aero HF, Hydraunycoil FH 51, ROYCO 756, Nycolube 934, рабочие жидкости НГЖ-5У и 7-50С-3, масло АМГ-10

Для цитирования: Седова Л.С., Шестаков А.М. Зарубежные гидрожидкости, применяемые в гражданской авиации РФ // Труды ВИАМ. 2024. № 3 (133). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-3-76-90.

Scientific article

FOREIGN HYDROLIQUIDS, APPLIED IN CIVIL AVIATION OF THE RUSSIAN FEDERATION

L.S. Sedova¹, A.M. Shestakov¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. Information on the foreign hydroliquids applied in the territory of the Russian Federation in civil aviation is provided. Properties of foreign hydroliquids are given: Skydrol LD-4, Skydrol 500B-4, Nyjet-IV-A^{plus}, AeroShell Fluid 41, Mobil Aero HF, Hydraunycoil FH 51, ROYCO 756, Nycolube 934. Data on the Russian analogs are provided: working fluids 7-50C-3 and NGZh-5U, oils AMG-10 and MGE-10A. Characteristics of domestic hydroliquids in comparison with import analogs are provided. Information on available foreign patent researches is specified.

Keywords: hydraulic system (hydrosystem), pressure fluid, airplane, hydroliquids Skydrol LD-4, HyJet-IV-A^{plus}, AeroShell Fluid 41, Mobil Aero HF, Hydraunycoil FH 51, ROYCO 756, Nycolube 934, liquids working NGZh-5U and 7-50C-3, AMG-10 oil

For citation: Sedova L.S., Shestakov A.M. Foreign hydroliquids, applied in civil aviation of the Russian Federation. *Trudy VIAM*, 2024, no. 3 (133), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-3-76-90.

Введение

Развитие авиации характеризуется вводом в эксплуатацию широкофюзеляжных пассажирских самолетов типа аэробус, а также сверхзвуковых пассажирских самолетов. Тем самым увеличились скорости полета самолетов, что привело к существенному расширению сферы применения гидросистем на самолетах и ужесточению требований к гидросистемам и гидравлическим жидкостям [1–6]. К положительным качествам гидравлической системы относятся надежность работы, простота конструктивного и технологического решения силового привода, сравнительно малая плотность, плавность действия и т. д.

С помощью гидросистем обеспечивается работа различных систем самолетов – например, управление поперечным, продольным и путевым курсом самолета, выпуск закрылков, шасси, приведение в движение люков и створок, а также различных механизмов. От свойств рабочей жидкости зависит надежность работы системы самолета в целом, а также характер управления гидроагрегатами, устойчивость эксплуатационных характеристик гидрожидкостей. Гидравлическая жидкость – это один из главных конструктивных элементов гидравлической системы [7].

В данной статье приведены свойства зарубежных гидрожидкостей, разрешенных к применению на территории Российской Федерации в гражданской авиации, таких как HyJet-IV-A^{plus}, Mobil Aero HF, ROYCO 756, Skydrol LD-4, Nycolube 934, Skydrol 500B-4, AeroShell Fluid 41.

Из представленного списка жидкостей самыми используемыми являются Nycolube 934, Skydrol LD-4 и HyJet-IV-A^{plus}. Гидравлические жидкости Skydrol LD-4 и Skydrol 500B-4 производства фирмы Solutia Ins (США) применяются на территории РФ с 1984 г. Синтетическая гидравлическая жидкость Nycolube 934 производства фирмы NYCO (Франция) имеет допуск к применению с 1998 г. и выдерживает рабочие температуры от –60 до +200 °С. Огнестойкая гидравлическая жидкость HyJet-IV-A^{plus} производства компании ExxonMobil Aviation Lubricants (США) допущена к применению в 2003 г.

Все работы выполнены при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ (далее – ВИАМ).

Требования к гидравлическим жидкостям

Предъявление определенных требований к гидрожидкостям обусловлено эксплуатационными условиями, в которых авиационная техника находится в воздушном пространстве, вследствие этого гидравлическая жидкость должна обеспечить бесперебойную работу гидросистемы при всех режимах полета в широком температурном интервале в течение длительного времени [8].

Характеристики вязкости. Гидрожидкость не должна значительно менять вязкость. Так, при понижении температуры до –60 °С вязкость жидкости сильно возрастает, производительность насоса существенно снижается, что вызывает замедление подъема и выпуска шасси. Основными требованиями к гидравлической жидкости являются технические характеристики для вязкости в диапазоне температур: при +70 °С – не менее 8 мм²/с, при –60 °С – не более 2000 мм²/с [8].

Стабильность против окисления. Содержащийся в воздухе кислород может вступать в химическую реакцию с одним из компонентов гидрожидкости, что приводит к ее окислению. В свою очередь продукты окисления вызовут коррозию металлических деталей. Одним из важных требований к гидрожидкости является устойчивость к воздействию окисления [9–14].

Огнестойкость. Одним из важных требований также является пожаробезопасность гидрожидкости. Возгорание может произойти как от прямого источника огня, так и от повышения температуры в результате ударов, трения и т. д. Существуют различные методы оценки – например, определение температур самовоспламенения, вспышки и воспламенения [7]. По существующим нормам безопасности температура вспышки, определяемая в открытом тигле, составляет не менее 160 °С.

Рабочий диапазон температур использования составляет от –60 до +200 °С.

Гидрожидкости должны быть неагрессивными и нетоксичными.

Распространенные гидравлические жидкости, используемые за рубежом

Рассмотрим характеристики гидрожидкостей на примере спецификаций MIL-H-5606G, MIL-H-83282 и MIL-H-87257, имеющих широкое применение в мире [15].

Гидрожидкость AeroShell Fluid 41 имеет спецификацию MIL-H-5606G и относится к минеральному типу масел; она совместима с гидрожидкостями типа AeroShell Fluid 4, 31, 51. Рабочий диапазон температур – от –54 до +90 °С, в герметичной системе – от –54 до +135 °С. Одобрена спецификацией DEF STAN 91-48 Grade Superclean и рекомендована к применению при производстве на территории Европы [16].

Гидравлическая жидкость по спецификации MIL-H-83282 разработана в 1960-х гг. как улучшенный вариант гидрожидкости AeroShell Fluid 41 по характеристике воспламеняемости. Жидкость на основе полиальфаолефина имеет высокую вязкость при низких температурах, что ухудшает работу гидросистемы. Рабочий диапазон температур – от –40 °С.

Жидкость AeroShell Fluid 41 продолжали улучшать по температурному диапазону эксплуатации. Гидрожидкость по спецификации MIL-H-87257 сохраняет текучесть при температуре –54 °С [17] и ранее была широко востребована.

Гидравлическая жидкость X/C 5606H (J) (официальный представитель – Phillips 66) имеет спецификацию MIL-H-5606H (J) и изготовлена на основе минеральных масел. Рабочий диапазон температур – от –54 до +90 °С, в негерметичной системе – от –54 до +135 °С. Отвечает экологическим требованиям для гидрожидкостей и соответствует стандартам для лабораторных испытаний [18].

Компания Eastmen Aviation Solutions выпускает гидрожидкости под маркой Skydrol™. В настоящее время имеются жидкости I, II, III, IV и V типов. Skydrol V является жидкостью нового поколения [19].

Компания ExxonMobil выпустила на рынок такие жидкости, как HyJet-IV-A, HyJet-IV-A^{plus} и HyJet-V. Последняя – это огнестойкая гидравлическая жидкость V типа с улучшенными характеристиками по показателю кинематической вязкости [20].

Гидравлические жидкости в российской авиации

В настоящее время в российской авиации широко используются следующие гидрожидкости: рабочие жидкости 7-50С-3 и ЛЗ-МГ-2, масло АМГ-10 и масло гидравлическое МГЕ-10А.

Разработчиком состава и технологии изготовления жидкости 7-50С-3 является предприятие ГОСНИИ ГА. В 1975 г. введен в действие ГОСТ 20734–75 на данный материал. Жидкость 7-50С-3 – смесь полисилоксановой жидкости и органического эфира с различными добавками, которая эксплуатируется при температурах от –60 до +200 °С. Выпускается на следующих предприятиях: ЗАО «Современные химические технологии» (ЗАО «Совхимтех»), АО «НПЦ Спецнефтьпродукт», ООО «Обнинскоргсинтез», ООО «Пластнефтехим» и ООО «Новочеркасский завод смазочных материалов» [21–23].

Масло АМГ-10 является совместным продуктом ГОСНИИ ГА (г. Москва) и ВНИИ НП (г. Москва). Миннефтехимпромом СССР был введен в действие ГОСТ 6794–75 на масло АМГ-10 с дальнейшими изменениями 1–5. С 2017 г. на материал действует ГОСТ 6794–2017 [24]. Масло АМГ-10 представляет собой смесь нефтяной фракции и присадок (антиокислительной, загущающей, противоизносной и т. д.). Температура эксплуатации – от –50 до +125 °С с перегревами до 150 °С. Выпуск масла АМГ-10 налажен на предприятиях ООО «НПП Квалитет», ООО «Полиэфир», АО «НПЦ Спецнефтьпродукт» и ООО «Пластнефтехим» [21, 23].

Масло гидравлическое МГЕ-10А разработано во ВНИИ НП (г. Москва) по ТУ 38.401-58-337–2003. Масло МГЕ-10А имеет загущенную нефтяную основу с добавками из противозадирных, противоизносных и антиокислительных присадок. Работает при температурах – от –55 до +100 °С. Выпуск масла гидравлического МГЕ-10А осуществляют на ООО «Обнинскоргсинтез», ООО «ЛЛК-Интернешнл», ООО «Полиэфир» и ООО «НПП Квалитет» [21, 23].

Рабочую жидкость ЛЗ-МГ-2 выпускают по ТУ 38.401-58-336–2003 (ВНИИ НП) и изготавливают из нефтяного сырья и дополнительных присадок. Режим эксплуатации – от –60 до +125 °С. Выпуск жидкости ЛЗ-МГ-2 налажен на ООО «Полиэфир» и «ЛЛК-Интернешнл» [21, 23].

Рабочая жидкость НГЖ-5У разработана во ВНИИ НП при непосредственном участии ВИАМ и достаточно продолжительное время выпускалась по ТУ 38.401-58-57–93. Рабочая жидкость содержит в составе эфиры фосфорной кислоты с улучшенными присадками, но на территории РФ данную жидкость не выпускают [21].

В табл. 1 приведены марки отечественных гидравлических жидкостей и зарубежные варианты гидрожидкостей, применяемые на территории РФ [21].

Таблица 1

Российские гидрожидкости и их зарубежные аналоги

Отечественные гидрожидкости	Зарубежные гидрожидкости
НГЖ-5У (ТУ 38.401-58-57–93)	Skydrol LD-4, Skydrol 500B-4, HyJet-IV-A ^{plus}
АМГ-10 (ГОСТ 6794–75)	AeroShell Fluid 41, Mobil Aero HF, Hydraunycoil FH 51, ROYCO 756
7-50С-3 (ГОСТ 20734–75)	Nycolube 934
МГЕ-10А (ТУ 38 101328–81)	Hydraunycoil FH 16
ЛЗ-МГ-2 (ТУ 38.101328–81)	Аналоги не указаны

Зарубежные гидрожидкости, применяемые на территории Российской Федерации в гражданской авиации

В данной работе приведены характеристики зарубежных гидрожидкостей, которые прошли испытания и одобрены к использованию на территории Российской Федерации.

Более подробно рассмотрены характеристики гидрожидкостей типа Skydrol LD-4 и HyJet-IV-A^{plus}, а также справочно приведена информация по остальным гидрожидкостям.

Гидравлические жидкости Skydrol 500B-4 и Skydrol LD-4

Огнестойкие гидравлические жидкости Skydrol LD-4 и Skydrol 500B-4 на основе эфиров фосфорной кислоты содержат присадки, улучшающие различные характеристики. Гидрожидкость Skydrol LD-4 – представитель IV поколения гидрожидкостей.

Гидрожидкость Skydrol LD-4 применяют без обновленного состава более 28 лет, она имеет высокие эксплуатационные характеристики, превосходную устойчивость к эрозии и является самой продаваемой в мире [19].

Гидравлические жидкости Skydrol 500B-4 и Skydrol LD-4 производства фирмы Solutia Ins допущены к применению на территории РФ в 1984 г. Жидкости модификации типа Skydrol окрашены в фиолетовый цвет, что является их отличительной чертой.

Испытания жидкостей проводили в ведущих организациях России по исследованию материалов для самолетостроения, таких как ВИАМ, ММКБ «Родина», завод «Рубин», ЦИАМ (г. Москва), НИИРП (Московская обл., Сергиево-Посадский округ) и т. д. Гидрожидкости Skydrol 500B-4 и Skydrol LD-4 являются аналогами отечественной гидравлической жидкости НГЖ-5У. Основные физические свойства гидрожидкостей Skydrol LD-4 и Skydrol 500B-4 представлены в табл. 2 [19].

Таблица 2

Физические свойства гидравлических жидкостей Skydrol LD-4 и Skydrol 500B-4

Показатель	Значения показателя для гидрожидкости	
	Skydrol LD-4	Skydrol 500B-4
Кинематическая вязкость (ASTM D445), мм ² /с, при температуре, °С:		
-54	1185	2765
38	11,42	11,51
99	3,93	3,78
Плотность при 25 °С (Eastman116-B), г/см ³	1,006	1,054
Относительная влажность (ASTM D1744), %	0,07	0,07
Кислотное число (ASTM D 974), (мг-КОН)/г	0,03	0,03
Теплота сгорания (ASTM D240), БТЕ/фунт	13 700	13 400
Температура самовоспламенения (ASTM D2155), °С	471	507
Температура воспламенения (ASTM D92), °С	171	182
Температура самовозгорания (ASTM D92), °С	182	210
Удельная теплоемкость при 38 °С (ASTM D2766), кал/(г·°С)	0,437	0,418
Удельная теплопроводность при 100 F (ASTM D2717), кал/(см·с·°С)	0,000326	0,000315

Жидкости Skydrol 500B-4 и Skydrol LD-4 используются на многих зарубежных авиалайнерах следующих зарубежных компаний: Boeing Commercial Airplane Co BMS3-11, Airbus Industrie NSA307110, British Aerospace BAC M.333.B, Lockheed Aircraft Corp. LAC C-34-1224 и т. д. [19].

Огнестойкая гидравлическая жидкость HyJet-IV-A^{plus}

Гидравлическая жидкость HyJet-IV-A^{plus} – огнестойкая гидрожидкость на основе эфиров фосфорной кислоты, которая относится к IV типу гидравлических жидкостей; имеет низкую плотность и высокую температурную стабильность, обеспечивает высокоэффективную защиту от коррозии. Такая высокая стабильность означает отсутствие необходимости смены масла из-за ухудшения его качества, что в результате способствует снижению затрат на ремонт и техническое обслуживание системы. Сниженная плотность гидрожидкости означает уменьшение массы самолета и, следовательно, меньший расход топлива. Предотвращает коррозию, тем самым снижает риск повреждения гидросистемы.

Для получения разрешения на использование гидрожидкости HyJet-IV-A^{plus} испытания проводили в таких действующих организациях, как ВИАМ, завод «Рубин»,

ММКБ «Родина», НИИРП (Московская обл., Сергиево-Посадский округ), ЦИАМ (г. Москва). Гидрожидкость HyJet-IV-A^{plus} является эквивалентом российской гидрожидкости НГЖ-5У.

Основные физико-химические характеристики гидрожидкости HyJet-IV-A^{plus} следующие [25]:

Кинематическая вязкость (ASTM D445), мм ² /с, при температуре, F:	
+100	10,6
+210	3,6
-65	1320
Точка (температура) текучести (ASTM D97/ASTM D5950), F	-80
Кислотное число (ASTM D974), (мг·KOH)/г	0,04
Точка (температура) вспышки (ASTM D92), F	349
Температура воспламенения (ASTM D92), F	370
Температура самовоспламенения (ASTM D2155), F	800
Содержание воды (ASTM D6304), % (по массе)	0,1
Стабильность – вязкость при 40 °С (ASTM D5621), %	22
Плотность при 25 °С (ASTM D4052), г/см ³	0,996
Теплопроводность при 40 °С, кал/(см·с·К)	0,00033
Электропроводность при 20 °С (ASTM D2624), мСм/см	1,4
Удельная теплоемкость, кал/(г·К)	0,41

Гидравлическая жидкость HyJet-IV-A^{plus} применяется на самолетах фирм Airbus, Boeing, Lockheed (США) и т. д. Основным производителем и поставщиком данной жидкости является компания ExxonMobil Corporation. Жидкость удовлетворяет требованиям спецификации SAE AS 1241D и имеет одобрение по спецификациям фирмы Boeing (BMS 3-11P, Type IV и V) [25].

Приведем сравнение характеристик рабочей жидкости НГЖ-5У с гидрожидкостями Skydrol LD-4, Skydrol 500B-4 и HyJet-IV-A^{plus} в табл. 3.

Таблица 3

Сравнительные физико-химические характеристики рабочей жидкости НГЖ-5У с зарубежными аналогами

Характеристика	Значения характеристик для гидрожидкостей			
	НГЖ-5У	Skydrol LD-4	Skydrol 500B-4	HyJet-IV-A ^{plus}
Температура вспышки (воспламенения), °С	158	171	182	158 (349 F)
Температура самовоспламенения, °С	590	471 (471 F)	507 (507 F)	427 (800 F)
Кислотное число, (мг·KOH)/г	0,02	0,03	0,03	0,04
Плотность при 25 °С, г/см ³	–	1,009	1,057	0,996

Гидравлическая жидкость AeroShell Fluid 41

Жидкость AeroShell Fluid 41 – это минеральное гидравлическое масло, которое имеет высокий уровень чистоты и обладает улучшенными эксплуатационными свойствами; содержит присадки, обеспечивающие отличную текучесть при низких температурах, а также устойчивость к износу.

Производитель гидрожидкости AeroShell Fluid 41 – фирма Shell (Германия), она применяется на территории РФ с 1984 г. Рабочая температура в герметичных системах – от –54 до +135 °С [16].

Испытания гидравлической жидкости проводили в следующих организациях: ММКБ «Родина», НИИРП (Московская обл., Сергиево-Посадский округ), завод «Рубин» и ВИАМ. Жидкость AeroShell Fluid 41 смешивается с маслом АМГ-10 в любых соотношениях.

Типичные физико-химические характеристики гидрожидкости AeroShell Fluid 41 следующие [16]:

Кинематическая вязкость, мм ² /с, при температуре, °С:	
+100	5,3
+40	14,1
–40	491
–54	2300
Температура вспышки в закрытом тигле, °С	105
Температура самовоспламенения, °С	230
Относительная плотность при температуре 15,6 °С	0,87
Кислотное число, (мг·КОН)/г	0,01
Содержание воды, ppm	<100
Противоизносные свойства – диаметр следа износа, мм	0,95
Набухание эластомеров, %	25,4
Стабильность при низких температурах (–54 °С) – 72 ч	Выдерживает
Температура застывания, °С	–60

Гидравлическая жидкость AeroShell Fluid 41 соответствует спецификации MIL-PRF-5606H [16].

Гидравлическое масло Mobil Aero HF

Авиационное гидравлическое масло Mobil Aero HF представляет собой композицию на нефтяной основе с загущающей полимерной добавкой, ингибитором окисления, красителем и т. д.

Гидравлическое масло фирмы Mobil Aero HF (США) разрешено к применению в 1998 г. и может использоваться при температурах до –54 °С [26]. Российским аналогом жидкостей подобного типа является масло АМГ-10. Испытания проводились в научно-исследовательских центрах России. Основные характеристики масла Mobil Aero HF следующие [26]:

Кинематическая вязкость (ASTM D445), мм ² /с, при температуре, °С:	
+100	5,1
+40	13,8
–40	450
–54	1950
Точка (температура) текучести (ASTM D97), °С	–66
Кислотное число, (мг·КОН)/г	0,03
Температура вспышки (ASTM D93), °С	90
Плотность при 25 °С (ASTM D4052), г/см ³	0,881
Индекс вязкости (ASTM D2270)	370

Масло Mobil Aero HF соответствует спецификации MIL-PRF-5606.

Минеральная гидравлическая жидкость Hydraunycoil FH 51

Жидкость Hydraunycoil FH 51 – минеральная гидрожидкость, которая в основном применяется в гидросистемах самолетов и вертолетов. Возможно ее использование в пневмогидравлических агрегатах с большими степенями адиабатического сжатия.

Гидрожидкость Hydraunycoil 51 производства фирмы NYCO (Франция) используется на территории РФ с 1992 г. Диапазон рабочих температур: в закрытой системе – от –54 до +135 °С, в открытой системе – от –54 до +90 °С [27].

Испытания гидравлической жидкости Hydraunycoil FH 51 проводились в таких организациях, как ГосНИИ ГА, ВИАМ, завод «Рубин». Жидкость Hydraunycoil FH 51 является аналогом масла АМГ-10 и взаимозаменяема с ним.

Основные физические характеристики гидрожидкости Hydraunycoil FH 51 следующие [27]:

Кинематическая вязкость, мм ² /с, при температуре, °С:	
+100	5,39
+40	14,12
–40	444
–54	2012
Температура вспышки, °С	91
Испаряемость в течение 6 ч при температуре 71 °С, % (по массе)	16,2
Содержание воды, мг/кг	57
Точка (температура) текучести, °С	–69
Кислотное число, (мг·КОН)/г	0,04
Плотность при температуре 15 °С, г/см ³	0,874

Минеральная гидравлическая жидкость Hydraunycoil FH 51 соответствует спецификации MIL-PRF-5606 LIMT [27].

Масло ROYCO 756

Минеральное масло ROYCO 756 используется для реактивных турбовинтовых двигателей, является высоковязким маслом, способствует защите от коррозии и замедляет процесс износа деталей гидросистемы. Масло не агрессивно к металлам, сплавам и конструкционным материалам.

Гидрожидкость ROYCO 756 производит фирма Anderol (Нидерланды), ее испытания проведены с 2002 по 2003 г., но широкого распространения она не получила. Диапазон температур использования: в негерметичной системе – от –54 до +90 °С, в герметичной системе – от –54 до +135 °С [28]. Авиационное масло ROYCO 756 полностью совместимо с маслом АМГ-10, что подтверждено испытаниями, которые проводились в научно-исследовательских институтах России. Основные физические свойства масла ROYCO 756 следующие [28]:

Кинематическая вязкость, мм ² /с, при температуре, °С:	
+100	5,13
+40	13,9
–40	451
–54	1850
Точка (температура) вспышки в открытом тигле, °С	95

Температура застывания, °С	-70
Кислотное число, (мг·КОН)/г	0
Плотность при температуре 20 °С, г/см ³	0,88
Содержание воды, мг/кг	50
Испаряемость в течение 6 ч при температуре 160 °С, % (по массе)	13,6

Минеральное масло ROYCO 756 соответствует спецификации MIL-PRF-5606H.

Результаты сравнения свойств зарубежных гидрожидкостей со свойствами масла АМГ-10 приведены в табл. 4.

Таблица 4

Сравнительные физико-химические свойства гидрожидкостей

Свойства	Значения свойств для гидрожидкостей				
	Масло АМГ-10	AeroShell Fluid 41	Mobil Aero HF	Hydraunycoil FH 51	ROYCO 756
Температура вспышки, °С	96	105	90	91	95
Температура застывания, °С	-70	-60	-66	-69	-70
Кислотное число, (мг·КОН)/г	0,02	0,01	0,03	0,04	0
Плотность, г/см ³ , при температуре, °С	20	–	–	–	0,88
	15	–	0,870	0,874	–

Синтетическая жидкость Nycolube 934

Nycolube 934 – это синтетическая гидравлическая жидкость, которая состоит из смеси силиконовых жидкостей с эфирами, содержит в составе антиоксидантные, противоизносные присадки и присадки узкой направленности. Жидкость Nycolube 934 применяется для обеспечения работы амортизаторных стоек шасси.

Гидравлическую жидкость Nycolube 934 производит фирма NYCO (Франция). Работы с жидкостью проводились с 1998 г., она может использоваться в диапазоне температур от -60 до +200 °С [29]. Синтетическая жидкость Nycolube 934 является зарубежным аналогом рабочей жидкости 7-50С-3, их сравнительные испытания проводились в ВИАМ, ВНИИ НП и ЦИАМ. Описание свойств гидравлической жидкости Nycolube 934 и жидкости 7-50С-3 представлено в табл. 5 [29].

Таблица 5

Сравнительные свойства гидрожидкостей Nycolube 934 и 7-50С-3

Свойства	Значения свойств для гидрожидкостей	
	Nycolube 934	7-50С-3
Кинематическая вязкость, мм ² /с, при температуре, °С:	200	1,3
	20	22
	-60	4200
Точка (температура) вспышки в открытом тигле, °С	201	200
Температура застывания, °С	-73	-70
Плотность при температуре 20 °С, г/см ³	0,932	0,93–0,94
Кислотное число, (мг·КОН)/г	0,03	0,1
Содержание воды, мг/кг	90	–

Влияние специальных добавок на эксплуатационные характеристики

Вводимая в состав гидрожидкости эпоксидная присадка действует как акцептор кислоты и используется в качестве ингибитора гидролиза. Антиэрозионная присадка обеспечивает необходимый уровень удельной электрической проводимости. Антикоррозионная присадка гарантирует стабильность жидкости к гидролитической устойчивости. Загущающая присадка оказывает влияние на вязкость гидрожидкости. Стандартный набор присадок содержит антиокислители и ингибиторы коррозии меди, железа, красителя.

Разработка новых зарубежных аналогов гидрожидкостей для самолетов

В настоящее время самыми востребованными являются гидрожидкости, выпускаемые под марками Skydrol™ и HyJet™.

Компания Solutia Ins (США) выпустила на рынок обновленную жидкость под маркой Skydrol PE-5 на основе эфиров фосфорной кислоты с комплексом присадок. На ее применение получены допуски от таких производителей, как Boeing (кроме самолета B787), Airbus, ATR, Bombardier, Gulfstream и COMAC. Гидрожидкость отличается высокой надежностью, имеет продолжительный срок службы, малую плотность (0,993 г/см³) при температуре 25 °С, что в свою очередь позволяет снизить затраты на топливо, жидкость остается подвижной даже при отрицательных температурах (–54 °С) и содержит в своем составе присадки, придающие устойчивость к эрозии, одним из показателей которой является коэффициент объемной деформации. Сравнительные свойства гидрожидкостей Skydrol PE-5 и Skydrol LD-4 представлены в табл. 6 [19].

Таблица 6

Сравнительные свойства гидрожидкостей Skydrol PE-5 и Skydrol LD-4

Свойства	Значения свойств для гидрожидкостей	
	Skydrol PE-5	Skydrol LD-4
Плотность при температуре 25 °С, г/см ³	0,993	1,006
Кинематическая вязкость при температуре –54 °С, мм ² /с	1076	1185
Коэффициент объемной деформации, МПа	1620,2	1592,6

Компания ExxonMobil (США) выпустила на рынок жидкость пятого поколения HyJet™-V – это огнестойкая авиационная гидравлическая жидкость, содержащая в составе эфиры фосфатной кислоты с различными присадками – антикоррозионной, противоизносной, антипенной и т. д. [20].

Для сравнения рассмотрим ряд характеристик жидкостей HyJet™-V и HyJet-IV-A^{plus} (табл. 7).

Таблица 7

Сравнительные характеристики гидрожидкостей HyJet™-V и HyJet-IV-A^{plus}

Характеристика	Метод испытания	Значения характеристик для гидрожидкостей	
		HyJet™-V	HyJet-IV-A ^{plus}
Электропроводность при температуре 20 °С, мкСм/см	ASTM D2624	0,4	1,4
Точка (температура) вспышки, F	ASTM D92	346	349
Содержание воды по Карлу Фишеру, % (по массе)	ASTM D6304	0,09	0,1

Одновременно с выпуском новых гидрожидкостей ведется и научно-исследовательская работа в области интеллектуальной собственности, направленная на поиск новых составов и улучшение рабочих характеристик. В патенте [30] указан состав гидрожидкости на основе углеводородного компонента, нафтенового масла >5 % (по массе) и до 95 % (по массе) возобновляемого (переработанного) изопарафинового масла. Предполагаемая область использования – в качестве жидкости для автоматических трансмиссий и для амортизаторов для применения в Арктике.

В патенте [31] представлена гидрожидкость биологического происхождения на основе углеводородного базового масла с улучшенной гидролитической стабильностью.

В патенте [32] заявлено о стойкости гидравлического масла и авиационного топлива к растворителю. В составе гидрожидкости присутствует сера, содержатся форполимеры и растворитель, а также органические наполнители. Возможно применение в космической отрасли.

Заключения

Широко используемые гидрожидкости типа Skydrol™ и HyJet™ применяются с 1940 г. В дальнейшем эти гидрожидкости усовершенствовались по различным спецификациям – меняли компоненты составов и применяли передовые технологии. С годами изменилась самолетостроительная промышленность, возрос коммерческий интерес к охвату все большего сегмента рынка. Выпуск указанных гидрожидкостей налажен по всему миру.

Внедрение в производство абсолютно новых типов гидрожидкостей – это максимально дорогостоящая инвестиция для производителей, поэтому в мире практикуется улучшение свойств и качества уже существующих на рынке гидрожидкостей. Работы ведутся по всему миру, в России также разрабатывают новые составы и патентуют изобретения.

Кратко проанализируем основные свойства гидравлических жидкостей, которые применяются в настоящее время на территории РФ, таких как Skydrol LD-4, Nycolube 934 и HyJet-IV-A^{plus}, для выявления их достоинств и недостатков.

Достоинством жидкости марки Skydrol LD-4 перед другими рассматриваемыми ранее гидрожидкостями является малая плотность, однако имеющиеся характеристики у гидрожидкостей марок Skydrol 500B-4 и HyJet-IV-A^{plus}, такие как температуры вспышки, самовоспламенения, воспламенения и самовозгорания, превосходят показатели аналогичных характеристик для гидрожидкости Skydrol LD-4, что является в свою очередь таким же достоинством [19, 25].

Гидрожидкость марки Nycolube 934 в основном уступает отечественной жидкости марки 7-50С-3 по показателю кинематической вязкости, что формально можно отнести к ее недостаткам [29].

На отечественном рынке появился новый продукт – авиационное синтетическое гидравлическое масло марки АСГИМ [33], производство которого налажено в АО «НПЦ Спецнефтьпродукт». Масло АСГИМ поставляют таким промышленным предприятиям, как ПАО «Сухой», ПАО «Яковлев», ОАО «НПО Гидромаш» и т. д. В настоящее время ведутся работы по внедрению масла АСГИМ на российский рынок.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Всероссийскому институту авиационных материалов – 80 лет // Деформация и разрушение материалов. 2012. № 6. С. 17–19.
2. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 7–17.

3. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // *Металлы Евразии*. 2012. № 3. С. 10–15.
4. Бузник В.М., Каблов Е.Н. Состояние и перспективы арктического материаловедения // *Вестник РАН*. 2017. Т. 87. № 9. С. 827–839.
5. Каблов Е.Н. Роль химии в создании материалов нового поколения для сложных технических систем // Тез. докл. XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. Екатеринбург: УрО РАН, 2016. С. 25–26.
6. Бузник В.М., Каблов Е.Н. Технологии получения и адаптации материалов для применения в Арктике // Тез. докл. сателлитной конф. «V Междунар. конференция-школа по химической технологии» XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. Волгоград: ВолгГТУ, 2016. С. 9–10.
7. Сухотин А.М., Зотиков В.С., Казанкина А.Ф. и др. Негорючие теплоносители и гидравлические жидкости: справочное руководство. Л.: Химия, 1979. 235 с.
8. Коняев Е.А., Немчиков М.Л. *Авиационные горюче-смазочные материалы: учеб. пособие*. М.: МГТУ ГА, 2013. С. 75–79.
9. Каблов Е.Н., Кутырев А.Е., Вдовин А.И., Козлов И.А., Афанасьев-Ходыкин А.Н. Исследование возможности возникновения контактной коррозии в паяных соединениях, используемых в конструкции двигателей авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 4 (65). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 25.09.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-3-13.
10. Тарасова П.Н., Слепцова С.А., Лаукканен С., Дьяконов А.А. Уплотнительные материалы на основе политетрафторэтилена для авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 1 (66). Ст. 05. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 27.09.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-51-64.
11. Каблов Е.Н., Бакрадзе М.М., Громов В.И., Вознесенская Н.М., Якушева Н.А. Новые высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали для аэрокосмической техники разработки ФГУП «ВИАМ» (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (58). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
12. Ветрова Е.Ю., Щекин В.К., Курс М.Г. Сравнительная оценка методов определения коррозионной агрессивности атмосферы // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 1 (54). С. 74–81. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-74-81.
13. Лаптев А.Б., Барботько С.Л., Николаев Е.В. Основные направления исследований сохраняемости свойств материалов под воздействием климатических и эксплуатационных факторов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 547–561. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-547-561.
14. Виноградов С.С., Никифоров А.А., Демин С.А., Чесноков Д.В. Защита от коррозии углеродистых сталей // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 242–263. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-242-263.
15. MIL-PRF-87257B (SENSYN 87257) // Sentinel Canada. Industrial Chemicals and Lubricants: офиц. сайт. URL: <https://sentinelcanada.com/hydraulic-fluid/mil-prf-87257b/> (дата обращения: 20.11.2023).
16. *Авиационный справочник AeroShell*. Ed. 18. The AeroShell Book. Shell Aviation, 2003. P. 194–200.
17. What types of hydraulic fluids are used in aircraft? // Компания Brennaninc: офиц. сайт. URL: <https://blog.brennaninc.com/what-types-of-hydraulic-fluids-might-you-find-in-an-aircraft> (дата обращения: 30.08.2023).
18. Гидравлическая жидкость X/C 5606J Aviation // Компания «СанТрип»: офиц сайт. URL: <https://us-packaging.ru/phillips66-aviation/catalog/gidravlicheskie-masla/gidravlicheskaya-zhidkost-x-c-5606j-aviation/?ysclid=lpay68fcj5586863736> (дата обращения: 21.11.2023).
19. Eastman aviation solutions // Eastman Chemical Company: офиц сайт. URL: https://www.eastman.com/Literature_Center/A/AFRUS009.pdf (дата обращения: 21.11.2023).
20. Огнестойкая авиационная гидравлическая жидкость HyJet™ V // Exxon Mobil Corporation: офиц. сайт. URL: <https://www.exxonmobil.com/ru-ru/aviation/pds/gl-xx-hyjet-v> (дата обращения: 21.11.2023).

21. Седова Л.С., Долгова Е.В. Производство гидрожидкостей для авиационной техники в России (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 8 (114). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.09.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-65-76.
22. ГОСТ 20734–75. Жидкость рабочая 7-50С-3. Технические условия. М.: Издательство стандартов, 1975. 4 с.
23. МОР-1313500-01–2021. Межотраслевой ограничительный перечень топлив, масел, смазок, специальных жидкостей, консервационных материалов и присадок, разрешенных к применению в вооружении, военной и специальной технике. М.: 25 ГосНИИ Химмотологии Минобороны России, 2021. С. 46–50. URL: <https://ens.mil.ru/files/MOP-2021.pdf> (дата обращения: 25.09.2023).
24. ГОСТ 6794–2017. Масло АМГ-10. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2019. 14 с.
25. Aviation lubricants, greases, fluids, oils & fuels // Exxon Mobil Corporation: офиц. сайт. URL: <https://www.exxonmobil.com/en/aviation/products-and-services/products/hyjet-iv-a-plus> (дата обращения: 21.11.2023).
26. Авиационная гидравлическая жидкость Mobil Aero HF: свойства и характеристики // Exxon Mobil Corporation: офиц. сайт. URL: https://www.mobil.com/en-us/aviation/pds/gl-xx-mobil-aero-hf-series?ad=semD&an=msn_s&am=modifiedbroad&q=mil+h+5606+hydraulic+fluid&o=29593&qsrc=999&l=sem&askid=22e4232a-71aa-4021-bc7d-7a040b240feb-0-ab_msm (дата обращения: 21.11.2023).
27. Технический паспорт на гидравлическую жидкость Hydraunycoil FH 51 // NYCO Company: офиц. сайт. URL: https://www.nyco-group.com/wp-content/uploads/TDS_Hydraunycoil_FH51RU_1E4.pdf (дата обращения: 21.11.2023).
28. Технический паспорт на минеральное масло ROYCO® 756 // Aircraft Spruce & Specialty Co. ANDEROL Inc. Specialty Lubricants. URL: <https://www.aircraftspruce.com/catalog/pdf/Royco756.pdf> (дата обращения: 21.11.2023).
29. Технический паспорт на гидравлическую жидкость Nycolube 934 // NYCO Company: офиц. сайт. URL: https://www.nyco-group.com/wp-content/uploads/TDS_Nycolube_NL934_1E2.pdf (дата обращения: 21.11.2023).
30. Hydraulic fluid composition: pat. US 11053448B2; appl. 21.12.17; publ. 06.07.21.
31. Hydraulic fluids from renewable isoparaffins: pat. WO 2015/192072 A1; appl. 12.06.15; publ. 17.12.15.
32. Hydraulic fluid and fuel resistant sealants: pat. US 20190010370 A1; appl. 07.07.17; publ. 10.01.19.
33. Масло авиационное синтетическое гидравлическое АСГИМ // Компания «СПЕЦНЕФТЬПРОДУКТ»: офиц. сайт. URL: <http://snp-gsm.ru/products/asgim/> (дата обращения: 11.09.2023).

References

1. Kablov E.N. All-Russian Institute of Aviation Materials is 80 years old. *Deformatsiya i razrushenie materialov*, 2012, no. 6, pp. 17–19.
2. Kablov E.N. Strategic areas of developing materials and their processing technologies for the period up to 2030. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 7–17.
3. Kablov E.N. Modern materials – the basis of innovative modernization of Russia. *Metally Evrazii*, 2012, no. 3, pp. 10–15.
4. Buznik V.M., Kablov E.N. State and prospects of Arctic materials science. *Vestnik RAN*, 2017, vol. 87, no. 9, pp. 827–839.
5. Kablov E.N. The role of chemistry in the creation of new generation materials for complex technical systems. *Reports of XX Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*. Ekaterinburg: UB of the RAS, 2016, pp. 25–26.
6. Buznik V.M., Kablov E.N. Technologies for obtaining and adapting materials for use in the Arctic. *Reports of satellite conference «V International Conference-School on Chemical Technology» of the XX Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*. Volgograd: VolgSTU, 2016, pp. 9–10.

7. Sukhotin A.M., Zotikov V.S., Kazankina A.F. et al. *Non-flammable coolants and hydraulic fluids: guide*. Leningrad: Khimiya, 1979, 235 p.
8. Konyaev E.A., Nemchikov M.L. *Aviation fuels and lubricants: textbook*. Moscow: MSTU GA, 2013, pp. 75–79.
9. Kablov E.N., Kuttyrev A.E., Vdovin A.I., Kozlov I.A., Afanasyev-Khodykin A.N. The research of possibility of galvanic corrosion in brazed connections used in aviation engine construction. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 25, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-3-13.
10. Tarasova P.N., Sleptsova S.A., Laukkanen S., Dyakonov A.A. Sealing materials based on polytetrafluoroethylene for aviation products. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 05. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 27, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-51-64.
11. Kablov E.N., Bakradze M.M., Gromov V.I., Voznesenskaya N.M., Yakusheva N.A. New high strength structural and corrosion-resistant steels for aerospace equipment developed by FSUE «VIAM» (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. (58), pp. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
12. Vetrova E.Yu., Shchekin V.K., Kurs M.G. Comparative evaluation of methods for the determination of corrosion aggressivity of the atmosphere. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 1 (54), pp. 74–81. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-74-81.
13. Laptev A.B., Barbotko S.L., Nikolaev E.V. The main research areas of the persistence properties of materials under the influence of climatic and operational factors. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 547–561. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-547-561.
14. Vinogradov S.S., Nikiforov A.A., Dyomin S.A., Chesnokov D.V. Protection against corrosion of carbon steel. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 242–263. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-242-263.
15. *MIL-PRF-87257B (SENSYN 87257)*. Available at: <https://sentinelcanada.com/hydraulic-fluid/mil-prf-87257b/> (accessed: November 20, 2023).
16. *Aviation reference book AeroShell*. Ed. 18. The AeroShell Book. Shell Aviation, 2003, pp. 194–200.
17. *What Types of Hydraulic Fluids are Used in Aircraft?* Available at: <https://blog.brennaninc.com/what-types-of-hydraulic-fluids-might-you-find-in-an-aircraft> (accessed: August 30, 2023).
18. *Hydraulic fluid X/C 5606J Aviation*. Available at: <https://us-packaging.ru/phillips66-aviation/catalog/gidravlicheskie-masla/gidravlicheskaya-zhidkost-x-c-5606j-aviation/?ysclid=lpay68fcj5586863736> (accessed: November 21, 2023).
19. *Eastman Aviation Solutions*. Available at: https://www.eastman.com/Literature_Center/A/AFRUS009.pdf (accessed: November 21, 2023).
20. *Fire-resistant aviation hydraulic fluid HyJet™ V*. Available at: <https://www.exxonmobil.com/ru-ru/aviation/pds/gl-xx-hyjet-v> (accessed: November 21, 2023).
21. Sedova L.S., Dolgova E.V. Production of hydroliquids for aviation engineering in Russia (review) // *Trudy VIAM*, 2022, no. 8 (114), paper no. 05. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: September 04, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-65-76.
22. State Standard 20734–75. *Working fluid 7-50C-3. Technical conditions*. Moscow: Standards Publishing House, 1975, 4 p.
23. MOP-1313500-01–2021. *Interindustry restrictive list of fuels, oils, lubricants, special liquids, conservation materials and additives permitted for use in weapons, military and special equipment*. Moscow: 25 GosNII Khimmotologii of the Ministry of Defense of Russia, 2021, pp. 46–50. Available at: <https://ens.mil.ru/files/MOP-2021.pdf> (accessed: September 25, 2023).
24. State Standard 6794–2017. *AMG-10 oil. Technical conditions*. Moscow: Standartinform, 2019, 14 p.
25. *Aviation lubricants, greases, fluids, oils & fuels*. Available at: <https://www.exxonmobil.com/en/aviation/products-and-services/products/hyjet-iv-a-plus> (accessed: November 21, 2023).

26. *Mobil Aero HF aviation hydraulic fluid: properties and characteristics*. Available at: https://www.mobil.com/en-us/aviation/pds/gl-xx-mobil-aero-hf-series?ad=semD&an=msn_s&am=modifiedbroad&q=mil+h+5606+hydraulic+fluid&o=29593&qsrc=999&l=sem&askid=22e4232a-71aa-4021-bc7d-7a040b240feb-0-ab_msm (accessed: November 21, 2023).
27. *Technical data sheet for hydraulic fluid Hydraunycoil FH 51*. Available at: https://www.nyco-group.com/wp-content/uploads/TDS_Hydraunycoil_FH51RU_1E4.pdf (accessed: November 21, 2023).
28. *Technical data sheet for mineral oil ROYCO® 756*. Available at: <https://www.aircraftspruce.com/catalog/pdf/Royco756.pdf> (accessed: November 21, 2023).
29. *Technical data sheet for hydraulic fluid Nycolube 934*. Available at: https://www.nyco-group.com/wp-content/uploads/TDS_Nycolube_NL934_1E2.pdf (accessed: November 21, 2023).
30. *Hydraulic fluid composition*: pat. US 11053448B2; appl. 21.12.17; publ. 06.07.21.
31. *Hydraulic fluids from renewable isoparaffins*: pat. WO 2015/192072 A1; appl. 12.06.15; publ. 17.12.15.
32. *Hydraulic fluid and fuel resistant sealants*: pat. US 20190010370 A1; appl. 07.07.17; publ. 10.01.19.
33. *Aviation synthetic hydraulic oil ASGIM*. Available at: <http://snp-gsm.ru/products/asgim/> (accessed: September 11, 2023).

Информация об авторах

Седова Лариса Степановна, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Шестаков Алексей Михайлович, ведущий научный сотрудник, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Larisa S. Sedova, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexey M. Shestakov, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 21.12.2023; получена после доработки 19.02.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 19.02.2024.
The article was submitted 21.12.2023; received in revised form 19.02.2024; approved and accepted for publication after reviewing 19.02.2024.