

## ИННОВАЦИИ В АВИАСТРОЕНИИ: АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ПРОГРАММ ПО РАЗРАБОТКЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ВИДОВ АВИАЦИОННОГО ТОПЛИВА

Светлана Валерьевна РАТНЕР

доктор экономических наук, ведущий научный сотрудник,  
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Российская Федерация  
lanaratner@ipu.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-3485-5595>  
SPIN-код: 7840-4282

### История статьи:

Получена 27.12.2017  
Получена в доработанном  
виде 18.01.2018  
Одобрена 05.02.2018  
Доступна онлайн 15.03.2018

УДК 338.2

JEL: O18, O33, Q42

### Ключевые слова:

альтернативное  
авиационное топливо,  
биотопливо, сжиженное  
водородное топливо,  
выбросы загрязняющих  
веществ

### Аннотация

**Предмет.** Ужесточение экологического законодательства в сфере авиационных перевозок, а также поиски путей снижения энергозависимости от стран – экспортеров нефти и нефтепродуктов активизировали в последние 10 лет исследования и разработки в области использования альтернативных видов авиатоплива, которые проводятся как в рамках корпоративных исследовательских программ крупнейших авиастроительных концернов, так и с привлечением более широкого экспертного сообщества.

**Цели.** Анализ перспективных трендов инновационного развития авиастроительной отрасли и обобщение результатов международных отраслевых и корпоративных исследовательских программ по повышению энергоэффективности и разработке альтернативных видов авиационного топлива, представленных в открытых источниках.

**Методология.** В работе использованы методы библиографического, сравнительного и статистического анализа, а также метод множественного кейс-стади. Информационной базой исследования послужили отчеты Международной организации гражданской авиации, Международной ассоциации воздушного транспорта, Международного Совета по чистому транспорту, международной ассоциации Air Transport Action Group, итоговые обзорные отчеты 7-й Рамочной Программы ЕС, а также труды зарубежных ученых.

**Результаты.** Наиболее проработанными вариантами замены традиционного авиатоплива в настоящее время являются образцы, произведенные по технологии Фишера – Тропша, и биотопливо, полученное путем гидропроцессинга из масличных культур. Проекты европейских и американских научных коллективов по использованию в качестве альтернативного авиационного топлива сжиженного водорода пока находятся на стадии лабораторных исследований. Исследования по переводу самолетов на использование электричества в качестве частичной или полной замены традиционному топливу находятся на стадии концептуального моделирования.

**Область применения результатов.** Полученные результаты могут использоваться для разработки и коррекции государственных программ стимулирования исследований и разработок в области авиастроения.

© Издательский дом ФИНАНСЫ и КРЕДИТ, 2017

**Для цитирования:** 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.  
<https://doi.org/10.24891/ni.14.3.492>

Гражданская авиация в настоящее время является быстрорастущей отраслью мировой экономики, характеризующейся потреблением больших объемов углеводородного топлива. Если в начале 1970-х гг. мировой рынок авиaperевозок составлял примерно 500 млрд пассажиро-километров, то к середине 2000-х гг. эти показатели составили уже

5 157 млрд, а к 2015 г. – 6 664,5 млрд пасс.-км<sup>1</sup>. Потребность в топливе при таком объеме перевозок составляет 230 млн т ежегодно, что соответствует выбросам 731 млн т парниковых газов (в CO<sub>2</sub>-эквиваленте). И хотя на сегодняшний день гражданская авиация вносит вклад в образование парниковых газов лишь 2%, прогнозируемый рост мирового рынка авиаперевозок со средними ежегодными темпами в 4–4,4% до 2035 г. вызывает обеспокоенность мирового экспертного сообщества проблемами негативного воздействия гражданской авиации на окружающую среду<sup>2</sup>.

Кроме того, согласно прогнозам Международной организации гражданской авиации (ИКАО, ICAO – *International Civil Aviation Organization*), в рассматриваемый период также ожидается увеличение объема грузовых перевозок от примерно 220 млрд т-км в 2013 г. до 510 млрд т-км в 2033 г., то есть более чем в 2,3 раза. Такой существенный рост пассажирских и грузовых перевозок может привести к увеличению объема выбросов парниковых газов к 2050 г. в шесть раз по сравнению с 2010 г.

Международная ассоциация воздушного транспорта (IATA) в 2007 г. провозгласила глобальную инициативу по уменьшению вредных выбросов от авиатранспорта в атмосферу, которая предусматривает сокращение потребления топлива и, как следствие, сокращение выбросов CO<sub>2</sub> в гражданской авиации в период до 2020 г. на 1,5% ежегодно, а к 2050 г. – достижение сокращения выбросов углекислого газа на 50% по сравнению с уровнем 2005 г. В 2013 г. IATA по согласию с ICAO подтвердили приверженность достаточно амбициозным целям по сокращению выбросов парниковых газов в документе *Aviation Carbon Neutral Growth Strategy (CNG2020)*. Обсуждение

<sup>1</sup> ICAO. URL: <http://icao.int>

<sup>2</sup> Boeing. *World Air Cargo Forecast 2014–2015*. Boeing Commercial Airplanes Marketing. Seattle, WA, USA. 2014; Boeing. *Current Market Outlook 2016–2035*. Boeing Commercial Airplanes Market Analysis. Seattle, WA, USA. 2016; Airbus. *Flying by Numbers*. Global Market Forecast. Airbus Industrie. Toulouse, France. 2015.

возможного законодательного закрепления данных инициатив рассматривалось на полях Парижского климатического саммита 2015 г., однако решение о введении международного стандарта на выбросы пока было отложено из-за опасений о снижении пассажирского и грузового авиа-трафика.

Тем не менее возможное ужесточение экологического законодательства, а также поиски путей снижения энергозависимости от стран – экспортеров нефти и нефтепродуктов являются основными драйверами развития исследований и разработок в области использования альтернативных видов авиатоплива, которые со второй половины 2000-х гг. активно проводятся как крупнейшими авиастроительными корпорациями мира – в первую очередь Boeing и Airbus, так и более широкими исследовательскими сообществами (рис. 1). Среди них стоит отметить исследовательскую программу девяти крупных университетов Великобритании OMEGA (*Opportunities for Meeting the Environmental Challenge of Growth in Aviation*, создана в 2007 г.), поддерживаемую правительством этой страны, направление ALFA-BIRD (*Alternative Fuels and Biofuels for Aircraft Development*) седьмой рамочной программы ЕС (EU FMP 7, начало в 2008 г.), а также ассоциацию CAAFI (*Commercial Aviation Alternative Fuel Initiative*), исследовательская деятельность которой спонсируется авиастроительными предприятиями, авиаперевозчиками и правительством США (создана в 2006 г.).

В результате реализации множества исследовательских программ и инициатив к настоящему моменту наиболее проработанными альтернативами традиционному топливу (Jet A1/8) можно назвать следующие.

1. F-T (*Fischer – Tropesch*) – топливо, получаемой из угля, природного газа или биомассы по технологии Фишера – Тропша (основана на реакции восстановительной олигомеризации монооксида углерода). К основным преимуществам F-T-топлива относится совместимость с существующей инфраструктурой подзарядки и перевозки.

2. HRJ (*Hydroprocessed Renewable Jet*) – гидроочищенное биотопливо, получаемое из растительных и животных жиров (соевых бобов, пальмового масла, солероса, ятрофы, водорослей). Еще одно часто используемое в литературе сокращение – HEFAJ (*Hydroprocessed esters and fatty acids jet*) – гидроочищенные сложные эфиры и жирные кислоты. Лабораторные исследования данного вида биотоплива дают оценки по снижению выбросов парниковых газов на 60–80% по сравнению с традиционным авиатопливом.

3. Сжиженный водород ( $LH_2$ ) – наиболее перспективный вид топлива в длительном горизонте. К преимуществам относятся отсутствие прямых выбросов  $CO_2$ , высокие энергоемкость и кинетика горения. Однако оценки выбросов  $CO_2$  по всему жизненному циклу (включая этап производства и транспортировки) имеют существенные различия в зависимости от метода производства. При химическом реформинге природного газа выбросы составляют 0,095 кг  $CO_2$ /МДж. Однако если в производственном процессе используется энергия, получаемая из возобновляемых источников, то выбросы могут быть значительно меньше: 0,005 кг  $CO_2$ /МДж – для ветра и 0,02 – для биомассы.

В настоящее время авиационные топлива должны удовлетворять стандартам ASTM (*American Society for Testing and Materials*) D1655 в США и стандартам DSA (*Defense Standards Agency*) в Великобритании. Требования к авиационному топливу включают высокую теплотворность, хорошее распыление, быстрое испарение, хорошие характеристики горения, низкий риск взрыва, отсутствие загрязнений, минимальное образование углерода, низкую вязкость, хорошую термическую стабильности и возможности хранения. Сравнительные характеристики энергетических и экологических свойств альтернативных видов топлива в сравнении с традиционными приведены в табл. 1 [1].

Рассмотрим результаты исследований и демонстрационных проектов по каждой из

трех перечисленных альтернатив более подробно.

Топливо, получаемое по технологии Фишера-Тропша (FT) известно достаточно давно и характеризуется хорошим качеством горения, нетоксичностью, отсутствием выбросов оксидов азота, низким содержанием серы и высоким кетановым числом [2, 3]. Однако производственный процесс является дорогим, а его эффективность находится в пределах 25–50%. Еще одним его недостатком являются плохие смазочные свойства, что, однако, может быть компенсировано при смешивании FT-топлива с обычным. На сегодняшний день стандарт D7566 Американского сообщества по тестированию (*American Society for Testing and Materials, ASTM*) утвердил использование FT-топлива в пропорции 50% с обычным Jet A1 топливом. Разновидностью видов FT-топлива является биосинтетический парафиновый керосин (FT-SPK), производимый из твердой биомассы или угля. Такое топливо полностью подходит к использованию в качестве авиационного по своим энергетическим характеристикам, однако процесс его производства оказывает существенную нагрузку на окружающую среду. Коэффициент EROEI (отношение произведенной энергии к затраченной) для авиационного топлива, произведенного по технологии Фишера - Тропша наиболее высок, когда в качестве исходного сырья используется прутьевидное просо, и составляет 9,8 (для сравнения: EROEI традиционного авиатоплива в зависимости от места происхождения нефти лежит в пределах 4,9–14). EROEI для FT-топлива из природного газа и угля составляет всего 0,6 и 0,5 соответственно [4].

Стоимость FT-топлива по теоретическим оценкам конца 2016 г. лежит в пределах 0,77–1,45 долл. США за кг, что существенно выше стоимости обычного топлива в тот же временной период (0,3 долл. США/кг), однако при неизбежном в долгосрочном периоде росте стоимости обычного топлива и при снижении стоимости FT-топлива за счет эффектов масштаба производства и обучения [5, 6] к 2035 г. стоимость данных видов топлива может сравняться.

В том случае, когда FT-топливо получается из биомассы, его можно отнести к разряду биотоплива. На сегодняшний день многие из развитых и развивающихся стран разрабатывают различные процессы производства биотоплива в целях снижения зависимости от стран – экспортеров углеводородов, сокращения выбросов парниковых газов и стимулирования экономического развития сельских территорий. Все процессы производства биотоплива можно условно разделить на две крупные категории – процессы производства первичного и вторичного биотоплива. Первичное биотопливо имеет естественное происхождение (отработанные масла, животные жиры, древесина) и используется непосредственно для отопления, приготовления пищи, производства электроэнергии без какого-либо химического способа обработки [7]. Вторичное биотопливо получается путем переработки первичного и улучшения его энергетических свойств. Растительные масла, биодизель, этанол, метанол и биогаз – некоторые примеры вторичного биотоплива. Производство вторичных видов биотоплива из возобновляемых источников посредством различных химических процессов разделяют на три поколения [8].

К процессам первого поколения относят производство биоэтанола/бутанола из пшеницы, кукурузы, ячменя, картофеля и сахарного тростника посредством ферментации, а также производство биодизеля из масличных культур (соевые бобы, подсолнечник, пальмовое масло, животные жиры) посредством переэтерификации. Наиболее высокого коэффициента EROEI для ферментированных видов топлива в настоящее время удалось добиться при производстве топлива из сахарного тростника – 6,7 [4]. К процессам второго поколения относят производство биоэтанола/бутанола из лигноцеллюлозной биомассы посредством гидролиза и производство дизельного топлива по технологии Фишера – Тропша из побочных продуктов деревообработки. К процессам третьего поколения относят производство биоэтанола/бутанола из водорослей посредством термообработки, а также

производство водорода из зеленых водорослей и микробов.

Вторичное биотопливо может быть смешано с обычным и использовано непосредственно в двигателях внутреннего сгорания. Использование смеси с 10%-ным содержанием биоэтанола не требует какой-либо модификации двигателя. Увеличение доли биоэтанола в топливе может быть достигнуто путем модификации двигателя. Биодизель на основе животных жиров и использованных растительных масел может быть смешан с обычным топливом в пропорции 20 : 80.

Наиболее перспективными ресурсами для производства биотоплива в настоящее время считаются такие не используемые в пищу масличные культуры, как ятрофа и камелина и, как уже отмечалось ранее, водоросли. Ятрофа устойчива к засухе и вредителям, характеризуется быстрым ростом даже в плохих почвенно-климатических условиях и содержит большой процент (30–40%) масла в зернах [9]. Растение является многолетним и может плодоносить в течение 40 лет. Южная Африка, Южная и Центральная Америка и Юго-Восточная Азия могут рассматриваться как потенциальные регионы – производители ятрофы. Камелина (*Camelina*), или рыжик – непищевая энергетическая культура с высоким содержанием масел (в среднем 38–43%) [10]. Это растение так же не требовательно к качеству почвы и может произрастать на землях, непригодных для других культур. Кроме того, оно может быть использовано в качестве ротационной культуры для пшеницы и других злаковых [9]. Выжимки камелины, образующиеся после извлечения масел, могут использоваться в качестве корма для животных.

Водоросли обладают высоким содержанием липидов, высокой степенью поглощения CO<sub>2</sub>, не занимают земли, а также характеризуются высокими темпами роста [10, 11]. Процент содержания масел в водорослях достигает 60%, что делает их использование более выгодным [12]. Водоросли могут вырабатывать большое количество липидов и углеводов, используя солнечный свет, сточные

воды и CO<sub>2</sub> и, таким образом, способны сыграть решающую роль в очистке сточных вод [13]. В сравнении с другими энергетическим культурами водоросли дают в 30 раз больше урожайности на единицу занимаемой площади [14]. Недавние исследования показывают, что авиационное биотопливо из микроводорослей может сократить время жизни парниковых газов на 76% [9].

Еще одним перспективным источником производства биотоплива являются различные отходы (бумага, продукты переработки растительного и животного происхождения). Различные термохимические и биохимические способы переработки отходов в биодизель, биоспирты и некоторые виды синтетического топлива в настоящее время разрабатываются во многих странах.

HRJ топливо представляет собой парафиновые жидкости, которые производятся путем гидродезоксигенации растительных масел, животных жиров, масел водорослей, при этом побочными продуктами являются вода и пропан [9]. Процесс гидрообработки включает обработку жиров и масел в присутствии водорода для удаления кислорода из исходного сырья. Гидродезоксигенация с последующей изомеризацией и крекингом используется для достижения требуемых характеристик топлива, таких как низкотемпературные свойства [15, 16]. Гидрообработанное возобновляемое авиатопливо представляет собой различные виды высокоэнергетического биотоплива, которые можно использовать даже без смешивания. Одним из преимуществ такого топлива является сокращение выбросов CO, HC, оксидов азота (NO<sub>x</sub>) и твердых частиц (PM).

HRJ-топливо не содержит ароматических соединений и серы и имеет высокое цетановое число, высокую термическую стабильность и низкие выбросы при сжигании [13, 16]. Эти виды топлива стабильны для хранения и устойчивости к микробному росту<sup>3</sup> [10, 15].

<sup>3</sup> International Air Transport Association (IATA). Sustainable aviation fuel roadmap. 1th edition. Montreal. Geneva. 2015.

HRJ-топливо подходит для обычных авиационных двигателей без модификации, не образует осадка на компонентах двигателя<sup>4</sup> [17]. Кроме того, HRJ подходит для использования на больших высотах в силу своих термических свойств [16]. Однако их смазочные свойства являются низкими в силу отсутствия кислорода и серы [15], что может быть улучшено путем смешивания с обычным топливом или применением специальных добавок<sup>5</sup> [13]. Свойства холодного потока, такие как закупоривание холодного фильтра и точка облачности, зависят от более высокого содержания парафина, что, в свою очередь, определяется типом исходного сырья<sup>6</sup>. Как недостаток данного вида авиатоплива может рассматриваться цетановое число HRJ (характеристика воспламеняемости топлива по сравнению с обычным реактивным топливом), но такие проблемы могут быть легко устранены путем смешивания HRJ с обычными видами топлива [13]. Гидрообработанное возобновляемое реактивное топливо является достаточно экономичным. Коэффициент EROI при его производстве колеблется в пределах от 1,6 до 2,9 [4]. Топливо HRJ, соответствующее спецификации ASTM D7566, может быть смешано с обычным реактивным топливом в соотношении до 50% [17].

Прогнозируемая стоимость HRJ-топлива составляет 0,78–0,87 долл. США/кг, что пока существенно выше цены традиционного топлива [16]. Однако, как уже отмечалось, развитие промышленного производства HRJ-топлива с выраженными проявлениями эффектов масштаба производства и обучения может в долгосрочном периоде привести к снижению его стоимости.

С точки зрения практической реализации, наиболее успешным к настоящему моменту оказалось применение смесей биотоплива и традиционного топлива, которое осуществляется уже не только в рамках

<sup>4</sup> Там же.

<sup>5</sup> International Air Transport Association (IATA). Guidance material for sustainable aviation fuel management. 2th edition. Montreal. Geneva. 2015.

<sup>6</sup> Там же.

демонстрационных проектов, но и в коммерческих масштабах [6]. В феврале 2008 г. в рамках демонстрационного проекта по использованию биотоплива в качестве альтернативного авиационного топлива состоялся первый экспериментальный полет самолета Боинг 747-400 компании Virgin Atlantic из Лондона в Амстердам с одним из двигателей, работающим на топливе с 20% добавкой биотоплива (метиловый эфир жирных кислот, произведенный реакцией переэтерификации жиров со спиртом метанолом). А уже с 11 марта 2016 г. компания United Airlines начала использование биотоплива на регулярных рейсах Лос-Анжелес – Сан-Франциско. Доля биотоплива в общем объеме топливной смеси составляет 30%, биотопливо производится из отходов сельхозкультур и непищевых растительных масел. Компания планирует закупать 17 тыс. т биотоплива в год в течение трех лет, а с 2019 г. увеличить объем закупок топлива до 270 тыс. т в год.

Проекты европейских и американских научных коллективов по использованию в качестве альтернативного авиационного топлива сжиженного водорода пока находятся на стадии лабораторных исследований<sup>7</sup>. В результате проведенных экспериментов установлено, что двигатели, работающие на сжиженном водороде, потребляют на 64% меньше топлива (*SFC, Specific Fuel Consumption* – на 64% меньше), чем традиционные (0,0976 против 0,271 [кг/час]/кг при крейсерском полете и 0,0512 против 0,142 [кг/час]/кг – при взлете). Кроме того, ожидается, что эффективность двигателей будет на 5% выше, а температура на входе турбины немного выше. Так же по результатам проведенных исследований ожидается, что использование сжиженного водорода может повысить безопасность полетов. В случае аварии  $\text{LN}_2$  сгорает гораздо быстрее (2,7–3,5 м/с против 0,85 м/с у топлива Jet A1/8) и с меньшей тепловой радиацией, что снижает

<sup>7</sup> Необходимо отметить, что первый экспериментальный полет самолета Ту-155 на жидком водороде состоялся в СССР еще в 1988 г. Однако, несмотря на работоспособность прототипа, программа по разработке криогенного самолета была прекращена по соображениям экономической целесообразности.

риск разрушения фюзеляжа<sup>8</sup>. Горящий  $\text{LN}_2$  покрывает гораздо меньшую площадь поверхности по сравнению с традиционным топливом. По дизайну криогенного самолета в настоящее время можно сказать лишь то, что для него потребуются гораздо более объемные чем для обычного самолета (примерно в 4,3 раза больше) топливные баки с хорошей изоляцией, которые могут быть размещены как над пассажирским и грузовым отсеками, так и под ними. Это увеличит вес пустого самолета, однако в силу легкости сжиженного водорода, самолет с полным баком будет весить меньше.

Стоимость криогенного топлива на сегодняшний день оценивается наиболее высоко, в пределах 1–1,73 долл. США/кг [16].

Отдельного внимания заслуживают проекты Subsonic Ultra Green Aircraft Research (*SUGAR*) компании Боинг по созданию гибридного самолета (использующего как обычное топливо, так и электроэнергию батарей) и проект Ce-Liner компании Bauhaus Luftfahrt по созданию полностью электрифицированного самолета (электролета). Оба данных проекта нацелены не просто на разработку новых видов топлива, но на изменение концептуальной модели воздушного судна и его основных систем. Спецификации обеих концептуальных моделей в сравнении с прогнозируемым уровнем технологических параметров базовой модели Аэробуса А-320 2035 г. приведены в табл. 2 [18].

Концептуальная модель гибридного самолета *SUGAR Volt* предполагает использование съемных модульных аккумуляторов общей массой 11 950 кг, расположенных вдоль централи фюзеляжа, и гибридной газотурбинной электродвигательной установки. Высокое расположение крыльев<sup>9</sup> (рис. 2) также позволяет рассматривать возможность крепления аккумуляторов непосредственно к крыльям, что может упростить наземное

<sup>8</sup> *Okai K.* Long term potential of hydrogen as aviation fuel. In: *Alternative fuels. ICAO Environmental report 2010.* Montreal, International Civil Aviation Organization. 2010.

<sup>9</sup> *Bradley M.K., Dronney C.K.* Subsonic Ultra Green Aircraft Research: Phase I Final Report. NASA/CR-2011-216847. Boeing Research & Technology, Huntington Beach, California, 2011.

обслуживание самолета, в частности, смену батарей. По замыслу разработчиков, использование электроэнергии вместо обычного топлива во время полета позволит сократить потребление топлива и, как следствие, объемы выбросов на 70% (целевой параметр)<sup>10</sup>.

Большой размах крыльев самолета позволяет повысить его аэродинамическое качество и обеспечить меньшую длину разбега, однако для того чтобы самолет мог обслуживаться в существующей наземной инфраструктуре аэропортов, предусмотрена возможность складывания крыльев.

Выбор конкретного типа аккумуляторов пока не осуществлен, так как используемые на сегодняшний день системы хранения энергии пока не удовлетворяют требуемым параметрам. Однако, учитывая быструю динамику развития исследований и разработок в этой области, разработчики концепции SUGAR Volt прогнозируют успешное решение данной проблемы в среднесрочной перспективе. На данный момент наиболее перспективной технологией по критериям гравиметрической и объемной плотности считается литий-полимерная батарея Li-po<sup>11</sup>. Создание первой серийной модели самолета намечено на 2030 год.

Концептуальная модель полностью электрифицированного самолета Ce-Liner снабжена двумя винтовыми турбинами с высокотемпературными сверхпроводящими (HTS) электрическими двигателями, расположенными в хвостовой части фюзеляжа<sup>12</sup> (рис. 3). Специфическая форма крыла (C-wing) повышает аэродинамическое качество системы и существенно снижает индуктивное сопротивление. Запас необходимой энергии содержится в 256 литий-ионных батарейных модулях с общей энергетической емкостью 3,76 МВт·ч, весом

2 200 кг каждый, размещенных в 14 стандартных LD3-контейнерах для ускорения процесса наземного обслуживания. В предположении, что стоимость батареи составит 99 долл. США за кВт·ч, стоимость одного контейнера составит приблизительно 425 000 долл. США.

Согласно предварительным расчетам, проведенным на примере эксплуатации самолета в Германии, предполагается, что модель Ce-Liner сможет покрыть до 54% объема перевозок, выполняемого в настоящее время лайнерами A320, B737 и частично B757. Выход разработки на рынок предполагается примерно в 2035 г.

**Выводы.** Количество, динамика и интенсивность проводимых на сегодняшний день в мире исследований и разработок в области альтернативного авиационного топлива свидетельствуют о вероятном изменении структуры топливного баланса в индустрии авиаперевозок в средне- и долгосрочной перспективе. В среднесрочной перспективе (ближайшие 10–15 лет) наиболее вероятным представляется переход к активному использованию топливных смесей из традиционного и биотоплива, причем доля биотоплива в таких топливных смесях будет постоянно увеличиваться по мере совершенствования технологий его производства и соответствующего снижения стоимости. Зависимость отрасли от нефти и нефтепродуктов существенно снизится, что, учитывая ежегодные объемы потребления топлива, может привести к снижению спроса на сырую нефть. Тем не менее общие энергетические потребности индустрии производства авиационных топлив могут даже возрасти, учитывая более низкие показатели EROI производства биотоплива в сравнении с традиционным авиатопливом.

В более отдаленной перспективе (после 2030–2035 г.) вероятен переход к использованию электричества в качестве основного вида энергии для осуществления авиаперевозок, что повлечет за собой полную модернизацию мирового авиапарка и потребует значимых изменений в

<sup>10</sup> BOEING. URL: <http://boeing.com>

<sup>11</sup> Hepperle M. Electric flight – potential and limitations. In: Energy efficient technologies and concepts of operation, 22–24 October 2012, Lisbon, Portugal, 2012.

<sup>12</sup> Bradley M.K., Drone C.K. Subsonic Ultra Green Aircraft Research: Phase I Final Report. NASA/CR–2011-216847. Boeing Research & Technology, Huntington Beach, California, 2011.

существующей наземной инфраструктуре обслуживания воздушных судов и резкий спад спроса на нефть и нефтепродукты. Неизбежный при таком переходе рост спроса на электроэнергию актуализирует проблему перевода мировой электроэнергетики к более чистым технологиям (атомная, возобновляемая) и источникам (природный газ) производства энергии.

Полученные результаты (оценка вероятности реализации различных сценариев развития авиатранспорта и смежных с данным сектором экономики секторов производства авиационного топлива) могут использоваться для разработки и/или коррекции государственных программ стимулирования исследований и разработок в области авиационного топлива и энергетики.

**Таблица 1****Характеристики альтернативных видов авиационного топлива****Table 1****Characteristics of alternative types of aviation fuel**

Характеристики	Jet A1/8	F-T и HJR	LH <sub>2</sub>
Энергетическая плотность, МДж/л	1	0,957	0,24
Удельная масса, кг/л	1	0,944	0,0886
Выбросы CO <sub>2</sub>	1	0,982	-
Выбросы NO <sub>x</sub>	1	0,778-0,889	0,005-0,0139
Выбросы SO <sub>x</sub>	1	-	-
Выбросы мелкодисперсных частиц	1	0,0005-0,025	-
Выбросы NM(НС)	1	0,75-0,82	-

Источники: [1, 2]

Sources: [1, 2]

**Таблица 2****Сравнение спецификаций гибридного самолета SUGAR Volt, электролета Ce-Liner и Аэробуса 320-2035****Table 2****Comparison of specifications of the hybrid aircraft SUGAR Volt, Ce-Liner and Airbus 320-2035**

Спецификации	SUGAR Volt	Ce-Liner	A320-2035
Длина	40,3 м	43 м	37,6 м
Высота	11,3 м	12,9 м	11,8 м
Размах крыльев	65,2 м, 36 м в сложенном состоянии	36 м	36 м
Удлинение крыла	24	7,11	10,6
Аэродинамическое качество	32,43	20,5	18,55
MTOW – максимальная взлетная масса	70 262 кг	109 300 кг	78 990 кг
OWE – масса снаряженного самолета	42 910 кг	59 410 кг	43 883 кг
Дальность полета	6 482 км	1 667 км	6 112 км
Скорость	M 0,7 FL 420	M 0,75 FL 330	M 0,76 FL 350
Количество пассажиров	154	189	180

Источники: [18]

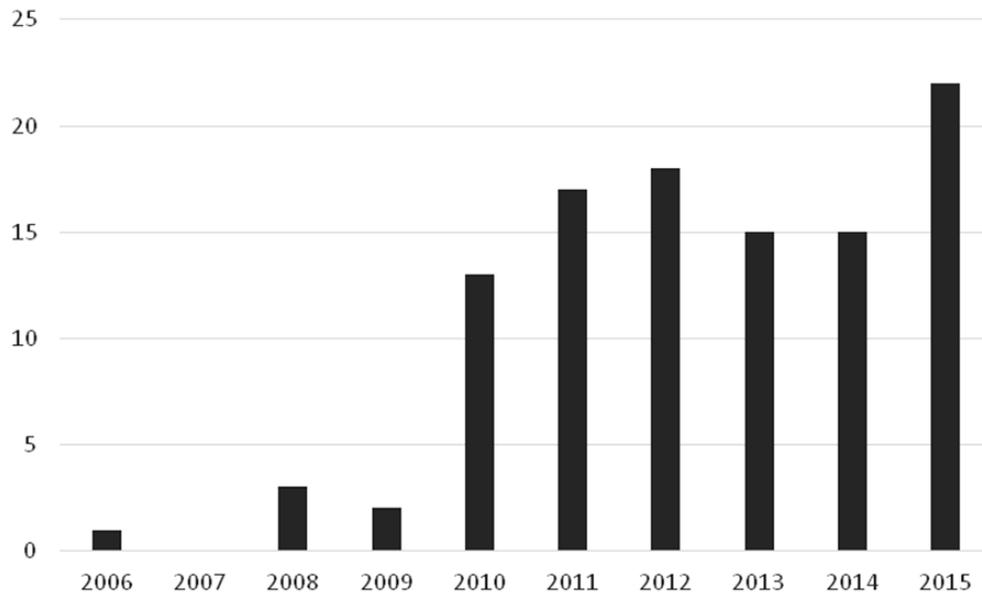
Sources: [18]

**Рисунок 1**

**Количество исследовательских инициатив по разработке альтернативного авиационного топлива в период 2006–2015 гг.**

**Figure 1**

**The number of research initiatives for alternative aviation fuels within 2006–2015**



*Источник:* по данным IATA

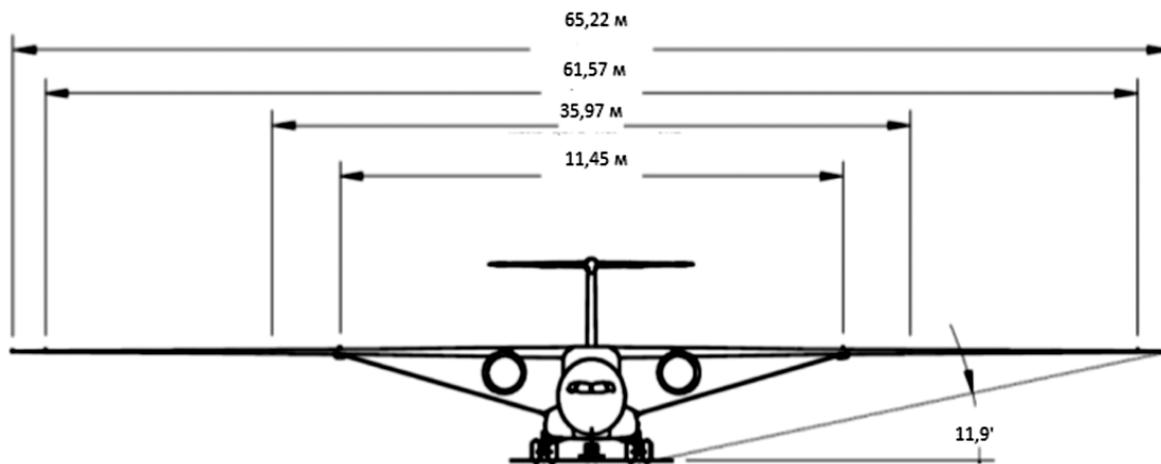
*Source:* IATA

**Рисунок 2**

**Размеры самолета SUGAR Volt**

**Figure 2**

**Dimensions of SUGAR Volt**

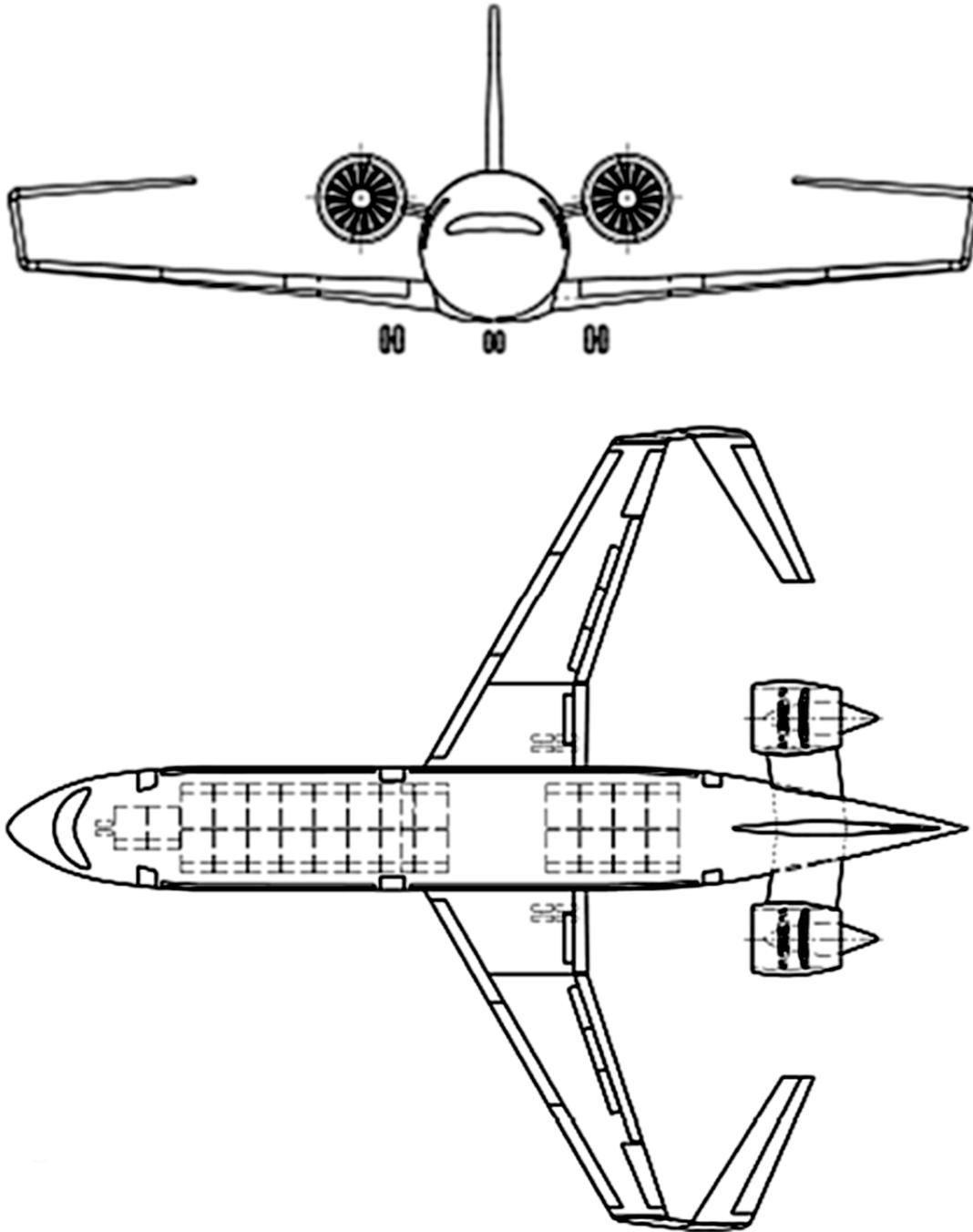


*Источник:* Bradley M.K., Droney C.K. Subsonic Ultra Green Aircraft Research: Phase I Final Report. Boeing Research & Technology. NASA/CR-2011-216847. Hampton, Virginia, Langley Research Center. 2011.

*Source:* Bradley M.K., Droney C.K. Subsonic Ultra Green Aircraft Research: Phase I Final Report. Boeing Research & Technology. NASA/CR-2011-216847. Hampton, Virginia, Langley Research Center, 2011.

**Рисунок 3**  
**Модель Ce-Liner (вид спереди и сверху)**

**Figure 3**  
**Ce-Liner Model: A front and top view**



*Источник: Bradley M.K., Doney C.K. Subsonic Ultra Green Aircraft Research: Phase I Final Report. Boeing Research & Technology. NASA/CR-2011-216847. Hampton, Virginia, Langley Research Center. 2011*

*Source: Bradley M.K., Doney C.K. Subsonic Ultra Green Aircraft Research: Phase I Final Report. Boeing Research & Technology. NASA/CR-2011-216847. Hampton, Virginia, Langley Research Center, 2011.*

**Список литературы**

1. *Hileman I.J., Stratton W.R., Donohoo E.P.* Energy content and alternative jet fuel viability // *Journal of Propulsion and Power*. 2010. Vol. 26. Iss. 6. P. 1184–1195.  
URL: <https://doi.org/10.2514/1.46232>
2. *Pucher G., Allan W., LaViolette M.* Emissions from a gas turbine sector rig operated with synthetic aviation and biodiesel fuel // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2011. Vol. 133. Iss. 11. P. 111502-1–111502-8.  
URL: <https://doi.org/10.1115/1.4002844>
3. *Yilmaz N., Atmanli A.* Sustainable alternative fuels in aviation // *Energy*. 2017. No. 140. Part 2. P. 1378–1376.  
URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.077>
4. *Trivedi P., Olcay H., Staples M.D., Withers M.R., Malina R., Barrett S.R.H.* Energy return on investment for alternative jet fuels // *Applied Energy*. 2015. Vol. 141. P. 167–174.  
URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.016>
5. *Ратнер С.В., Иосифов В.В.* Формирование рынков энергетического машиностроения в Китае и Индии // *Вестник УрФУ. Сер. Экономика и управление*. 2013. № 3. С. 52–62.
6. *Ратнер С.В., Иосифов В.В.* Исследование закономерностей развития новых высокотехнологичных отраслей экономики в энергетической сфере // *Экономический анализ: теория и практика*. 2014. № 28. С. 25–32.  
URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/issledovanie-zakonomernostey-razvitiya-novyh-vysokotekhnologichnyh-otrasley-ekonomiki-v-energeticheskoy-sfere>
7. *Demirbas A.* *Green Energy and Technology: Biofuels: Securing the Planet's Future Energy Needs*. Springer Verlag, 2009. P. 1–4.
8. *Nigam P.S., Singh A.* Production of liquid biofuels from renewable resources – review // *Progress in Energy and Combustion Sciences*. 2011. Vol. 37. Iss. 1. P. 52–68.  
URL: <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2010.01.003>
9. *Hari T.K., Yaakob Z., Binitha N.N.* Aviation biofuels from renewable resources: routs, opportunities and challenges // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 42. P. 1234–1244.  
URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.095>
10. *Mahmudul H.M., Hagos F.Y., Mamat R., Adam A.A., Ishak W.F.W., Alenezi R.* Production, characterization and performance of biodiesel as alternative fuel in diesel engines – A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 72. P. 497–509.  
URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.001>
11. *Hajjari M., Tabatabaei M., Aghbashlo M., Ghanavati H.* A review on the prospects of sustainable biodiesel utilization // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 72. P. 445–464.  
URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.034>
12. *Guo F., Zhao J., Lusi A., Yang X.* Life cycle assessment of microalgae-based aviation fuel: Influence of lipid content with specific productivity and nitrogen nutrient effects // *Bioresource Technology*. 2016. Vol. 221. P. 350–357.  
URL: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.044>

13. Mendez C.J., Parthasarathy R.N., Gollahalli S.R. Performance and emission characteristics of butanol/Jet A blends in a gas turbine engines // *Applied Energy*. 2014. Vol. 118. P. 135–140.  
URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.12.011>
14. Fu J., Yang C., Wu J., Zhuang J., Hou Z., Lu X. Direct production of aviation fuels from microalgae lipids in water // *Fuel*. 2015. Vol. 139. P. 678–683.  
URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.09.025>
15. Hileman J.I., Wong H.M., Ortiz D., Brown N., Maurice L., Rumizen M. The feasibility and potential environmental benefits of alternative fuels for commercial aviation. Proc. 26th International Congress of the Aeronautical Sciences. ICAS. 2008.
16. Winchester N., McConnachie D., Wollersheim C., Waitz I.A. Economic and emission impact of renewable fuel goals for aviation in the US // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2013. Vol. 58. P. 116–128.  
URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.09.025>
17. Kousoulidou M., Lonza L. Biofuels in aviation: fuel demand and CO2 emissions evolution in Europe toward 2030 // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2016. Vol. 46. P. 166–181.  
URL: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.03.018>
18. Schmidt M., Paul A., Cole M., Ploetner K.O. Challenges for ground operation arising from aircraft concepts using alternative energy // *Journal of Air Transport Management*. 2016. Vol. 56. Part B. P. 107–117.  
URL: <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2016.04.023>

#### **Информация о конфликте интересов**

Я, автор данной статьи, со всей ответственностью заявляю о частичном и полном отсутствии фактического или потенциального конфликта интересов с какой бы то ни было третьей стороной, который может возникнуть вследствие публикации данной статьи. Настоящее заявление относится к проведению научной работы, сбору и обработке данных, написанию и подготовке статьи, принятию решения о публикации рукописи.

## INNOVATION IN THE AIRCRAFT INDUSTRY: AN ANALYSIS OF RESULTS OF RESEARCH PROGRAMS FOR DEVELOPING ALTERNATIVE TYPES OF AVIATION FUEL

Svetlana V. RATNER

V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation  
lanaratner@ipu.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-3485-5595>

### Article history:

Received 27 December 2017  
Received in revised form  
18 January 2018  
Accepted 5 February 2018  
Available online  
15 March 2018

**JEL classification:** O18, O33,  
Q42

**Keywords:** alternative  
aviation fuel, biofuel, liquefied  
hydrogen fuel, polluting  
emissions

### Abstract

**Importance** R&D on alternative types of aviation fuel has been enlivened for the recent decade as the aviation laws become more stringent and economies search for new escapes from energy dependence on oil exporting countries.

**Objectives** The research analyzes promising trends in innovative development of the aircraft industry and summarizes publicly available results of international researches into increased energy efficiency and alternative types of aviation fuel.

**Methods** The research relies upon methods of bibliographic, comparative and statistical analysis, and multiple case studies. The data set is made up of reports of the International Civil Aviation Organization, International Air Transport Association, International Council on Clean Transportation, Air Transport Action Group, final survey reports of the Seventh Framework Programme, and scientific proceedings.

**Results** Specimens produced through the Fischer–Tropsch synthesis and biofuel from hydrotreating of oil crops are the most elaborated substitutes of conventional aviation fuel. European and U.S. projects for the use of liquefied hydrogen undergo laboratory tests. Researches into some or full substitution of conventional fuel with electricity propulsion are at the stage of conceptual modeling. The findings can be used to outline and adjust governmental programs for encouraging R&D in aircraft engineering.

© Publishing house FINANCE and CREDIT, 2017

**Please cite this article as:** Ratner S.V. Innovation in the Aircraft Industry: An Analysis of Results of Research Programs for Developing Alternative Types of Aviation Fuel. *National Interests: Priorities and Security*, 2018, vol. 14, iss. 3, pp. 492–506.  
<https://doi.org/10.24891/ni.14.3.492>

## References

1. Hileman I.J., Stratton W.R., Donohoo E.P. Energy Content and Alternative Jet Fuel Viability. *Journal of Propulsion and Power*, 2010, vol. 26, iss. 6, pp. 1184–1195.  
URL: <https://doi.org/10.2514/1.46232>
2. Pucher G., Allan W., LaViolette M. Emissions from a Gas Turbine Sector Rig Operated with Synthetic Aviation and Biodiesel Fuel. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2011, vol. 133, iss. 11, pp. 111502-1–111502-8. URL: <https://doi.org/10.1115/1.4002844>
3. Yilmaz N., Atmanli A. Sustainable Alternative Fuels in Aviation. *Energy*, 2017, vol. 140, part 2, pp. 1378–1376. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.077>
4. Trivedi P., Olcay H., Staples M.D., Withers M.R., Malina R., Barrett S.R.H. Energy Return on Investment for Alternative Jet Fuels. *Applied Energy*, 2015, vol. 141, pp. 167–174.  
URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.016>

5. Ratner S.V., Iosifov V.V. [Formation of energy engineering markets in China and India]. *Vestnik URFU. Seriya Ekonomika i upravlenie = Bulletin of Ural Federal University. Series Economics and Management*, 2013, no. 3, pp. 52–62. (In Russ.)
6. Ratner S.V., Iosifov V.V. [Study on the regularities of the development of new high-tech industries in the energy sector]. *Ekonomicheskii analiz: teoriya i praktika = Economic Analysis: Theory and Practice*, 2014, no. 28, pp. 25–32.  
URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/issledovanie-zakonomernostey-razvitiya-novyh-vysokotekhnologichnyh-otrasley-ekonomiki-v-energeticheskoy-sfere> (In Russ.)
7. Demirbas A. *Green Energy and Technology: Biofuels: Securing the Planet's Future Energy Needs*. Springer Verlag, 2009, pp. 1–4.
8. Nigam P.S., Singh A. Production of Liquid Biofuels from Renewable Resources – Review. *Progress in Energy and Combustion Sciences*, 2011, vol. 37, iss. 1, pp. 52–68.  
URL: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2010.01.003>
9. Hari T.K., Yaakob Z., Binitha N.N. Aviation Biofuels from Renewable Resources: Routs, Opportunities and Challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 42, pp. 1234–1244. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.095>
10. Mahmudul H.M., Hagos F.Y., Mamat R., Adam A.A., Ishak W.F.W., Alenezi R. Production, Characterization and Performance of Biodiesel as Alternative Fuel in Diesel Engines – A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 72, pp. 497–509.  
URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.001>
11. Hajjari M., Tabatabaei M., Aghbashlo M., Ghanavati H. A Review on the Prospects of Sustainable Biodiesel Utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 72, pp. 445–464.  
URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.034>
12. Guo F., Zhao J., Lusi A., Yang X. Life Cycle Assessment of Microalgae-based Aviation Fuel: Influence of Lipid Content with Specific Productivity and Nitrogen Nutrient Effects. *Bioresource Technology*, 2016, vol. 221, pp. 350–357. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.044>
13. Mendez C.J., Parthasarathy R.N., Gollahalli S.R. Performance and Emission Characteristics of Butanol/Jet A Blends in a Gas Turbine Engines. *Applied Energy*, 2014, vol. 118, pp. 135–140.  
URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.12.011>
14. Fu J., Yang C., Wu J., Zhuang J., Hou Z., Lu X. Direct Production of Aviation Fuels from Microalgae Lipids in Water. *Fuel*, 2015, vol. 139, pp. 678–683.  
URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.09.025>
15. Hileman J.I., Wong H.M., Ortiz D., Brown N., Maurice L., Rumizen M. The Feasibility and Potential Environmental Benefits of Alternative Fuels for Commercial Aviation. Proc. 26th International Congress of the Aeronautical Sciences. ICAS, 2008.
16. Winchester N., McConnachie D., Wollersheim C., Waitz I.A. Economic and Emission Impact of Renewable Fuel Goals for Aviation in the US. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2013, vol. 58, pp. 116–128.  
URL: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2013.10.001>

17. Kousoulidou M., Lonza L. Biofuels in Aviation: Fuel Demand and CO2 Emissions Evolution in Europe Toward 2030. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2016, vol. 46, pp. 166–181. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.03.018>
18. Schmidt M., Paul A., Cole M., Ploetner K.O. Challenges for Ground Operation Arising from Aircraft Concepts Using Alternative Energy. *Journal of Air Transport Management*, 2016, vol. 56, Part B, pp. 107–117. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2016.04.023>

#### **Conflict-of-interest notification**

I, the author of this article, bindingly and explicitly declare of the partial and total lack of actual or potential conflict of interest with any other third party whatsoever, which may arise as a result of the publication of this article. This statement relates to the study, data collection and interpretation, writing and preparation of the article, and the decision to submit the manuscript for publication.