

УДК 621.45.04

DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-38-52

Применение методов оценки термоокислительной стабильности реактивных топлив в гражданской авиации

К.И. Грядунов¹, А.А. Браилко¹, К.Э. Балышин¹, С.А. Савушкин¹,
В.К. Харина¹

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

Аннотация: В результате окисления реактивных топлив в них образуются нерастворимые осадки, называемые смолами или высокотемпературными отложениями, существенно снижающие химотологическую надежность агрегатов топливных систем авиационных двигателей: топливорегулирующей аппаратуры, топливно-масляных радиаторов, фильтров тонкой очистки и пр. Основными факторами, интенсифицирующими процессы окисления реактивных топлив, являются качество и кондиционность топлива и его температура. В связи с этим на предприятиях авиатопливообеспечения осуществляется постоянный контроль показателей термической стабильности авиационных топлив. Широко применяемым отечественным методом оценки термоокислительной стабильности авиационных топлив является метод в статических условиях (ТСРТ), зарубежным – динамический метод (JFTOT). Мнения насчет применения того или иного метода для объективной оценки термостабильности авиационных топлив расходятся. В статье рассматриваются основные положения, касающиеся стабильности реактивных топлив, дается обзор методов и показателей, характеризующих термоокислительную стабильность авиационных топлив, приводятся статистические данные многолетнего использования статического (ТСРТ) и динамического (JFTOT) методов оценки качества отечественных марок топлив для дозвуковых ВС ТС-1 и РТ, поступающих на авиапредприятие. Показано, что использование динамического метода (JFTOT) с текущими параметрами работы не является актуальным.

Ключевые слова: авиационные керосины, термоокислительная стабильность топлив, статический метод оценки термоокислительной стабильности, динамический метод оценки термоокислительной стабильности.

Для цитирования: Грядунов К.И. Применение методов оценки термоокислительной стабильности реактивных топлив в гражданской авиации / К.И. Грядунов, А.А. Браилко, К.Э. Балышин, С.А. Савушкин, В.К. Харина // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 3. С. 38–52. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-38-52

The application of methods for assessing the thermal oxidative jet fuel stability in civil aviation

K.I. Gryadunov¹, A.A. Brailko¹, K.E. Balyshin¹, S.A. Savushkin¹,
V.K. Kharina¹

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

Abstract: As a result of jet fuel oxidation, insoluble sediments, called resins or high-temperature deposits, are formed. They significantly reduce the chemotological reliability of aircraft engine fuel system units, i.e., fuel metering equipment, fuel-oil coolers, fine fuel filters, etc. The main factors that intensify the jet fuel oxidation processes are fuel quality and meeting specifications as well as its temperature. In this regard, aviation fuel supply enterprises constantly monitor indicators of the thermal aviation fuel stability. The widely used domestic method for assessing the thermal oxidative aviation fuel stability is the technique under static conditions (Thermal Jet Fuel Stability – TJFS), the foreign one is the dynamic technique (Jet Fuel Thermal Oxidation Test – JFTOT). Opinions concerning the use of a particular method for an objective assessment of the thermal aviation fuel stability are divided. The article considers the main provisions with respect to the jet fuel stability, overviews the methods and indicators, characterizing the thermal oxidative aviation fuel stability, provides statistical data on the long-term use of the static (TJFS) and

dynamic (JFTOT) methods for assessing the quality of domestic TS-1 and RT fuel grades for subsonic aircraft supplied to an airline. It is shown that the use of the dynamic method (JFTOT) with the current operation parameters is not relevant.

Key words: kerosene-based aviation fuels, thermo-oxidative fuel stability, static method for evaluating thermo-oxidative stability, dynamic method for evaluating thermo-oxidative stability.

For citation: Gryadunov, K.I., Brailko, A.A., Balyshin, K.E., Savushkin, S.A., Harina, V.K. (2023). The application of methods for assessing the thermal oxidative jet fuel stability in civil aviation. Civil Aviation High Technologies, vol. 26, no. 3, pp. 38–52. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-38-52

Введение

Нефтяные топлива являются нестабильными, т. е. способными к изменению своих физико-химических свойств в процессе эксплуатации. В результате сложных процессов окисления, полимеризации и уплотнения углеводородов в авиационном топливе (АТ)

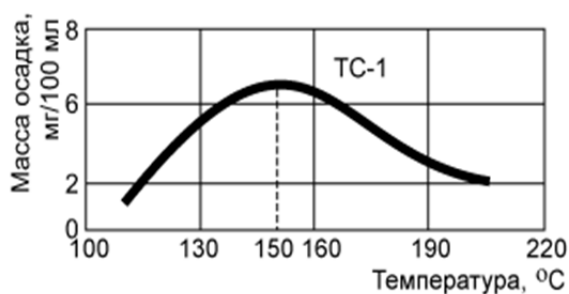


Рис. 1. Влияние температуры на образование ВТО в авиатопливе TC-1

Fig. 1. The temperature effect on the high-temperature deposits formation in TS-1 aviation fuel

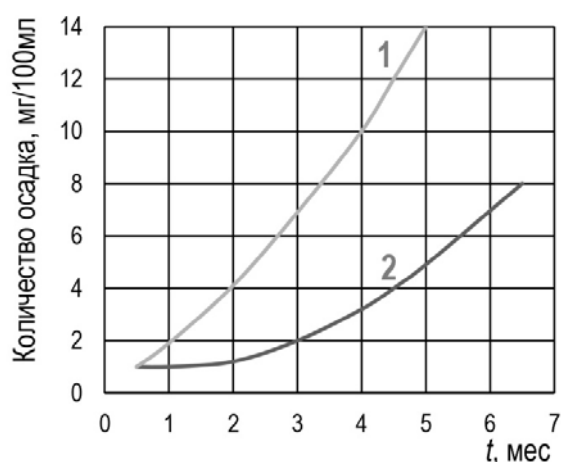


Рис. 2. Влияние концентрации кислорода в газовой фазе прибора ТСРТ на образование осадков

Fig. 2. The influence of oxygen concentration in the gas phase of the TJFS device on sediment formation

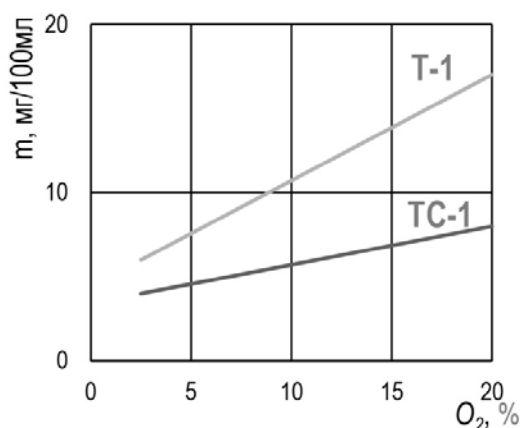


Рис. 3. Зависимость образования ВТО в керосине TC-1 при 150 °C от времени хранения в емкости: 1 – наполовину заполненной; 2 – полностью заполненной

Fig. 3. Dependence of the high-temperature deposits formation in TS-1 kerosene-based aviation fuel at 150°C on the storage time in a half-filled (1) and fully filled (2) container

образуются нерастворимые в его среде отложения (жидкие, смолистые и твердые), в общем случае называемые смолами или высокотемпературными отложениями (ВТО) и существенно ухудшающие свойства товарного продукта вплоть до невозможности его применения по назначению [1–9].

Процессы окисления играют решающую роль в образовании осадков (70–80 %) и приводят к появлению в топливах твердых частиц загрязнений размерами до 150 мкм [5].

На интенсивность образования осадков в АТ влияют многие факторы: химический (особенно наличие гетероатомных и непредельных соединений) и фракционный состав АТ; температура АТ; наличие в надтопливном пространстве и в самом топливе кислорода; наличие катализаторов окисления –

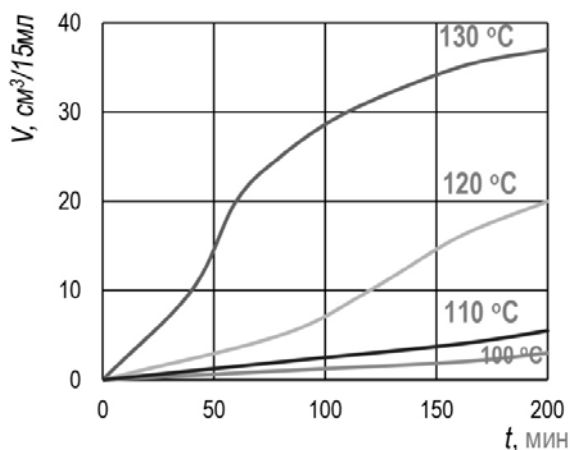


Рис. 4. Объем поглощения кислорода в зависимости от температуры топлива ТС-1
Fig. 4. The volume of oxygen absorption depending on TS-1 aviation fuel temperature

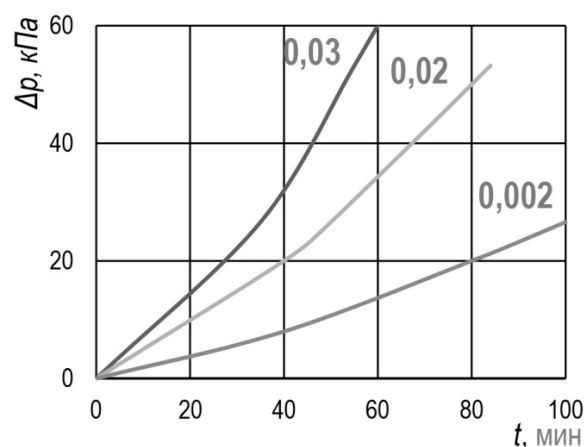


Рис. 6. Зависимость перепада давления на фильтре от содержания в нем меркаптановой серы, % масс.
Fig. 6. Dependence of differential pressure on the filter on the content of mercaptan sulfur, % by mass

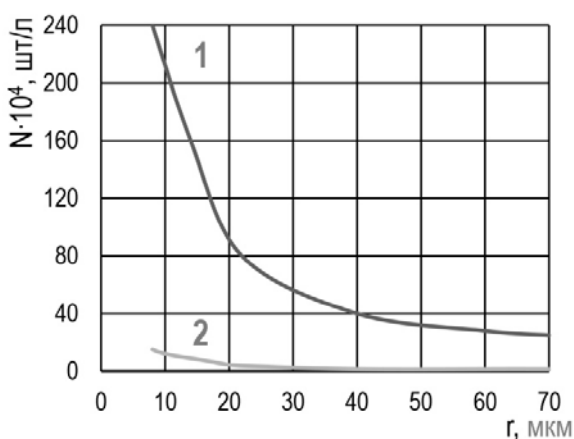


Рис. 5. Влияние чистоты АТ на количество образовавшихся частиц за 4 ч окисления: 1 – загрязненное топливо, 2 – чистое топливо
Fig. 5. Aviation fuel purity influence on the number of particles formed within 4 hours of oxidation, 1 – contaminated fuel, 2 – clean fuel

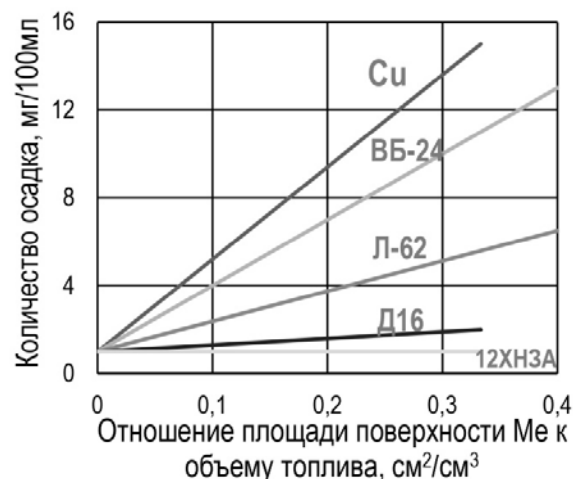


Рис. 7. Влияние отношения поверхности Ме к объему топлива на образование осадков в керосине ТС-1 при 150 °C
Fig. 7. The Me surface ratio effect to the volume of aviation fuel on the sediment formation in TS-1 kerosene-based aviation fuel at 150 °C

металлов, входящих в состав конструкционных материалов элементов топливных систем; чистота АТ, освещенность и пр. (рис. 1–8) [2–5, 7, 10–12], однако преимущественное влияние на осадкообразование оказывает качество товарного АТ [2, 5, 12].

Механизм образования смолистых осадков в АТ при хранении показан на рис. 9 [4, 5].

Механизм окисления реактивных топлив для дозвуковых ВС меняется при достижении температур свыше 110 °C, до этого механизм

един, при повышении температуры топлива изменяется лишь скорость окисления [4, 5], однако и в том, и в другом случае он имеет цепной характер, т. е. когда в результате химической реакции, в которой участвуют активные частицы (атомы, свободные радикалы и пр.) и исходные молекулы, образуются новые активные частицы, реагирующие с исходными молекулами [4, 5, 8, 12]. Увеличение температуры способствует увеличению скорости и глубины окисления топлив. Явле-



Рис. 9. Механизм осадкообразования в АТ при хранении
Fig. 9. The sediment formation mechanism in aviation fuel during storage

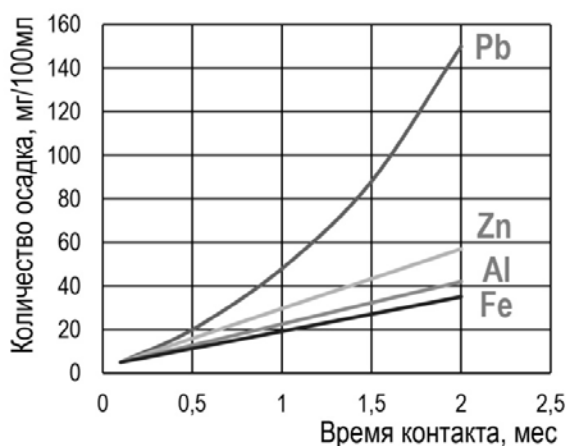


Рис. 8. Влияние времени контакта Me на образование осадков в керосине ТС-1 при 20 °С
Fig. 8. The Me contact time effect on the sediment formation in TS-1 kerosene-based aviation fuel at 20 °С

ние возникновения в АТ нерастворимых осадков при высоких температурах называется термоокислительной стабильностью [5, 7].

Процесс осадкообразования, активное изучение которого было начато, по сути, с переходом на сверхзвуковые скорости полета, т. е. с 50-х гг. XX в., складывается из серии химических, физических и механических явлений, характерных для работы топлива в топливных системах воздушных судов (ВС) и авиационных двигателей (АД) [2, 3, 5, 10].

Из приведенных данных (рис. 1–8) видно, что чем выше температура начала кипения топлива, тем при более высокой температуре образуется максимальное количество осадка

(высокотемпературных отложений) при его окислении. У топлива ТС-1 температура начала кипения составляет ок. 150 °С. Это определяет наличие на кривой величины осадкообразования (рис. 1) максимума и объясняется тем, что после начала кипения топлива происходит интенсивный процесс парообразования, при котором из жидкой фазы интенсивно выделяется и окислитель – кислород, что заметно ослабляет скорость окисления в жидкой фазе и, соответственно, накопление осадка. В топливных системах дозвуковых ВС таких температур не наблюдается, максимальные значения температуры АТ в гидравлических устройствах составляют до 130 °С. До этих значений температур интенсивность образования осадков (смолоотложения) в зависимости от температуры имеет практически линейный характер [7].

Отдельно стоит отметить, что нагревание топлив в двигателях дозвуковых ВС вплоть до температур, примерно равных температурам конца их кипения (для ТС-1 и РТ ок. 250 и 280 °С соответственно), может наблюдаться в локальных зонах камер сгорания после останова двигателей. В результате этого негативного явления топливо фактически образует нагары, закоксуывается. Склонность АТ к образованию таких отложений оценивают в статических условиях по массе фактических смол, образующихся после полного выпаривания 100 мл АТ (рис. 10). Определение проводят по ГОСТ 8489-85 (выпари-



Рис. 10. Методы оценки термоокислительной стабильности реактивных топлив и их показатели

Fig. 10. Assessment methods of thermal oxidative stability of jet fuels and their performance

вание осуществляется под струей нагретого водяного пара), по ГОСТ 1567-97 и ГОСТ 32404-2013 (под струей нагретого воздуха) [7]. Образование осадков в указанных условиях не является предметом обсуждения в настоящей статье, поэтому подробнее останавливаться не актуально.

Также термоокислительная стабильность топлив снижается в присутствии смолистых и сернистых соединений и особенно меркаптанов (рис. 6). При использовании гидроочистки в процессе производства топлив из топливных фракций практически полностью удаляются гетероатомные и непредельные соединения, а меркаптаны полностью. Это позволяет гидроочищенным маркам топлив (РТ; Т-8в; Т-6) успешно противостоять окислению, т. е. делает их более термостабильными вплоть до температур 300–350 °С. Однако удаление некоторых гетероатомных соединений, являющихся естественными антиоксидантами, отрицательно сказывается на стабильности этих марок АТ при длительном хранении, поэтому при производстве в них обязательно добавляют антиокислительные присадки [7].

Таким образом, максимальная температура топлива в подавляющем большинстве агрегатов топливной системы АД дозвуковых ВС составляет порядка 130 °С, при этом температура в баках этих ВС после 4–5 часов

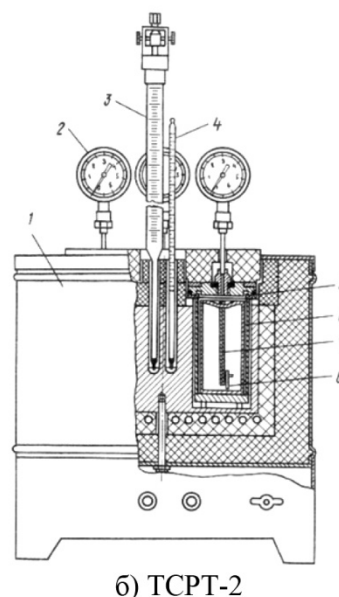
полета устанавливается в пределах от минус 40 до минус 60 °С; температура топлива в баках сверхзвуковых ВС может достигать до плюс 200 °С, а в агрегатах их двигателей и еще больших температур. В связи с этим стабильность АТ принято рассматривать в трех характерных условиях: при длительном хранении, в топливной системе дозвуковых ВС и в топливной системе сверхзвуковых ВС [5, 10, 11].

Соответственно, в топливной системе газотурбинных двигателей (ГТД) наибольшее смолоотложение наблюдается в агрегатах, где топливо нагревается до указанных высоких температур и контактирует с металлами – катализаторами его окисления: в топливно-масляном радиаторе (ТМР) и топливорегулирующей аппаратуре (ТРА). Высокотемпературные отложения обладают высокой адгезионной способностью и малой теплопроводностью. Их образование в топливной системе приводит к снижению эффективности работы ТМР вплоть до его полной забивки; к заклиниванию и зависанию (залипанию) золотников ТРА; к забивке фильтров тонкой очистки (ФТО) АД и топливных форсунок; повышенному нагарообразованию в камерах сгорания и пр. [5, 7–9].

Объективная оценка термоокислительной стабильности АТ является актуальной задачей. На сегодняшний день существуют сле-



а) ТСРТ-2м



б) ТСРТ-2

Рис. 11. Внешний вид (а) и схема (б) прибора типа ТСРТ-2:

1 – корпус (металлический электротермостат); 2 – манометр; 3 – контактный термометр; 4 – термометр; 5 – бомба из нержавеющей стали; 6 – стеклянный стакан; 7 – стеклянная трубка с крышкой; 8 – медная пластинка; 9 – электронный блок управления

Fig. 11. Appearance a) and diagram b) of a TJFS-2 type device:

1 – case (metallic electric incubator), 2 – pressure meter, 3 – contact thermometer, 4 – thermometer, 5 – stainless steel bomb, 6 – glass jar, 7 – glass capped tube, 8 – copper strip, 9 – electronic control unit

дующие прямые и косвенные методы определения термостабильности АТ (рис. 10). Эти показатели характеризуют такое эксплуатационное свойство АТ, как склонность его к образованию отложений (в результате окисления) [5, 7, 13, 14], наиболее распространенными методами являются методы оценки термоокислительной стабильности в статических и динамических (по методу JFTOT) условиях, однако к единому мнению насчет объективности оценки термоокислительной стабильности теми или иными методами специалисты до сих пор не пришли.

Кроме указанных основных показателей, существуют и прочие контролируемые в лабораториях ГСМ авиапредприятий показатели, оказывающие влияние на интенсивность окисления АТ: наличие в АТ водорастворимых кислот и щелочей (и нейтральность), наличие и содержание в АТ серосодержащих компонентов, содержание в АТ мыл нефтяных кислот и другие [7].

Основные положения

Склонность реактивных топлив к образованию отложений в результате окисления в статических условиях оценивают по ГОСТ 11802-88. Данный метод был разработан в нашей стране. Сущность метода заключается в окислении испытуемого топлива в среде воздуха в присутствии катализатора (медной пластинки) в аппарате типа ТСРТ-2¹ (рис. 11) при 150 °С в течение 4 ч с последующей количественной оценкой (весовым методом) образующегося осадка, а также растворимых и нерастворимых смол. Дальнейшим развитием приборов ТСРТ является модификация ТСРТ-10, отличающаяся большей автоматизацией процесса (рис. 12) [6, 7, 11].

Считается, что наиболее достоверную оценку различных показателей качества можно получать на установках, максимально

¹ ТСРТ – термическая стабильность реактивных топлив.



Рис. 12. Внешний вид аппарата TCPT-10
Fig. 12. Appearance of TSRT-10 device



Fig. 13. Внешний вид установки
JFTOT MARK IV

Fig. 13. Appearance of JFTOT MARK IV installation

полно моделирующих реально происходящие процессы в реальных системах. Для оценки термоокислительной стабильности АТ были созданы маломасштабные установки, моделирующие работу топливной системы АД

в динамических условиях. Они позволяют оценить интенсивность смолоотложения АТ на нагретых металлических поверхностях и после контакта с ними [6].

Первые подобные установки появились в 1954–1955 гг. В США это была установка Fuel Koker, в СССР – ДТС-1. Развитием американского метода стало создание фирмой Alcor в 1974 г. метода JFTOT (Jet Fuel Thermal Oxidation Test – определение термоокислительной стабильности реактивного топлива) с соответствующей одноименной установкой² [2, 6].

На данный момент этот метод (с усовершенствованиями, полностью автоматизированный) широко распространен по миру для оценки качества марок реактивных топлив для дозвуковых ВС, соответствующие установки (рис. 13^{3,4}) изготавливает единственный производитель.

Стоит отметить, что статический метод в США никогда не использовался, в то же время в отечественной практике использование динамического метода (ДТС) распространялось только на квалификационные методы испытаний АТ⁵ [6, 13].

² JFTOT IV jet fuel thermal oxidation tester [Электронный ресурс] // youtube. 2022. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=7tz5L-1DBDA> (дата обращения: 07.06.2022).

³ ООО «Неолаб» – оборудование для вашей лаборатории [Электронный ресурс] // neolabllc. URL: <https://www.neolabllc.ru/> (дата обращения: 07.06.2022).

⁴ Revolutionary advancement in jet fuel thermal oxidation testing [Электронный ресурс] // petro-online.com. 22 августа 2011. URL: <https://www.petro-online.com/news/analytical-instrumentation/11/pac-lp/revolutionary-advancement-in-jet-fuel-thermal-oxidation-testing/16508> (дата обращения: 07.06.2022).

⁵ Комплексы квалификационных испытаний являются неотъемлемой частью испытаний вновь разработанных авиаГСМ, а также испытаний известных сортов и марок авиаГСМ, полученных из нового сырья по измененным технологиям, содержащим новые компоненты и пр. Показатели, входящие в перечень квалификационных методов испытаний топлив, существенно шире тех показателей, которые отражены в соответствующих нормативных документах на продукт [7, 13, 15].

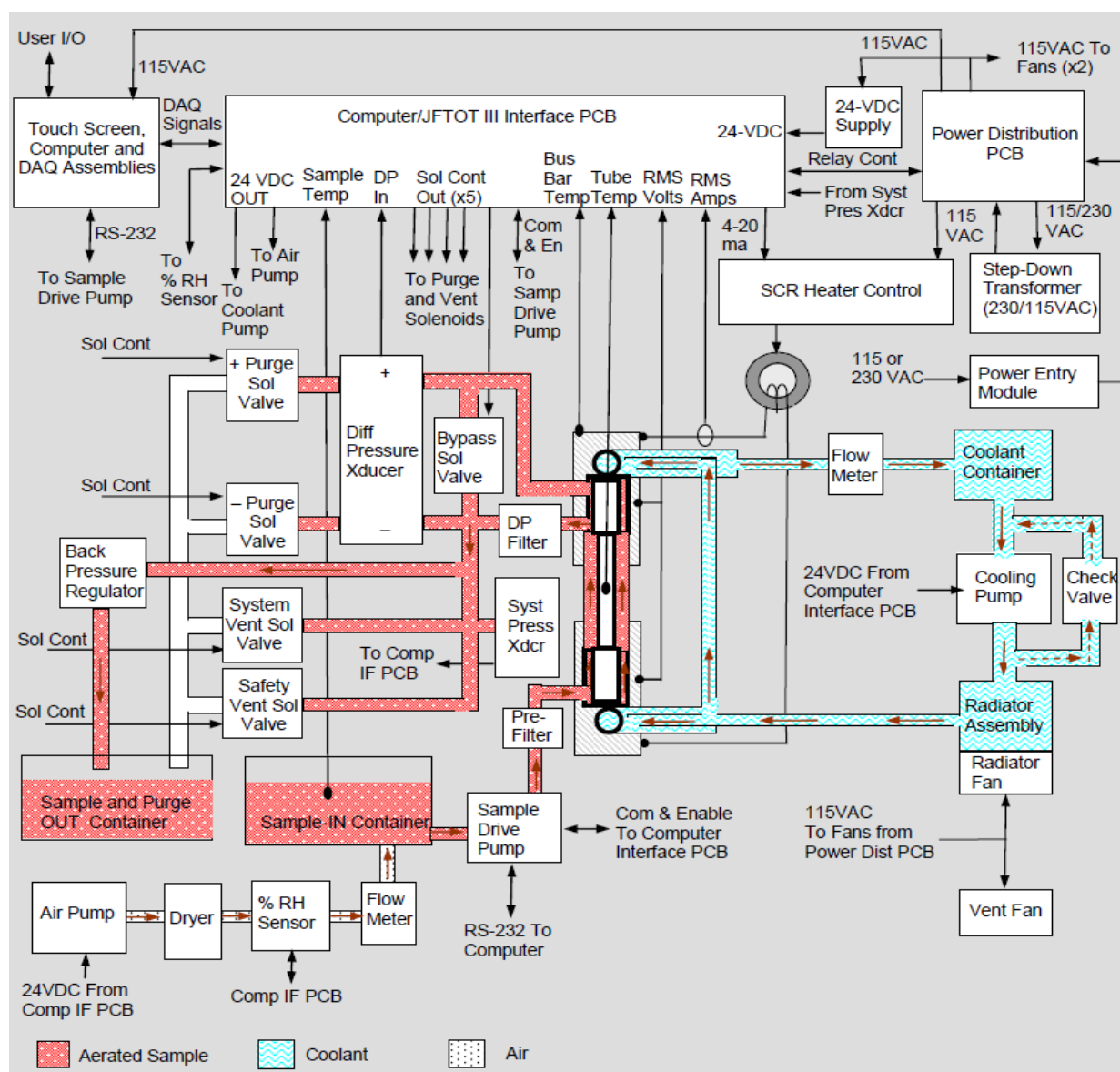


Рис. 14. Принципиальная схема работы установки JFTOT
Fig. 14. Schematic diagram of the JFTOT installation operation

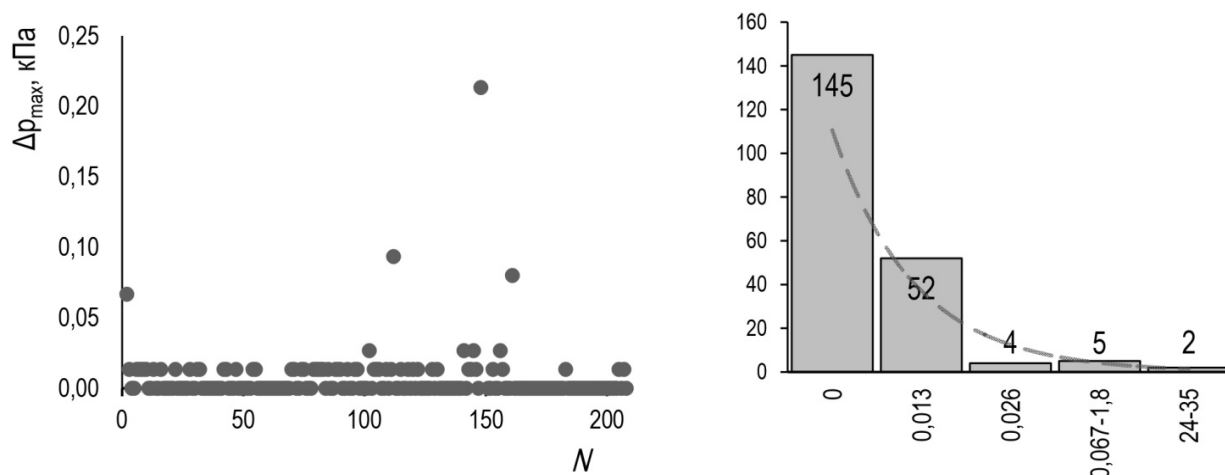
На сегодняшний день в регламенте Таможенного союза⁶ показатели по динамическо-

му методу (JFTOT) нормируют для отечественных марок топлив для ГА ТС-1 и РТ. Научно обоснованная причина введения этого показателя отсутствует⁷, однако из-за этого производители (поставщики) АТ, а также

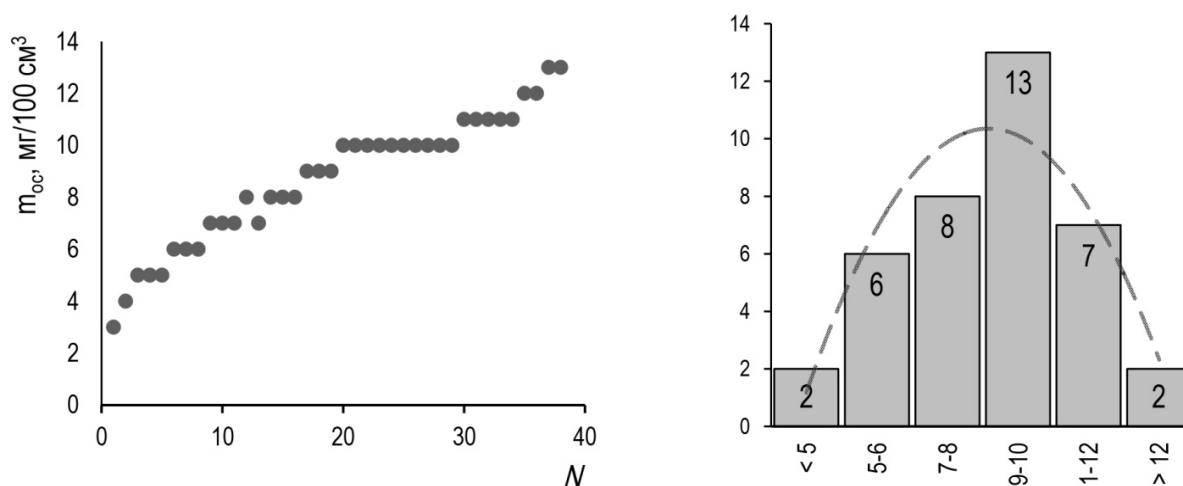
⁶ Решение Комиссии Таможенного союза от 18.10.2011 № 826 (ред. от 19.12.2019) «О принятии технического регламента Таможенного союза "О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и мазуту" (вместе с "ТР ТС 013/2011. Технический регламент Таможенного союза. О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и мазуту")» [Электронный ресурс] // consultant.ru. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_12

0933/ (дата обращения: 07.06.2022). На сегодняшний день является единственным юридическим документом, по которому оценивают качество АТ.

⁷ ГОСТ Р 52954-2008 "Нефтепродукты. Определение термоокислительной стабильности топлив для газовой турбин. Метод JFTOT" [Электронный ресурс] // Гарант. URL: <https://base.garant.ru/5923030/#friends> (дата обращения: 07.06.2022).



Опыт применения динамического метода (JFTOT) лабораторией ГСМ с 2014 по 2021 г. Контрольный перепад давления 25 кПа. Из 208 проб 201 фактически показала отсутствие перепада давления на контрольном фильтре; все пробы находятся в допустимых пределах. Не зафиксировано ни одного случая образования отложений на контрольной трубке. Гистограмма распределения не характеризует объективного состояния термостабильности товарного продукта



Опыт применения статического метода для керосина ТС-1 лабораторией ГСМ за 2020 г. Очевидно нормальное распределение результатов экспериментов – объективная характеристика термостабильности товарного продукта

Рис. 15. Сравнительные данные по опыту эксплуатации динамического (JFTOT) и статического (TCPT) методов оценки термостабильности АТ

Fig. 15. Comparative data on the operational experience of the dynamic (JFTOT) and static (TJFS) methods for assessing the thermal aviation fuel stability

некоторые эксплуатирующие предприятия были вынуждены приобрести и используют соответствующие приборы в лабораториях горюче-смазочных материалов (ГСМ), что, несомненно, выгодно производителю соответствующих установок.

Сущность метода JFTOT заключается в прокачке в течение 2,5 ч с определенной

скоростью и при определенном давлении разогретого до высоких температур (260 °C) топлива и оценке его термоокислительной стабильности по количеству (цвету и толщине) отложений, образующихся на одноразовой алюминиевой нагревательной трубке *Tube Temp*, и времени забивки контрольного фильтра с номинальной пористостью 17 мкм

DP Filter, расположенного по потоку топлива за нагревательной трубкой (рис. 14)⁸.

Проведение испытания осуществляют в соответствии с ГОСТ Р 52954-2013 и ГОСТ 33848-2016. Стандарты идентичны ASTM D 3241-13 и ASTM D3241-14b соответственно.

Проведем анализ актуальности применения метода JFTOT для оценки термоокислительной стабильности отечественных марок реактивных топлив.

На рис. 15 показаны сравнительные данные по анализам авиационных топлив статическим (ТСРТ) и динамическим (JFTOT) методами за 7 лет и 1 год соответственно. Данные идентичны с другими использующими эти методы организациями авиатопливообеспечения.

За весь период эксплуатации установок JFTOT (с конца 2000-х гг.) отечественными лабораториями ГСМ авиапредприятий не было отбраковано ни одного образца свежего АТ по показателям данного метода⁹, притом что по показателям статического метода такие обстоятельства крайне редко, но случались (рис. 15).

На рис. 16 показана чувствительность статического и динамического (JFTOT) методов к изменению термодинамической стабильности после смешения марок топлив ТС-1 и РТ. Видно, что динамический метод JFTOT не реагирует на эти изменения в отличие от статического метода [7].

Поэтому применение динамического метода JFTOT для указанных целей для отечественных марок топлив для дозвуковых ВС является неактуальным [7].

Более того, из приведенных эмпирических данных (рис. 15, 16) видно, что использования статического метода оценки термоокислительной стабильности для проверки качества товарного продукта организациями

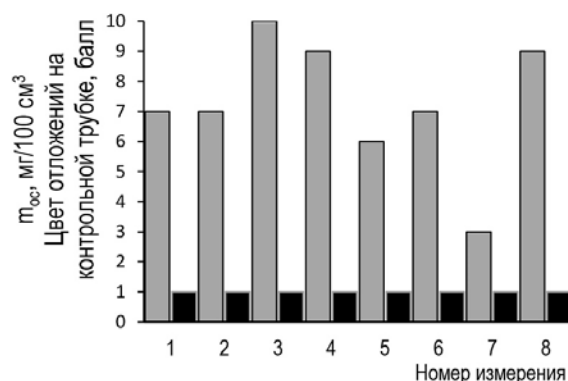


Рис. 16. Чувствительность статического (ТСРТ, серый) и динамического (JFTOT, черный) методов к изменению термостабильности АТ ТС-1 и РТ после их смешения

Fig. 16. Sensitivity of the static (TJFS, gray) and dynamic (JFTOT, black) methods to changes in the thermal TS-1 and RT aviation fuel stability after their mixing



Рис. 17. Внешний вид установки ДТС-4
Fig. 17. Appearance of DTS-4 installation

авиатопливообеспечения вполне достаточно. Показатели динамического метода могут быть использованы для расширенной характеристики продукта, поэтому использование этого метода при квалификационных испытаниях, как и было определено в отечественной практике, вполне обосновано.

Таким образом, преимуществами статических методов оценки качества товарного продукта перед динамическими являются простота и дешевизна оборудования и прове-

⁸ JFTOT 230 MARK III. Jet fuel thermal oxidation tester. User's manual. Alcor, 2015 265 p.

⁹ Случаи забивки фильтра установки JFTOT, как правило, наблюдаются на отработанном керосине (керосине, отобранном из баков ВС) [16], к контролю качества товарного продукта это не имеет отношения.

дения эксперимента¹⁰, а также большая объективность результатов испытаний, в том числе и применительно к топливным системам АД, если принять во внимание, что наибольшее смолоотложение в них будет наблюдаться непосредственно после останова двигателя, т. е. когда топливо, нагретое до высоких температур, перестает циркулировать по топливной системе, а также при температурах, примерно равных температурам начала кипения АТ (для ТС-1 и РТ $\approx 150^\circ\text{C}$) [6, 7].

Температурами начала отложений являются $80\text{--}105$ и $135\text{--}180^\circ\text{C}$ для топлив ТС-1 и РТ соответственно [6, 7, 13]. Из рис. 1 видно, что проводить оценку термостабильности данных марок АТ при температуре испытания на JFTOT (260°C) не имеет практического смысла.

Также нельзя не отметить, что в текущей геополитической обстановке приобретение и нормальная эксплуатация американского прибора затруднительны, например, поставка фирмой-производителем одноразовых контрольных трубок в нашу страну была прекращена.

Современной отечественной установкой испытания термостабильности АТ в динамических условиях является установка ДТС-4 (рис. 17). Также используют и установку ДТС-2. Определение показателей термостабильности (температура начала образования отложений, индекс термостабильности (количество отложений), изменение скорости перепада давления на фильтре) осуществляют по ГОСТ 17751-79 и СТО 08151164-0305-2019 [7, 17].

При этом и конструкция установок, и параметры их работы отличны от метода

JFTOT. Так, температура АТ по методу ДТС-4 после нагревателя составляет 150°C , а в камере контрольного фильтра – 180°C , время проведения испытания – 2 ч. Установки ДТС адаптированы для отечественных марок АТ, в том числе для дозвуковых ВС, они изготовлены в единичных экземплярах и используются при квалификационных испытаниях АТ [7]. Расширение практики применения данных установок взамен JFTOT организациями авиатопливообеспечения в целом возможно, однако, как уже отмечалось, это не имеет практической необходимости.

Заключение

На основании указанного возможно выделить основные преимущества и недостатки статического и динамических методов оценки термоокислительной стабильности (рис. 18).

Показана непригодность применения метода JFTOT с текущими параметрами работы для оценки термоокислительной стабильности отечественных товарных марок топлив для дозвуковых ВС. Для обеспечения объективности оценки для каждого сорта (а в некоторых случаях и марки) топлив требуются свои условия испытания. В целом доработка прибора в этом отношении не вызывает большой сложности, однако действий в этом направлении со стороны производителя пока не предпринималось.

Отмечено, что для сравнительной оценки показателей термоокислительной стабильности, а также с целью контроля качества товарного продукта достаточно использования статического метода ТСРТ. Динамический метод ДТС актуально использовать при квалификационных испытаниях АТ, а также в тех случаях, когда требуется определение марки топлива: по показателю «температура начала образования отложений» марку РТ можно оперативно отличить от марки ТС-1. Так как подобная задача ставится весьма редко, наличие данной установки в ряде лабораторий ГСМ не требуется.

¹⁰ По состоянию на 2021 г. стоимость только расходных материалов на проведение одного испытания по методу JFTOT составляет около 6 000 руб., стоимость самого прибора составляет порядка 14 млн руб. Для снятия показателей с контрольной трубки также возможно приобретение отдельной установки (PAC OptiReader) стоимостью порядка 5 млн руб., стоимость прибора ТСРТ-10 на сегодняшний день составляет порядка 800 тыс. руб. (ценой на расходные материалы можно пренебречь).



Рис. 18. Преимущества и недостатки методов оценки термоокислительной стабильности реактивных топлив для дозвуковых ВС ГА

Fig. 18. Advantages and disadvantages of the methods for assessing the thermal oxidation stability of jet fuels for civil aviation subsonic aircraft

Высокой практической необходимости по внедрению метода ДТС вместо JFTOT нет, поскольку в целом нет необходимости контроля термоокислительной стабильности в динамических условиях в организациях авиатопливообеспечения ГА.

На сегодняшний день в мире распространяется практика использования на ВС синтетических и биологических топлив, как в чистом виде, так и в виде смесей с нефтяным реактивным топливом^{11,12,13,14,15}. Указанные

альтернативные топлива обладают низкой стабильностью (в том числе термоокислительной) [18], однако применимость классических методов к оценке их стабильности пока не определена. В России производства марок биологических и синтетических топлив, допущенных к применению на ВС, нет, поэтому в данной статье исследование возможности использования статических, динамических и других методов для оценки термоокислительной стабильности указанных топлив и их смесей с нефтяным реактивным топливом не проводилось.

Список литературы

1. Аксенов А.Ф. Авиационные топлива, смазочные материалы и специальные жидкости. М.: Транспорт, 1970. 256 с.

¹⁴ Французы выполнили первый полет узкофюзеляжного самолета на 100%-ном биотопливе // АВИАИНФОРМ. 2021. № 11 (212). С. 69–70.

¹⁵ Вертолет Airbus совершил первый полет на 100 % экологическом топливе // АВИАИНФОРМ. 2021. № 11 (212). С. 72–73.

¹¹ This A319neo is the latest to test 100% SAF [Электронный ресурс] // airbus.com. 30 октября 2021. URL: <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2021-10-this-a319neo-is-the-latest-to-test-100-saf> (дата обращения: 07.06.2022).

¹² First Airbus helicopter flight with 100% sustainable aviation fuel [Электронный ресурс] // airbus.com. 9 ноября 2021. URL: <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2021-11-first-airbus-helicopter-flight-with-100-sustainable-aviation-fuel> (дата обращения: 07.06.2022).

¹³ An A350 fuelled by 100% SAF just took off [Электронный ресурс] // airbus.com. 18 марта 2021. URL: <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2021-03-an-a350-fuelled-by-100-saf-just-took-off> (дата обращения: 07.06.2022).

2. **Пискунов В.А., Зрелов В.Н.** Влияние топлив на надежность реактивных двигателей самолетов: химмотологическая надежность. М.: Машиностроение, 1978. 270 с.

3. **Пискунов В.А., Зрелов В.Н., Василенко В.Т. и др.** Химмотология в гражданской авиации: справочник. М.: Транспорт, 1983. 248 с.

4. **Братков А.А., Серегин Е.П., Горенков А.Ф. и др.** Химмотология ракетных и реактивных топлив. М.: Химия, 1987. 304 с.

5. **Грядунув К.И.** Химмотология авиационных горюче-смазочных материалов: учеб. пособие. М.: ИД Академии Жуковского, 2021. 184 с.

6. **Грядунув К.И.** Эксплуатационные свойства авиационных горюче-смазочных материалов: учеб. пособие. М.: ИД Академии Жуковского, 2022. 168 с.

7. **Грядунув К.И., Марчук Н.В.** Эксплуатационные свойства авиационных ГСМ: учебно-метод. пособие по выполнению лабораторных работ. Воронеж: МИР, 2022. 80 с.

8. **Фукс И.Г., Спиркин В.Г., Шабалина Т.Н.** Основы химмотологии. Химмотология в нефтегазовом деле: учеб. пособие. М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2004. 280 с.

9. **Урявин С.П., Коняев Е.А.** Высокотемпературные отложения (ВТО) реактивных топлив: негативность, влияющие факторы, способы борьбы // Научный Вестник МГТУ ГА. 2010. № 162. С. 81–84.

10. **Литвинов А.А.** Основы применения горюче-смазочных материалов в гражданской авиации: учебник для вузов. М.: Транспорт, 1987. 308 с.

11. **Углов Б.А.** Эксплуатационные свойства реактивных топлив и надежность авиационных силовых установок: учеб. пособие. Куйбышев: КуАИ, 1986. 68 с.

12. Теоретические основы химмотологии / Под. ред. А.А. Браткова. М.: Химия, 1985. 320 с.

13. **Гуреев А.А., Серегин Е.П., Азев В.С.** Квалификационные методы испытаний нефтяных топлив. М.: Химия, 1984. 200 с.

14. **Орешенков А.В., Гришин Н.Н., Степанова С.Е.** Современные методы оценки

термоокислительной стабильности нефтепродуктов // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. 2017. № 7. С. 25–35.

15. **Чудиновских А.Л., Тонконогов Б.П., Лахши В.Л.** Моторное масло как важный объект химмотологии. М.: Недра, 2014. 223 с.

16. **Попов Ю.В.** Оценка методик анализа качества авиационного топлива при расследовании авиационных происшествий с воздушными судами гражданской авиации / Ю.В. Попов, Л.В. Ковба, О.Б. Азжеурова, Н.В. Морозова, Н.П. Кондукова // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2020. № 32. С. 76–86.

17. **Астафьев В.А.** Сравнительный анализ результатов оценки термоокислительной стабильности топлив для реактивных двигателей в динамических условиях методами ДТС-4 и ДТС-2 // 55 лет химмотологии – основные итоги и направления развития: тезисы докладов Межведомственной научно-технической конференции. Москва, 27 ноября 2019 г. М.: 25 ГОСНИИ химмотологии МО РФ, 2019. С. 87–89.

18. **Романцова С.В., Рязанцева И.А., Малахов К.С.** Стабильность биодизельных топлив при хранении // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2009. Т. 14, № 1. С. 63–66.

References

1. **Aksenov, A.F.** (1970). Aviation fuels, lubricants and special liquids. Moscow: Transport, 256 p. (in Russian)

2. **Piskunov, V.A., Zrelov, V.N.** (1978). The influence of fuels on the aircraft jet engine's reliability: chemmotological reliability. Moscow: Mashinostroyeniye, 270 p. (in Russian)

3. **Piskunov, V.A., Zrelov, V.N., Vasilenko, V.T. et al.** (1983). Chemmotology in civil aviation: handbook. Moscow: Transport, 248 p. (in Russian)

4. **Bratkov, A.A., Seregin, E.P., Gorenkov, A.F. et al.** (1978). Chemmotology of rocket and jet fuels. Moscow: Khimiya, 304 p. (in Russian)

5. **Gryadunov, K.I.** (2021). Aviation fuels and lubricants chemmotology: Tutorial. Mos-

cow: Izdatelskiy Dom Akademii Zhukovskogo, 184 p. (in Russian)

6. **Gryadunov, K.I.** (2022). Aviation fuels and lubricants operational properties: Tutorial. Moscow: Izdatelskiy Dom Akademii Zhukovskogo, 168 p. (in Russian)

7. **Gryadunov, K.I., Marchuk, N.V.** (2022). Aviation fuels and lubricants operational properties: educational and methodical manual for the implementation of laboratory work. Voronezh: MIR, 80 p. (in Russian)

8. **Fuks, I.G., Spirkin, V.G., Shabalina, T.N.** (2004). Fundamentals of chemmotology. Chemmotology in oil and gas business: Tutorial. Moscow: RGU nefti i gaza im. I.M. Gubkina, 280 p. (in Russian)

9. **Uryavin, S.P., Konyaev, E.A.** (2010). Fuel high temperature measures: negativeness, factors, means of struggle. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA*, no. 162, pp. 81–84. (in Russian)

10. **Litvinov, A.A.** (1987). Fuels and lubricants application basics in civil aviation: Textbook for Universities. Moscow: Transport, 308 p. (in Russian)

11. **Uglov, B.A.** (1986). Jet fuels operational properties and aviation powerplants reliability: Tutorial. Kuybyshev: KuAI, 68 p. (in Russian)

12. **Bratkov, A.A.** (Ed). (1985). Theoretical foundations of chemmotology. Moscow: Khimiya, 320 p. (in Russian)

13. **Gureev, A.A., Seregin, E.P., Azev, V.S.** (1984). Qualification testing methods for petroleum fuels. Moscow: Khimiya, 200 p. (in Russian)

14. **Oreshenkov, A.V., Grishin, N.N., Stepanova, S.E.** (2017). Modern methods of evaluation of thermal oxidative stability of petroleum products. *World of Petroleum Products Scientific and Technical Journal*, no. 7, pp. 25–35. (in Russian)

15. **Chudinovskikh, A.L., Tonkonogov, B.P., Lashkhi, V.L.** (2014). Motor oil as an important object of chemmotology. Moscow: Izdatelstvo Nedra, 223 p. (in Russian)

16. **Popov, Yu.V., Kovba, L.V., Azzheurova, O.B., Morozova, N.V., Kondukova, N.P.** (2020). Evaluation of methods of aircraft fuel quality analysis during investigation of aircraft accidents of civil aviation. *Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation (GosNII GA)*, no. 32, pp. 76–86. (in Russian)

17. **Astafev, V.A.** (2019). Jet engine fuels thermal-oxidative stability measured under dynamic conditions by DTS-4 and DTS-2 methods, comparative analysis of the results. *55 let khimmotologii-osnovnyye itogi i napravleniya razvitiya: tezisy dokladov Mezhdvdomstvennoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. Moscow: 25 GOSNII khimmotologii MO RF, pp. 87–89. (in Russian)

18. **Romantsova, S.V., Ryazanceva, I.A., Malahov, K.S.** (2009). Stability of biodiesel fuels during the storage. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Yestestvennyye i tekhnicheskkiye nauki*, vol. 14, no. 1, pp. 63–66. (in Russian)

Сведения об авторах

Грядунув Константин Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры авиатопливообеспечения и ремонта летательных аппаратов МГТУ ГА, k.gryadunov@mstuca.aero.

Браилко Анатолий Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры авиатопливообеспечения и ремонта летательных аппаратов МГТУ ГА, a.brailko@mstuca.aero.

Балышин Кирилл Эдуардович, преподаватель кафедры авиатопливообеспечения и ремонта летательных аппаратов МГТУ ГА, k.balyshin@mstuca.aero.

Савушкин Сергей Александрович, ассистент преподавателя кафедры авиатопливообеспечения и ремонта летательных аппаратов МГТУ ГА, s.savuschkin@mstuca.aero.

Харина Вера Константиновна, кандидат технических наук, доцент кафедры технической механики и инженерной графики МГТУ ГА, h.vera@bk.ru.

Information about the authors

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

Anatoly A. Brailko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Aviation Fuel Supply and Aircraft Repair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, A.brailko@mstuca.aero.

Kirill E. Balyshin, Lecturer of Aircraft Fuel Supply and Repair Department Moscow State Technical University of Civil Aviation, k.balyshin@mstuca.aero.

Sergey A. Savushkin, Lecturer Assistant of Aircraft Fuel Supply and Repair Department Moscow State Technical University of Civil Aviation, s.savushkin@mstuca.aero.

Vera K. Harina, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Technical Mechanics and Engineering Graphics Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, h.vera@bk.ru.

Поступила в редакцию 26.11.2022
Принята в печать 25.05.2023

Received 26.11.2022
Accepted for publication 25.05.2023