

УДК 621.45.04

DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-5-67-75

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА АВИАЦИОННЫХ КЕРОСИНОВ, БИОТОПЛИВ И ИХ СМЕСЕЙ

К.И. ГРЯДУНОВ¹, А.Н. КОЗЛОВ¹, В.М. САМОЙЛЕНКО¹, Ш. АРДЕШИРИ²

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

² *Авиатранспортное бюро в Международной организации гражданской авиации (ИКАО),
г. Ванкувер, Канада*

Современные тенденции развития гражданской авиации указывают на необходимость повышения топливной эффективности и экологичности применяемых топлив. Применение традиционного авиакеросина все в меньшей степени удовлетворяет перспективным требованиям по экологичности при постоянно растущей на него цене. Кроме того, запасы нефти не безграничны. По мнению многих специалистов, решением нарастающих проблем с нефтяными топливами может быть использование альтернативных видов авиационного топлива. Ряд компаний в разных странах мира совместно с производителями авиационной техники при весомой государственной поддержке активно разрабатывают новые виды топлива. Наиболее распространены на данный момент биотоплива, состоящие из биоэтанола, полученные из различных растительных и животных источников. Альтернативные виды топлив по своим эксплуатационным свойствам не должны уступать нефтяным топливам. Возможный переход на них не должен требовать значительных затрат на модернизацию воздушных судов и средств наземного авиатопливообеспечения. Поэтому актуальной задачей является проведение сравнения основных показателей качества нефтяных топлив, биотоплив и их смесей для оценки возможности применения биотоплив на воздушных судах. Сравнительный анализ проводился по некоторым показателям качества, после чего были даны комментарии по влиянию изменений этих показателей качества на эксплуатационные свойства топлив. Показано, что по некоторым показателям качества исследуемые биотоплива имеют преимущества перед нефтяными. Очевидна актуальность проведения полных и всесторонних исследований эксплуатационных свойств биотоплив. Совершенствование нефтяных топлив и их всестороннее изучение продолжается уже более 60 лет, биотоплива только начинают свой жизненный путь, поэтому целесообразно проведение всесторонних исследований по их применению в авиации.

Ключевые слова: авиация, реактивное топливо, биотопливо, авиационный керосин, эксплуатационные свойства, производство биотоплив, показатели качества авиационных топлив.

ВВЕДЕНИЕ

Надежность и эффективность работы применяемых на ВС газотурбинных двигателей в значительной мере зависит от качества авиатоплив. С химмотологической точки зрения рабочие жидкости, в т. ч. топлива, рассматриваются как полноценные элементы конструкции соответствующих систем. К применяемым в гражданской авиации (ГА) авиатопливам предъявляются жесткие требования, связанные с надежностью, экономичностью и экологичностью работы авиационной техники [1–4]. Совершенствование топливной эффективности воздушных судов (ВС) осуществляется следующими способами: конструктивными – совершенствование планеров ВС с целью снижения потерь от сопротивления; авиационных двигателей с целью обеспечения полноты сгорания топлива и снижения его расхода при одновременном увеличении тяги и прочем; технологическими – разработка новых облегченных авиационных материалов для снижения массы ВС, совершенствование применяемых и разработка альтернативных видов топлив, разработка авиационных двигателей на принципиально иных физических основах и пр.

Сегодня во всем мире достаточно остро стоит вопрос отыскания альтернативных видов топлив взамен нефтяным¹ [5, 6]. Все больше стран занимается разработкой биотоплив на госу-

¹ ICAO Secretariat. Alternative Fuels. Potential Effects of Alternative Fuels on Local and Global Aviation Emissions // ICAO Environmental Report. Montreal (Canada). 2007.

дарственном и межгосударственном уровнях² [5–7]. Переход на альтернативные виды топлив актуален и в нашей стране: так, еще в конце прошлого века совершили свои полеты самолет Ту-155 и вертолет Ми-8ТГ на газовых топливах, в связи с чем лидирующие позиции в разработке газотопливных ВС до сих пор сохраняет Россия. Знаменитый авиаконструктор А.А. Туполев подчеркивал необходимость использования подобных топлив, а к XIII пятилетке в нашей стране планировался перевод на данные топлива сначала грузовых, а затем и пассажирских ВС³. Широкое применение альтернативных топлив может сделать перевозки существенно дешевле и экологичнее. Вопрос экологичности крайне серьезно ставится мировым сообществом несмотря на то, что доля авиации в загрязнении окружающей среды углекислым газом оценивается всего в 2–3 % [6, 7]. В нашей стране транспортная стратегия до 2030 г. также предусматривает перевод различных транспортных средств на экологически чистые виды топлива и стимулирование применения альтернативных не нефтяных источников энергии⁴.

В последние годы наиболее актуальной и перспективной является разработка топлив, получаемых на основе возобновляемых природных ресурсов – биотоплив. Как известно [4], выделяют биотоплива трех поколений. У каждого из них есть свои преимущества и недостатки.

На современном этапе развития биотоплив все большее внимание уделяется биотопливам, которые по большей части состоят из биоэтанола (рис. 1) [8]. Применение таких топлив обусловлено прежде всего их высокой экологичностью.



Рис. 1. Доля биоэтанола в мировом объеме производства биотоплива
Fig. 1. Share of bioethanol in global biofuel production

Их источник – биомасса – в процессе своего роста поглощает CO_2 из атмосферы, а в процессе производства и сжигания биотоплива в атмосферу возвращается CO_2 , связанный при росте растений (рис. 2) [6, 8]. Таким образом, не нарушается суммарный экологический баланс, в отличие от производства и сжигания нефтяных (и других альтернативных) топлив. По предварительным прогнозам, применение в авиации биокеросина позволит уменьшить выбросы CO_2 более чем на 60 % [8].

Бразильская авиакомпания TAM совместно с Airbus выполнила первый тестовый полет на самолете A320 с двигателями CFM56 на смеси топлива, состоящей из биотоплива (на основе яatroфы) и авиационного керосина в пропорции 50 : 50, проведение которого было одобрено Европейским агентством по безопасности авиоперевозок (EASA) и авиационными властями Бразилии (ANAC). Полет завершился успешно и является важным шагом к возможному приме-

² Альтернативные виды авиационного топлива // Материалы совещания по международной авиации и изменению климата. Документ ИКАО HLM-ENV/09-WP/9. Монреаль. 10/08/09.

³ Ту-155 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=yvgOLapNubI>.

⁴ Транспортная стратегия РФ на период до 2030 года: Утв. распоря. Правительства РФ от 22.11.08. № 1734.

нению биотоплива в гражданской авиации, что позволит снизить вредные выбросы в атмосферу, а его источник производства является возобновляемым.

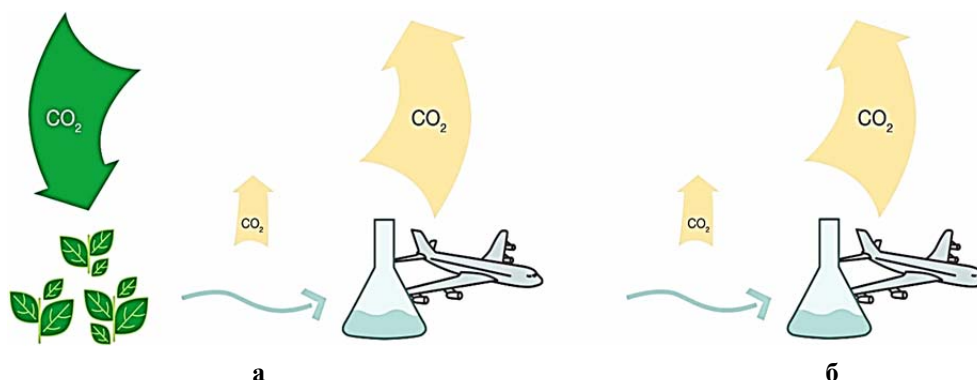


Рис. 2. Схема круговорота CO₂ в случае производства авиатоплива из биомассы (а) и трансформации CO₂ при получении его из нефти (б) [8]

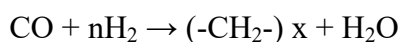
Fig. 2. Scheme of CO₂ cycle in case of production of aviation fuel from biomass (a) and transformation of CO₂ when it is obtained from oil (b) [8]

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В настоящее время за рубежом также производится в промышленном масштабе и допущены к применению на авиатехнике синтетические авиакеросины, производимые из угля и природного газа. Производство синтетического авиакеросина осуществляется по спецификации ASTM D 7566-09.

Синтетический авиакеросин по этому стандарту представляет собой смесь синтетического парафинового керосина (СПК), произведенного из угля или природного газа по усовершенствованной технологии Фишера – Тропша (FT), со стандартным реактивным топливом для гражданской авиации, например Jet A-1 или ТС-1. В СПК в обязательном порядке вводится антиокислительная присадка.

Биотопливо FT СПК производится из угля синтезом Фишера – Тропша. Основным производителем является южноафриканская компания Sasol. Реакция синтеза FT может быть представлена следующим образом:



Реактивное топливо, полученное таким образом, характеризуется низким содержанием ароматических водородов и серы.

Первым сертифицированным для применения на ВС реактивным биотопливом стало биотопливо, получаемое из водорослей [9].

Технологией получения биотоплива является гидрирование сложных эфиров и жирных кислот (HEFA). Источником получения являются различные растительные виды биомассы (рыжики, ятрофа и морские водоросли).

Другой массовой технологией производства биотоплив (HVO) является гидроочистка масел, при которой масла (триглицериды) реагируют с водородом под высоким давлением для удаления кислорода. Полученные углеводородные цепочки химически эквивалентны нефтяному дизельному топливу. Кроме того, при таком производстве получают пропан как побочный продукт.

Термины HEFA (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids) и HVO (Hydrotreated Vegetable Oil) используются для обозначения биологически активных биотоплив на основе биогенного углеводородного сырья – широкого спектра растительных масел и жиров. HEFA (HVO) не содержит ароматических соединений и серы. Однако основной проблемой производства этих топлив является поиск подходящего сырья.

HVO может быть получено из многих видов масел и жиров. К ним относятся триглицериды и жирные кислоты из растительных масел (например, рапсового, соевого или кукурузного), талового масла (сопутствующий продукт целлюлозно-бумажной промышленности), а также животных жиров. Производимое HVO в основном состоит из 35 % отходов скотобоен, 23 % растительных или животных отходов, 22 % сырого талового масла, 15 % пальмового масла и 5 % животного жира.

Также осуществляется производство гидродезоксигенированного синтезированного ароматического керосина (HDO-SAK), который состоит примерно из 95 % моноароматических соединений. Это топливо применяется как компонент при смешивании других синтетических топлив, не содержащих ароматических соединений, для увеличения их содержания и может использоваться для создания полусинтетического или полностью синтетического реактивного топлива.

Для применения в авиации биотоплива оно должно обладать такими же эксплуатационными свойствами, как и нефтяной керосин, чтобы не требовалось дополнительных затрат на модернизацию ВС и авиационных двигателей, их топливных систем и наземных средств авиатопливообеспечения. Однако на данный момент синтетические керосины обладают отличными от нефтяного керосина физико-химическими свойствами [10]. Решение указанной проблемы пока осуществляется за счет смешивания биокеросина с керосином, полученным из нефти, в различных пропорциях. На данных смесях проводят исследования без изменения конструкции и перенастройки топливорегулирующей аппаратуры авиационных ГТД.

Считается, что по мере роста производства синтетического керосина возможен постепенный переход на биотопливо, который может не потребовать изменения существующей системы топливообеспечения и какой бы то ни было модернизации ВС и авиадвигателей.

С целью возможного применения в гражданской авиации смеси биотоплива с традиционными марками керосина актуально провести сравнительное исследование показателей качества и эксплуатационных свойств известных марок керосинов: ТС-1, Jet A-1, биотоплива FT SPK и смесевых топлив (биотопливо HEFA SPK и HDO SAK + нефтяное топливо в различных пропорциях) (таблица 1).

Как известно [1–4, 11], определяют 12 эксплуатационных свойств авиационных топлив, которые характеризуются 23–25 показателями качества для отечественных топлив⁵ для ГА и 18 для иностранного Jet A-1^{6,7}. Отечественные и иностранные показатели качества различаются как методами определения, так и условиями проведения эксперимента, поэтому их унификация для проведения объективного сравнения порой затруднительна. Изменение данных свойств в процессе эксплуатации оказывает значительное влияние на надежность ВС и безопасность полетов. Проведем сравнительный анализ основных показателей.

Плотность топлива характеризует энерговооруженность ВС. Температура топлива оказывает заметное влияние на его плотность. Снижение плотности заправляемого топлива на 40 единиц приводит к уменьшению дальности полета на 5 %. Как видно (табл. 1), исследованные биотоплива и их смеси показывают удовлетворительные значения плотности.

⁵ ГОСТ 10227-2013. Топлива для реактивных двигателей. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2014.

⁶ ГОСТ 32595-2013. Топливо авиационное для газотурбинных двигателей Джет А-1 (JET A-1). Технические условия. М.: Стандартинформ, 2014.

⁷ ASTM D1655. Standard Specification for Aviation Turbine Fuels. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011, 11b.

Фракционный состав определяет ряд эксплуатационных характеристик топлив и авиационных двигателей. Температура отгона 10 % топлива характеризует пусковые качества топлива и его потери от испарения при хранении и применении на ВС. Более высокое значение данной температуры создаст трудности при запуске авиационных двигателей в условиях отрицательных температур, слишком низкое значение приведет к избыточным потерям топлива от естественного испарения, а также увеличит склонность топлива к кавитации. Следует отметить, что все полученные значения для исследуемых биотоплив и их смесей находятся в приемлемом диапазоне.

Таблица 1
Table 1

Сравнительные данные показателей качества нефтяных керосинов и биотоплив
Comparative data of oil kerosene and biofuel quality indicators

Характеристики топлива	TC-1	Jet A-1	100 % FT SPK	50 % FT SPK в Jet A-1	50 % HEFA SPK в Jet A-1	17 % HDO SAK в HEFA SPK
плотность при 15 °С, кг/м ³	786,0	814,8	759,9	786,6	784,9	775,3
фракционный состав:						
10 % отгона, °С	150,0	173,8	158,6	160,7	155,8	148,4
98 % отгона, °С	250,0	259,8	220,9	250,0	268,5	276,2
низшая теплота сгорания, МДж/кг	43,2	43,1	43,8	43,6	43,0	43,6
объемная теплота сгорания, МДж/м ³ · 10 ³	33,9	35,1	33,2	34,3	33,8	33,8
объемная доля ароматических углеводородов, %	17,0	18,3	0,5	17,5	10,4	15,0
кинематическая вязкость при минус 20 °С, сСт	4,3	4,7	3,5	3,9	4,5	3,8
массовая доля общей серы, %	0,17	0,19	0,0	0,14	0,144	< 0,0003
высота некопящего пламени, мм	26,0	22,0	40,0	28,0	32,0	28,6
содержание водорода, %	14,0	13,7	15,3	15,0	14,5	14,43
содержание углерода, %	86,0	86,1	84,6	85,0	85,3	85,54
соотношение водород/углерод	0,16	0,16	0,18	0,18	0,17	0,17

Температура отгона 98 % топлива характеризует полноту сгорания топлив, их нагарообразующие свойства и экологичность, а также состав тяжелых углеводородных фракций. Чем ниже данная температура, тем выше полнота сгорания и экологичность и ниже нагарообразование в воздушном тракте авиационных двигателей. Хорошие результаты демонстрирует 100 % FT SPK, а добавление 50 % FT SPK в Jet A-1 ожидаемо улучшает данный показатель последнего (табл. 1).

Низшая теплота сгорания характеризует важнейшее свойство топлив – теплотворную способность. Чем выше данный показатель, тем выше топливная эффективность. Определенные теплоты сгорания нефтяных керосинов и исследуемых биотоплив и их смесей показали, что значения находятся примерно в едином диапазоне. В эксплуатации зачастую более показательна не массовая (низшая и высшая) теплота сгорания, а объемная, которая является производением массовой теплоты сгорания на плотность топлива. Поэтому в табл. 1 также показаны и эти значения. Видно, что и их разброс незначителен ввиду небольших отличий множителей.

Ароматические углеводороды представляют собой ненасыщенные циклические органические соединения. Данные углеводороды склонны к реакциям замещения. Ввиду высокой прочности данных соединений, скорость и полнота их горения наименьшая среди прочих классов углеводородов, присутствующих в топливах. Поэтому высокое содержание ароматических углеводородов приводит к повышению нагарообразования и расхода топлива и снижению экологичности двигателей. Содержание ароматических углеводородов в авиационных топливах ограничивается.

Сравнительные данные табл. 1 показывают значительно более низкое значение содержания ароматических углеводородов в чистом биотопливе и сниженные значения смесевых топлив по сравнению с чистым Jet A-1, что приведет к повышению экологичности.

Кинематическая вязкость является важнейшим показателем качества топлив, влияющим на прокачиваемость топлив по топливным магистралям, качество его распыла топливными форсунками, смазывающую способность. Ограничивается минимальная вязкость топлива при высоких температурах и максимальная при низких. Из табл. 1 видно, что все топлива и их смеси имеют удовлетворительные значения вязкости при минус 20 °С, а чистое биотопливо имеет меньшую вязкость, что характеризует его положительно. Однако вязкостно-температурные характеристики биотоплив и их смесей с нефтяными керосинами в широком диапазоне температур пока не оценивались.

Высота некоптящего пламени (максимальная высота некоптящего пламени (МВНП)) – высота пламени (в миллиметрах), достигаемая до появления дыма, при сжигании топлива в стандартной лампе при определенных условиях. Данный показатель характеризует нагарообразующие свойства топлив (наличие тяжелых углеводородных фракций в топливах). Тяжелыми углеводородами являются ароматические углеводороды, поэтому в табл. 1 очевидна взаимосвязь между их объемным содержанием и величиной МВНП. Чем выше значение МВНП, тем полнее сгорает топливо и тем ниже нагарообразование и выше экологичность. Видно, что данный показатель у чистого биотоплива значительно лучше.

Содержание серы в топливе характеризует по большей части его коррозионную активность. Наличие серы и любых сернистых соединений в топливах нежелательно, поэтому при облагораживании авиационных топлив производится их очистка от указанного химического элемента и его соединений. Из табл. 1 видно, что чистое биотопливо не имеет в своем составе серы.

Соотношение водород к углероду Н/С характеризует прежде всего теплотворную способность топлива, т. к. теплота сгорания массовой единицы водорода выше, чем углерода. Поэтому очевидна взаимосвязь между данным соотношением и массовой теплотой сгорания в табл. 1. Все значения у биотоплив несколько лучше. Также значение Н/С характеризует и нагарообразующие свойства топлив: чем выше данное соотношение, тем ниже нагарообразование. Однако обратной стороной медали является снижение плотности продукта при увеличении значения Н/С, что мы также можем наблюдать в табл. 1, – плотность чистого биотоплива ниже плотностей всех остальных топлив и их смесей.

Таким образом, при сравнении лишь некоторых основных свойств нефтяных топлив, биотоплив и их смесей показано, что сравниваемые показатели находятся в приемлемых для эксплуатации диапазонах, однако требуется дальнейшее глубокое и полное изучение показателей всех эксплуатационных свойств биотоплив, изменений этих свойств в различных условиях эксплуатации, взаимного влияния биотоплив и нефтяных топлив при их смешении, их взаимозаменяемости и пр. Совершенствование нефтяных топлив, их всестороннее изучение продолжается уже более 60 лет, и до сих пор имеются нерешенные задачи. Можно говорить о том, что биотоплива только начинают свой жизненный путь, следовательно, для их широкого применения в авиации целесообразно проведение дополнительных исследований в реальных условиях эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен сравнительный анализ некоторых показателей качества биотоплив, нефтяных топлив и их смесей. Показано, что в скором времени возможно получение биотоплив с высокими эксплуатационными характеристиками, позволяющими не просто заменить нефтяные топлива, но и повысить топливную эффективность и экологичность авиационного транспорта.
2. Эксперименты показали, что исследуемые биотоплива и смеси имеют свои преимущества и недостатки, но в целом по анализируемым показателям отвечают требованиям, предъявляемым к применяемым авиационным топливам.
3. Отмечена актуальность всестороннего и полного исследования эксплуатационных свойств биотоплив и их смесей с нефтяными топливами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Литвинов А.А.** Основы применения горюче-смазочных материалов в гражданской авиации: учебник для вузов. М.: Транспорт, 1987. 308 с.
2. **Братков А.А., Серегин Е.П.** Химмотология ракетных и реактивных топлив. М.: Химия, 1987. 304 с.
3. **Гишваров А.С.** Эксплуатационная надежность топливных систем воздушных судов: учебное пособие. Уфа: УГАТУ, 2008. 298 с.
4. **Коняев Е.А., Грядунов К.И.** Эксплуатационные свойства авиационных горюче-смазочных материалов: учебное пособие. М.: МГТУ ГА, 2016. 80 с.
5. **Нургалеев А.** Биотопливо нуждается в государственной поддержке [Электронный ресурс] // Отраслевое агентство «АвиаПорт». URL: <https://www.aviaport.ru/news/2012/02/01/228946.html> (дата обращения: 15.03.2019).
6. **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.
7. **Федченко И.А., Соловцова А.С., Лукьянов А.И.** Аналитический отчет. Основные тенденции развития рынка биотоплива в мире и России за 2000–2012 годы [Электронный ресурс] // Портал-энерго. Эффективное энергосбережение 2013. URL: http://portal-energo.ru/files/articles/portal-energo_ru_2.pdf (дата обращения: 25.03.2019).
8. **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.
9. **Lefebvre A.H., Ballal D.R.** Gas Turbine Combustion Alternative Fuels and Emissions [Электронный ресурс] // International Renewable Energy Agency URL: https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Biofuels_for_Aviation_2017.pdf (дата обращения: 15.06.2019).
10. **Васильев А.Ю., Челебян О.Г., Медведев Р.С.** Особенности применения биотопливной смеси в камерах сгорания современных газотурбинных двигателей // Вестник СГАУ. 2013. № 3 (41). С. 57–62.
11. **Грядунов К.И., Маслова Т.М.** Химмотология и контроль качества ГСМ. Авиационные топлива: учеб.-метод. пособие. М.: ООО «МИР», 2019. 56 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Козлов Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры авиатопливообеспечения и ремонта летательных аппаратов МГТУ ГА, an.kozlov@mstuca.aero.

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

Ардешири Шади, младший научный сотрудник Авиатранспортного бюро в Международной организации гражданской авиации (ИКАО), shadiardeshiri@gmail.com.

COMPARATIVE ANALYSIS OF QUALITY INDICATORS OF AVIATION KEROSINE, BIOFUELS AND THEIR MIXTURES

**Konstantin I. Gryadunov¹, Alexander N. Kozlov¹,
Vasiliy M. Samoilenko¹, Shadi Ardehshiri²,**

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

²*Air Transport Bureau at the International Civil Aviation
Organization, Vancouver, Canada*

ABSTRACT

Modern trends of civil aviation development indicate the need to improve fuel efficiency and environmental friendliness of the utilized fuels. The use of conventional jet fuel is meeting to a lesser degree the promising requirements concerning environmental friendliness at a constantly rising price for it. Apart from that, oil reserves are limited. According to many experts, the solution to the growing problems with oil fuels can be application of alternative types of aviation fuel. A number of companies around the world, together with aircraft manufacturers under the significant state support, are actively developing new types of fuel. At the moment the most widespread biofuels consisting of bioethanol are obtained from various plant and animal sources. Alternative fuels should not be inferior to petroleum fuels in its operational properties. A possible transition to them should not require significant costs for the modernization of aircraft and facilities of ground aviation fuel supply. Therefore, an urgent task is to compare the main indicators of the quality of oil fuels, biofuels and their mixtures to assess the possibility of using biofuels on aircraft. A comparative analysis was carried out on some quality indicators. Afterwards the comments were given on the impact of changes of these quality indicators on the performance properties of the fuels. It is shown that according to some quality indicators, biofuels under research have the advantages over oil ones. The relevance of comprehensive study of the performance properties of biofuels is obvious. The improvement of oil fuels and their comprehensive study have been under way for more than 60 years. Biofuels are just beginning their life, so it is reasonable to conduct thorough research on their use in aviation.

Key words: aviation, jet fuel, biofuel, aviation kerosene, operational properties, production of biofuels, aviation fuels quality indicators.

REFERENCES

1. **Litvinov, A.A.** (1987). *Osnovy primeneniya goryuche-smazochnykh materialov v grazhdanskoy aviatsii* [Bases of fuel and lubricants application in civil aviation]. Moscow: Transport, 308 p. (in Russian)
2. **Bratkov, A.A. and Seregin, E.P.** (1987). *Khimotologiya raketnykh i reaktivnykh topliv* [Chemotology of rocket and jet fuel]. Moscow: Khimiya, 304 p. (in Russian)
3. **Gishvarov, A.S.** (2008). *Ekspluatatsionnaya nadezhnost toplivnykh sistem vozдушnykh sudov: Uchebnoe posobie* [Operational reliability of aircraft fuel systems: Training manual]. Ufa: UGATU. 298 p. (in Russian)
4. **Konyaev, E.A. and Gryadunov, K.I.** (2016). *Ekspluatatsionnyye svoystva aviatsionnykh goryuche-smazochnykh materialov: Uchebnoe posobie* [Operational properties of aviation fuel and lubricant: Training manual]. Moscow: MGTU GA, 80 p. (in Russian)

5. **Nurgaleev, A.** (2012). *Bioplyivo nuzhdaetsya v gosudarstvennoy podderzhke* [Biofuel needs state support]. Available at: <https://www.aviaport.ru/news/2012/02/01/228946.html> (accessed: 15.03.2019). (in Russian)
6. **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*. The Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, no. 162, pp. 12–21. (in Russian)
7. **Fedchenko, I.A., Solovtsova, A.S. and Lukyanov, A.N.** (2013). *Analiticheskiy otchet. Osnovnyye tendentsii razvitiya rynka bioplyiva v mire i Rossii za 2000–2012 gody* [Analytical report. The main trends in the development of the biofuel market in the world and in Russia in 2000–2012]. Available at: http://portal-energo.ru/files/articles/portal-energo_ru_2.pdf (accessed: 25.03.2019). (in Russian)
8. **Glover, B.M.** (2008). *Boeing and the Environment: Our Commitment to a Better Future*. Presentation of Boeing Management Company. Seattle (USA): Boeing Management Company, 17.06.2008.
9. **Lefebvre A.H., Ballal D.R.** (2017). *Gas Turbine Combustion Alternative Fuels and Emissions*. International Renewable Energy Agency. Available at: https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Biofuels_for_Aviation_2017.pdf (accessed: 15.06.2019).
10. **Vasilyev, 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 of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering, no. 3 (41), part 2, pp. 57–62.
11. **Gryadunov, K.I. and Maslova, T.M.** (2019). *Himnotologiya i kontrol kachestva GSM. Aviatsionnyye topliva* [Chemotology and quality control of fuel and lubricants. Aviation fuel]. Teaching aid. Moscow: OOO «MIR», 56 p. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Alexander N. Kozlov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Chair of Aviation Fuel Supply and Aircraft Repair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, an.kozlov@mstuca.aero.

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

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

Поступила в редакцию
Принята в печать

08.07.2019
24.09.2019

Received
Accepted for publication

08.07.2019
24.09.2019