

УДК 621.45.04

DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-94-102

Результаты оценки трибологических свойств авиационных масел для двигателей воздушных судов

М.В. Селезнев¹, К.И. Грядун¹, К.Э. Балышин¹

¹Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия

Аннотация: Разработка современных и теплонапряженных авиационных двигателей является комплексным процессом, который основывается на передовых достижениях различных отраслей науки и техники, включая химмотологию. Каждое новое поколение авиационных двигателей предъявляет более жесткие требования к качеству применяемых авиационных масел, требуемых для обеспечения надежной работы в том числе маслосистем двигателей, подшипников опор роторов и других узлов. Одним из важных факторов снижения трения и износа современных газотурбинных двигателей является использование высококачественных масел с высоким уровнем противоизносных и антифрикционных свойств, позволяющих обеспечить работу двигателей при различных режимах смазки. В отечественной нормативно-технической документации противоизносные свойства авиационных масел оцениваются с помощью четырехшариковой машины трения (ЧМТ) по ГОСТ 9490, а антифрикционные свойства не учтены. Указанная машина трения имеет ряд недостатков. В этой связи авторами проведена оценка противоизносных и антифрикционных свойств отечественных авиационных масел с помощью универсального вибротрибометра, позволяющего исследовать эксплуатационные свойства масел при режимах, наиболее характерных для реальной эксплуатации авиационных двигателей, по сравнению с параметрами испытаний масел на четырехшариковой машине трения. В отличие от ЧМТ в конструкции вибротрибометра используется схема контакта в паре трения «шарик – плоскость пластины». При этом на указанном приборе установлена термокамера, которая обеспечивает постоянный нагрев пары трения и испытуемых смазочных масел до требуемой температуры (от 0 до 150 °С). По результатам испытаний установлено, что наилучшими противоизносными и антифрикционными свойствами обладает масло авиационное ИПМ-10, а с увеличением температуры испытаний масел происходит пропорциональное увеличение износа в паре трения «шарик – плоскость пластины».

Ключевые слова: авиационные масла, антифрикционные свойства, газотурбинные двигатели, противоизносные свойства, универсальный вибротрибометр, четырехшариковая машина трения.

Для цитирования: Селезнев М.В., Грядун К.И., Балышин К.Э. Результаты оценки трибологических свойств авиационных масел для двигателей воздушных судов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 3. С. 94–102. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-94-102

Evaluation results of the tribological properties of aviation oils for aircraft engines

M.V. Seleznev¹, K.I. Gryadunov¹, K.E. Balyshin¹

¹Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

Abstract: The development of modern heat-stressed aircraft engines is a complex process based on the advanced achievements of various branches of science and technology, including chemmotology. Each new generation of aircraft engines imposes stricter requirements on the quality of the aviation oils used to ensure the reliable operation, including engine oil systems, rotor bearings and other components. One of the important factors in reducing friction and wear-out of modern gas turbine engines is the use of high-quality oils with a high level of anti-wear and anti-friction properties which allow engines to operate under various relubrication intervals. In the domestic regulatory and technical documentation, the anti-wear properties of aviation oils are evaluated using a four-ball friction machine according to GOST 9490, and the anti-friction properties are not taken into account. The specified friction machine has a variety of disadvantages. In this regard, the authors evaluated the anti-wear and anti-friction properties of domestic aviation oils using a versatile vibro-tribometer which allows for the operational properties of oils to be

researched under the modes that are the most characteristic for the actual operation of aircraft engines compared with parameters of oil tests by a four-ball friction machine. Unlike the four-ball friction machine, the vibro-tribometer design implements a contact - interaction scheme in a “ball-plate plane” friction pair. At the same time, a thermal chamber is installed on this application that provides constant heating of the friction pair and the tested lubricating oils to the required temperature (from 0 to 150 °C). It has been found that IPM-10 aviation oil possesses the best anti-wear and anti-friction properties, and with an increase in the tested oil temperature, a proportional increase in wear-out in the “ball-plate plane” friction pair occurs.

Key words: aviation oils, anti-friction properties, gas turbine engines, anti-wear properties, multi-operated vibro-tribometer, four-ball friction machine.

For citation: Seleznev, M.V., Gryadunov, K.I., Balishin, K.E. (2023). Evaluation results of the tribological properties of aviation oils for aircraft engines. Civil Aviation High Technologies, vol. 26, no. 3, pp. 94–102. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-94-102

Введение

Период развития отечественного и мирового авиадвигателестроения характеризуется сменой ряда поколений газотурбинных двигателей (ГТД) и включает в себя разработку принципиально новых и уникальных технических решений, использование новых технологий, а также конструкционных материалов. Создание современных и теплонапряженных авиационных двигателей является комплексным процессом, который основывается на передовых достижениях различных отраслей науки и техники, включая химмотологию [1, 2]. Современные и теплонапряженные авиационные двигатели являются уникальным продуктом машиностроения, обладающим высоким уровнем интенсивности рабочего процесса, нагруженности и теплового режима эксплуатации. При этом каждое новое поколение авиационных двигателей предъявляет более жесткие требования к качеству применяемых авиационных масел, требуемых для обеспечения надежной работы в том числе маслосистем двигателей, подшипников опор роторов и других узлов [3, 4]. Одним из важных факторов снижения трения и износа современных газотурбинных двигателей является использование высококачественных масел с высоким уровнем противоизносных и антифрикционных свойств, позволяющих обеспечивать работу двигателей при различных режимах смазки: гидродинамическом, эластогидродинамическом и граничном. Для этого в компонентные составы авиационных масел вводят противоизносные присадки на основе фосфора, в основном трикрезилфосфаты, по-

скольку соединения серы в указанных маслах вызывают образование сильных кислот при их окислении [5]. Также немаловажное значение имеют антифрикционные свойства масел, позволяющие обеспечивать снижение расхода топлива [6, 7].

При этом отечественная методологическая база по сравнению с зарубежной в области оценки физико-химических и эксплуатационных свойств авиационных масел в ряде показателей качества не соответствует современным требованиям. Наблюдаются отличия в методических подходах и используемом испытательном оборудовании [8–11]. В частности, в российской нормативно-технической документации противоизносные свойства авиационных масел оцениваются с помощью четырехшариковой машины трения (ЧМТ) по ГОСТ 9490, а антифрикционные свойства не учтены [12, 13]. Испытания проводят по двум показателям качества: критической нагрузке (кратковременные одноминутные испытания) и диаметру пятна износа (испытание в течение 60 мин) при осевой нагрузке 196 Н [14, 15]. Принцип действия ЧМТ основан на вращении под заданной нагрузкой верхнего шарика относительно трех нижних шариков, неподвижно закрепленных в чашке машины и погруженных в испытуемое масло. Фактически узел трения ЧМТ включает в себя пирамиду, состоящую из четырех контактирующих в одной точке стальных шариков диаметром 12,7 мм. Принципиальная схема узла трения ЧМТ представлена на рис. 1. Недостатками данной схемы узла трения являются отсутствие мертвых точек движения, методики измерения объема износа верхнего

и нижних шаров ЧМТ и зачастую расхождение полученных данных с результатами испытаний масел в условиях реальной эксплуатации авиационных двигателей. Указанный метод также не позволяет получать информацию о коэффициенте трения. Данные обстоятельства вызывают сложности при необходимости достоверной и объективной оценки эксплуатационных свойств масел на этапе их применения. При этом за рубежом трибологические характеристики масел оцениваются преимущественно на шестеренчатых стендах, а испытания на четырехшариковой машине трения практически не включаются в их спецификации [16].

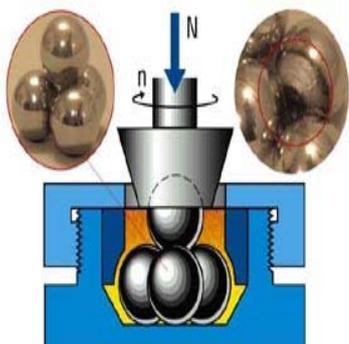


Рис. 1. Принципиальная схема узла трения четырехшариковой машины трения
Fig. 1. The schematic diagram of the four-ball friction machine friction unit

На основании изложенного расширение методологического подхода в области оценки качества авиационных масел вызывает потребность увеличения новых исследований основных эксплуатационных свойств, в том числе противоизносных и антифрикционных, при режимах, приближенных к реальным условиям эксплуатации.

Методы и методология исследований

По результатам исследований авторами [16] установлено, что применение вибрационного трибометра, в котором используется пара трения «пластина – шарик» с возвратно-поступательным движением, позволяет получить вы-

сокую степень сходимости лабораторных и стендовых результатов испытаний. В источниках [17, 18] приведены результаты исследований авиационных масел на трибометре SRV и выявлено, что необходимо использовать геометрию контакта по линии, которая соответствует трибометру, а не точечную. Следует отметить, что испытания авиационных масел на трибометрах типа SRV дополняют метод оценки эксплуатационных свойств на четырехшариковой машине трения и позволяют получать более объективную оценку об уровне их трибологических характеристик.

Противоизносные и антифрикционные свойства авиационных масел испытывали согласно методу оценки трибологических характеристик смазочных масел, который описан в СТО 08151164-0146-2013. В качестве прибора для оценки трибологических (противоизносных и антифрикционных) свойств исследуемых авиационных масел использован вибротрибометр UMT-3. При этом на указанном приборе установлена термокамера, которая обеспечивает постоянный нагрев пары трения и испытуемых смазочных масел до требуемой температуры (от 0 до 150 °С). В конструкции пары трения трибометра шарик, имеющий диаметр 12,7 мм, является неподвижным элементом, а пластина осуществляет возвратно-поступательное движение в отношении прижатого к ее плоскости шарика. Принципиальная схема узла трения вибротрибометра представлена на рис. 2.

Исследования могут осуществляться в ряду скоростей скольжения, соответствующих диапазону от 0,01 до 0,3 м/с, и нормальных нагрузок от 2 до 2000 Н. Скорость скольжения задается посредством частоты осцилля-

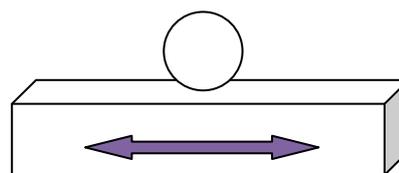


Рис. 2. Принципиальная схема узла трения вибротрибометра UMT-3
Fig. 2. The schematic diagram of the UMT-3 vibro-tribometer friction unit

ций, которая изменяется от 1 до 60 Гц. Измерительная система испытательного оборудования УМТ-3 оснащена функцией постоянной регистрации значений коэффициента трения в ходе испытаний смазочных материалов [19].

Объектами исследования были выбраны отечественные авиационные масла: авиационное масло ИПМ-10 по ТУ 38.1011299-2006, применяемое в теплонапряженных ГТД с максимальной рабочей температурой до 200 °С, масло синтетическое Б-3В по ТУ 38.101295-85, предназначенное для газотурбинных и других специальных двигателей и редукторов вертолетов, синтетическое масло ЛЗ-240 по ТУ 301-04-010-92 для ГТД и редукторов вертолетов, масла синтетические ВНИИ НП 50-1-4ф по ГОСТ 13076 и ВНИИ НП 50-1-4у по ТУ 38.401-58-12-91, применяемые для газотурбинных двигателей самолетов и турбохолодильников, унифицированное авиационное синтетическое масло АСМО-200 по СТО 07548712-001-2014, предназначенное для авиационных газотурбинных двигателей и редукторов вертолетов.

Материалом пары трения являлась сталь ШХ-15. Амплитуда возвратно-поступательного движения пластины соответствовала значению 0,5 мм, а частота осцилляций пластины – 50 Гц. В качестве нормальной нагрузки на неподвижный шарик принята величина в 175 Н.

Перед началом каждого испытания пластина и шарик погружались в образец авиационного масла, который предварительно загружался в смазочную ванну УМТ-3 и нагревался в течение 90 мин до температуры 80 °С. Затем в течение последующих 120 мин проводили испытание пары трения в образце масла при постоянной температуре в термокамере прибора. При этом для каждого образца авиационного масла проводилось два параллельных испытания, а результаты рассчитывались как среднее арифметическое значение. По завершении теста пластина и

шарик с помощью ультразвуковой ванны промывались нефрасом, а затем спиртом. После указанной процедуры испытания образца авиационного масла воспроизводили при аналогичных режимах и последовательности, но при температуре в камере прибора равной 120 °С.

В качестве критериев трибологических (противоизносных и антифрикционных) свойств авиационных масел использованы величины линейного износа шарика ($d_{ш}$) и объемного износа пластины ($W_{V, пласт}$, $W_{V, шар}$), а также значение среднего давления в контакте пары трения ($P_{ФПК}$) и динамического коэффициента трения (COF). Величину износа пары трения определяли с помощью оптической системы прибора ПТМ-3 и профилометрии с применением универсального измерителя шероховатости TR-200. Принцип работы прибора TR-200 заключается в перемещении алмазной иглы по поверхности изношенной детали (пластины) и фиксации датчиком ее отклонения от ровной поверхности пластины.

Антифрикционные свойства образцов авиационных масел исследовались в соответствии с СТО 08151164-0146-2013 и анализировались в конце испытания в интервале от 5 000 до 7 000 с по значениям динамического коэффициента трения, которые регистрировались прямым измерением с помощью датчиков прибора [20].

Результаты исследования

Для наглядного понимания характерного износа пары трения после испытания авиационного масла на вибротрибометре на рис. 3 приведены примеры линейного износа шарика и пластины.

Результаты проведенного исследования по оценке противоизносных и антифрикционных свойств различных авиационных масел представлены в табл. 1 и на рис. 4.

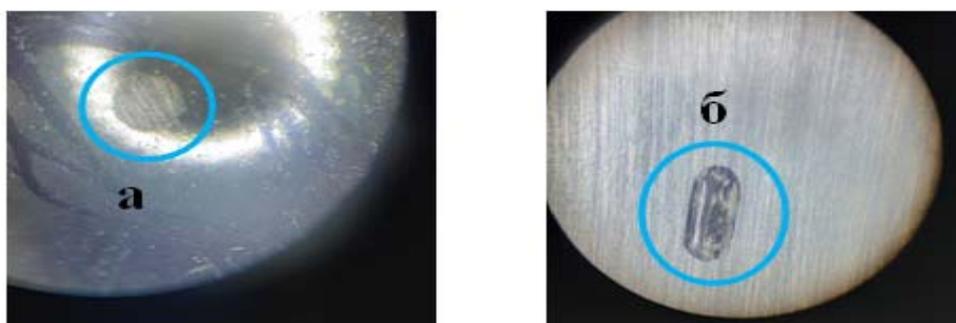


Рис. 3. Пример линейного износа: а – шарика, б – пластины
Fig. 3. Example of linear wear-out of: a – ball; b – plate

Таблица 1
Table 1

Результаты испытаний по оценке противоизносных свойств авиационных масел
Test results according to the evaluation of anti-wear properties of aviation oils

Наименование масла	Наименование показателей противоизносных свойств			
	$W_{V, пласт}, 10^3 \text{ мкм}^3$	$W_{V, шар}, 10^4 \text{ мкм}^3$	$d_{из}, \text{ мм}$	$P_{ФПК}, \text{ МПа}$
При температуре 80 °С				
ИПМ-10	1312	129	0,478	983
Б-3В	5014	2120	0,982	264
ЛЗ-240	2144	1060	0,681	420
ВНИИНП-1-50-4ф	1340	136	0,480	972
ВНИИНП-1-50-4у	1452	193	0,521	834
АСМО-200	1613	152	0,492	885
При температуре 120 °С				
ИПМ-10	1922	623	0,575	646
Б-3В	6014	2656	1,257	149
ЛЗ-240	3044	1530	0,810	342
ВНИИНП-1-50-4ф	1936	651	0,586	598
ВНИИНП-1-50-4у	2057	984	0,677	492
АСМО-200	2012	788	0,634	613

Обсуждение полученных результатов

По результатам исследования установлено, что наилучшими противоизносными свойствами обладает масло авиационное ИПМ-10. При этом наибольший износ пары трения характерен при испытаниях на масле Б-3В, что, вероятно, связано с выпадением в осадок соединений 2-меркаптобензтиазола

(присадки каптакс). Анализ данных табл. 1 показывает, что с увеличением температуры масла происходит пропорциональное увеличение износа в паре трения «шарик – плоскость пластины», что, по-видимому, происходит вследствие снижения кинематической вязкости авиационных масел с ростом температуры испытаний.

Результаты оценки антифрикционных свойств авиационных масел показывают (рис. 4), что изменение температуры масел

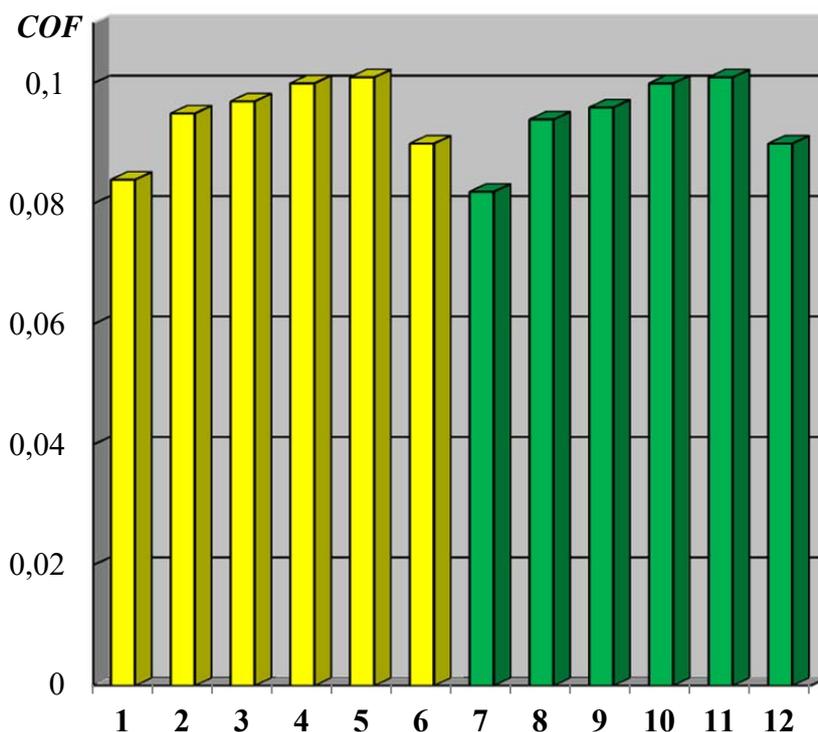


Рис. 4. Результаты оценки антифрикционных свойств авиационных масел при температуре 80 °С: 1 – ИПМ-10, 2 – Б-3В, 3 – ЛЗ-240, 4 – ВНИИНП-1-50-4ф, 5 – ВНИИНП-1-50-4у, 6 – АСМО-200; при температуре 120 °С: 7 – ИПМ-10, 8 – Б-3В, 9 – ЛЗ-240, 10 – ВНИИНП-1-50-4ф, 11 – ВНИИНП-1-50-4у, 12 – АСМО-200

Fig. 4. Results of evaluation of anti-friction aviation oil properties at the temperature of 80 °C: 1 – IPM-10, 2 – B-3V, 3 – LZ-240, 4 – VNIINP-1-50- 4f, 5 – VNIINP-1-50- 4u, 6 – ASMO-200; at the temperature of 120 °C, 7 – IPM-10, 8 – B-3V, 9 – LZ-240, 10 – VNIINP-1-50- 4f, 11 – VNIINP-1-50- 4u, 12 – ASMO-200

практически не оказывает влияния на величину коэффициента трения. При этом наименьшее значение *COF* соответствует маслу авиационному ИПМ-10, а наибольшее – маслу ВНИИНП-1-50-4у.

Заключение

В результате проведенных исследований получены данные по уровню противоизносных и антифрикционных свойств авиационных масел с помощью универсального вибротрибометра, позволяющего исследовать эксплуатационные свойства масел при режимах (давление в паре трения в начале опыта – 1500 МПа, температура масла – 80 и 120 °С, вид движения пары трения – возвратно-поступательное), наиболее характерных для реальной эксплуатации авиационных двига-

телей по сравнению с четырехшариковой машиной трения. Указанный метод предлагается использовать в нормативно-технической документации на авиационные масла, однако предварительно необходимо осуществить накопление статистических данных по испытаниям масел различного компонентного состава и определить корреляцию с другими методами оценки трибологических характеристик.

Полученные результаты испытаний свидетельствуют, что повышенный износ характерен для масла Б-3В ($W_{V,плас\tau} = 5014 \cdot 10^3 \text{ мкм}^3$, $W_{V,шар} = 2120 \cdot 10^4 \text{ мкм}^3$), а наилучшими трибологическими характеристиками обладает масло ИПМ-10 ($W_{V,плас\tau} = 1312 \cdot 10^3 \text{ мкм}^3$, $W_{V,шар} = 129 \cdot 10^4 \text{ мкм}^3$). Наименьшее значение коэффициента трения соответствует маслу авиационному ИПМ-10 (0,084), а наибольшее – маслу ВНИИНП-1-50-4у (0,101) при температурах

масел 80 и 120 °С соответственно. Таким образом, в узлах и механизмах теплонапряженной авиационной техники, которые предъявляют повышенные требования к уровню противоизносных и антифрикционных свойств, рекомендуется в качестве основной марки использовать авиационное масло ИПМ-10 по сравнению с маслами синтетическими ВНИИ НП 50-1-4ф и ВНИИ НП 50-1-4у, а в газотурбинных двигателях и редукторах вертолетов унифицированное авиационное синтетическое масло АСМО-200 по сравнению синтетическими маслами ЛЗ-240 и Б-3В.

Список литературы

1. **Сергеев Е.П.** Развитие химмотологии. М.: Первый том, 2018. 880 с.
2. **Liberio P.D., Garver J.M.** Lubricity of military jet fuels // *Lubrication Engineering*. 1995. Vol. 51. Pp. 27–32.
3. **Кривошеев И.А., Рожков К.Е., Симонов Н.Б.** Развитие методов проектирования турбин и компрессоров в составе газотурбинных двигателей // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. 2022. № 2. С. 111–125.
4. **Агульник А.Б.** Оценка диапазона возможных параметров гидридного газотурбинного двигателя с твердооксидными топливными элементами для среднемагистрального самолета / А.Б. Агульник, С.М. Каленский, И.В. Кравченко, Ю.А. Эрохи // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. 2022. № 2. С. 126–131.
5. **Thirupathi A.** Эпоксидированные оксикасторполиоловые эфиры: многофункциональное базовое масло для авиационного и судового применения / А. Thirupathi, К. Kamalakar, V. Siddaiah, M.S.L. Karuna, M. Devarapaga // *Нефтехимия*. 2022. Т. 62, № 6. С. 1059–1070. DOI: 10.31857/S0028242122060260
6. **Куц К.А., Коваленко Г.В.** Определение статистического компенсационного запаса топлива для флота «Боинг-777» на фиксированных маршрутах // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. 2021. № 4. С. 4–10.
7. **Макаева Р.Х.** Диагностика технического состояния авиационных подшипников качения с применением голографической интерферометрии / Р.Х. Макаева, В.В. Такмовцев, А.М. Царева, Н.И. Шакиров // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. 2021. № 4. С. 90–95.
8. **Оганесова Э.Ю.** Трибологическая активность метиловых эфиров диалкилдитиокарбоновых кислот в составе композиций смазочных материалов / Э.Ю. Оганесова, Е.Г. Бордубанова, А.С. Лядов, О.П. Паренго // *Нефтехимия*. 2022. Т. 62, № 4. С. 561–566. DOI: 10.31857/S0028242122040116
9. **Сулима С.И.** Перспективы технологий получения синтетических основ моторных масел / С.И. Сулима, В.Г. Бакун, Н.С. Чистякова, М.В. Ларина, Р.Е. Яковенко, А.П. Севостьянов // *Нефтехимия*. 2021. Т. 61, № 6. С. 760–775. DOI: 10.31857/S0028242121060022
10. **Данилов А.М.** Современное состояние исследований в области биоразлагаемых смазочных материалов / А.М. Данилов, С.А. Антонов, Р.В. Бартко, П.А. Никульшин // *Нефтехимия*. 2021. Т. 61, № 4. С. 445–460. DOI: 10.31857/S0028242121040018
11. **Цветков О.Н., Черемискин А.А.** Трибологическая оценка свойств смазочных масел // *Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний*. 2017. № 2. С. 25–27.
12. **Исследование смазочных материалов при трении: сборник статей / Под ред. Р.М. Матвеевского.** М.: Наука, 1981. 144 с.
13. **Орешенков А.В., Гришин Н.Н., Степанова С.Е.** Трибологические характеристики горюче-смазочных материалов // *Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний*. 2017. № 2. С. 23–25.
14. **Яхьяев Н.Я.** Смазочная композиция для улучшения трибологических характеристик смазочного материала / Н.Я. Яхьяев, Ж.Б. Бегов, Ш.Д. Батырмурзаев, А.Ш. Батырмурзаев // *Трение и смазка в машинах и механизмах*. 2010. № 7. С. 29–32.
15. **Пучков В.Н., Заскалько П.П.** Исследования влияния добавок наноструктурированных материалов на трибологические свойства смазочных масел // *Трение и смазка в машинах и механизмах*. 2010. № 11. С. 25–30.

16. Маньшев Д.А. Исследование эксплуатационных свойств масла для малоразмерного поршневого авиационного двигателя / Д.А. Маньшев, А.В. Иванов, С.А. Криушин, А.В. Чернышева, С.Г. Потупчик // Труды 25 ГосНИИ МО РФ. 2020. № 59. С. 253–261.

17. Заславский Ю.С., Артемьева В.П. Новое в трибологии смазочных материалов: монография. М.: Нефть и газ, 2001. 480 с.

18. Правоторова Е.А., Буяновский И.А. Метод минимизации количества трибологических испытаний // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2009. № 3. С. 15–20.

19. Морозов А.В. Экспериментальное определение статического и динамического коэффициентов трения скольжения эпиламинированных материалов // Трение и износ. 2014. Т. 35, № 2. С. 114–120.

20. Гаврилов К.В. Оценка антифрикционных свойств твердосмазочных покрытий для юбки поршня высокофорсированного дизеля / К.В. Гаврилов, А.В. Морозов, М.В. Селезнев, Ю.В. Рождественский, Н.А. Хозенюк, А.А. Дойкин, В.С. Худяков // Трение и износ. 2020. Т. 41, № 5. С. 647–654. DOI: 10.32864/0202-4977-2020-41-5-647-654

References

1. Seregin, E.P. (2018). Chemmotology development. Moscow: Pervyy tom, 880 p. (in Russian)

2. Liberio, P.D., Garver, J.M. (1995). Lubricity of military jet fuels. *Lubrication Engineering*, vol. 51, pp. 27–32.

3. Krivosheev, I.A., Rozhkov, K.E., Simonov, N.B. (2022). Development of methods for designing turbines and compressors as a part of gas turbine engines. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Aviatsionnaya Tekhnika*, no. 2, pp. 111–125. (in Russian)

4. Agul'nik, A.B., Kalenskii, S.M., Kravchenko, I.V., Ezrokhi, Yu.A. (2022). Estimation of a range of possible parameters for a hybrid turbine engine with solid oxide fuel cells for airliner. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Aviatsionnaya Tekhnika*, no. 2, pp. 126–131. (in Russian)

5. Thirupathi, A., Kamalakar, K., Sidaiah, V., Karuna, M.S.L., Devarapaga, M. (2022). Epoxy-acylated oxycastor polyol esters: a multifunctional base oil for aviation and marine applications. *Neftekhimiya*, vol. 62, no. 6, pp. 1059–1070. DOI: 10.31857/S0028242122060260 (in Russian)

6. Kuts, K.A., Kovalenko, G.V. (2021). Boeing 777 fleet statistical contingency fuel determination on fixed routes. *Russian Aeronautics*, vol. 64, no. 4, pp. 583–590.

7. Makaeva, R.K., Takmoltsev, V.V., Tsareva, A.M., Shakirov, N.I. (2021). Diagnostics of the technical condition of aircraft rolling bearings using the holographic interferometry. *Russian Aeronautics*, vol. 64, no. 4, pp. 688–694.

8. Ogenesova, E.Y., Bordubanova, E.G., Lyadov, A.S., Parenago, O.P. (2022). Tribological performance of dialkyldithiocarbamic acid methyl esters in lubricating compositions. *Petroleum Chemistry*, vol. 62, no. 6, pp. 672–676. DOI: 10.1134/S0965544122040132

9. Sulima, S.I., Bakun, V.G., Chistyakova, N.S., Larina, M.V., Yakovenko, R.E., Savost'yanov, A.P. (2021). Prospects for technologies in the production of synthetic base stocks for engine oils (a review). *Petroleum Chemistry*, vol. 61, no. 11, pp. 1178–1189. DOI: 10.1134/S0965544121110013

10. Danilov, A.M., Antonov, S.A., Bartko, R.V., Nikulshin, P.A. (2021). Recent advances in biodegradable lubricating materials (a review). *Petroleum Chemistry*, vol. 61, no. 7, pp. 697–710. DOI: 10.1134/S0965544121050121

11. Tsvetkov, O.N., Cheremiskin, A.L. (2017). Tribological evaluation of properties of lube oils. *World of Petroleum Products Scientific and Technical Journal*, no. 2, pp. 25–27. (in Russian)

12. Matveevskiy, R.M. (Ed.). (1981). Research on lubricants in friction: a collection of articles. Moscow: Nauka, 144 p. (in Russian)

13. Oreshenkov, A.V., Grishin, N.N., Stepanova, S.E. (2017). Tribological characteristics fuels and lubricating materials. *World of Petroleum Products Scientific and Technical Journal*, no. 2, pp. 23–25. (in Russian)

14. **Yakhyayev, N.Ya., Begov, Zh.B., Batyrmurzaev, Sh.D., Batyrmurzaev, A.Sh.** (2010). The lubricant composition for improving the tribological characteristics of the lubricant. *Treniye i Smazka v Mashinakh i Mekhanizmaxh*, no. 7, pp. 29–32. (in Russian)

15. **Puchkov, V.N., Zaskalko, P.P.** (2010). Research on influence of nanostructured materials additives on the tribological properties of lubricating oils. *Treniye i Smazka v Mashinakh i Mekhanizmaxh*, no. 11, pp. 25–30. (in Russian)

16. **Manishev, D.A., Ivanov, A.V., Kriushin, S.A., Chernyshova, A.V., Potupchik, S.G.** (2020). Performance study of motor oil intended for small-sized reciprocating aviation engine. *Scientific Investigations of the 25-th State Research Institute of Chemmotology, Ministry of Defence of Russian Federation*, pp. 253–261. (in Russian)

17. **Zaslavskiy, Yu.S., Artemeva, V.P.** (2001). New in tribology lubricants: Monograph. Moscow: Neft i gaz, 480 p. (in Russian)

18. **Pravotorova, E.A., Buyanovskiy, I.A.** (2009). Minimizing the number of tribological tests. *Treniye i Smazka v Mashinakh i Mekhanizmaxh*, no. 3, pp. 15–20. (in Russian)

19. **Morozov, A.V.** (2014). Experimental determination of static and dynamic coefficients of sliding friction of epilam-coated materials. *Journal of Friction and Wear*, vol. 35, no. 2, pp. 114–120. DOI: 10.3103/S1068366614020093

20. **Gavrilov, K.V., Rozhdestvenskii, Y.V., Khozeniuk, N.A., Doikin, A.A., Hudyakov, V.S., Morozov, A.V., Seleznev, M.V.** (2020). Evaluation of anti-friction properties of solid lubricant coatings for a piston skirt of a high-force diesel. *Journal of Friction and Wear*, vol. 41, no. 5, pp. 480–485. DOI: 10.3103/S1068366620050104

Сведения об авторах

Селезнев Максим Витальевич, кандидат технических наук, доцент кафедры авиатопливообеспечения и ремонта ЛА, МГТУ ГА, mr.selmaks@mail.ru.

Грядунов Константин Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры авиатопливообеспечения и ремонта ЛА, МГТУ ГА, k.gryadunov@mstuca.aero.

Балышин Кирилл Эдуардович, преподаватель кафедры авиатопливообеспечения и ремонта ЛА, МГТУ ГА, knpnlll@ya.ru.

Information about the authors

Maxim V. Seleznev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Aviation Fuel Supply and Aircraft Repair Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, mr.selmaks@mail.ru.

Konstantin I. Gryadunov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Aviation Fuel Supply and Aircraft Repair Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, k.gryadunov@mstuca.aero.

Kirill E. Balyshin, Teacher of the of Aviation Fuel Supply and Aircraft Repair Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, knpnlll@ya.ru.

Поступила в редакцию 07.12.2022
Принята в печать 25.05.2023

Received 07.12.2022
Accepted for publication 25.05.2023