

ТРАНСПОРТ

05.22.01 – Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте;

05.22.08 – Управление процессами перевозок;

05.22.13 – Навигация и управление воздушным движением;

05.22.14 – Эксплуатация воздушного транспорта

УДК 621.45.04

DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-3-8-16

**ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЭТИЛИРОВАННОГО АВИАЦИОННОГО
БЕНЗИНА НА ВОЗДУШНЫХ СУДАХ**

К.И. ГРЯДУНОВ¹, А.Н. ТИМОШЕНКО¹, Е.Ю. СТАРКОВ¹

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

На сегодняшний день наблюдается устойчивая динамика расширения парка ВС малой авиации, оснащенных поршневыми двигателями. Для авиационных поршневых двигателей (ПД) применяется специальное топливо – авиационные бензины с заданными эксплуатационными свойствами, обеспечивающее их стабильную работу на любых режимах и в любых условиях эксплуатации. Уровень показателей эксплуатационных свойств авиационных топлив, и в т.ч. бензинов, задаётся посредством введения специальных присадок. Одной из таких присадок является антидетонационная присадка – тетраэтилсвинец (ТЭС), которая добавляется в топливо в определённом количестве в виде этиловой жидкости. Несмотря на отличные свойства ТЭС как антидетонатора, он имеет и ряд существенных недостатков. С точки зрения эксплуатации авиационных двигателей было отмечено, что продукты сгорания (разложения) ТЭС, которые недостаточно эффективно выносятся из камеры сгорания, в значительном количестве попадают в масляную систему, вызывая забивку масляных фильтров тонкой очистки. Отмечено, что даже незначительное содержание продуктов разложения ТЭС в авиационных маслах резко ухудшает их прокачиваемость и приводит к полной забивке фильтров тонкой очистки масла за считанные минуты работы двигателя даже на свежем масле. Причём многоступенчатая очистка масла, предусмотренная конструкцией некоторых ПД, не оказывает существенного влияния на данное негативное обстоятельство, создающее угрозу для безопасности полётов. На данный момент применение свинецсодержащего бензина для авиационных ПД является безальтернативным, поэтому требуются решения по снижению негативных последствий при его применении.

Ключевые слова: авиация, авиационный бензин, эксплуатационные свойства, тетраэтилсвинец, авиационные поршневые двигатели.

ВВЕДЕНИЕ

Современные тенденции развития гражданской авиации (ГА) показывают стабильное увеличение парка ВС малой авиации [1]. Данные ВС оснащаются поршневыми двигателями (ПД), работающими на авиационном бензине, к которому предъявляются повышенные требования. Основными марками авиационного бензина для ГА на данный момент являются российский Б-91/115 и американский 100LL. Для задания необходимых эксплуатационных свойств в данные бензины добавляется ряд присадок. В качестве антидетонационной присадки применяются свинецсодержащие присадки: в основном, тетраэтилсвинец [2].

Отдельно стоит отметить, что с начала 90-х гг. прошлого века производство отечественных марок авиационного бензина было полностью прекращено, а вместе с ним и производство тетраэтилсвинца, которое в конечном счёте было утрачено [1, 3]. Таким образом, на протяжении почти двух десятков лет эксплуатанты поршневой авиации нашей страны были вынуждены закупать иностранный авиационный бензин по грабительским ценам или в нарушение всех пи-

санных норм применять на ВС автомобильные бензины. Примерно с середины 10-х гг. производство одной марки отечественного авиационного бензина (Б-91/115) возобновилось [3]¹, однако необходимые для производства компоненты, например, антидетонационная присадка (ТЭС) и даже соответствующий краситель, приобретаются за рубежом.

Тetraэтилсвинец ($Pb(C_2H_5)_4$), применяемый в виде этиловой жидкости, – смертельно опасный яд, обладающий выраженным кумулятивным действием, вызывает нарушения центральной нервной системы, оказывает аллергическое воздействие, относится к 1-му классу опасности. Проникает в организм даже через кожу. Предельно допустимая концентрация паров ТЭС – $0,005 \text{ мг/м}^3$ ^{2,3,4,5}[1, 3–6]. ТЭС является веществом, опасным для окружающей среды, в связи с чем применение его в автомобильных бензинах в большинстве стран мира запрещено, в т. ч. и в России с 2003 г.⁶

Однако в авиации данная присадка является необходимым компонентом авиационного бензина по ряду причин. Во-первых, это эффективная антидетонационная присадка, обеспечивающая необходимый уровень сортности на богатой смеси. Во-вторых, образующиеся при сгорании бензина окислы свинца положительно влияют на противоизносные свойства топлив (применительно к деталям цилиндропоршневой группы (ЦПГ)).

ТЭС оказывает влияние и на прочие эксплуатационные свойства авиационного бензина.

Влияние ТЭС на стабильность бензина неоднозначно: в одних случаях ТЭС является катализатором процессов окисления углеводородов, а в других – ингибитором [7].

Отрицательное воздействие ТЭС оказывает на нагарообразующие свойства, продукты окисления ТЭС кислородом воздуха образуют нерастворимые осадки в бензине, что может вызывать забивку топливных фильтров, продукты сгорания ТЭС негативно влияют на каталитические нейтрализаторы и пр. [8].

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Содержание тетраэтилсвинца в авиационных бензинах приведено в табл. 1^{1,2}.

Таблица 1
Table 1

Содержание ТЭС в авиационных этилированных бензинах
TEL concentration in aviation leaded gasoline

Концентрация ТЭС	100LL	Б-91/115
млТЭС/дм ³ , не более	0,53	
гPb/дм ³ , не более	0,56	
гPb/кг, не более		2,5

¹ Ивхимпром начал производство авиационных бензинов марок Б-91/115 и Avgas 100LL [Электронный ресурс] // Сделано у нас. 2016. URL: <https://sdelanounas.ru/blogs/83489/> (дата обращения 15.12.2019).

² ГОСТ Р 55493-2013. Бензин авиационный Avgas 100LL. М.: Стандартинформ, 2014. 15 с.

³ ГОСТ 1012-2013. Бензины авиационные. М.: Стандартинформ, 2019. 15 с.

⁴ Tetraэтилсвинец. Физико-химические свойства и токсичность, механизм токсического действия, клиника, профилактика и принципы оказания медицинской помощи [Электронный ресурс] // Хелпикс.Орг-Интернет помощник. 2017. URL: <https://helpiks.org/9-10286.html> (дата обращения 25.02.2020).

⁵ Отравление тетраэтилсвинцом [Электронный ресурс] // LibTime. 2012. URL: <https://libtime.ru/zdorovye/otravlenie-tetraetilsvincom.html> (дата обращения 25.02.2020).

⁶ О запрете производства и оборота этилированного автомобильного бензина в Российской Федерации. № 34-ФЗ от 22 марта 2003 г.

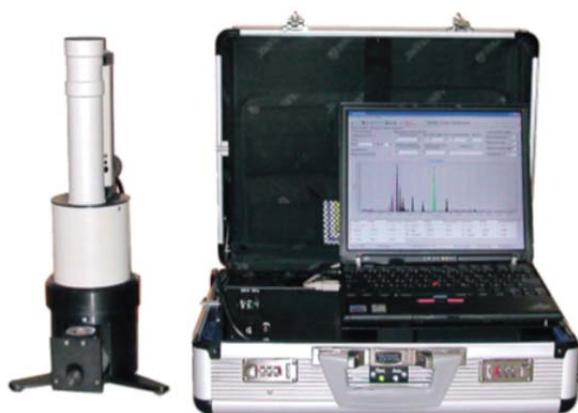
Для объективного сравнения данных табл. 1 следует привести значения концентраций ТЭС. Принимая плотность авиабензина 100LL при 20 °С равной 750 кг/м³, получаем гРb/кг = 0,75.

Буквы в маркировке авиационного бензина 100LL означают low lead – с низким содержанием свинца, что в некотором смысле соответствует действительности (различие содержания ТЭС по сравнению с бензином Б-91/115 более чем в 3 раза), однако можно говорить о практически идентичном негативном влиянии указанных марок бензина на окружающую среду, учитывая ядовитость ТЭС, и эксплуатацию авиационных двигателей (что будет показано далее).

Как известно, поршневые двигатели имеют следующую особенность работы: детали ЦПГ работают в условиях высоких неравномерных температурных напряжений и ударных нагрузок, при этом нижняя часть поршня работает в условиях жидкостного трения, а верхняя – граничного. Сам поршень при работе деформируется и в определённые моменты принимает форму овала, вытянутого вдоль оси поршневого пальца. Это обуславливает наличие гарантированного (и часто увеличенного) зазора между поршнем и цилиндром. Таким образом, применяемый бензин и продукты его сгорания могут попадать в масло, особенно при наличии повышенного износа деталей ЦПГ [9–11]. Соответственно в масло попадает и ТЭС, а также продукты его разложения после сгорания авиационного бензина в камере сгорания. Этим же фактом обусловлен заброс масла в камеру сгорания и, как следствие, значительные расходы масла при работе ПД, которые могут составлять до 10 л/ч и даже более.

Для определения содержания ТЭС в авиационном масле, имеющем различную наработку, были отобраны пробы из двигателей АШ-62 ИР самолёта АН-2.

Для оценки состава металлических примесей в авиационных маслах поршневых двигателей применялся рентгенофлуоресцентный спектральный метод анализа, реализованный на установке АДК «Призма» (рис. 1). АДК «Призма» позволяет проводить количественный и качественный анализ проб масел на наличие в них металлов с высокой достоверностью и отличается простотой пробоподготовки⁷ [12].



- возможность определения 74 элементов от Са до Am;
- диапазон измеряемых концентраций: от 0,1 до 250 г/т;
- пределы относительной погрешности измерений концентрации: от 5 до 20 % в зависимости от концентрации

Рис. 1. Общий вид АДК «Призма» и его основные параметры
Fig. 1. The general view of ADC «Prizm» and its main properties

Рентгенофлуоресцентные спектральные анализы проб авиационного масла из поршневых двигателей показали значительное содержание в них свинца (табл. 2). Источником свинца

⁷ Автоматизированный диагностический комплекс «АДК ПРИЗМА» [Электронный ресурс] // Южнополиметалл-холдинг-разработка и производство аналитического оборудования. 2018. URL: <http://www.analizator.ru/production/xrfa/adc-prizma/> (дата обращения 12.12.2019).

в масле является ТЭС из авиационного бензина. При этом значительной разницы по этому параметру в зависимости от марки применяемого авиационного бензина не наблюдалось.

Из табл. 2 видно, что наличие в пробах свинца может быть значительным даже при эксплуатации двигателей на свежем масле. Это может объясняться тем, что при замене масла в соответствии с регламентом авиационные ПД не промываются. Какой-либо зависимости наличия Pb в пробах работающего масла от наработки масла также не обнаружено – оно значительно при любых наработках.

Наличие свинца в пробах масла ухудшает прокачиваемость масла и его фильтруемость. В присутствии свинца масло чернеет и образует сгустки.

Таблица 2
Table 2

Содержание свинца в пробах масла из поршневых двигателей
с различной наработкой масла
Lead concentration in the oil samples of piston engines with various oil operating time

№ пробы	Нарботка двигателя АШ-62Ир на масле МС-20, ч	Fe, г/г	Pb, г/г	Cu, г/г	Zn, г/г	Cr, г/г	Ag, г/г	Zr, г/г
1	1,5	1,76	8,19	1,7	0,31	-	-	-
2	100	1,29	8,81	0,67	-	0,21	2,62	-
3	2	1,24	1,91	0,82	-	-	-	-
4	2	2,02	3,09	0,72	-	-	-	0,67
5	100	1,73	2,67	0,81	0,23	0,25	-	-

Масляные фильтры тонкой очистки поршневых двигателей, размер ячеек которых составляет от 10 до 25 мкм в зависимости от вида применяемого фильтра, забиваются при работе на таком масле практически мгновенно (рис. 2–3)⁸, и загрязнённое масло продолжает подаваться в двигатель через перепускные клапаны в обход фильтров, что негативно сказывается на безопасности полётов. При этом следует отметить, что в маслосистемах авиационных ПД отсутствуют сигнализаторы забивки ФТО. В них могут быть установлены лишь датчики измерения перепада давления с соответствующим указателем в кабине пилота. Данный факт затрудняет регистрацию забивки ФТО экипажем.

Также стоит отметить, что ТЭС в виде этиловой жидкости, растворённой в объёме топлива, не вызывает проблем с прокачиваемостью топлива через топливные ФТО, размер ячеек которых составляет от 10 до 25 мкм в зависимости от применяемого фильтра, и тем более не вызывает их забивки. Забивку фильтров вызывают только продукты окисления или разложения ТЭС после его сгорания. В рассматриваемом случае это продукты разложения – диоксид свинца (PbO₂) – в составе прочих продуктов сгорания и окисления авиационного бензина, что является неизбежным при применении авиационных бензинов с ТЭС.

В конструкции маслосистем ПД может применяться многоступенчатая очистка масла, заключающаяся в том, что масло перед попаданием в фильтр тонкой очистки проходит предварительную очистку в центрифуге. Центрифугирование масла перед фильтром в указанных обстоятельствах очевидно имеет некоторое положительное действие, т. к. значительное количество

⁸ АН-2 «Кукурузник»: Замена масла, проверка фильтров и чистка центрифуги двигателя АШ-62ИР [Электронный ресурс] // Capfa.Ru- ремонт, тюнинг и эксплуатация техники. 2019. URL: <https://capfa.ru/1460-an-2-zamena-masla-proverka-filtrov-i-chistka-centrifugi-dvigatelja-ash-62ir.html> (дата обращения 03.03.2020).

ство довольно крупных частиц (от 50 мкм) в течение некоторого промежутка времени оседает на стенках центрифуги. Однако практика показывает, что центрифугирование не предотвращает забивку ФТО, а при наличии факта забивки ФТО не может являться самостоятельной эффективной системой очистки масла от загрязнений (взамен ФТО).



Рис. 2. Фильтр МФМ-25 после 1,5 часов работы двигателя
Fig. 2. MFM-25 filter after 1.5 hours of engine operation



Рис. 3. Центрифуга ТЦМ-25 после 100 часов работы двигателя
Fig. 3. TCM-25 centrifuge after 100 hours of engine operation

Указанные факты также указывают и на токсичность масла, применяемого в авиационных поршневых двигателях, соответственно к вопросам охраны окружающей среды и производственной безопасности при эксплуатации маслосистем авиационных ПД должны предъявляться соответствующие повышенные требования.

Пути решения данной проблемы могут быть различными, в т. ч.:

1. Замена антидетонационной присадки к авиационному бензину [1, 2].
2. Изменение регламента замены масла, замены (очистки) фильтров тонкой очистки и очистки центрифуги (при ее наличии), введение в регламент периодической промывки поршневого двигателя при замене масла.
3. Изменение конструкции фильтроэлементов или системы фильтрации авиационного масла.
4. Переход на альтернативные виды топлива^{9,10} [13–23] и пр.

Любой из указанных путей потребует значительных временно-трудовых и экономических затрат, однако является необходимым для обеспечения безопасности полетов ВС, оборудованных ПД, и экологичности данных двигателей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ свойств применяемого в авиационных бензинах антидетонатора ТЭС показывает ряд его недостатков, влияющих в т. ч. на ресурс деталей ПД и на безопасность полетов ВС.
2. Эксперименты показали, что вне зависимости от наработки масла на ПД, содержание свинца в его пробах является значительным, что вызывает забивку ФТО за считанные минуты

⁹ Ту-155 [Электронный ресурс] // Ютуб. 2010. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=yvgOLapNubI> (дата обращения 01.07.2019).

¹⁰ Федченко И.А. Аналитический отчет. Основные тенденции развития рынка биотоплива в мире и России за 2000–2012 годы [Электронный ресурс] // Портал-Энерго. 2013. URL: <http://portal-energo.ru/articles/details/id/706> (дата обращения 25.03.2019).

работы двигателя и загрязнённое масло начинает циркулировать по системе в обход ФТО через систему перепуска.

3. Отмечена актуальность замены ТЭС на иные присадки-антидетонаторы, а также обозначены прочие возможные пути решения проблем загрязнения маслосистемы продуктами окисления и разложения ТЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Свириз И.** Взлётный режим // Сибирская нефть. 2016. № 134. С. 32–37.
2. Теоретические основы химмотологии / Под. ред. А.А. Браткова. М.: Химия, 1985. 320 с.
3. **Попов И.М.** Тенденции развития бензинов для авиатехники с поршневыми двигателями / И.М. Попов, П.В. Бородако, М.Н. Пациона, Е.П. Федоров, Н.И. Варламова, Л.С. Яновский // Двигатель. 2015. № 5 (101). С. 20–22.
4. **Крамаренко В.Ф.** Токсикологическая химия. М.: Книга по Требованию, 2013. 445 с.
5. **Пискунов В.А.** Химмотология в гражданской авиации: справочник / В.А. Пискунов, В.Н. Зрелов, В.Т. Василенко и др. М.: Транспорт, 1983. 248 с.
6. **Немчиков М.Л.** Проблемы применения авиационного этилированного бензина на воздушных судах / М.Л. Немчиков, К.И. Грядунов, И.С. Мельникова, О.В. Нелюбова // «Новые материалы и перспективные технологии»: Пятый междисциплинарный научный форум с международным участием. Москва, 30 октября-1 ноября 2019 г. Т. 1. С. 606–607.
7. **Литвинов А.А.** Основы применения горюче-смазочных материалов в гражданской авиации: учебник для вузов. М.: Транспорт, 1987. 308 с.
8. Переработка сернистых нефтей / Под. ред. А.С. Эйгинсон. Ленинград: государственное научно-техническое издательство нефтяной и горнотопливной литературы, 1959. 279 с.
9. **Углов Б.А.** Авиационный двигатель Ан-62ИР: учеб. пособие. Самара: Самарский аэрокосмический университет, 1992. 112 с.
10. **Бочаров В.Е., Гутман Л.Д.** Авиационный мотор АШ-62ИР. Описание конструкции и эксплуатация. М.: Редакционно-издательский отдел Аэрофлота, 1951. 350 с.
11. **Грядунов К.И.** Диагностирование авиационных двигателей по содержанию металлов в маслах / К.И. Грядунов, М.Л. Немчиков, А.Н. Козлов, И.С. Мельникова // Научный Вестник МГТУ ГА. 2019. Т. 22, № 3. С. 35–44. DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-3-35-44
12. **Маслова Т.М., Грядунов К.И.** Химмотология и контроль качества ГСМ. Авиационные масла, смазки, специальные жидкости: учеб.-метод. пособие. М.: МИР, 2019. 52 с.
13. **Серегин Е.П.** Развитие химмотологии. М.: Первый том, 2018. 880 с.
14. **Глаголева О.Ф., Белоконь Т.Н.** Топлива для двигателей внутреннего сгорания и альтернативная энергетика // «55 лет химмотологии. Основные итоги и направления развития»: тезисы докладов Межведомственной научно-технической конференции. Москва, 27 ноября 2019 г. С. 49.
15. **Николайкин Н.И., Мельников Б.Н., Большунов Ю.А.** Перевод на альтернативные виды топлива как способ повышения энергетической и экологической эффективности транспорта // Научный Вестник МГТУ ГА. 2010. № 162. С. 12–21.
16. **Glover B.M.** Boeing and the environment: our commitment to a better future: presentation of boeing management company. Seattle (USA): Boeing Management Company, 17.06.2008. 40 p.
17. **Васильев А.Ю., Челебян О.Г., Медведев Р.С.** Особенности применения биотопливной смеси в камерах сгорания современных газотурбинных двигателях // Вестник СГАУ им. Академика С.П. Королева. 2013. № 3 (41). С. 57–62.
18. **Schmidt M.** Challenges for ground operation arising from aircraft concepts using alternative energy / M. Schmidt, A. Paul, M. Cole, K.O. Ploetner // Journal of Air Transport Management. 2016. Vol. 56. Part B. Pp. 107–117. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2016.04.023>

19. Грядунов К.И. Сравнительный анализ показателей качества авиационных керосинов, биотоплив и их смесей / К.И. Грядунов, А.Н. Козлов, В.М. Самойленко, Ш. Ардешири // Научный Вестник МГТУ ГА. 2019. Т. 22, № 5. С. 67–75. DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-5-67-75

20. Башенко Н.С., Аджиев А.Ю., Шеин О.Г. Возможности получения нового авиационного топлива – АСКТ // Экспозиция нефть и газ. 2009. № 5. С. 40–41.

21. Ратнер С.В. Инновации в авиационной промышленности: анализ результатов исследовательских программ по разработке альтернативных видов авиационного топлива // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2018. Т. 14, № 3. С. 492–506. DOI: 10.24891/ni.14.3.492

22. Fu J. Direct production of aviation fuels from microalgae lipids in water / J. Fu, C. Yang, J. Wu, J. Zhuang, Z. Hou, X. Lu // Fuel. 2015. Vol. 139. Pp. 678–683. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.09.025>

23. Lefebvre A.H., Ballal D.R. Gas turbine combustion alternative fuels and emissions [Электронный ресурс] // Irena. International Renewable Energy Agency. 2017. URL: https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Biofuels_for_Aviation_2017.pdf (дата обращения 15.06.2019).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Тимошенко Андрей Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры авиационного топлива и ремонта ЛА МГТУ ГА, a.timoshenko@mstuca.aero.

Старков Евгений Юрьевич, старший преподаватель кафедры безопасности полётов и жизнедеятельности МГТУ ГА, e.starkov@mstuca.aero.

PROBLEMS OF AVIATION LEADED GASOLINE APPLICATION ON AIRCRAFT

**Konstantin I. Gryadunov¹, Andrey N. Timoshenko¹,
Evgeniy U. Starkov¹**

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

ABSTRACT

A steady trend of expanding the small aircraft fleet equipped with piston engines is observed today. Special fuel (aviation gasoline with specified operational properties) for aircraft piston engines (PE) ensuring their stable operation in all modes and under all operating conditions is used. The indicators of aviation fuels operational properties including gasoline are achieved by means of adding special additives. One of these additives is an anti-knock additive – tetraethyl lead (TEL) that is added into the fuel in a certain amount in an ethyl liquid form. Despite the excellent TEL properties as an anti-knock additive, it also has a number of significant disadvantages. From the point of view of aircraft engine operation, it is noted that the TEL combustion products (decomposition) that are not effectively removed from the combustion chamber, enter the oil system in a significant amount, causing fine oil filters clogging. The article notes that even a small content of TEL decomposition products in aviation oils deteriorates dramatically their pumping capacity and leads to complete fine oil filters clogging for few minutes of engine operation, even on fresh oil. Moreover, the multi-stage oil cleaning stipulated by the design of some PE does not have a significant impact on this negative factor posing a threat to flight safety. These days the lead-containing gasoline use for aviation PE has no alternative, so solutions to reduce the negative consequences while applying are required.

Key words: aviation, aviation gasoline, operational properties, tetraethyl lead, aviation piston engines.

REFERENCES

1. **Sviriz, I.** (2016). *Vzletnyy rezhim* [Take-off mode]. *Sibirskaya neft*, no. 134, pp. 32–37. (in Russian)
2. **Bratkov, A.A. (Ed.)**. (1985). *Teoreticheskiye osnovy khimmotologii* [Theoretical foundations of chemmotology]. Moscow: Khimiya, 320 p. (in Russian)
3. **Popov, I.M., Borodako, P.V., Patsina, M.N., Fedorov, E.P., Varlamova, N.I. and Yanovskii, L.S.** (2015). *Tendentsii razvitiya benzinov dlya aviatekhniki s porshnevnyimi dvigatelyami* [Trends in the development of gasoline for aircraft with piston engines]. *Engine*, no. 5 (101), pp. 20–22. (in Russian)
4. **Kramarenko, V.F.** (2013). *Toksikologicheskaya khimiya* [Toxicological chemistry]. Moscow: Kniga po Trebovaniyu, 445 p. (in Russian)
5. **Piskunov, V.A.** (1983). *Himmotologiya v grazhdanskoy aviatsii: spravochnik* [Chemmotology in civil aviation: directory]. Moscow: Transport, 248 p. (in Russian)
6. **Nemchikov, M.L., Gryadunov, R.I., Melnikova, I.S. and Nelyubova, O.V.** (2019). *Problems of aviation leaded gasoline application on aircraft*. *Novyye materialy i perspektivnyye tekhnologii: 5th mezhdunarodnyy nauchnyy forum s mezhdunarodnym uchastiem* [New materials and promising technologies: Fifth interdisciplinary scientific forum with international participation], vol. 1, pp. 606-607. (in Russian)
7. **Litvinov, A.A.** (1987). *Osnovy primeneniya goryuche-smazochnykh materialov v grazhdanskoy aviatsii. Uchebnik dlya VUZ* [Bases of fuels and lubricants application in civil aviation: Textbook for Universities]. Moscow: Transport, 308 p. (in Russian)
8. **Eyginson, A.S. (Ed.)**. (1959). *Pererabotka sernistykh neftey* [Processing of sulfur crude oil]. Leningrad: gosudarstvennoye nauchno-tekhnicheskoye izdatelstvo neftyanoy i gornotoplivnoy literatury, 279 p. (in Russian)
9. **Uglov, B.A.** (1992). *Aviatsionnyy dvigatel ASH-62IR* [ASH-62IR aviation engine]. Samara: Samarskiy aerokosmicheskiy universitet, 112 p. (in Russian)
10. **Bocharov, V.Ye. and Gutman, L.D.** (1951). *Aviatsionnyy motor ASH-62IR. Opisaniye konstruktsii i ekspluatatsiya* [ASH-62IR aviation engine. Description of construction and operation]. Moscow: Redaktsionno-izdatelskiy otdel Aeroflota, 350 p. (in Russian)
11. **Gryadunov, K.I., Nemchikov, M.L., Kozlov, A.N. and Melnikova, I.S.** (2019). *Aviation engines diagnostics by estimating the metal contamination in oils*. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 22, no. 3, pp. 35–44. DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-3-35-44. (in Russian)
12. **Maslova, T.M. and Gryadunov, K.I.** (2019). *Himmotologiya i kontrol kachestva GSM. Aviatsionnyye masla, smazki, specialnyye zhidkosti* [Chemmotology and quality control of fuels and lubricants. Aviation oils, lubricants, special liquids]. Moscow: MIR, 52 p. (in Russian)
13. **Seregin, E.P.** (2018). *Razvitiye himmotologii* [Development of chemmotology]. Moscow: Pervyy tom, 880 p. (in Russian)
14. **Glagoleva, O.F. and Belokon, T.N.** (2019). *Topliva dlya dvigateley vnutrennego sgoraniya i alternativnaya energetika* [Fuels for internal combustion engines and alternative energy]. *55 let khimmotologii. Osnovnyye itogi i napravleniya razvitiya: tezisy dokladov Mezhdvedomstvennoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Proceedings of the Interdepartmental scientific and technical conference «55 years of chemmotology. Main results and directions of development» reports], p. 49. (in Russian)
15. **Nikolaykin, N.I., Melnikov, B.N. and Bolshunov, Yu.A.** (2010). *Transfer into alternative kinds of fuel as the way of transport power and ecological efficiency increase*. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA*, no. 162, pp. 12–21. (in Russian)
16. **Glover, B.M.** (2008). *Boeing and the environment: our commitment to a better future: presentation of boeing management company*, Seattle (USA): Boeing Management Company, 40 p.

17. Vasilev, A.Yu., Chelebyan, O.G. and Medvedev, R.S. (2013). *Peculiarities of application of biofuel mixture in combustion chambers of modern gas turbine engines*. Vestnik SGAU imeni Akademika S.P. Koroleva, no. 3 (41), pp. 57–62. (in Russian)

18. Schmidt, M., Paul, A., Cole, M. and Ploetner, K.O. (2016). *Challenges for ground operation arising from aircraft concepts using alternative energy*. Journal of Air Transport Management, vol. 56, part B, pp. 107–117. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2016.04.023>

19. Gryadunov, K.I., Kozlov, A.N., Samoilenko, V.M. and Ardeshiri, Sh. (2019). *Comparative analysis of quality indicators of aviation kerosine, biofuels and their mixtures*. Civil Aviation High Technologies, vol. 22, no. 5, pp. 67–75. DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-5-67-75. (in Russian)

20. Bashchenko, N.S., Adzhiev, A.Yu. and Shein, O.G. (2009). *Vozможности polucheniya novogo aviatsionnogo topliva – ASKT* [Opportunities for obtaining new aviation fuel-ASKT]. Exposition Oil & Gas, no. 5, pp. 40–41. (in Russian)

21. Ratner, S.V. (2018). *Innovation in the aircraft industry: An analysis of results of research programs for developing alternative types of aviation fuel*. National Interests: Priorities And Security, vol. 14, no. 3, pp. 492–506. DOI: 10.24891/ni.14.3.492. (in Russian)

22. Fu, J., Yang, C., Wu, J., Zhuang, J., Hou, Z. and Lu, X. (2015). *Direct production of aviation fuels from microalgae lipids in water*. Fuel, vol. 139, pp. 678–683. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.09.025>

23. Lefebvre, A.H. and Ballal, D.R. (2017). *Gas turbine combustion alternative fuels and emissions*. Irena. International Renewable Energy Agency. Available at: https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Biofuels_for_Aviation_2017.pdf (accessed 15.06.2019).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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.

Andrey N. Timoshenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Aviation Fuel Supply and Aircraft Repair Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, a.timoshenko@mstuca.aero.

Evgeniy U. Starkov, Senior Lecturer of the Flight and Life Safety Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, e.starkov@mstuca.aero.

Поступила в редакцию 14.03.2020
Принята в печать 21.05.2020

Received 14.03.2020
Accepted for publication 21.05.2020