

УДК 662.754

## Развитие технологий и перспективы внедрения авиационного биотоплива

© 2020 Т.Н. ГАЕВА<sup>1\*</sup>, А.Н. ВАРАКИН<sup>3</sup>, Л.А. ГУЛЯЕВА<sup>2</sup>, Д.И. ИШУТЕНКО<sup>3</sup>, А.Л. КУЛИНИЧ<sup>2</sup>, П.А. НИКУЛЬШИН<sup>2</sup>, А.А. ПИМЕРЗИН<sup>3</sup>, Р.Г. ВАСИЛОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, 123182

<sup>2</sup> АО «Всероссийский научно-исследовательский институт по переработке нефти», Москва, 111116

<sup>3</sup> ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», Самара, 443100

\* e-mail: gaeva@mail.ru

Поступила в редакцию 30.12.2019 г.

После доработки 26.04.2020 г.

Принята к публикации 12.09.2020 г.

Представлен обзор состояния технологий производства авиационного биотоплива в мире и в России. Дана оценка вклада авиации в процессы изменения климата и возможностей отрасли по достижению глобальных экологических целей в случае масштабного применения альтернативных видов авиационного топлива. Проанализированы основные технологические процессы получения синтетического керосина с точки зрения уровня его коммерциализации, сдерживающих факторов и мер поддержки данного направления. Особое внимание уделено действующему порядку международной сертификации авиационного биотоплива.

*Ключевые слова:* авиационное биотопливо, авиабиотопливо, синтетический керосин, авиабиокеросин, глобальное потепление, изменение климата, эмиссия парниковых газов, устойчивое биотопливо, сертификация ASTM, конверсия биомассы, фотосинтезирующие микроорганизмы.

doi: 10.21519/0234-2758-2020-36-5-13-30

### Влияние авиации на глобальное потепление и изменение климата

В последние десятилетия наблюдается усиление признаков глобального потепления и изменения климата на Земле. Для преодоления негативных эффектов климатических сдвигов (адаптации) необходимо ясное понимание их причин. Несмотря на многообразие возможных источников, провоцирующих усиление климатических изменений, включая действие естественных биосферных и планетарных механизмов циклического характера, экспертами единодушно признается очевидный вклад в эти процессы антропогенного воздействия в виде

растущей эмиссии CO<sub>2</sub> и усиливающегося парникового эффекта вследствие промышленной революции и научно-технического прогресса. В связи с этим контроль антропогенного воздействия считается серьезным инструментом, сдерживающим нарушение биосферного баланса и нарастание неблагоприятных климатических изменений [1, 2]. Опасные и непредсказуемые последствия, связанные с глобальным потеплением и изменением климата, позволили отнести эти явления к одному из главных глобальных вызовов, который угрожает природе, экономике и судьбе цивилизации в целом [3].

На Международной конференции ООН по окружающей среде и развитию

*Список сокращений:* ASTM — Американское общество по испытаниям и материалам; IATA — Международная авиатранспортная ассоциация; ICAO — Международная организация гражданской авиации; IEA — Международное энергетическое агентство; IRENA — Международное агентство по возобновляемой энергетике; OEM — оригинальный производитель оборудования; ООН — Организация объединенных наций; ПГ — парниковые газы; RSB — международный стандарт организации Roundtable on Sustainable Biomaterials для оценки устойчивости (экологичности) авиабиотоплива; CO<sub>2</sub> — углекислый газ; CORSIA — схема компенсации и сокращения выбросов углерода для международной авиации; FAA — Федеральное управление гражданской авиации (США); ЦУР — цели устойчивого развития, установленные ООН.

в Рио-де-Жанейро (1992 г.) было определено, что для выживания человечества необходимо совершить переход к новому мышлению для реализации концепции устойчивого развития, обеспечивающей необходимый баланс между решением социально-экономических проблем, достижением высокого качества жизни нынешнего и будущих поколений и сохранением окружающей среды. В последующих документах ООН была конкретизирована ключевая задача по сдерживанию глобального потепления — это стабилизация выбросов ПГ и CO<sub>2</sub> (в среднем на 5%)<sup>1</sup>. Ее решение планируется в рамках принятого в 2015 г. Парижского соглашения (The Paris Agreement), к которому в 2019 г. присоединилась и Российская Федерация. Соглашением обозначена цель удержания среднемировой температуры в пределах роста не более, чем на 1,5–2 °С относительно доиндустриального уровня, поскольку прогнозируется, что в случае большего потепления компоненты климатической системы Земли окажутся за границами критических пороговых значений [4]. Это вызовет сокращение суши, расширение площади засушливых земель, возрастание частоты стихийных бедствий, что приведет к массовым миграциям населения, вспышкам инфекционных заболеваний и эпидемий с изменением географии их распространения [1]. Для достижения установленных целей страны Парижского соглашения определяют на национальном уровне свой вклад в снижение выбросов ПГ. Однако, по мнению ряда экспертов, суммарный объем таких добровольных обязательств выглядит недостаточным и не обеспечивает максимальное ограничение роста температуры ниже 3 °С [4]. В связи с этим возникает потребность в сокращении всех возможных источников эмиссии ПГ и CO<sub>2</sub> с применением новейших технологий и передовых экологических практик.

Транспортный сектор является одним из наиболее крупных эмитентов ПГ. По оценкам IEA, его вклад в общую эмиссию в 2014 г. составлял более 20%. Согласно расчетам [6], наибольшее влияние на повышение температуры Земли оказывает автомобильный транспорт с масштабом выбросов CO<sub>2</sub> в 6–7 раз превышающим суммарный вклад всех остальных видов транспорта. На втором месте в транспортном сегменте оказалась авиация — 9%

(по другим оценкам, 12% [7]), затем следуют железнодорожный (4%) и морской (2%) транспорт. На перспективу, к 2037 г., по мнению [6], наибольший прирост данного показателя следует ожидать у авиации (4,4% в год) как у наиболее динамично развивающегося транспортного сегмента [8]. Если же оценивать вклад авиации с точки зрения всех ПГ, образующихся в результате деятельности человека, то на ее долю приходится 2–2,5%. Эта небольшая, на первый взгляд, величина сопоставима с общим объемом эмиссии в масштабах отдельной страны, причем такая страна в мировом рейтинге заняла бы 8-е место среди стран-эмитентов. В физическом выражении выбросы CO<sub>2</sub> в международной авиации в 2010 г. составили 448 мегатонн при прогнозируемом увеличении этого показателя до 755 мегатонн к 2050 г., если не будет принято никаких мер [9].

Ведущую роль в разработке механизмов контроля за повышением экологичности авиационного транспорта играет Международная организация гражданской авиации ICAO, устанавливающая международные правила и нормы в сфере авиации. Являясь специализированной структурой ООН, она участвует в достижении 14 из 17 ЦУР, связанных с защитой окружающей среды. Об авиационном биотопливе (авиабиотопливе, синтетическом керосине, биокеросине) как важном научно-технологическом направлении, обладающим высоким потенциалом сокращения вредного воздействия международных воздушных перевозок на окружающую среду, впервые было упомянуто в 2007 г. в резолюции 36-й сессии Ассамблеи ICAO. В 2009 г. усилиями ICAO была обоснована концепция экологически устойчивого авиатоплива (sustainable aviation fuel или SAF) как основного инструмента снижения эмиссии в авиации, а также разработаны методологические принципы и критерии оценки авиабиотоплива для признания его «устойчивым» [10]. Одновременно была создана инициативная группа по воздушному транспорту (в составе представителей авиакомпаний, аэропортов, профсоюзов пилотов и диспетчеров, отраслевых ассоциаций авиапроизводителей и авиаоператоров), которая установила три базовых показателя, способных обеспечить ощутимое снижение влияния авиационной отрасли на изменение климата [11]:

- достижение углеродно-нейтрального уровня по выбросам CO<sub>2</sub> в 2010–2020 гг.;
- сокращение к 2050 г. объемов эмиссии ПГ авиацией на 50% (относительно уровня 2005 г.);

<sup>1</sup> Рамочная конвенция ООН об изменении климата (United Nations Framework Convention on Climate Change), принятая в 1992 г.; Киотский протокол (Kyoto Protocol to the Framework Convention on Climate Change), принятый в 1997 г.; Дохинская поправка к Киотскому протоколу (Doha Amendment to the Kyoto Protocol), принятая в 2012 г.

**Сравнение показателей эмиссии CO<sub>2</sub> возобновляемого дизеля из различных видов биомассы и дизеля из нефти, полученных путем оценки жизненного цикла топлива [14]**Comparative analysis of CO<sub>2</sub> emission indicators of renewable diesel from various types of biomass and petroleum diesel based on the life cycle assessment of fuels [14]

Вид топлива	Показатель эмиссии CO <sub>2</sub> на основании оценки жизненного цикла топлива (количество выброшенного в атмосферу CO <sub>2</sub> в граммах на 1 МДж затраченной энергии)
Возобновляемый дизель из животного жира	12,7
Возобновляемый дизель из рапсового масла	18
Возобновляемый дизель из утилизированного кулинарного масла	15–20
Возобновляемый дизель из соевого масла	20
Дизель из нефти	90

— повышение топливной эффективности воздушного транспорта на 1,5% ежегодно. Эти цели были поддержаны и приняты на политическом уровне, а затем положены в основу стратегии устойчивого развития авиационной отрасли.

В настоящем обзоре рассмотрены некоторые результаты и перспективы в достижении указанных целей через призму анализа развития технологий, производства и потребления авиационного биотоплива, стимулов и барьеров в развертывании производственной инфраструктуры в мире и в России. Значительное внимание уделено деятельности, связанной с сертификацией и масштабированием технологий получения синтетического керосина из биомассы, а также некоторым аспектам практического использования авиационного биотоплива.

**Авиационное биотопливо как экологически безопасная альтернатива авиационному керосину**

Экологизация воздушного транспорта возможна по широкому спектру направлений, включая, например, создание самолетов на электрической или солнечной энергии или использование криогенного водородного топлива. Однако, по оценкам IRENA, эти альтернативные технологии вряд ли будут готовы к коммерческому использованию раньше 2050 г., а их применение потребует от авиакомпаний замены парка самолетов новыми моделями, что крайне затратно и противоречит стандартной практике максимальной выработки эксплуатационного ресурса воздушных судов [9]. Более реальной и доступной альтернативой с высоким экологическим эффектом является использование авиационного биотоплива. Степень его влияния на сокращение выбросов зависит от многих факторов, в том числе от типа исходного сырья

и способа его переработки. Тем не менее, по сравнению с авиационным керосином, типичные значения снижения эмиссии ПГ при использовании, например, HVO — биодизельного топлива из растительных масел (от англ. Hydrotreated Vegetable Oils) варьируются от 40% до 65%, а в случае применения спиртового реактивного топлива на основе лигноцеллюлозы из кукурузных стеблей этот показатель достигает 73%, в то время как биоэтанол из крахмалосодержащего сырья сокращает выбросы всего на 10% [11]. Согласно расчетам ICAO, использование 25 тыс. т авиационного биотоплива только в одном аэропорту позволит снизить эмиссию ПГ на 39,0–62,4 тыс. т [12].

Если оценивать сокращение эмиссии только на этапе сгорания биотоплива, показатели будут немногим ниже, чем у керосина, тем более в случае применения авиационного биотоплива только в качестве добавки. Для получения объективных значений используется расчет баланса всего жизненного цикла биотоплива (Lifecycle assessment), который включает, помимо производства и конечного потребления, также и период роста биомассы с поглощением CO<sub>2</sub>. При сгорании топлива в атмосферу возвращается углекислый газ, связанный в период роста растений [13]. В ходе исследований биодизельного топлива из различных видов биомассы с использованием принятой методики оценки жизненного цикла было установлено достоверное снижение показателя эмиссии CO<sub>2</sub> по сравнению с дизельным топливом из нефти (табл. 1) [14].

Еще одним важным преимуществом авиационного биотоплива является возможность его полной взаимозаменяемости с традиционным топливом, что получило за рубежом название «дроп-ин» биотопливо (от англ. drop-in biofuel). Использование «дроп-ин» биотоплива исключает необходимость каких-либо конструктивных изменений и модификаций двигателей, топливной системы

и других компонентов воздушного судна, а также наземных объектов хранения и топливораспределительной сети.

### **Особенности международной сертификации технологических процессов получения авиационного биотоплива**

Как известно, к авиационному топливу предъявляются особенно жесткие требования для обеспечения надежности, экономичности и безопасности воздушного судна. Получение разрешения на применение авиационного биотоплива также предусматривает тщательное изучение свойств альтернативного топлива, проведение обязательной сертификации и летных испытаний. К настоящему времени в мировой практике сложилось два вида сертификации авиационного биотоплива: а) техническая сертификация, подтверждающая эквивалентность авиационного биотоплива по физико-химическим и эксплуатационным характеристикам нефтяному авиационному топливу, то есть его соответствие понятию «дроп-ин биотопливо»; б) сертификация экологической устойчивости, гарантирующая, что отдельно взятый вид альтернативного авиационного топлива отвечает действующим критериям экологической устойчивости и целям устойчивого развития авиации (sustainability of aviation), то есть соответствует понятию «устойчивое топливо».

Сведения о самой процедуре сертификации авиационного биотоплива представлены в литературе ограниченно и фрагментарно, поэтому в настоящем обзоре данному вопросу уделено особое внимание и сделана попытка некоторой систематизации данных.

Авиационное биотопливо химически сходно с произведенным на основе нефти. В соответствии с определением ИКАО, любое альтернативное авиационное топливо представляет собой смесь жидких углеводородов, которые функционально эквивалентны видам транспортного топлива и топливным смесям, произведенным из нефти, и так же, как они, не содержит кислород, который вызывает коррозию металлов, окисляет топливные компоненты и снижает энергетическую плотность топлива [15]. Однако современные технологии пока не позволяют добиться абсолютного совпадения параметров. У авиационного биотоплива, например, более низкое содержание ароматических углеводородов, отсутствует сера, наблюдается большая высота некоптящего пламени, иные показатели температурной стабильности (например, в условиях низких температур), вязкости, влияния на износ двигателя, более низкие характеристики энергетической плотности. В то же время по ряду показателей регистрируются отличия,

находящиеся в приемлемом диапазоне значений. Влияние более весомых девиаций пока недостаточно изучено [13]. Для безопасности полетов любые отклонения от стандарта считаются недопустимыми и подлежат дальнейшим детальным исследованиям. Этим объясняется действующее сегодня требование применять все сертифицированные виды авиационного биотоплива только в виде смесей с авиационным керосином в различных установленных пропорциях, при которых достигается полное соответствие характеристикам, предусмотренным стандартом на традиционное авиационное топливо. В экономическом смысле дополнительный этап смешивания повышает стоимость конечного продукта, а с экологической точки зрения, небольшое процентное содержание альтернативного компонента в составе авиационного топлива и малые объемы производства не позволяют реализовать потенциал биотоплива по сокращению выбросов ПГ. Поэтому задача перехода к широкому использованию авиационного биотоплива, вплоть до 100%-ной замены авиационного керосина, не теряет своей актуальности и не снимается с повестки дня. По прогнозным оценкам ИКАО, полную замену на устойчивое «дроп-ин» авиационное биотопливо возможно ожидать к 2050 г. с результирующим сокращением эмиссии CO<sub>2</sub> авиационным транспортом на 63% [10].

Технические и эксплуатационные характеристики «дроп-ин» авиационного биотоплива определяются международным стандартом «ASTM D7566-19, стандарт спецификации авиационного турбинного топлива, содержащего синтезированные углеводороды» (ASTM D7566-19, Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons). Одновременно проводятся исследования, направленные на проверку полного соответствия синтетического биотоплива спецификациям стандарта, действующего для авиационного реактивного топлива, производимого из нефти «ASTM D1655-19, стандарт спецификации авиационного турбинного топлива» (ASTM D1655-19, Standard Specification for Aviation Turbine Fuels). Последний распространяется на два типа (марки) традиционного реактивного топлива для газотурбинных двигателей (керосина), которые различаются по точке замерзания: Jet A — класс реактивного топлива, используемого в Северной Америке (с точкой замерзания минус 40 °С) и Jet A-1 — класс реактивного топлива, используемого за пределами Северной Америки (с точкой замерзания минус 47 °С).

Несмотря на то, что в настоящее время технические требования и стандарты производства альтернативных видов авиационного топлива

**Программа тестирования новых видов авиационного топлива и присадок к ним в соответствии со стандартом ASTM D4054 [11, 16, 19]**

Test program of new aviation fuels and fuel additives in accordance with the ASTM D4054 Standard [11, 16, 19]

Этапы тестирования топливного кандидата	Цель тестирования	Объем топлива для испытаний, л
Уровень 1	Характеризация топливного кандидата. Тестирование основных спецификационных свойств на соответствие нефтяному керосину по химико-техническим и эксплуатационным свойствам. Проверка безопасности работы двигателя. Соответствие ASTM 7566 и ASTM D1655 (Def Stan 91-91– для военного применения) при использовании в виде смеси	38
Уровень 2	Тестирование расширенных «специальных свойств» (FFP), подтверждение соответствия назначению (химические, физические, электрические свойства топлива, совместимость с другими видами топлива, наземное обслуживание и безопасность) для исключения отклонений в работе газотурбинного двигателя, требующих конструктивных изменений	38–380
Уровень 3	Тестирование на испытательном стенде технических узлов, компонентов, систем (система зажигания, топливная система и др.), вспомогательного силового агрегата (ВСУ) при использовании топлива-кандидата	950–38 000
Уровень 4	Испытание двигателя и ВСУ. Тестирование на выносливость, долговечность, управляемость и др. (воздушные испытания)	852 000

действуют в ряде стран мира (например, бразильский стандарт ANP 63/207 или китайский CTSO-2C701), международно признанным является именно стандарт ASTM D7566. Спецификациям данного стандарта должны отвечать все биокеросины, произведенные по любому иному стандарту, что требует обязательного контроля на соответствие 12 эксплуатационным свойствам топлива, которые характеризуются 18 показателями качества [13].

Порядок испытаний новых топливных кандидатов и осуществления контроля качества при производстве авиабиотоплива определен в специально разработанном стандарте ASTM D4054 «Стандартная практика оценки нового авиационного турбинного топлива и топливных добавок» (Standard Practice for Evaluation of New Aviation Turbine Fuels and Fuel Additives). Стандарт представляет собой инструктивный материал для производителей биокеросина. Он регламентирует процесс испытаний образцов нового топлива, а также порядок подтверждения его характеристик установленным стандартам качества.

Процесс сертификации авиабиотоплива носит итеративный характер и состоит из трех частей: а) выполнение программы тестирования, б) обзор OEM и внесение изменений, в) утверждение нового приложения к стандарту ASTM D7566 и спецификации топлива [16].

Программа тестирования включает четыре уровня испытаний и охватывает проверку: а)

основных спецификационных свойств, химических и технических характеристик альтернативного топлива в чистом виде и в смеси нефтяным керосином (уровень 1); б) расширенных свойств или так называемых «специальных свойств» (FFP от англ. fit-for-purpose), которые не включены в спецификацию реактивного топлива, так как они относительно постоянны для всех видов нефтяного керосина, однако, в случае отклонений, могут вызывать изменения в работе газотурбинного двигателя и потребуют конструктивных изменений воздушного судна (уровень 2); в) испытания на стенде для двигателей и компонентов (уровень 3); г) испытания в полноразмерном двигателе (уровень 4) (табл. 2). Последний, четвертый уровень испытаний не является обязательным и зависит от результатов трех первых.

По завершении тестирования производитель топлива-кандидата готовит исследовательский отчет ASTM (при участии экспертов ASTM), который передается для внутреннего анализа оригинальным производителям авиационного оборудования, так называемый «обзор OEM» (OEM review). В ходе этой процедуры отчет дорабатывается. В итоговом варианте он должен включать описание методов контроля за соблюдением заявленных характеристик авиабиотоплива при промышленных объемах производства. Все данные отчета должны подтверждаться консенсусом представителей FAA, OEM и экспертов ASTM относительно того, что новое топливо не будет

оказывать негативного влияния на безопасность, производительность и долговечность работы двигателя и воздушного судна. После утверждения отчета FAA и OEM он направляется в ассоциацию ASTM для утверждения путем голосования. Итоговым шагом является разработка нового приложения к стандарту ASTM D7566 со спецификацией и методами контроля авиационного топлива, прошедшего сертификацию. Приложение утверждается также путем голосования [16].

Процедура сертификации, как показывает практика, является не только продолжительной, но и весьма затратной. Если испытания топливного кандидата 1–2 уровней осуществляются лабораторно и не требуют больших расходов, то для выполнения задач 3–4 уровней необходимо предоставить до 852 т топлива-кандидата (табл. 2), что невозможно без масштабирования технологии, а, следовательно, и значительных финансовых вложений. Тем не менее, начиная с 2009 г., ассоциация ASTM аттестовала по стандарту ASTM D4054 пять технологических процессов производства «дроп-ин» биокеросина, соответствующего стандарту ASTM D7566 и удовлетворяющего стандарту ASTM D1655. В сертифицированных технологиях используются разнообразные виды сырья (твердые отходы, жиры, масла, энергетические культуры, спирты и др.) и применяются различные пути конверсии (термохимический, биохимический, гибридный). Все технологии после проведения сертификации были включены в стандарт ASTM D7566 в качестве отдельных приложений к нему (табл. 3). Поскольку в настоящее время все представленные в таблице 3 вида авиационного топлива используются только в виде смеси с керосином с коэффициентом смешивания от 10% до 50%, то по правилам, произведенный альтернативный топливный компонент проверяется на заводе на соответствие стандарту ASTM D7566. На этапе промежуточного хранения и транспортировки он смешивается в разрешенной пропорции с обычным топливом, затем смесь проходит проверку на соответствие стандартам ASTM D7566 и ASTM D1655, после чего доставляется потребителю как топливо по стандарту ASTM D1655. В аэропорту проводится еще одна проверка на соответствие стандарту ASTM D1655 и только после этого разрешается заправка самолетов.

Как отмечалось выше, для подтверждения «устойчивости» авиационного топлива, то есть его экологичности, предполагается проведение экологической сертификации. Единой, организационно и методологически унифицированной процедуры пока не выработано, но потребность в ней возрастает вместе с развитием биотопливной отрасли.

Существуют различные критерии и методики, которые позволяют произвести оценку экологичности на этапах производства и применения как биомассы, так и самого биотоплива. К наиболее распространенным критериям относятся: показатель выбросов углерода в течение всего жизненного цикла биотоплива, прямые и косвенные изменения в землепользовании, влияние на состояние почвы, воздуха и воды, применение удобрений и пестицидов, воздействие на биоразнообразие, вырубку лесов, предусмотренные способы управления отходами и др. В ряде методик учитываются также социально-экономические аспекты, вопросы правового регулирования, риски продовольственной безопасности [10, 18]. Из всех официальных структур, которые могут производить оценку устойчивости авиационного топлива наиболее авторитетной в авиационной отрасли считается международная организация «Круглый стол по устойчивым биоматериалам» (Round Table on Sustainable Biomaterials), разработавшая стандарт RSB, охватывающий все звенья производственной и логистической цепочки получения биотоплива. Преимуществом стандарта RSB является его практически полная согласованность с ЦУР, установленными ООН в области устойчивого развития [19, 20].

Заинтересованность в экологической сертификации поддерживается рядом мер, направленных на освобождение авиакомпаний от необходимости приобретения квот на эмиссию ПГ в случае использования устойчивого авиационного топлива, что должно подтверждаться экологическим сертификатом. Этот принцип используется в Европейской системе торговли квотами на выбросы парниковых газов (EU ETS от англ. EU Emissions Trading System). Он положен в основу механизма Глобальных рыночных мер (GMBM от англ. Global market-based mechanism) и программы CORSIA, разработанных ICAO с целью создания единых глобальных подходов к сертификации эмиссии CO<sub>2</sub>.

### **Текущий мировой статус и оценка эффективности коммерциализации технологий авиационного биотоплива**

В 2016 г. управление FAA опубликовало «Специальный информационный бюллетень по летной годности» (Special Airworthiness Information Bulletin) с рекомендациями авиакомпаниям о применении сертифицированного авиационного топлива, где сообщалось, что пять видов реактивного топлива, произведенного из синтетических компонентов для смешивания, отвечают требованиям стандарта ASTM D7566 и являются приемлемыми для использования в воздушных

**Сертифицированные виды авиационного биотоплива на основе биомассы, конверсионные процессы получения которых включены в стандарт ASTM D7566 в качестве приложений [17]**

Certified biomass-derived aviation biofuels whose conversion pathway specifications are included in the standard ASTM D7566 as annexes [17]

Приложение к стандарту ASTM D 7566, дата включения в стандарт	Наименование авиационного керосина	Процесс преобразования	Коэффициент смешивания, %	Виды биомассы	Компании с предложениями по коммерциализации
Приложение A1 Июнь 2009 г.	<b>FT-SPK</b> Fischer-Tropsch-Synthesized paraffinic kerosene  Гидроочищенный синтетический парафинированный керосин	Термохимическая конверсия. Газификация с получением синтез-газа, каталитическая конверсия с использованием процесса Фишера–Тропша (FT)	50	Лигноцеллюлозная биомасса: твердые бытовые отходы, отходы АПК и лесного хозяйства	Fulcrum Bioenergy, Red Rock Biofuels, SG Preston, Kaidi, Sasol, Shell, Syntroleum
Приложение A2 Июль 2011 г.	<b>HEFA-SPK</b> Hydroprocessed Esters and Fatty Acids-Synthesized paraffinic kerosene  Синтетический парафинированный керосин	Биохимическая конверсия липидов. Гидрогенизация сложных эфиров и жирных кислот	50	Растительные масла, животный жир, утилизированные масла	AltAir Fuels, Honeywell, UOP, Neste Oil, Dynamic Fuels, EERC
Приложение A3 Июнь 2014 г.	<b>SIP-HFS</b> Synthesized iso-paraffins produced from hydroprocessed fermented sugars  Синтетический изопарафиновый керосин	Биохимическая конверсия (2-й путь). Ферментация сахаров генетически модифицированными микроорганизмами с получением промежуточных продуктов — фарнезенов	10	Биомасса, используемая для производства сахара	Amyris, Total
Приложение A4 Ноябрь 2015 г.	<b>SPK/A или FT-SPK/A</b> Synthesized kerosene with aromatics derived by alkylation of light aromatics from non-petroleum sources  Синтетический парафинированный керосин с ароматическими соединениями	Термохимическая конверсия. Газификация и процесс Фишера–Тропша (FT). Алкилирование легких ароматических соединений не нефтяного происхождения	50	Лигноцеллюлозная биомасса: твердые бытовые отходы, отходы АПК и лесного хозяйства	Sasol
Приложение A5 Апрель 2016 г.	<b>ATJ-SPK</b> Alcohol-to-jet synthetic paraffinic kerosene  Синтетический парафинированный керосин «спирт в авиатопливо»	Термохимическая или биохимическая конверсия (1-й путь). Преобразование «спирт в реактивное топливо» с получением изобутанола в качестве промежуточного продукта	30	Биомасса используемая для производства крахмала и сахара, и целлюлозная биомасса для производства изобутанола	Gevo, Cobalt, Honeywell, UOP, Lanzatech, Swedish Biofuels, Byogy

судах и двигателях, сертифицированных для эксплуатации с использованием реактивного топлива Jet A или Jet A-1 [19]. Однако масштабное промышленное производство сертифицированных и рекомендованных к использованию видов авиационного топлива (табл. 3) развернуть пока не удалось.

Консорциум «Инициатива по альтернативному топливу для коммерческой авиации» (The Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative)<sup>2</sup> разработал методику оценки уровня готовности различных сертифицированных технологий биокеросина к коммерческому производству — шкалу FRL (от англ. fuel readiness level). Было предложено следующее распределение: технологии, аттестованные на уровнях ниже седьмого (FRL7) оценивались как незрелые, находящиеся на ранних стадиях, далеких от широкой коммерциализации. Седьмой–восьмой уровни (FRL7–FRL8) соответствуют предкоммерческим стадиям, девятый уровень (FRL9) — выход на коммерциализацию. С использованием этого подхода эксперты провели аттестацию технологий в 2016 г. На уровне FRL9 оказалась только технология HEFA-SPK. Керосин Фишера-Тропша (FT-SPK) был определен на уровне FRL7–FRL8 (причем с использованием в качестве сырья угля, а не биомассы). Остальные технологии распределились следующим образом: ATJ-SPK — на уровне FRL7; SIP-HFS — от FRL5 до FRL7; SPK/A — от FRL4 до FRL6 [9].

Таким образом, с точки зрения коммерциализации, первенство — у авиационного топлива HEFA-SPK, которое также называют дизельным топливом HEFA (HEFA-diesel), разрешенного к использованию в авиации в виде 50%-ной смеси с керосином. Надо отметить, что в зарубежной и российской научной литературе не выработано пока единых терминологических стандартов для идентификации различных видов возобновляемого топлива, что вызывает путаницу в названиях и акронимах. Одни и те же продукты могут именоваться по-разному, и в то же время разные по способу получения виды биотоплива могут носить одинаковое название. Так, например, биодизельным топливом, как известно, называется транспортное топливо, произведенное с применением переэтерификации содержащихся в биомассе триглицеридов метиловым спиртом (FAME от англ. Fatty Acid Methyl Ester). Несмотря на то, что продукт, полученный

в результате применения альтернативного технологического процесса, именуемого HEFA, — гидроочистки эфиров и жирных кислот из липидосодержащего сырья (растительных масел, животных жиров, утилизированного кулинарного масла и др.) — тоже является биодизельным топливом, его называют иначе, с указанием на технологию (HEFA). А биодизельное топливо, уже хорошо известное на современном мировом биотопливном рынке и так же произведенное по технологии HEFA, именуют гидроочищенным растительным маслом (HVO). Отличие же между двумя последними разновидностями биодизельного топлива заключается в том, что в процессе производства по технологии HEFA после стадии гидроизомеризации и сепарации дизельная фракция используется для производства HVO, а керосиновая фракция подвергается каталитической реакции с получением реактивного топлива (HEFA-SPK). Оба вида топлива имеют неоспоримые преимущества перед биодизельным топливом FAME. Их относят к биодизельному топливу второго поколения и, наряду еще с шестью технологическими разновидностями, к группе так называемого «зеленого» дизельного топлива (green diesel)<sup>3</sup> [21]. Большие ожидания связаны с завершением сертификации (как полагают, через 3–5 лет) еще одного вида биотоплива — HEFA-плюс (HEFA+ или HEFA expansion), обладающего улучшенными свойствами для использования в авиации. В настоящее время уже проведены испытательные полеты на топливной смеси с 15%-ным содержанием HEFA-плюс [14].

Общая мировая производственная мощность предприятий по выпуску топлива HEFA в 2017 г. оценивалась в 6 млн т/год с преимущественной локализацией производств в Евросоюзе — 4,5 млн т/год. Мощности в Северной Америке достигали в 2016 г. только 1 млн т/год с перспективой увеличения на 500 тыс. т за счет строящихся производственных объектов [14]. Почти все мировое коммерческое производство с использованием технологии HEFA было сориентировано на выпуск HVO для автотранспорта. На производство реактивного авиационного топлива использовалась лишь малая часть указанных промышленных объемов [9].

<sup>2</sup> Международный консорциум создан в 2006 г. и объединяет разработчиков авиационного топлива, авиакомпании, аэропорты, авиапроизводителей, регулирующие органы с целью усиления деятельности по обеспечению энергетической безопасности и повышению экологической устойчивости мировой авиации за счет использования биотоплива

<sup>3</sup> Основные производители топлива по технологии HEFA в настоящее время: Neste — 4 завода (сырьё: растительные масла, животный жир, утилизированные масла); ENI — 1 завод (растительные масла); Diamond Green Diesel — 1 завод (растительные масла, животный жир, утилизированные масла); UPM — 1 завод (сырое талловое масло); AltAir Fuels (непищевые масла и отходы); Renewable Energy Group (высшие и низшие жирные кислоты) [9].



Технология получения авиабиотоплива FT-SPK пока не достигла коммерческой стадии, несмотря на то, что была сертифицирована раньше других и имеет высокий уровень готовности к масштабированию. На первом этапе технологического процесса осуществляется получение синтез-газа из биомассы с применением технологии газификации. Далее, с помощью хорошо известного процесса Фишера-Тропша осуществляется каталитическая конверсия синтез-газа с получением синтетического парафинированного керосина. Ряд компаний планируют начать производство авиабиотоплива на основе этой технологии уже в ближайшее время. Fulcrum Bioenergy, пройдя этап демонстрационного производства, ведёт строительство завода по выпуску FT-SPK и биодизельного топлива на основе масштабной переработки 181,4 тыс. т твердых бытовых отходов в год с получением 42 млн л биотоплива. Компания готова осуществить строительство еще семи подобных заводов в США [22]. Проект компании Red Rock Biofuels направлен на строительство завода по производству FT-SPK из древесной биомассы с запланированной мощностью 45 млн л/год. Заявила о готовности приступить к подобному проекту, предусматривающему строительство объекта мощностью 1 млн л/год, и компания Kaidi [9].

Три других технологических процесса получения синтетического керосина (FT-SPK/A, ATJ-SPK, SIP-HFS) прошли сертификацию ASTM в более поздний период (2014–2016 гг.) (табл. 3).

Синтетический керосин Фишера-Тропша с ароматическими соединениями FT-SPK/A (Sasol) был включен в спецификацию ASTM D7566 в 2015 г. Несмотря на то, что в настоящее время разрешено использование FT-SPK/A только в виде смеси с коэффициентом смешивания 50%, при доведении ароматических веществ до нужного уровня это будет, как считается, наиболее реальный путь к 100%-ной замене керосина на устойчивое биотопливо [10].

Процесс производства синтетического изопарафинового топлива SIP-HFS (Amyris, Total) основан на превращении в углеводороды сахаросодержащего сырья в процессе ферментации с использованием генетически модифицированных микроорганизмов и дрожжей. В ходе конверсии осуществляется наработка фарнезенов (изопреноидов), из которых в результате дальнейших преобразований получают продукт с характеристиками, соответствующими авиационному топливу. Это так называемый второй путь биохимической конверсии [10, 17].

Технология производства реактивного топлива ATJ-SPK (Gevo, Lanzatech, Cobalt и др.)

на основе первого пути биохимической конверсии (процесс «спирт в реактивное топливо») была одобрена ASTM для включения в спецификацию ASTM D7566 последней по времени (2016 г.). Она предусматривает получение авиабиотоплива из изобутанола, изготовленного из биомассы сахаро- и крахмалосодержащих растений, лигноцеллюлозных материалов и др. Для преобразования спиртосодержащего сырья в чистую углеводородную топливную смесь используются дегидрирование, олигомеризация и гидроочистка. Преимуществом технологии является возможность ее интеграции с широким спектром различных технологий, включая использование и термохимических конверсионных подходов. Поэтому технологию иногда характеризуют как гибридную [10].

Помимо пяти сертифицированных технологических путей, ASTM рассматриваются еще 22 претендента, из них 7 находятся на разных этапах сертификации и 15 — ожидают вхождения в процесс. Проходят сертификацию следующие технологии: каталитическая конверсия сахаров методом водного фазового риформинга (CCS-APR); каталитическая гидроочистка липидов (каталитический гидротермолиз) (CH); пиролиз лигноцеллюлозной биомассы (гидроочищенное деполимеризованное целлюлозное реактивное топливо) (HDCJ); совместная переработка растительных масел с обычными средними дистиллятами на существующих нефтеперерабатывающих заводах (co-processing); каталитический ATJ-синтетический керосин с биоароматическими веществами (CATJ-SKA) на основе каталитического апгрейдинга спиртовых промежуточных продуктов; каталитический апгрейдинг этанола и бутанола (ATJ-SPK expansion); усовершенствованный процесс HEFA (HEFA-плюс) [23].

Для оценки перспектив достижения международной авиацией экологических целей, установленных к 2050 г., необходимо проанализировать параметры потенциального рынка.

В 2017 г. общее мировое потребление авиацией нефтяного керосина составило 430 млн т/год или 8% всего топлива, используемого транспортной отраслью [24]. В соответствии с прогнозом ICAO, этот показатель к 2050 г. может вырасти до 852 млн т/год. При таком сценарии ежегодный объем авиабиотоплива к 2050 г., необходимый для сокращения вдвое эмиссии CO<sub>2</sub> авиационной отраслью (относительно текущего показателя выбросов 850 млн т/год), как это запланировано ICAO, оценивается на уровне 400 млн т ежегодно [9]. Эта цифра сопоставима с современным объемом мирового рынка авиакеросина, и для

достижения такого уровня необходимо сверхбыстрое развертывание биотопливной отрасли.

Динамика коммерческого производства устойчивого авиабиотоплива, по данным ICAO, характеризуется ростом с 290 т/год (усредненный показатель) в 2013–2015 гг. до 17 тыс. т в 2018 г. Однако и этот наибольший показатель составил лишь 0,011% от всех видов биотоплива, произведенного в 2018 г. в объеме 150 млн т по различным технологиям из разных видов сырья, и 0,004% в общем потреблении топлива мировой авиацией. Всё авиабиотопливо изготавливалось по технологии HEFA-SPK на заводе компании AltAir (Калифорния, США) — первом предприятии в мире, полностью сориентированном на выпуск реактивного биотоплива. Объем авиабиотоплива, поставленного компанией в 2018 г., составил всего 0,28% мировой мощности предприятий, производящих биотопливо по технологии HEFA. Даже при полном переходе всех этих предприятий на выпуск авиабиотоплива, замещалось бы менее 1,5% общей потребности авиации в топливе [9, 24, 25]. Крайне низкие темпы масштабирования и коммерциализации технологий производства биокеросина, продемонстрированные в последние годы, не позволяют рассчитывать на достижение целей ICAO по устойчивому развитию мировой авиации к 2050 г.

### **Барьеры для развертывания мирового производства авиационного биотоплива и возможности их преодоления**

К основным причинам недостаточного развития мирового производства авиабиотоплива специалисты, как правило, относят:

- слабую обеспеченность биомассой; высокую стоимость, неустойчивую доступность либо территориальную разобщенность источников биологического сырья;
- низкую конкурентоспособность производственной стоимости авиабиотоплива относительно традиционных видов топлива из-за высокой энергоёмкости, сложности и/или многоэтапности технологических процессов на современном уровне развития технологий;
- высокие инвестиционные запросы в связи с большими капитальными вложениями в масштабирование технологий и сертификацию, создание объектов производственно-логистической инфраструктуры;
- недостаточные меры государственной поддержки и неразвитость правового регулирования биотопливной отрасли.

Указанные барьеры создают высокую коммерческую неопределенность и обуславливают

недостаточную активность инвесторов, ожидающих новых технологий или дополнительных мотивирующих стимулов. Понижительная динамика инвестиционных процессов, наблюдаемая в последнее время в биотопливном сегменте, свидетельствует о том, что оснований для оптимизма у инвесторов пока не возникает. По оценкам IRENA, в 2018 г. общий объем инвестиций в биотопливную отрасль составил 3 млрд долларов США, снизившись с ежегодного уровня 20 млрд долларов США, наблюдавшегося в 2006–2007 гг. Причем основной финансовый поток по-прежнему направлялся в производство биотоплива 1-го поколения — из пищевой биомассы [24]. В то же время, чтобы выйти на запланированный к 2050 г. уровень решения экологических и климатических проблем, потребуется преодолеть тренд падения инвестиций и вернуться к объему инвестиций не ниже наибольшего из приведенных выше показателей.

Выполненный IATA в 2015 г. анализ экономической эффективности проектов по производству авиабиотоплива с учетом расходов на транспорт, смешивание топлива и сбыт, продемонстрировал их потенциальную конкурентоспособность при базовом сценарии, предусматривающем инвестиции в инфраструктуру одного производственного объекта в объеме 260 млн долларов США. Эти средства необходимы для покрытия расходов на землю, строительство и оборудование биоперерабатывающего завода. Подобного рода проекты позволяют рассчитывать на положительные значения денежного потока, начиная с четвертого года эксплуатации объекта [10]. По объему капитальных вложений этому уровню в определенной степени соответствуют затраты на производственную инфраструктуру HEFA-SPK (265 млн — 855 млн долларов США), в то время, как на создание коммерческого производства FT-SPK, по расчетам, необходимо от 434 млн — до 1575 млн долларов США [9].

Существуют также технологические ограничения, как общие, так и специфичные для каждого вида авиабиотоплива. Например, для производств с использованием технологии HEFA, обеспечивающей высокий выход конечного продукта, ключевой остается проблема дорогого сырья при низкой доступности и недостаточной устойчивости источников его получения [24]. Напротив, технология FT-SPK не испытывает затруднений с обеспеченностью отходами для переработки, но её основные проблемы лежат в области недостаточной эффективности процессов, что требует технических и технологических усовершенствований газификаторов и реакторов для

**Сопоставление стоимости нефтяного керосина и авиационного биотоплива, произведенных с использованием различных технологий конверсии биомассы (по показателю минимальной рыночной цены) [9]**

Cost comparison of petroleum-derived kerosene and aviation biofuels produced through various biomass conversion technologies (based on the minimum market price) [9]

Наименование топлива	Вид топлива	Сырье	Цена за 1 л топлива, доллары США
Jet A-1	Авиационный керосин	Нефть	0,36*
HEFA	Авиациокеросин на основе гидроочистки сложных эфиров и жирных кислот	Утилизованное кулинарное масло	1,52
FT	Авиациокеросин на основе синтеза Фишера-Тропша	Древесные отходы/ пшеничная солома	2,0–3,0
HTL	Авиациокеросин на основе гидротермального сжижения	Древесные отходы/ пшеничная солома	1,0–1,5
HDCJ	Гидроочищенный деполимеризованный целлюлозный авиациокеросин на основе пиролиза	Древесные отходы/ пшеничная солома	1,5–2,1
ATJ	Авиациокеросин на основе процесса «спирт в авиатопливо»	Древесные отходы/ пшеничная солома	2,7–4,0
SIP	Авиациокеросин на основе ферментации сахаров (сахара-фарнезены-авиатопливо <sup>™</sup> )	Древесные отходы/ пшеничная солома	5,4–7,2

\* Указана цена керосина на рынке США, зафиксированная в мае 2016 г. при цене на нефть 50 долларов США за 1 баррель

\*The price of kerosene is indicated on the market of USA recorded in May 2016 at oil price \$50 per barrel

синтеза Фишера-Тропша, а также снижения энергоёмкости производства. И для FT и для HEFA актуальна задача создания улучшенных, высоко селективных катализаторов. Серьёзным ограничением для процесса SIP-HFS является низкий выход продуктов конверсии [10]. Особенностью технологий SIP-HFS и ATJ-SPK является высокая ценность промежуточных продуктов (фарнезена и бутанола соответственно), которые приносят большой доход, если используются не для получения авиатоплива, а в качестве сырьевых компонентов в химической, косметической и фармацевтической промышленности [9].

Общим и трудно преодолемым барьером для всех технологий получения авиационного биотоплива является недостаточная рыночная конкурентоспособность. Сегодня она, по оценкам IRENA, в 2–7 раз превышает стоимость нефтяного керосина [9]. Из таблицы 4 следует, что наиболее коммерчески выгодная стоимость обеспечивается применением технологий HEFA, а самый дорогой биокеросин получается с использованием конверсии ATJ или SIP.

Наибольшую часть в структуре конечного продукта составляют затраты на сырьё (в среднем около 75%). Для технологии HEFA-SPK в цене одного л конечного продукта этот показатель находится в диапазоне от 0,8 долларов США (масло рыжика) до 1,25 долларов США (животный жир). Для FT-SPK сырьё на этапе газификации

добавляет от 0,9 долларов США (кукурузные стебли) до 1,96 долларов США (лигноцеллюлоза). Для технологии ATJ на сырьё приходится от 1,8 долларов США (синтез-газ из лигноцеллюлозы) до 2,76 (этанол из сахарного тростника). В результате технико-экономического анализа [10] была выявлена такая закономерность: чем выше расходы на конверсию, тем ниже стоимость сырья и наоборот, чем выше стоимость сырья, тем проще методы конверсии и ниже затраты на его переработку. С этой точки зрения, на современном уровне развития технологий наиболее выгодными в качестве сырья являются отходы различного типа, а самым коммерчески привлекательным — технологический путь конверсии липидов HEFA.

Таким образом, для повышения экономической целесообразности производства авиационного биотоплива все пять технологий, сертифицированных ASTM, требуют дальнейшей доработки. Скрытые ресурсы заключаются в использовании, где это возможно, действующих объектов производственной и логистической инфраструктуры, в оптимизации технологических процессов как для снижения производственных энергозатрат, так и для повышения энергетической плотности биотоплива, а также в увеличении процентного содержания альтернативного компонента в топливной смеси вплоть до полной замены нефтяного авиатоплива, что потребует роста объемов

производства и сократит операционные расходы. Наконец, возможна разработка и более эффективных конверсионных процессов. Например, по информации Департамента энергетики США (United States Department of Energy), благодаря одной из технологий получения авиабиотоплива с помощью быстрого пиролиза, производственные расходы сокращаются на 75% относительно других технологий [10].

Повышение рентабельности использования новых технологий в значительной степени может обеспечиваться сокращением доли сырья в конечной стоимости топлива. С этой целью используются такие подходы, как: повышение урожайности за счет применения новых агротехнических и генно-инженерных методов, улучшение логистики в сельском хозяйстве, совершенствование сбора и сортировки отходов, снижение расходов на предпроизводственную подготовку сырья и др. Активно развивается и направление, связанное с поиском новых источников биомассы, например, создание высокопродуктивных сортов непищевых энергетических культур. Особенно большие надежды связывают с таким новым и перспективным видом непищевой биомассы, обладающим высокой энергетической плотностью, каким являются фотосинтезирующие микроорганизмы (микроводоросли).

Микроводоросли рассматриваются сегодня как предпочтительное сырьё для получения высокоэнергетического «дроп-ин» биотоплива третьего поколения с использованием, помимо НЕФА, и всех остальных известных путей конверсии биомассы. Большой интерес к микроводорослям исследователей и предпринимателей во всем мире объясняется рядом преимуществ. Стратегии культивирования микроводорослей способны обеспечить высокие урожаи биомассы на единицу площади, не создавая конкуренции за пахотные земли и удобрения, используемые в традиционном сельском хозяйстве, а по содержанию липидов возможно достижение уровня свыше 60% в сухой биомассе. В зависимости от вида фотосинтезирующих микроорганизмов их выращивание может осуществляться в сточных водах, технической или соленой воде. Для роста микроводорослей можно с успехом использовать углерод из отработанных газов стационарных источников, включая электростанции и другие промышленные объекты, что будет способствовать секвестру CO<sub>2</sub>. Биомасса микроводорослей богата полезными и востребованными в различных отраслях промышленности компонентами. Это делает ее чрезвычайно подходящей для переработки по концепции «биорефининга» (biorefinery), когда наряду

с производством различных видов биотоплива осуществляется выпуск ценных сопутствующих продуктов, снижающих общую производственную себестоимость [26].

Микроводоросли являются хорошим объектом для применения рекомбинантных технологий и создания новых штаммов с улучшенными свойствами. Применение геномного секвенирования, метагеномного и протеомного анализа, методов метаболической инженерии позволяют осуществлять контролируемое повышение уровня липидов в биомассе и увеличение выхода ценных целевых продуктов, что создает хороший потенциал рыночной конкурентоспособности. В то же время, все технологии конверсии биомассы водорослей в биотопливо пока не являются зрелыми и не достигают требуемого уровня рентабельности. По некоторым оценкам, выход на промышленные масштабы коммерческого производства авиабиотоплива из водорослей возможен только через 15–20 лет [27].

#### **Текущие результаты внедрения авиабиотоплива в практику международной авиации**

Несмотря на препятствия к широкой коммерциализации, применение авиабиотоплива в мире постепенно расширяется. В немалой степени это происходит благодаря мерам нормативно-правового регулирования и государственной поддержки. Выше уже говорилось о формировании спроса на биотопливо путем включения авиации в глобальную систему торговли квотами на выброс углерода. Помимо этого, во всех странах, заинтересованных в обеспечении энергетической безопасности и/или в противодействии изменению климата путем использования биоресурсов и возобновляемых источников энергии, действуют свои приоритетные модели стимулирования. Наиболее распространена такая мера, как установление требования (мандата) обязательного применения авиабиотоплива в качестве компонента в составе топливной смеси, несмотря на то, что это влечет за собой повышение цены топлива для авиакомпаний и стоимости билетов для пассажиров. Такое требование, как правило, устанавливается государством. Например, в США была поставлена цель потребления авиабиотоплива на уровне 5% к 2018 г., в Евросоюзе — 3–4% к 2020 г., в Израиле — 20% к 2025 г., в Австралии — 50% к 2050 г. [10]. Часть возникающих в связи с этим финансовых обременений государство берет на себя, вводя дифференцированное налогообложение, снижая налоговую нагрузку, обеспечивая финансирование проектов

на льготных условиях в ответ на участие в развитии биотопливной отрасли. Знаком заинтересованности в использовании авиабиотоплива является заключение авиакомпаниями долгосрочных договоров с производителями биокеросина, гарантирующих закупку авиабиотоплива по фиксированной цене, как правило, еще до пуска объекта в эксплуатацию (off-take agreement). Существенную поддержку авиакомпании оказывают также своим участием в финансировании научных исследований, масштабировании новых технологий, осуществлении тестовых полетов.

Благодаря предпринятым усилиям, в 2008 г. стало известно о первом тестовом полете компании Virgin Atlantic с использованием авиабиотоплива, а к 2015 г. уже 11 авиакомпаний выполнили 2500 коммерческих пассажирских перевозок на 50%-ной топливной смеси с добавкой авиабиотоплива на основе ятрофы, рыжика, водорослей, сахарного тростника. В 2016 г. начались первые регулярные поставки авиационного топлива для использования через общую систему гидрантной заправки в аэропорту Осло (Норвегия). В этом же году United стала первой авиакомпанией, которая ввела альтернативное биотопливо, поставляемое AltAir, в повседневную практику. По состоянию на июнь 2019 г. более 40 коммерческих авиакомпаний приобрели опыт применения устойчивого авиабиотоплива, выполнив свыше 180 тысяч коммерческих рейсов [25].

Таким образом, несмотря на отставание в темпах коммерциализации технологий и незначительные объемы промышленного производства, формирование инфраструктуры и рынка авиабиотоплива в технологически развитых странах, в целом, достаточно результативно. Обращает на себя внимание тот факт, что наибольшие успехи достигаются в тех случаях, когда на уровне создания технологий применяются стратегии одновременного технологического обеспечения всех звеньев производственной цепочки, а на уровне государства — разрабатываются национальные программы, профилированные на скоординированное развитие сегмента авиабиотоплива с четко поставленными целями.

### **Состояние разработок авиационного биотоплива в Российской Федерации и уровень практической готовности к внедрению технологий**

В Российской Федерации проблема энергетической безопасности, стоящая перед ведущими экономиками мира, не актуальна в связи с высокой обеспеченностью ископаемыми энергоносителями. Вместе с тем в контексте глобального

потепления и изменения климата задача снижения показателей эмиссии всеми видами транспорта, включая авиацию, носит международный характер. Необходимость участия Российской Федерации в ее решении поддерживается присоединением нашей страны к Парижскому соглашению по климату, что требует разработки национальной стратегии перехода на безуглеродную экономику и принятия национального плана по снижению выбросов, технологическому перевооружению и адаптации к климатическим изменениям. В рейтинге стран, вносящих наибольший вклад в загрязнение атмосферы, Россия, как известно, занимает четвертое место после Китая, США и Индии<sup>4</sup>, и даже частичный переход отечественной авиации на биотопливо будет способствовать улучшению экологических показателей и выполнению обязательств по Парижскому соглашению.

Согласно расчетам объем выбросов отечественной авиацией загрязняющих веществ в верхний слой тропосферы в 2012 г. по сравнению с 2000 г. увеличился на 41,9–48,5%, ПГ — на 43,7% [28]. Стоит отметить, что вплоть до последнего времени российские эксперты, как и ряд зарубежных, не проявляли единодушия в оценке потенциала авиабиотоплива для решения экологических проблем. Помимо угрозы продовольственной безопасности, которая, как теперь очевидно, преодолевается использованием для производства биотоплива непищевой биомассы, специалисты предупреждали и о неизбежности постепенного уничтожения тропических лесов, и о недостаточной аргументированности и завышенных ожиданиях эффекта снижения эмиссии CO<sub>2</sub> в долгосрочной перспективе [29]. Участвуя как член ИКАО в ее деятельности, Российская Федерация неоднократно выражала недоверие к эффективности применения механизма Глобальных рыночных мер в качестве основного инструмента регулирования негативного воздействия авиации на атмосферу<sup>5</sup>. Этот подход, основанный на квотировании эмиссии, с российской точки зрения, не оправдан, поскольку гражданская авиация относится к наиболее экологически чистым видам транспорта, в случае же наложения высоких штрафов за превышение эмиссионных квот, они негативно отразятся на финансовой устойчивости сектора гражданской авиации<sup>6</sup>. Ставилась под сомнение и сама возможность достижения запланированного уровня углеродной нейтральности в авиационном секторе даже при полном пе-

<sup>4</sup> Интернет-ресурс: <https://tass.ru/info/6917170>

<sup>5</sup> В 2016 г. на 39-й Ассамблее Совета ИКАО и в 2017 г. на Конференции по авиационному и альтернативному топливу (Conference on aviation and alternative fuels)

<sup>6</sup> Интернет-ресурс: <http://www.favt.ru/novosti-novosti/?id=3024>

реходе на авиабиотопливо, принимая во внимание его более низкую энергетическую плотность [27]. Некоторые из приведенных аргументов представляются спорными, но в то же время нельзя недооценивать, например, повышение риска высоких штрафных санкций в связи с недостаточной экологичностью авиации в случае, как это планируется, обязательного принятия механизма Глобальных рыночных мер для стран с большим парком самолетов. О порядке величин возможных штрафов свидетельствует, например, такой факт из более ранней практики применения квотирования эмиссии в странах Евросоюза: в 2014 г. за превышение действующих на тот момент эмиссионных квот Германия оштрафовала на 2,7 млн евро 61 авиакомпанию из разных стран, включая Россию [29].

В настоящее время на российском рынке реактивного авиационного топлива представлены различные марки нефтяного керосина (ТС-1, Т-1С, Т-1, Т-2, РТ), синтетические керосины полностью отсутствуют. Все виды керосина производятся по межгосударственному стандарту ГОСТ 10227-86 «Топлива для реактивных двигателей. Технические условия (с Изменениями № 1, 2, 3, 4, 5, 6)». Наиболее распространены топливо ТС-1 (для гражданской авиации) и РТ (для сверхзвуковой авиации). В соответствии со стандартом они могут применяться в холодных и в арктических климатических условиях.

Топливо ТС-1 по основным физико-химическим и эксплуатационным характеристикам аналогично авиакеросину марки Jet A-1 (стандарт ASTM D1655). Некоторые различия лежат в области технологии производства: Jet A-1 получают полной гидроочисткой прямогонной керосино-лигроиновой фракции, а ТС-1 представляет собой смесь гидроочищенного и неочищенного прямогонного дистиллята. Причём Jet A-1 считается более экологически безопасным за счет меньшего содержания серы и имеет на 10 °С большую температуру вспышки, чем у российского керосина. Преимуществом ТС-1 является возможность его использования при гораздо более низких температурах<sup>7</sup>. Для авиакеросина Jet A-1 в России с 2006 г. действует национальный стандарт ГОСТ Р 52050-2006 «Топливо авиационное для газотурбинных двигателей Джет А-1 (JET А-1)». Некоторые российские компании освоили производство авиатоплива Jet A-1 по данному стандарту для заправки зарубежных авиаперевозчиков в аэропортах Российской Федерации и для экспортных поставок.

Как свидетельствуют цифры, характеризующие российский рынок авиационного

керосина, в 2018 г. в России было произведено 12,7 млн т реактивного топлива с годовым ростом в 11,3%<sup>8</sup>. В период 2016–2019 гг. средние цены производителей на топливо для реактивных двигателей выросли на 56,7%, с 23108,9 руб. до 36205,6 руб. за тонну. Наибольшее увеличение средних цен производителей произошло в 2018 г., тогда рост составил 31,5%, и стоимость топлива превысила европейские показатели<sup>9</sup>. В случае использования 5%-ной биотопливной добавки к авиакеросину при текущих параметрах рынка необходимый объем альтернативного топлива составил бы около 600–700 тыс. т/год, что по масштабу производственной инфраструктуры соответствует приблизительно трем био заводам мощностью, например, 240 тыс. т/год каждый, подобно производственным объектам компании Neste, локализованным в Финляндии [9]. Однако в России пока не сложились условия для реализации таких проектов. Альтернативное авиационное топливо в России не производится не только из биомассы, но также и из угля или природного газа. В отличие от мировых технологических лидеров, в Российской Федерации недооценивается стратегическое значение биотопливной отрасли с точки зрения ее возможностей по решению задач экономической и экологической безопасности, расширения доступа к новым технологиям, повышения качества жизни, создания рабочих мест, полезной утилизации различного вида отходов, расширения сельскохозяйственного и промышленного производства, развития аграрных и отдаленных территорий. Этим объясняется несформированность нормативно-правовой базы для развития биотопливной отрасли, а также недостаточность мер и инструментов государственной поддержки.

Косвенным образом развитие биотопливного направления регламентируется некоторыми федеральными законами, принятыми в 2009 г.<sup>10</sup>. Более предметно — документами, появивши-

<sup>8</sup> Интернет-ресурс: <https://alto-group.ru/otchet/rossija/408-rynok-kerosina-aviacionnogo-tekushaya-situaciya-i-prognoz-2015-2019-gg.html>

<sup>9</sup> Интернет-ресурс: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2017/11/28/743316-aviakerosin-podorozhal>

<sup>10</sup> Федеральный закон Российской Федерации от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ; Энергетическая стратегия России на период до 2030 года; «Основные направления государственной политики России в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии» на период до 2024 г., утверждены распоряжением Правительства Российской Федерации от 8 января 2009 г. № 1-р (в редакции от 15 мая 2018 г.)

<sup>7</sup> Интернет-ресурс: <https://www.gazprom-neft.ru/press-center/sibneft-online/archive/2016-december-projects/1115543/>

мися в 2012–2018 гг.<sup>11</sup> В 2018 г. наметилось некоторое оживление деятельности, связанной с биоэтанолом, благодаря принятию Государственной Думой РФ Федерального закона № 448-ФЗ от 28.11.2018 г., способствующего мотивации к производству и использованию биоэтанола<sup>12</sup>. Прямое отношение к развитию производства авиационного биотоплива имеют только поручение Президента Российской Федерации от 30 декабря 2008 г. № Пр-2809 и поручение Правительства Российской Федерации Минэнерго России и Минпромторгу России от 4 февраля 2010 г. о разворачивании работ по созданию технологий получения синтетических видов жидкого топлива с требуемыми техническими и эксплуатационными характеристиками для авиационной и ракетно-космической техники.

Реализация упомянутых нормативных актов в части биотоплива, включая авиационное биотопливо, осуществляется в рамках действующих государственных программ: выполняется ряд актуальных проектов, в том числе по разработке технологий производства авиационного биотоплива на основе различных видов биомассы<sup>13</sup>.

В настоящее время в России имеется определенный научно-технический задел по разработке лабораторных регламентов получения альтернативного авиатоплива. Достаточной ресурсной базой и отечественными технологиями конверсии биомассы обеспечено получение биотоплива первого поколения из пищевого сырья, однако их коммерциализация имеет такие ограничения, как несформированность запроса на альтернативные виды топлива и отсутствие профильных рынков, нехватка необходимого технологического

оборудования и современных объектов производственно-логистической инфраструктуры.

В ИНХС РАН им. А.В. Топчиева разработана технология конверсии биоэтанола (первого поколения) для получения моторных и реактивных видов топлива, дивинила, этилена и ароматических углеводородов для нефтехимической промышленности. К преимуществам технологии относится разработка гетерогенного катализатора нового поколения для реализации и интенсификации процесса конверсии биоэтанола в жидкий продукт, отвечающий составу и свойствам реактивного топлива. Новый способ получения реактивного топлива из биоэтанола защищен патентом [30].

По инициативе ЦИАМ им. П.И. Баранова были проведены исследования по отечественным альтернативным авиакеросинам, разработаны технические требования и опытные образцы синтетических видов авиатоплива. Получение опытного образца реактивного топлива из биомассы обеспечивалось участием в исследованиях МИТХТ им. М.В. Ломоносова. Для конверсии биомассы применялась технология получения реактивного топлива из биоэтанола с использованием цеолитных катализаторов. Выход биотоплива составил около 10%. Полученное синтетическое углеводородное биотопливо для авиации, в целом, отвечало техническим требованиям ЦИАМ им. П.И. Баранова, за исключением температуры вспышки, которая составила 25 °С при требуемом показателе 28 °С для топлива ТС-1 и 38 °С — для топлива Jet A-1. По качеству синтетическое топливо соответствовало требованиям международного стандарта ASTM D7566, что делает возможным его применение в авиационной технике как в смеси с реактивным топливом из нефти, так и индивидуально с введенными противозносной и антиокислительной присадками [31]. МИТХТ им. М.В. Ломоносова разработан лабораторный регламент изготовления опытных образцов синтетического реактивного топлива из этилового спирта, который может быть взят за основу при создании технологий промышленного производства реактивного топлива из биомассы. Исследования МИТХТ им. М.В. Ломоносова, направленные на разработку технологий получения биодизельного топлива второго поколения, фокусируются, в частности, на поиске наиболее эффективных катализаторов, обеспечивающих высокую селективность, максимальный уровень конверсии субстрата и снижение стоимости производственного процесса. Разрабатываются новые каталитические системы, характеризующиеся высокой активностью и стабильностью. В данных исследованиях принимает участие Тверской государственный технический университет [32, 33].

<sup>11</sup> «Комплексная программа развития биотехнологий в Российской Федерации на период до 2020 года», утверждена постановлением Правительства Российской Федерации от 24 апреля 2012 г. № 1853-П8; План мероприятий «Развитие биотехнологий и геномной инженерии» на 2018–2020 годы, утвержден постановлением Правительства Российской Федерации от 28 февраля 2018 г. № 337-р

<sup>12</sup> Федеральный закон № 448-ФЗ от 28.11.2018 г. «О внесении изменений в Федеральный закон от 22 ноября 1995 № 171-ФЗ «О государственном регулировании производства и оборота этилового спирта, алкогольной и спиртосодержащей продукции и об ограничении потребления (распития) алкогольной продукции»

<sup>13</sup> Государственная программа Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности», утверждена постановлением Правительства Российской Федерации от 15 апреля 2014 г. № 328 и федеральная целевая программа «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», утверждена постановлением Правительства Российской Федерации от 21.05.2013 г. № 426

На более ранних стадиях находятся отечественные технологии производства авиационного биотоплива из биомассы микроводорослей, перспективные с точки зрения потенциально высокой рыночной конкурентоспособности и возможностей локального производства в суровых климатических условиях. Для развития данного направления необходимо совершенствование процессов промышленного культивирования, сбора и переработки биомассы, создание экономичных и высокопроизводительных систем культивирования закрытого типа — фотобиореакторов. Активные исследования в этой сфере проводятся в МГУ им. М.В. Ломоносова, РХТУ им. Д.И. Менделеева, РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина». В ходе выполнения работ в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям научно-технического комплекса России на 2014–2020 гг.» разрабатываются технологии получения авиационного керосина на основе переработки липидов фотомикроорганизмов и растительных масел в НИЦ «Курчатовский институт», во Всероссийском научно-исследовательском институте по переработке нефти, Самарском государственном техническом университете.

Таким образом, создание и широкое практическое внедрение технологий получения авиационного топлива из различных видов биомассы является одним из направлений развития биотопливной отрасли, имеющим стратегическое значение как с точки зрения влияния на глобальное потепление и неблагоприятные экологические и климатические изменения на планете, так и по значительному потенциалу возможностей для развития экономики и решения социальных задач.

В мировом масштабе технологии производства синтетического керосина из биомассы находятся на разных стадиях готовности к промышленному производству в зависимости от используемых видов сырья и путей конверсии. К настоящему времени международную сертификацию ASTM прошли пять различных технологических процессов. Проведены наземные и воздушные испытания двигателей и самолетов, выполнены многочисленные тестовые полеты с применением биокеросина из различных видов биомассы в смеси с нефтяным керосином, осуществляется переход к регулярному использованию таких смесей в авиации. Однако на коммерческий уровень к настоящему времени выведена только технология HEFA, которая и обеспечивает поставки авиационного биокеросина для практического применения.

Процессы масштабирования и коммерческого внедрения технологий имеют ряд барьеров,

главный из которых — недостаточная рыночная конкурентоспособность авиационного топлива. Отставание в развитии технологий получения синтетического керосина ставит под сомнение достижение установленных ИКАО глобальных целей по объемам производства и экологическим показателям на горизонте планирования до 2050 г. Основные усилия стран — технологических лидеров сконцентрированы сегодня на идентификации и преодолении барьеров для внедрения технологий, для чего вырабатываются соответствующие стратегии и инструменты поддержки. В связи с этим представляется целесообразным изучение опыта западных стран по решению проблем развития отрасли, в целом характерных и для России.

В настоящее время, несмотря на наличие достаточной ресурсной базы и научных заделов, необходимых для развития технологий, сориентированных на конверсию различных видов биомассы, включая биомассу фотосинтезирующих микроорганизмов, масштабирование российских технологий получения синтетического керосина значительно отстает от мирового уровня. Принимая во внимание цели устойчивого развития на национальном и мировом уровне, для Российской Федерации в современных условиях наиболее актуальной представляется разработка комплексных биотехнологий замкнутого цикла, обеспечивающих, помимо получения целевого продукта — авиационного топлива, — решение задач социально-экономического и экологического характера. В связи с этим необходима высокая доступность готовых к коммерциализации конкурентоспособных отечественных технологий биорефининга, сориентированных на глубокую переработку биомассы, включая приоритетное использование отходов и микроводорослей. Крупные биотехнологические предприятия, применяющие подобные технологии, могли бы стать центрами научно-технического, производственного, экономического, социального и территориального развития. Реализуемость таких сложных многоцелевых проектов с высоким мультипликативным социально-экономическим эффектом зависит от многих факторов и требует, в первую очередь, формирования национальной программы по развертыванию биотопливной отрасли. Одновременно необходимы значительные усилия по созданию соответствующей нормативно-правовой базы, мотивирующей к участию в научно-производственной и инвестиционно-финансовой деятельности в данном сегменте, а также использование наиболее эффективных и доказавших свою практическую значимость инструментов государственной поддержки.



## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № 14.574.21.0139 (Уникальный идентификатор проекта RFMEFI57417X0139).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дергачева Е.А. Особенности глобальной техносферы биосферы. *Век глобализации*. 2011, 2, 53–61.
2. Egli F., Johnstone N., Menon C. Identifying and inducing breakthrough inventions: An application related to climate change mitigation. OECD Science, Technology and Industry Working Papers, Paris: OECD Publishing, 2015, 1–51. <http://dx.doi.org/10.1787/5js03zd40n37-en>
3. Бондаренко Л.В., Маслова О.В., Белкина А.В., Сухарева К.В. Глобальное изменение климата и его последствия. *Вестник РЭУ им. Г.В. Плеханова*. 2018, 2 (98), 84–93. doi: <http://dx.doi.org/10.21686/2413-2829-2018-2-84-93>
4. Вирт Д.А. Глобальное управление в сфере изменения климата. Парижское соглашение: новый компонент климатического режима ООН. *Вестник международных организаций*. 2017, 12 (4), 186–214.
5. OECD Environmental outlook to 2050. OECD Publishing, 2012, 1–350. <https://doi.org/10.1787/9789264122246-en>
6. Berntsen T., Jan Fuglestedt J. Global temperature responses to current emissions from the transport sectors. *PNAS*. Edited by Field C.B., Carnegie Institution of Washington, Stanford, CA. 2008, 105 (49), 19154–10159. [www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0804844105](http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0804844105)
7. Aviation contribution to climate change. Chapter 1. ICAO Environmental Report. ICAO. 2010, 38–65.
8. Global networks, global citizens. Global market forecast 2018-2037. ICAO, Airbus GMF. 2018, 3–83.
9. Biofuels for aviation. Technology brief. International Renewable Energy Agency. IRENA, Abu Dhabi. 2017, 2–49.
10. Sustainable aviation biofuels guide. ICAO. 2017, 3–58. [www.icao.int/environmental-protection/Pages/ICAO\\_UNDP.aspx](http://www.icao.int/environmental-protection/Pages/ICAO_UNDP.aspx)
11. Alternative Aviation Fuels: Overview of Challenges, Opportunities, and Next Steps. US Department of Energy, DOE/EE-1515. 2017, 3–80.
12. On board. A sustainable future. Aviation and climate change. ICAO Environmental Report, 2016, 10–249. <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/ENV2016.aspx>
13. Грядунов К.И., Козлов А.Н., Самойленко В.М., Ардешери Ш. Сравнительный анализ показателей качества авиационных керосинов, биотоплива и их смесей. *Научный Вестник МГТУ*. 2019, 22 (5), 67–75. doi: [10.26467/2079-0619-2019-22-5-67-75](https://doi.org/10.26467/2079-0619-2019-22-5-67-75).
14. Pavlenko N., Kharina A.. Policy and Environmental Implications of Using HEFA+ for Aviation. The International Council on Clean Transportation (ICCT). Working Paper. 2018, 1–9.
15. Halog A., Bortsie-Aryee N.A. Environmental Assessment of a Forest Derived “Drop-in” Biofuel. *Biofuels — Economy, Environment and Sustainability*. Edited by Zhen Fang, Rijeka, Croatia: IntechOpen, 2013, 287–302. doi: [10.5772/50478](https://doi.org/10.5772/50478)
16. ASTM D4054 Users’ Guide. Publication of the Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative Certification-Qualification Team® (CAAFI). Authored by Rumizen M., Federal Aviation Administration with support from members of the ASTM International Emerging Fuels Subcommittee, 2013, 3–54.
17. Статус технической сертификации альтернативных видов авиационного топлива Рабочий документ. CAAF/2-WP/07 (Представлено Секретариатом ИКАО). Конференция по авиации и альтернативным видам топлива. Мехико, Мексика, 11–13 октября, 2017, 1–9.
18. Lee D.S., Fahey D.W., Forster P.M., et al. Aviation and global climate change in the 21st century. *Atmospheric Environment*, 2009, 43, 3520–3537. doi: [10.1016/j.atmosenv.2009.04.024](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.04.024)
19. Достижения и проблемы в области сертификации альтернативных видов топлива. Международная организация гражданской авиации. Рабочий документ. CAAF/2-WP/17 (Представлено Соединенными Штатами Америки). Конференция по авиации и альтернативным видам топлива. Мехико, Мексика, 11-13 октября, 2017, 1–11.
20. IATA Guidance Material for Sustainable Fuel Aviation Fuel Management, International Air Transport Association, 2<sup>nd</sup> Edition, 2015, 1–30.
21. Douvartzides S.L., Charisiou N.D., Papageridis K.N., Goula M.A. Green Diesel: Biomass Feedstocks, Production Technologies, Catalytic Research, Fuel Properties and Performance in Compression Ignition Internal Combustion Engines. *Energies*, 2019, 12 (809), 1–41. doi: [10.3390/en12050809](https://doi.org/10.3390/en12050809)
22. Baldino C., Berg R., Pavlenko N., Searle S. Advanced alternative fuel pathways: Technology overview and status. The International Council on Clean Transportation (ICCT). Working Paper. 2019, 1–31.
23. Bauen A., Gomez I., Nijeweme D.O., Paraschiv M. Alternative fuels. Expert group report. Studies and reports. European Union Commission. 2017, 3–86. doi: [10.2777/741279](https://doi.org/10.2777/741279)
24. Gielen D., Oksanen S. Advanced Aviation Biofuels: ready for take-off? IRENA, 2019, 1–6. <https://energypost.eu/advanced-aviation-biofuels-ready-for-take-off>
25. Destination green. The next chapter. 2019 Environmental Report. Aviation and Environment. ICAO, 2019, 10–374.

26. National Algal Biofuels Technology Review. U.S. DOE (U.S. Department of Energy). Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Bioenergy Technologies Office. 2016, 2–195.
27. Conference on aviation and alternative fuels. Working paper ICAO, Aviation biofuels efficiency in terms of CO<sub>2</sub> emission reduction (Presented by the Russian Federation). CAAF/2-WP/20. Mexico City, Mexico, October 11–13, 2017, 1–6.
28. Дмитриева Т.М. Оценка выбросов в атмосферу загрязняющих веществ и парниковых газов самолетами гражданской авиации России. *Метеорология и гидрология*, 2014, 9, 41–48.
29. Иванова А.Р. Влияние авиации на окружающую среду и меры по ослаблению негативного воздействия. *Труды Гидрометцентра России*, 2017, (365), 5–14.
30. Третьяков В.Ф., Французова Н.А., Третьяков К.В., Тальшинский Р.М., Илолов А.М.. Способ получения реактивного топлива из биоэтанола. Patent RU 2510389, Опубл.27.03.2014 г.
31. Яновский Л.С., Федоров Е.П., Варламова Н.И., Попов И.М. и др. Российские авиационные керосины из альтернативного сырья. *Двигатель*, 2012, 3 (81), 6–8.
32. Stepacheva A.A., Matveeva V.G., Sulman E.M., Sapunov V.N. Fatty acid hydrotreatment using hypercrosslinked polystyrene-supported pd catalysts to produce biofuels, *Chemical Engineering Transactions*, 2016, 52, 625–630. doi: 10.3303/CET1652105
33. Stepacheva, A.A., Sapunov, V.N., Sulman, E.M. et al. Catalytic Hydrodeoxygenation of Fatty Acids for Biodiesel Production. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 2016, 11 (2), 125–132. doi:10.9767/brec.11.2.538.125–132

## Development of Technologies and Prospects for the Introduction of Aviation Biofuels

T.N. GAEVA<sup>1\*</sup>, A.N. VARAKIN<sup>3</sup>, L.A. GULYAEVA<sup>2</sup>, D.I. ISHUTENKO<sup>3</sup>, A.L. KULINICH<sup>2</sup>, P.A. NIKULSHIN<sup>2</sup>, A.A. PIMERZIN<sup>3</sup> and R.G. VASILOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow, 123182, Russia

<sup>2</sup> All-Russian Research Institute for Oil Refining, Moscow, 111116, Russia

<sup>3</sup> Samara State Technical University, Samara, 443100, Russia

\*e-mail: gaeva@mail.ru

Received December 30, 2019

Revised April 26, 2020

Accepted September 12, 2020

**Abstract**—An overview of the current state of production technologies of biojet fuels in the world and in Russia is presented. The contribution of the aviation sector to climate change processes and the likelihood of achieving global environmental goals in the event of large-scale production of alternative aviation fuels are assessed. The level of commercialization, constraining factors and possible measures to support synthetic kerosene production technologies are reviewed. Special attention is paid to the current international certification procedure for aviation biofuels.

**Key words:** aviation biofuel, biojet fuels, synthetic kerosene, global warming, climate change, greenhouse gases emission, sustainable biofuel, ASTM certification, biomass conversion, photosynthetic microorganisms, microalgae.

**Funding**—The review was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project no. 14.574.21.0139 (Unique Project Identifier RFMEFI57417X0139).

**doi:** 10.21519/0234-2758-2020-36-5-13-30