Civil Aviation High Technologies

УДК 621.45.04

DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-3-17-28

ОБОСНОВАНИЕ СООТНОШЕНИЯ БИОТОПЛИВА И КЕРОСИНА В СМЕСИ ДЛЯ ЕЁ ПРИМЕНЕНИЯ В КАЧЕСТВЕ АВИАТОПЛИВА

В.М. САМОЙЛЕНКО¹, К.И. ГРЯДУНОВ¹, А.Н. ТИМОШЕНКО¹, Ш. АРДЕШИРИ²

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

² Авиатранспортное бюро в Международной организации гражданской авиации «ИКАО», г. Монреаль, Канада

На сегодняшний день активно развиваются технологии по производству альтернативных видов топлива и по разработке двигателей на иных принципах работы, что обусловлено как ужесточением экологических требований ИКАО (Международная организация гражданской авиации) по вредным выбросам в атмосферу и истощением невозобновляемых ресурсов, так и интересами стран – импортёров нефти. К качеству авиационных топлив предъявляются жёсткие требования, связанные с обеспечением надёжности авиационной техники и безопасности полётов. Ужесточение требований к показателям качества неизбежно приводит к удорожанию топлива, поэтому на сегодняшний день мы можем наблюдать некоторые послабления в отечественных и иностранных нормативных документах к некоторым показателям качества авиационных топлив, например, к показателям низкотемпературных свойств. Отсюда следует, что применение нефтяных топлив рано или поздно станет нецелесообразным. Технологии производства синтетических и биологических топлив из различных видов сырья позволяют получить топливо с близкими показателями качества к традиционному керосину, но полностью его заменить пока не удаётся. Поэтому сегодня рассматривается вопрос применения альтернативных топлив в смеси с нефтяным керосином в различных пропорциях. Остаётся открытым вопрос: в какой пропорции возможно применять смеси альтернативного топлива с керосином на ВС без всевозможных негативных последствий для их эксплуатации. На основании известных зависимостей в работе предложена математическая модель для расчёта некоторых эксплуатационных показателей топлива, двигателя и ВС в зависимости от пропорции смешивания альтернативного топлива и керосина. На основании проведённых расчётов обосновано наиболее рациональное соотношение нефтяного керосина и топлива SPK как с точки зрения необходимых эксплуатационных свойств, так и с точки зрения экономической целесообразности.

Ключевые слова: эксплуатационные свойства, биотопливо, топливная смесь, показатели качества топлива, синтетический керосин.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день во многих странах мира активно проводятся работы по разработке альтернативных видов топлива и силовых установок на иных принципах работы. Это рано или поздно позволит отказаться от применения в качестве основного топлива на ВС нефтяного керосина. На современном этапе развития производства альтернативных авиатоплив предпочтение отдаётся производству синтетических авиакеросинов. При этом ведутся также работы по созданию конкурентноспособных биокеросинов, широкое применение которых в будущем обосновано истощением невозобновляемых ресурсов: нефти и газа [1].

Получены различные синтетические и биологические топлива, имеющие различные показатели качества, всевозможные преимущества и недостатки как относительно друг друга, так и относительно нефтяного топлива, однако применение некоторых видов этих топлив в авиационной промышленности уже осуществляется [2–10]. Ещё в октябре 2009 г. министр ВМС США Рэй Мабиус заявлял, что к 2020 году доля альтернативного топлива, применяемого военно-морскими силами, должна составлять не менее 50 процентов от общего потребляемого

Самолёты Ан-32 ВВС Индии переводят на биотопливо [Электронный ресурс] // Военное обозрение. 2019. URL: https://topwar.ru/158269-samolety-an-32-vvs-indii-perevodjat-na-biotoplivo.html (дата обращения 20.03.2020).

объёма и на такое топливо будут переведены все авиационные и корабельные части^{2,3,4}. Полным ходом осуществляются летные испытания и сертификация BC по допуску к применению на них альтернативных топлив.

Стоит отметить, что безоговорочным лидером в разработке альтернативных видов топлива когда-то была и наша страна. В результате реализации Постановления ЦК КПСС и Совета Министров СССР 1981 г. «Об использовании газа на транспорте» в 1987 г. первый опытный полёт совершил вертолёт Ми-8ТГ на газовом топливе 5 , а в 1988 г. — самолёт Ту-155, в качестве топлив применялись водород и природный газ 6 .

Одним из сертифицированных авиационных альтернативных топлив является синтетический авиакеросин SPK (FT-SPK), который производится из угля, природного газа или биомассы по усовершенствованной технологии Фишера-Тропша в соответствии со стандартом ASTM D 7566-09. Применяется данный авиакеросин в смеси с авиационным нефтяным топливом Jet A-1 [7, 9]. Стандарт ASTM D 7566-09 предусматривает применение данного топлива в смеси с керосином Jet A-1 в максимальной пропорции 50:50.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Представляет практический интерес теоретическая оценка влияния содержания синтетического (биологического) топлива SPK в топливе Jet A-1 на некоторые эксплуатационные характеристики ВС. Известно [5, 7], что биотопливные смеси имеют отличные от нефтяного керосина физико-химические свойства. Применение биосмеси в камере сгорания влияет на рабочий процесс ГТД [11, 12]. Изменение теплоты сгорания приводит к изменению удельного расхода топлива, тяги ГТД и пр. [13].

Сравнительные данные некоторых показателей качества топлив SPK, Jet A-1 и TC-1 представлены в табл. 1 [7].

Таблица 1
Table 1

Сравнительные данные показателей качества образцов нефтяных керосинов и SPK

Comparative data of oil kerosene and SPK samples quality indicators

Характеристики топлива	TC-1	Jet A-1	100 % SPK
1	2	3	4
плотность при 15 °C, кг/м ³	786,0	814,8	759,9
фракционный состав:			
10 % отгона, °С	150,0	173,8	158,6
98 % отгона, °С	250,0	259,8	220,9

² Американские военные перейдут на альтернативное топливо [Электронный ресурс] // Lenta.ru. Наука и техника. 2010. URL: https://lenta.ru/articles/2010/11/23/biofuels/ (дата обращения 20.03.2020).

³ Американцы испытали самолет на чистом биотопливе [Электронный ресурс] // Новости ВПК. Lenta.ru. 2012. URL: https://vpk.name/news/78411_amerikancy_ispytali_samolet_na_chistom_biotoplive.html (дата обращения 20.03.2020).

⁴ Самолет впервые полетел на 100-процентном биотопливе [Электронный ресурс] // N+1. 2016. URL: https://yandex.ru/turbo?text=https%3A%2F%2Fnplus1.ru%2Fnews%2F2016%2F09%2F20%2Fbio (дата обращения 20.03.2020).

⁵ Многоцелевой вертолет Ми-8ТГ [Электронный ресурс] // Авиару.рф – интернет-музей российской авиации. 2012. URL: http://авиару.рф/aviamuseum/aviatsiya/sssr/vertolety/vertolety-kb-milya/mnogotselevoj-vertolet-mi-8/mnogotsele voj-vertolet-mi-8tg/ (дата обращения 15.03.2020).

⁶ Ту-155 [Электронный ресурс] // Ютуб. 2010. URL: https://www.youtube.com/watch?v=yvgOLapNubI (дата обращения 01.07.2019).

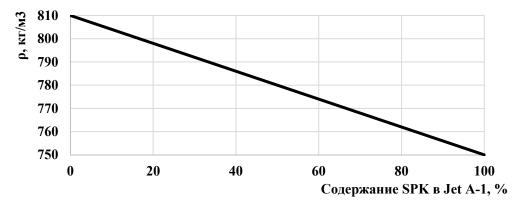
Civil Aviation High Technologies

Продолжение табл. 1 Continuance of Table 1

1	2	3	4
низшая теплота сгорания, МДж/кг	43,2	43,1	43,8
объемная теплота сгорания, МДж/м ³ х 10 ³	33,9	35,1	33,2
объемная доля ароматических углеводородов, %	17,0	18,3	0,5
кинематическая вязкость при минус 20 °C, сСт	4,3	4,7	3,5
массовая доля общей серы, %	0,17	0,19	0,0
высота некоптящего пламени, мм	26,0	22,0	40,0
содержание водорода, %	14,0	13,7	15,3
содержание углерода, %	86,0	86,1	84,6
соотношение водород / углерод	0,16	0,16	0,18

Используя данные в табл. 1, возможно рассчитать некоторые важные эксплуатационные показатели и дать качественную оценку смеси нефтяного керосина с синтетическим (биологическим) [14—19].

На рис. 1 и 2 показаны зависимости плотности (ρ) и массовой теплоты сгорания (H_u) топливной смеси Jet A-1 и SPK от её состава. Для оценки энерговооружённости BC применяют показатель объёмной теплоты сгорания (Hv), которая рассчитывается как произведение массовой теплоты сгорания на плотность топлива (рис. 3). Практически в прямой зависимости от показателей ρ и Hv находится дальность полёта BC (рис. 4).



Puc. 1. Зависимость плотности смеси топлива от её состава **Fig. 1.** Dependence of the fuel mixture density on its composition

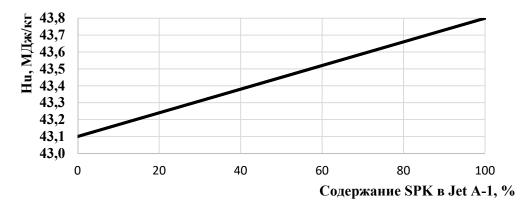


Рис. 2. Зависимость массовой теплоты сгорания смеси топлива от её состава **Fig. 2.** Dependence of the fuel mixture mass heat of combustion on its composition

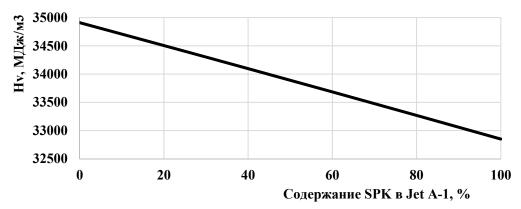


Рис. 3. Зависимость объемной теплоты сгорания смеси топлива от её состава **Fig. 3.** Dependence of the fuel mixture volumetric heat of combustion on its composition

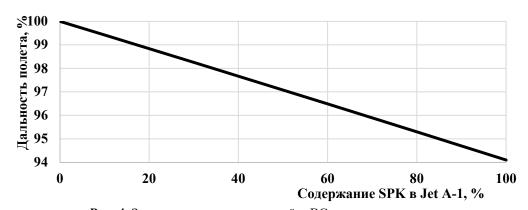


Рис. 4. Зависимость дальности полёта BC от состава топлива **Fig. 4.** Dependence of the aircraft range on the fuel composition

Зная элементный состав топлива и массу окислителя, необходимого для полного окисления (сгорания) этих элементов (табл. 2), и учитывая, что в качестве окислителя в авиационных двигателях применяется кислород воздуха, можно рассчитать секундный расход массы воздуха с окислителем:

$$L_0 = 4.33 \cdot G_0 = 4.33 \cdot (2.66g_C + 7.94g_H + g_S),$$

где G_0 – секундный расход массы окислителя, кг/с;

4,33 — коэффициент, учитывающий массу потребного воздуха, исходя из содержания в нём кислорода, равного 0,232 кг_{кислорода}/кг_{воздуха};

 $g_{\it C},\,g_{\it H},\,g_{\it S}$ – массовые доли основных элементов топлива: углерода, водорода и серы.

Таблица **2** Тable **2**

Масса окислителя, необходимая для полного окисления (сгорания) элементов топлив (стехиометрическое соотношение)

The mass of the oxidant necessary for the complete oxidation (combustion) of fuel elements (stoichiometric ratio)

Реакция	Расход кислорода, кг	Расход воздуха, кг
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	≈ 2,66	≈ 11,52
$H_2 + 0.5 \cdot O_2 \rightarrow H_2O$	≈ 7 ,94	≈ 34,38
$S + O_2 \rightarrow SO_2$	≈ 1,00	≈ 4 ,33

Иначе L_0 также называют стехиометрическим коэффициентом — соотношением окислителя к топливу, при котором химическая реакция окисления (горения) происходит без остатка. Ясно [16–18, 20, 21], что стехиометрический коэффициент зависит от соотношения углеродводород в топливе и после простых преобразований, пренебрегая массовой долей серы (g_S) в топливе, может быть рассчитан по формуле:

$$L_0 = (\frac{8}{3}g_C + 8g_H)/\psi_{O_2},$$

где L_0 — стехиометрический коэффициент, к $\Gamma_{\text{топлива}}/\kappa\Gamma_{\text{воздуха}};$

 $g_{\it C}$ и $g_{\it H}$ – массовая доля углерода и водорода в топливе;

 ψ_{O_2} – массовая доля окислителя (кислорода) в воздухе, равная 0,232.

Реальный состав смеси при работе авиационного ГТД отличается от стехиометрического. Избыток окислителя по отношению к его массе в стехиометрической смеси оценивают коэффициентом избытка воздуха:

$$\alpha = G_0 / (L_0 \cdot G_T),$$

где $G_{\rm T}$ — секундный расход массы топлива, кг/с, принимаем равным 4000 т/ч.

Для современных ГТД значение коэффициента α лежит в диапазоне от 0,85 (богатая смесь, избыток топлива) до значений свыше 1,25 (бедная смесь, избыток воздуха).

В зависимости от стехиометрического коэффициента и соотношения углерод-водород может быть рассчитан расход массы газа через двигатель.

Секундный расход массы газа через двигатель:

$$G_{\Gamma} = G_{\mathrm{T}} + G_{\mathrm{O}},$$

где G_0 – секундный расход массы окислителя, кг/с.

Отсюда получаем формулу для расчёта массы газа:

$$G_{\Gamma} = G_{\mathrm{T}} \cdot (1 + \alpha \cdot L_{\mathrm{o}}) = G_{\mathrm{T}} \cdot \left[1 + \alpha \cdot \frac{1 + 2g_H}{0.087} \right].$$

Зависимость потребной массы газа от состава смеси топлива в абсолютных значениях и в процентах показана на рис. 5, 6.



Puc. 5. Расход газа в зависимости от состава топлива **Fig. 5.** The gas consumption depending on the fuel composition

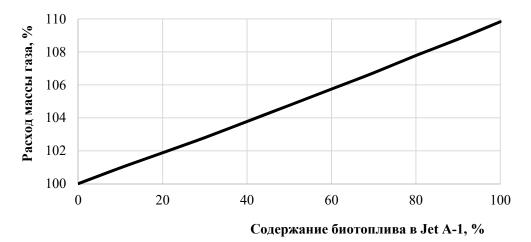


Рис. 6. Расход газа в зависимости от состава топлива **Fig. 6.** The gas consumption depending on the fuel composition

От элементного состава топлива, влияющего на вредные выбросы [22], и стехиометрического коэффициента зависит и температура продуктов сгорания, которая приближённо может быть оценена по формуле:

$$T_{\Gamma} = \frac{H_u}{C_{p_m} \cdot (1 + L_0)},$$

где T_{Γ} – температура продуктов сгорания, К/кг;

 C_{p_m} – средняя изобарная теплоёмкость продуктов сгорания, кДж/(кг-K).

Изменение температуры продуктов сгорания в зависимости от состава топливной смеси в абсолютных значениях и в процентах показано на рис. 7, 8.

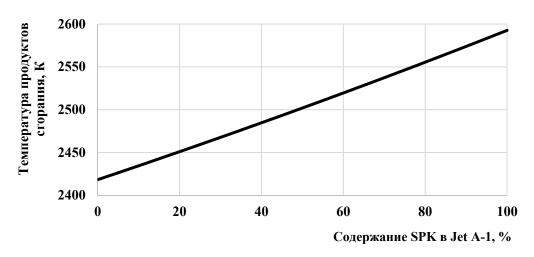
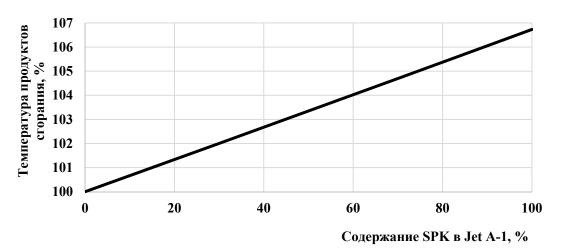


Рис. 7. Температура продуктов сгорания смеси топлива в зависимости от её состава **Fig. 7.** Temperature of the combustion products of the fuel mixture depending on its composition

Civil Aviation High Technologies



Puc. 8. Температура продуктов сгорания смеси топлива в зависимости от её состава **Fig. 8.** Temperature of the combustion products of the fuel mixture depending on its composition

Богатая смесь применяется во время запуска двигателя и может наблюдаться на взлётном режиме, в целом, на всех расчётных режимах работа осуществляется на бедной смеси. Вопервых, изменяется состав продуктов сгорания — обеспечивается полнота окисления топлива, во-вторых, снижается температура продуктов сгорания в соответствии с формулой:

$$T_{\Gamma} = \frac{H_u}{C_{p_m} \cdot (1 + \alpha \cdot L_0)}.$$

Снижение температуры газа за счёт обеднения смеси на сегодняшнем этапе развития техники является необходимым условием сохранения ресурса горячих частей двигателя.

Оценим потребное значение коэффициента α в зависимости от состава смеси топлива для обеспечения оптимальной температуры продуктов сгорания на выходе из камеры сгорания (рис. 9).

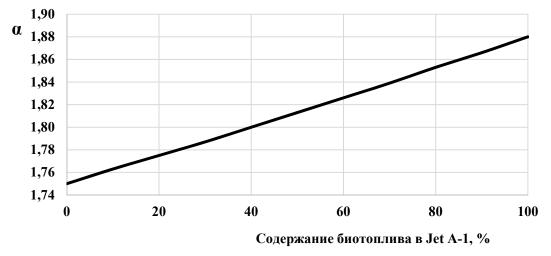


Рис. 9. Потребное значение коэффициента α в зависимости от состава смеси топлива для обеспечения оптимальной температуры продуктов сгорания на выходе из камеры сгорания **Fig. 9.** The required value of the coefficient α depending on fuel mixture composition to ensure the optimum temperature of the combustion products at the outlet of the combustion chamber

На рис. 10 показана оценка влияния состава смеси топлива на его вязкость.

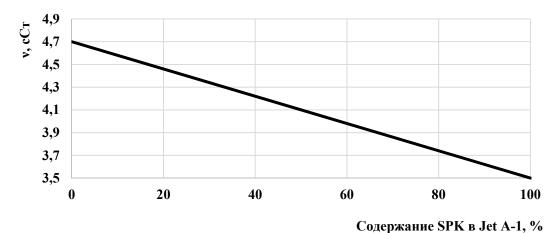


Рис. 10. Зависимость кинематической вязкости топливной смеси в зависимости от её состава

Fig. 10. Dependence of the fuel mixture kinematic viscosity depending on its composition

Наконец, важным показателем является цена заправляемого топлива. Любая вновь осваиваемая марка топлива имеет высокую стоимость. Так, стоимость топлива SPK на сегодняшний день составляет порядка 100 тыс. руб. за тонну, а цена традиционного керосина – вдвое меньше. Несложно оценить стоимость полной заправки BC в зависимости от состава смеси топлива (рис. 11).

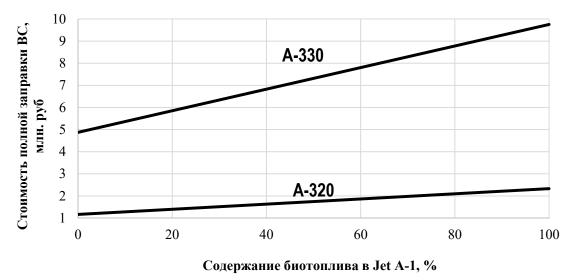


Рис. 11. Зависимость стоимости полной заправки BC от состава смеси топлива **Fig. 11.** Dependence of the full refueling aircraft cost on the fuel mixture composition

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- 1. Снижение плотности авиационного топлива при добавлении синтетического керосина SPK приводит к снижению энерговооружённости BC и, соответственно, сокращает дальность его полёта. Если принять во внимание изменение плотности в зависимости от температуры, сокращение дальности полёта при применении 100 % SPK может достигать более 10 %.
- 2. Увеличение содержания синтетического керосина SPK в авиационном керосине уменьшает соотношение С/H, что приводит к существенному росту потребного расхода газа через двигатель, и, как следствие, к увеличению его размеров и массы.

Civil Aviation High Technologies

- 3. Увеличение содержания синтетического керосина SPK (выше 7 %) в авиационном керосине приводит к росту температуры продуктов сгорания, что требует увеличения коэффициента избытка воздуха.
- 4. Уменьшение кинематической вязкости авиационного топлива с увеличением содержания SPK положительно сказывается на прокачиваемость и тонкость распыла топлива, однако при снижении данного значения до критического (примерно менее 1,3 сСт) при увеличении температуры могут быть потеряны смазывающие свойства топлив, тем более, учитывая, что подавляющее большинство синтетических и биотоплив обладают низкой смазывающей способностью.
- 5. Проведённые расчёты показали, что наиболее целесообразно применять в качестве авиатоплива для ГТД смесь SPK и Jet A-1 в соотношении 1:1, что обусловлено получением наиболее приемлемых эксплуатационных свойств такой смеси и не потребует внесения изменений в конструкцию авиационных двигателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- **1. Федоров Е.П., Французова Н.А.** Разработка синтетического реактивного топлива из биосырья / Под общ. ред. Л.С. Яновского // Труды ЦИАМ: Прямоточные ВРД и химмотология: сб. науч. ст. 2010. № 1340. С. 107–116.
- **2.** 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.
- **3. 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.
- **4. 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.
- **5.** 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.
- **6. 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
- **7. 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
- **8. Бащенко Н.С., Аджиев А.Ю., Шеин О.Г.** Возможности получения нового авиационного топлива АСКТ // Экспозиция нефть и газ. 2009. № 5. С. 40–41.
- **9. Ратнер С.В.** Инновации в авиастроении: 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
- 10. 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
- **11. Гишваров А.С.** Эксплуатационная надежность топливных систем воздушных судов: учеб. пособие. Уфа: УГАТУ, 2008. 298 с.
 - 12. Законы горения / Под общ. ред. Ю.В. Полежаева. М.: Энергомаш, 2006. 352 с.
- **13.** Демская И.А., Разносчиков В.В. Методика определения новых составов альтернативных топлив // Вестник Московского авиационного института. 2012. Т. 19, № 5. С. 72–80.

- 14. Теоретические основы химмотологии / Под ред. А.А. Браткова. М.: Химия, 1985. 320 с.
- **15. Пискунов В.А.** Химмотология в гражданской авиации: справочник / В.А. Пискунов, В.Н. Зрелов, В.Т. Василенко и др. М.: Транспорт, 1983. 248 с.
- **16. Литвинов А.А.** Основы применения горюче-смазочных материалов в гражданской авиации: учебник для вузов. М.: Транспорт, 1987. 308 с.
- **17. Дубовкин Н.Ф.** Справочник по углеводородным топливам и их продуктам сгорания. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. 288 с.
- **18.** Дубовкин Н.Ф. Физико-химические и эксплуатационные свойства реактивных топлив: справочник / Н.Ф. Дубовкин, В.Г. Маланичева, Ю.П. Массур, Е.П. Федоров. М.: Химия, 1985. 240 с.
 - 19. Серёгин Е.П. Развитие химмотологии. М.: Первый том, 2018. 880 с.
- **20. Хворенкова А.Ж.** Теория горения и взрыва: сб. задач. Екатеринбург: Изд-во Ур-ГУПС, 2014. 80 с.
- **21. Кульчицкий А.Р.** Топлива для энергоустановок. Расчет термохимических показателей: учеб. пособие. Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2009. 100 с.
- **22.** Chishty W.A. Benchmarking data from the experience gained in engine performance and emissions testing on alternative fuels for aviation / W.A. Chishty, T. Chan, P. Canteenwalla, C.R. Davison, J. Chalmers // Journal of the Global Power and Propulsion Society. 2017. Pp. 195–210. DOI: https://doi.org/10.22261/S5WGLD

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Самойленко Василий Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой авиатопливообеспечения и ремонта летательных аппаратов МГТУ ГА, v.samoilenko@mstuca.aero.

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

Тимошенко Андрей Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры авиатопливообеспечения и ремонта летательных аппаратов МГТУ ГА, a.timoshenko@mstuca.aero.

Ардешири Шади, младший научный сотрудник, Авиатранспортное бюро в Международной организации гражданской авиации «ИКАО», shadiardeshiri@gmail.com.

SUBSTANTIATION OF THE RATIO OF BIOFUEL AND KEROSIN IN THE MIXTURE FOR ITS APPLICATION AS AVIATION FUEL

Vasily M. Samoylenko¹, Konstantin I. Gryadunov¹,
Andrey N. Timoshenko¹, Shadi Ardeshiri²

¹ Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia ² Air Transport Bureau of the International Civil Aviation Organization (ICAO), Montreal, Canada

ABSTRACT

Today, technologies for the production of alternative fuels and for the development of engines on different operating principles are actively developing, due to both the tightening of the environmental requirements of ICAO (International Civil Aviation Organization) for harmful emissions into the atmosphere and the depletion of non-renewable resources, and the interests of the oil importing countries. Strict requirements are imposed on the quality of aviation fuels related to ensuring the reliability of aviation technology and flight safety. Requirement toughening for quality indicators will inevitably lead to higher fuel prices, so today we can observe some concessions in domestic and foreign regulatory documents to certain quality indicators of aviation fuels, for example, to indicators of low-temperature properties. It follows that the use of petroleum fuels will sooner or later become inappropriate. Technologies to produce synthetic and biological fuels from various types of raw materials make it possible to obtain

Civil Aviation High Technologies

fuel with close quality indicators to traditional kerosene, but it has not yet been completely replaced. Therefore, today we are considering the use of alternative fuels in a mixture with petroleum kerosene in various proportions. The question remains open: in what proportion is it possible to use mixtures of alternative fuel with kerosene on the aircraft without any negative consequences for their operation. Based on the known dependencies, a mathematical model is proposed for calculating some operational indicators of fuel, engine and aircraft depending on the proportion of mixing alternative fuel and kerosene. In accordance with the calculations, the most rational ratio of petroleum kerosene and SPK fuel is substantiated both from the point of view of the necessary operational properties and from the point of view of economic feasibility.

Key words: operational properties, biofuel, fuel mixture, fuel quality indicators, synthetic kerosene.

REFERENCES

- 1. Fedorov, E.P. and Frantsuzova, N.A. (2010). Development of synthetic jet fuel from bioraw materials. Ramjet WFD and Chemmotologi, in L.S. Yanovskii (Ed.). Proceedings of CIAM, no. 1340, pp. 107–116. (in Russian)
- **2.** 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 Mezhvedomstvennoy 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)
- 3. 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)
- **4. 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.
- **5.** 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)
- 6. 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
- 7. 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)
- **8.** Bashchenko, N.S., Adzhiev, A.Yu. and Shein, O.G. (2009). *Vozmozhnosti polucheniya novogo aviatsionnogo topliva ASKT* [Opportunities for obtaining new aviation fuel-ASKT]. Exposition Oil & Gas, no. 5, pp. 40–41. (in Russian)
- **9.** 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)
- 10. 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
- 11. Gishvarov, A.S. (2008). Ekspluatatsionnaya nadezhnost toplivnykh system vozdushnykh sudov: uchebnoye posobiye [Operational reliability of aircraft fuel systems: textbook. Allowance]. Ufa: UGATU, 298 p. (in Russian)
- **12. Polezhaev, Yu.V. (Ed.).** (2006). *Zakony goreniya* [The laws of combustion]. Moscow: Energomash, 352 p. (in Russian)

- 13. Demskaya, I.A. and Raznoschikov, V.V. (2012). *Metodika opredeleniya novykh sostavov alternativnykh topliv* [Methodology for determining new compositions of alternative fuels]. Aerospace MAI Journal, vol. 19, no. 5, pp. 72–80. (in Russian)
- **14. Bratkov**, **A.A. (Ed.).** (1985). *Teoreticheskiye osnovy khimmotologii* [Theoretical foundations of chemmotology]. Moscow: Khimiya, 320 p. (in Russian)
- **15. Piskunov, V.A.** (1983). *Himmotologiya v grazhdanskoy aviatsii: spravochnik* [Chemmotology in civil aviation: directory]. Moscow: Transport, 248 p. (in Russian)
- **16.** 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)
- 17. Dubovkin, N.F. (1962). Spravochnik po uglerodnym toplivam i ikh produktam sgoraniya [Handbook on the thermophysical properties of hydrocarbon fuels and their products of combustion]. Moscow-Leningrad: Gosenergoizdat, 288 p. (in Russian)
- 18. Dubovkin, N.F., Malanicheva, V.G., Massur, Yu.P. and Fedorov, E.P. (1985). Fiziko-khimicheskiye i ekspluatatsionnyye svoystva reaktivnykh topliv: spravochnik [Physical and chemical and operational properties of jet fuels: directory]. Moscow: Khimiya, 240 p. (in Russian)
- **19. Seregin, E.P.** (2018). *Razvitiye himmotologii* [Development of chemmotology]. Moscow: Pervyy tom, 880 p. (in Russian)
- **20.** Khvorenkova, A.Zh. (2014). *Teoriya goreniya i vzryva: sbornik zadach* [Theory of combustion and explosion: collection. Task]. Yekaterinburg: Izdatelstvo UrGUPS, 80 p. (in Russian)
- **21.** Kulchitskiy, A.R. (2009). *Topliva dlya energoustanovok. Raschet termokhimicheskikh pokazateley: uchebnoye posobiye* [Fuel for power plants. Calculation of thermochemical parameters: textbook]. Vladimir: Izdatelstvo Vladimirskogo gosudarstvennogo universiteta, 100 p. (in Russian)
- **22.** Chishty, W.A., Chan, T., Canteenwalla, P., Davison, C.R. and Chalmers, J. (2017). Benchmarking data from the experience gained in engine performance and emissions testing on alternative fuels for aviation. Journal of the Global Power and Propulsion Society, pp. 195–210. DOI: https://doi.org/10.22261/S5WGLD

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vasily M. Samoylenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, the Head of the Aviation Fuel Supply and Aircraft Repair Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, v.samoilenko@mstuca.aero.

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

Ardeshiri Shadi, Junior Research Fellow, Air Transport Bureau of the International Civil Aviation Organization (ICAO), Montreal, Canada, shadiardeshiri@gmail.com.

 Поступила в редакцию
 27.03.2020
 Received
 27.03.2020

 Принята в печать
 21.05.2020
 Accepted for publication
 21.05.2020