

Синтетические углеводородные топлива: развитие технологий, проблемы и перспективы применения в авиационных ГТД

Савельев А.М., Савельева В.А., Кадочников И.Н., Козлов В.Е.,
Кострица С.А., Новаковский Д.В.

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва
e-mail: amsavelev@ciam.ru

Рассмотрены тенденции развития дозвуковой реактивной авиации, связанные с применением синтетических углеводородных авиационных топлив в контексте проблемы декарбонизации воздушного транспорта. Представлен обзор технологий производства синтетических авиационных топлив, сертифицированных по стандарту ASTM D4054. Проанализированы некоторые аспекты применения синтетических авиационных топлив в ГТД. Дано обоснование необходимости всестороннего исследования характеристик горения синтетических топлив и построения моделей их суррогатов и реакционных кинетических моделей воспламенения и горения паров синтетических топлив в смесях с воздухом.

Ключевые слова: реактивная авиация, газотурбинный двигатель, альтернативное топливо, характеристики горения, модель горения, эмиссия

Synthetic hydrocarbon fuels: technological advancements, issues and potential for use in aviation GTEs

Savelyev A.M., Savelyeva V.A., Kadochnikov I.N., Kozlov V.E., Kostritsa S.A., Novakovskiy D.V.
CIAM, Moscow

The article examines trends in the development of subsonic jet aircraft related to the application of synthetic hydrocarbon aviation fuels for the issue of air transport decarbonization. An overview of the manufacturing technologies for synthetic aviation fuels certified according to the ASTM D4054 standard is presented. Some aspects of using synthetic aviation fuels in GTEs are analyzed. The rationale for carrying out a thorough investigation into combustion characteristics of synthetic fuels is provided, along with recommendations for modeling their surrogates and developing reaction kinetic models of ignition and combustion of synthetic fuel vapors mixed with air.

Keywords: jet aircraft, gas turbine engine, alternative fuel, combustion characteristics, combustion model, emissions

Введение

Дозвуковая реактивная авиация находится сегодня в преддверии серьезных перемен, связанных с постепенной заменой традиционных, нефтяных авиационных топлив на альтернативные. Эта замена – объективный процесс, обусловленный двумя основными причинами. Первая из них – постепенное истощение рентабельных запасов нефти и связанное с этим удорожание технологических процессов ее добычи и переработки. Вторая причина – сформировавшийся тренд на декарбониза-

цию воздушного транспорта, осуществление которой связывают во многом с применением альтернативных топлив с уменьшенным углеродным следом. Согласно экспертным оценкам, при сохранении современных тенденций роста спроса на авиаперевозки авиация к 2050 году будет ежегодно выбрасывать в атмосферу не менее 2700 млн тонн углекислого газа, что в несколько раз превышает уровень 2015 года [1]. С целью ограничения авиационной эмиссии CO₂ исполнительные органы Европейского союза, а также Международная организация гражданской авиации (ИКАО) предпри-

няли ряд важных шагов. Первым из них стало решение Еврокомиссии о включении авиации в Европейскую систему торговли квотами на выбросы парниковых газов (EU ETS) [2]. В соответствии с этим решением авиаперевозчики, совершающие рейсы в страны Европейской экономической зоны, в число которых, помимо стран Евросоюза, входят Исландия, Норвегия и Лихтенштейн, обязаны компенсировать свои выбросы квотами, эмитируемыми системой EU ETS. Со своей стороны ИКАО поставила целью на 2021...2035 годы углеродно-нейтральный рост объема авиаперевозок – сохранение эмиссии CO₂ на уровне 2019 года [3]. Для реализации этих планов была учреждена программа компенсации и сокращения выбросов диоксида углерода для международной авиации (CORSIA). Программа разделена на три этапа: два добровольных этапа (2021...2023 и 2024...2026 годы), когда программа CORSIA будет действовать только на международных рейсах для государств, изъявивших желание принять в ней участие, и обязательный этап (с 2027 года), когда программа распространит свое действие на все страны, за исключением наименее развитых, малых островных, развивающихся государств и развивающихся стран, не имеющих выхода к морю. Согласно утвержденным процедурам программы CORSIA, эксплуатанты воздушного транспорта должны производить компенсационные платежи за дополнительные (по отношению к уровню 2019 года) выбросы CO₂. В 2017 году Комитет по охране окружающей среды от воздействия авиации ИКАО на десятом совещании (CAEP/10) принял стандарты по эмиссии CO₂, которые описаны в томе 3 приложения 16 к Конвенции о международной гражданской авиации [4]. В 2019 году Еврокомиссия представила межгосударственное «Зеленое соглашение», устанавливающее достижение к 2050 году углеродно-нейтрального влияния в течение жизненного цикла для всей промышленности и транспорта, в том числе воздушного, во всех странах Евросоюза [5].

В качестве одного из основных механизмов декарбонизации воздушного транспорта в настоящее время рассматривают применение альтернативных топлив. В перспективе до 2030...2035 годов декарбонизацию воздушного транспорта связывают в первую очередь с углеводородными синтетическими топливами (УСТ) с уменьшенным углеродным следом, получившими название устойчивых авиационных топлив (SAF), т.е. топлив, отвечающих тренду на устойчивое развитие. В более отдаленной перспективе, до 2050 года, предполагают переход на углеродно-нейтральные УСТ и криогенное водородное топливо [6]. Впервые об устойчивых авиационных топливах как средстве ограничения авиационной эмиссии CO₂ было заявлено на конференции ИКАО в Рио-де-Жанейро в 2009 году [7]. Основные рекомендации этой конференции вошли в резолюцию

Ассамблеи ИКАО, а устойчивые авиационные топлива были включены в качестве главного средства в комплекс мер ИКАО [8]. Приоритет использования устойчивых авиационных топлив был зафиксирован в резолюции ИКАО А39 от 2016 года (п. 2 резолюции А39) [3].

Начало систематическому использованию УСТ в авиации было положено в 2011...2015 годах, когда более 2500 коммерческих пассажирских рейсов 22 авиакомпании осуществили с применением УСТ разного типа, в том числе биотоплив, произведенных из яatroфы, растительного масла и камелины (рыжика). Доля УСТ в общем объеме топлива, потребляемого коммерческой авиацией, остается незначительной. По данным Международной ассоциации воздушного транспорта (IATA), объем использования SAF в 2021 году во всем мире составил 120 млн литров, в то время как общий объем потребления авиатоплива достиг 300 млрд литров. Однако уже в ближайшем будущем доля УСТ в мировом объеме потребления авиатоплива будет быстро возрастать. В октябре 2021 года на 77-й сессии Ассамблеи IATA ведущие мировые авиакомпании дали прогнозы по использованию УСТ: 2% мировой потребности в авиатопливе в 2025 году, 5,2% в 2030 году, 60% к середине XXI века [9]. Процесс замещения традиционных нефтяных топлив альтернативными топливами будут регулировать посредством административных мер и поддерживать соответствующими законодательными инициативами. Так, ставки компенсационных платежей по программе CORSIA предполагают определять, учитывая использование синтетических топлив эксплуатантами воздушных судов. Рассматривают законопроекты об обязательных продажах УСТ в аэропортах Евросоюза. Механизм обязательных продаж описан в законопроекте 2021/0205 (COD), опубликованном в 2021 году в рамках законодательных инициатив Еврокомиссии в области климатической политики [10]. В соответствии с этим законопроектом, с 2025 года воздушные суда, вылетающие из стран Евросоюза, обязаны заправляться, вне зависимости от направления их вылета, смесью обычного керосина и УСТ. Особенностью законопроекта является требование к авиакомпаниям заправлять эти суда в аэропортах вылета топливом в объеме не менее 90% потребного для предстоящего перелета. Данное требование фактически означает запрет для авиаперевозчиков осуществлять рейсы в страны Евросоюза с запасом топлива, который позволяет не производить заправку при обратном вылете.

В США также предпринимают значительные усилия по переводу авиации на синтетические топлива. Массачусетский технологический институт в кооперации с рядом университетов США учредил центр передового опыта по альтернативным реактивным топливам (ASCENT), в задачи которого входит создание научно-

технического задела в области углеводородных синтетических топлив [11]. Деятельность ASCENT, финансируемая Федеральным авиационным управлением (FAA), NASA и министерством обороны, является важной составной частью национальной программы США по исследованию и совершенствованию углеводородных реактивных топлив – NJFCP [12]. FAA инициировало разработку международного стандарта ASTM D4054, в соответствии с которым осуществляется сертификация альтернативных углеводородных топлив, предлагаемых для дозвуковой реактивной авиации. Под эгидой FAA реализуется программа CLEEN, в рамках которой осуществляется совершенствование авиационных технологий в направлении снижения энергозатрат, эмиссии и шума, а также проводятся исследования, сертификация и отбор синтетических топлив для дозвуковой реактивной авиации [13]. В реализации данной программы участвуют ведущие разработчики авиационных газотурбинных двигателей [14].

Большое внимание развитию авиационных синтетических топлив уделяют и в Китае. Являясь страной с наиболее высокими темпами роста спроса на авиационное топливо, Китай в 2012 году начал реализовывать собственную программу по альтернативным авиационным топливам, которую в настоящее время координирует Национальный инновационный альянс промышленного сотрудничества в области альтернативного авиационного топлива. Эту программу выполняет ряд научно-исследовательских центров, занимающихся разработкой альтернативных видов авиационного топлива, а также соответствующих стандартов и процедур сертификации. В 2012 году ВВС Китая в сотрудничестве с производителями топлива приступили к осуществлению программы по разработке авиационного углеводородного топлива на основе угля для военного и коммерческого использования [15].

Решение задачи декарбонизации авиации также связывают с применением водорода. Экспертное сообщество рассматривает несколько возможных сценариев развития дозвуковой водородной авиации. Так, по оценкам экспертов группы Clean Sky (государственно-частное партнерство Еврокомиссии и европейской авиационной промышленности), появления первых воздушных судов на водородном топливе можно ожидать в 2030...2040 годах [6]. При этом по одному из сценариев к 2050 году водород станет основным топливом в региональной и ближнемагистральной авиации, для которой его применение рентабельно. Доля водорода в целом в авиации составит к 2050 году приблизительно 40%. Остальные 60% придется на углеродно-нейтральные УСТ, которые будут использоваться в среднемагистральной и дальнемагистральной авиации. По другому, более амбициозному сценарию доля водорода к 2050

году достигнет 60%, при этом водород будет использоваться и в среднемагистральной, и даже в дальнемагистральной авиации. Какой из этих сценариев окажется реалистичнее, зависит от множества факторов, в частности от того, как быстро будут разворачивать инфраструктуру водородной авиации (проблемы развития инфраструктуры рассмотрены в обзоре [16]). Однако независимо от сценария развития можно ожидать, что в дозвуковой реактивной авиации будущего доля углеводородных синтетических топлив будет весьма значительной.

По всей видимости, авиационные газотурбинные двигатели современного поколения постепенно адаптируются к использованию смесей синтетического топлива и традиционного нефтяного топлива, а двигатели следующих поколений будут рассчитаны на использование 100%-х углеродно-нейтральных УСТ. Учитывая, что внедрение углеводородных синтетических топлив регулируют административными мерами, можно заключить, что в будущем на международных авиалиниях останутся только воздушные суда, оснащенные ГТД, способными работать на УСТ. Следовательно, возможность применения УСТ может уже в ближайшем будущем стать фактором, определяющим, с одной стороны, конкурентоспособность ГТД, а с другой – саму возможность эксплуатации ГТД на международных воздушных линиях.

Основные виды синтетических авиационных топлив

Альтернативные топлива, допущенные к использованию в авиации, должны быть сертифицированы по стандарту ASTM D4054. Сертификацию осуществляет Дейтонский университет, входящий в состав центра ASCENT, в тесной координации с Евросоюзом [14]. Процедура сертификации, предусмотренная стандартом ASTM D4054, включает в себя несколько этапов, или уровней [17–19]. На уровнях 1...2 в лабораторных условиях проверяют базовые физико-химические характеристики топлива. На уровне 3 осуществляют проверку характеристик топлива на горелочном устройстве, имитирующем камеру сгорания (combustor/trig testing), а на уровне 4 проверка проходит непосредственно в ходе стендовых испытаний ГТД и ВСУ (engine/APU testing). Необходимость стендовых испытаний ГТД обусловлена в первую очередь различием компонентного состава УСТ и традиционных нефтяных топлив, из-за чего они различаются противоокислительными и противоизносными свойствами, коррозионной агрессивностью по отношению к металлам, склонностью к нагарообразованию и коксоотложениям в элементах проточного тракта ГТД, хладоресурсом, смазывающей способностью, способностью воздействовать на резины и герме-

тики, характеристиками горения. Как сообщает FAA, для стендовых испытаний свои ГТД предоставляли ведущие разработчики двигателей: компании General Electric, Pratt & Whitney, Honeywell и Rolls-Royce [14]. По итогам процедуры сертификации производитель топлива при участии ASTM International готовит исследовательский отчет ASTM, который передается для внутреннего анализа производителям авиационного оборудования (так называемый внутренний обзор OEM). В число производителей авиационного оборудования входят компании Boeing, Airbus, Safran и перечисленные выше двигателестроительные фирмы. В ходе анализа исследовательский отчет ASTM дорабатывают и дополняют. Итоговый отчет должны одобрить представители FAA, OEM и ASTM International, подтвердив, что синтетическое топливо соответствует всем требованиям, предъявляемым к авиатопливам, по безопасности, долговечности и производительности двигателя и воздушного судна. После утверждения отчета ASTM его направляют в ASTM International для утверждения путем голосования. Финальным этапом сертификации является разработка приложения к стандарту ASTM D7566, в котором описывается сертифицированное топливо [19]. Если по результатам испытаний альтернативное топливо допускают к эксплуатации, то определяют пропорцию, в которой топливо должно смешиваться с традиционным нефтяным топливом. Если не допускают, то вырабатывают рекомендации к его производителю по улучшению физико-химических и эксплуатационных свойств альтернативного топлива.

Этот многоэтапный процесс обеспечивает отбор альтернативных топлив для применения в воздушных судах, созданных главными зарубежными производителями – компаниями Boeing и Airbus. Следует отметить, что перечисленные выше разработчики ГТД не только предоставляют свои двигатели для испытаний, но и сами активно участвуют в той части программы CLEEN, которая связана с альтернативными топливами. Так, по сообщению FAA, компания General Electric участвовала в тестировании модельной камеры сгорания, предложенной ASCENT для сертификации топлив (в программе CLEEN компания General Electric ведет также разработку улучшенных версий камер сгорания TAPS [14]). Кроме того, компания исследовала альтернативные топлива с повышенным содержанием циклопарафинов для обеспечения совместимости УСТ с резинами, герметиками и эластомерами [14]. Компания Rolls-Royce принимала участие в тестировании 100%-го синтетического топлива, а также, как и компания General Electric, оценивала уплотнения, совместимые с УСТ. Компания Honeywell принимала участие в расширенных испытаниях топлива HEFA-SPK, а компания Pratt & Whitney – в испытаниях синтетических топлив класса ATJ и CHJ [14].

Нужно подчеркнуть, что сертификация – процедура не только продолжительная, но и весьма затратная. Производитель топлива на уровнях 3 и 4 должен предоставить более 852 000 л топлива [17]. Тем не менее с 2009 года по стандарту ASTM сертифицировано семь УСТ и соответствующих технологических процессов их производства (табл. 1).

В 2009 году была сертифицирована технология производства УСТ из каменного угля, базирующаяся на каталитической конверсии Фишера – Тропша (FT), включающей две основные стадии: 1) получение синтез-газа и 2) восстановительная олигомеризация окиси углерода на катализаторе. Полученные из каменного угля FT-топлива относят к типу CtL. В качестве сырья для производства FT-топлив может использоваться и природный газ, такие топлива относят к типу GtL. Топлива типа CtL и GtL входят в общий класс синтетических керосинов FT-SPK. Несомненным преимуществом FT-топлив является то, что, помимо каменного угля и природного газа, они могут быть получены из биомассы или биогаза, производимого с использованием отходов органического происхождения (древесины, пищевых отходов и т.п.). Эти топлива выделяют в отдельный тип BtL [15]. Топлива класса FT-SPK описаны в приложении A1 стандарта ASTM D7566.

В 2011 году по стандарту ASTM D4054 были сертифицированы топлива класса HEFA (hydroprocessed esters and fatty acids). Наиболее отработанными являются технологии получения таких топлив из масложирового сырья, представленного по большей части пальмовыми, соевыми, рапсовыми маслами, отработанными кулинарными маслами и жирами (HEFA-SPK, приложение A2). В целом технологии переработки масел и жиров подразумевают две стадии гидрообработки: на первой посредством гидродеоксигенации происходит удаление из органических молекул кислорода, а на второй применяется гидроизомеризация для улучшения низкотемпературных свойств [19]. Новые разработки в области переработки масел нацелены на уменьшение капитальных и эксплуатационных затрат с последующим снижением стоимости конечного продукта. По технологии HEFA производят не только реактивные топлива, но и дизельные; для обозначения реактивных топлив в литературе часто применяют аббревиатуру HRJ (hydroprocessed renewable jet fuel).

Процесс производства синтетического изопарафинового топлива SIP-HFS, включенного в стандарт ASTM D7566 в 2014 году (приложение A3), базируется 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 даль-

нейших преобразований получают продукт с характеристиками, соответствующими авиационному топливу [19].

Синтетический керосин с ароматическими соединениями FT-SPK/A был включен в стандарт ASTM D7566 в 2015 году (приложение A4). В настоящее время разрешено его использование только в виде смеси. При условии увеличения доли ароматических веществ до нужного уровня применение этих топлив рассматривают как один из возможных путей перехода к использованию чистого синтетического топлива, без смешения с нефтяными топливами [19].

В 2016...2018 годах прошли сертификацию технологии получения топлив АТJ «спирты в реактивное топливо»: АТJ-SPK – изобутанол и АТJ-SPK – этанол (приложение A5). По данной технологии спирты обез-

воживают и перерабатывают в реактивное топливо. Существует множество процессов синтеза спиртов. Сахар может быть непосредственно превращен в спирты путем сбраживания, крахмалы разлагают до сахаров и затем подвергают ферментации до образования спиртов. Превращение лигноцеллюлозного сырья сложнее, процесс включает следующие стадии: гидролиз; ферментацию или газификацию; снова ферментацию [20]. Для преобразования спиртосодержащего сырья в углеводородную смесь его подвергают дегидрированию, олигомеризации и гидроочистке [21].

В 2020 году была сертифицирована технология производства топлива СНJ, основанная на каталитическом гидротермолизе растительных и кулинарных масел (приложение A6 стандарта ASTM D7566). Важным

Табл. 1. Альтернативное топливо для авиации, включенное в стандарт ASTM D7566

Класс топлива	Сырье	Технология производства	Год сертификации	Предел для смешения, %
FT-SPK	Каменный уголь (CtL), природный газ (GtL), твердые бытовые отходы, лигноцеллюлозная биомасса: отходы древесины и т.п. (BtL)	Газификация с получением синтез-газа, каталитическая конверсия Фишера – Тропша	2009	50
HEFA-SPK	Непищевые растительные масла, животный жир	Гидрогенизационная переработка масел (жиров), сложных эфиров и жирных кислот	2011	50
SIP-HFS (гидрогенизированные ферментированные сахара и синтетические изопарафины)	Лигноцеллюлозная биомасса	Ферментация сахаров с получением фарнезенов и последующим гидрооблагораживанием	2014	10
FT-SPK/A	Твердые бытовые отходы, сельскохозяйственные отходы, лигноцеллюлозная биомасса: отходы древесины и т.д.	Газификация и процесс Фишера – Тропша + алкилирование легких ароматических соединений не нефтяного происхождения	2015	50
АТJ-SPK – изобутанол (технология «спирт в топливо»)	Биомасса, используемая для производства крахмала и сахара, целлюлозная биомасса, сельскохозяйственные отходы	Каталитическая конверсия биоспиртов (изобутанол) в непредельные углеводороды с последующей олигомеризацией и гидроочисткой	2016	30
АТJ-SPK – этанол (технология «спирт в топливо»)	Биомасса, используемая для производства крахмала и сахара, целлюлозная биомасса, сельскохозяйственные отходы	Каталитическая конверсия биоспиртов (этанол) в непредельные углеводороды с последующей олигомеризацией и гидроочисткой	2018	50
СНJ (синтетическое реактивное топливо, полученное каталитическим гидротермолизом)	Масло сои, ятрофы, рыжика (камелины), водорослей, кулинарные масла	Каталитический гидротермолиз масел (жиров), сложных эфиров и жирных кислот с последующим гидрооблагораживанием	2020	50
НС-HEF	Углеводороды биологического происхождения на основе водорослей	Гидрообработка масел, сложных эфиров и жирных кислот, полученных из микроводорослей	2020	10

достоинством топлив СНJ является то, что они, в отличие от топлив класса HEFA-SPK, содержат ароматические углеводороды, поэтому их наряду с топливами FT-SPK/A считают перспективными с точки зрения перехода на использование 100%-го синтетического топлива.



Рис. 1. ГТД Passport компании General Electric [27]



Рис. 2. ГТД GTF Advantage компании Pratt & Whitney [28]



Рис. 3. ГТД LEAP-1A компании CFM International [30]

В приложении A7 стандарта ASTM D7566 описана технология производства топлива HC-HEFA, сертифицированного в 2020 году. Она во многом аналогична технологии производства топлив класса HEFA с той разницей, что в ней используется углеводородное сырье, полученное из водорослей определенного вида [19].

Как уже было отмечено, по результатам тестирования альтернативного топлива определяют пропорцию, в которой его необходимо смешивать с нефтяным топливом, чтобы полученная смесь удовлетворяла стандарту ASTM D7566. Необходимость смешения с нефтяным топливом вызвана двумя основными причинами. Первая – это недостаточная плотность УСТ [22]. Вторая – малая концентрация или даже полное отсутствие ароматических компонентов в составе УСТ, из-за чего при взаимодействии УСТ с резиновыми уплотнениями, герметиками или эластомерами происходит их усадка (уменьшение объема) и, как следствие, возникает риск утечек топлива и возгорания ГТД [23–25]. Очевидно, что достигнуть углеродной нейтральности воздушного транспорта, смешивая УСТ с нефтяными топливами, нельзя, поэтому такое смешение рассматривают лишь как промежуточный шаг в декарбонизации авиации. Решение же этой проблемы связывают с использованием 100%-х углеродно-нейтральных УСТ. Поэтому в настоящее время идут активные работы по адаптации ГТД к таким топливам. По всей видимости, в этих работах достигнут определенный прогресс. В мае 2022 года компания General Electric провела испытания ГТД Passport (рис. 1) на 100%-м синтетическом топливе [26]. Об аналогичных испытаниях своего ГТД GTF Advantage (рис. 2) сообщила и компания Pratt & Whitney [28]. Работы по адаптации ГТД и в целом авиации к использованию 100%-го синтетического топлива активно ведут и в Европе. В рамках проекта VOLCAN (VOL avec Carburants Alternatifs Nouveaux) компании Airbus, Safran, Dassault Aviation совместно с Французским центром аэрокосмических исследований (ONERA) и министерством транспорта исследуют проблему совместимости 100%-х УСТ с различными системами современных воздушных судов. Сообщается о проведении в ноябре 2021 года первого летного испытания авиалайнера A319neo, в ходе которого один из двигателей LEAP-1A компании CFM International (рис. 3) работал на 100%-м УСТ производства компании Total [29]. Компания Rolls-Royce, разрабатывающая инновационный ГТД UltraFan (рис. 4), сообщает, что данный двигатель рассчитан на использование 100%-го УСТ [31].

Наиболее отработанной является технология производства синтетических FT-топлив из угля и природного газа. Эти топлива производятся в промышленных масштабах и с 2009 года допущены к применению в качестве авиационного топлива в смесях с традиционным неф-



Рис. 4. ГТД UltraFan компании Rolls-Royce [31]

тяным топливом. Нужно подчеркнуть, что FT-топлива, полученные из ископаемого сырья, не являются углеродно-нейтральными и характеризуются лишь уменьшенным углеродным следом, что обеспечивается в первую очередь снижением процентного содержания углерода в топливе. Если в традиционных топливах отношение $H/C = 1,93...1,96$ [32–34], то в топливах FT-SPK оно может составлять $2,1...2,2$ [33–35]. Еще одним фактором, способствующим уменьшению углеродного следа FT-топлив, является теплота сгорания, которая у синтетических FT-топлив может достигать $44,3$ МДж/кг [36], превышая более чем на 1 МДж/кг теплоту сгорания традиционного керосина марки Jet A ($43,1$ МДж/кг), поэтому при неизменных параметрах термодинамического цикла ГТД производство одной и той же мощности требует меньшего расхода топлива.

Наиболее перспективны с точки зрения декарбонизации авиации углеродно-нейтральные биотоплива из растительного сырья или водорослей, такие как HEFA-SPK. Углеродная нейтральность этих топлив обусловлена тем, что при их сгорании в атмосферу выбрасывается то же количество CO_2 , что было поглощено сырьем при фотосинтезе глюкозы [37]. Строго говоря, полностью углеродно-нейтральными эти топлива назвать нельзя, так как технологический процесс их производства может предусматривать использование минеральных источников энергии, сжигание которых всегда сопровождается эмиссией CO_2 . Для характеристики степени углеродной нейтральности с учетом данного фактора используют расчет баланса жизненного цикла биотоплива (life cycle assessment). Показатель эмиссии CO_2 на основании оценки жизненного цикла биотоплива – количество выброшенного в атмосферу CO_2 в граммах на 1 МДж затраченной энергии – для современных биотоплив характеризуется следующими значениями: для биотоплива из соевого масла – $15...20$ г, из рапсового масла – 18 г [37]. Значение данного показателя для традиционного нефтяного топлива составляет

90 г [37]. Таким образом, современные технологии производства биотоплив уже позволяют добиться кратного уменьшения эмиссии CO_2 . В будущем, при использовании атомной энергетики и возобновляемых источников энергии для производства биотоплив, степень их углеродной нейтральности может быть увеличена. Производство углеродно-нейтральных топлив класса HEFA-SPK осуществляют в основном в Евросоюзе такие компании, как TotalEnergies (Франция), Neste (Финляндия), SkyNRG (Голландия) и др. [38–40].

Рассматривают и другие технологии производства углеродно-нейтральных топлив. Здесь прежде всего нужно отметить технологии, базирующиеся на переработке CO_2 в отходящих и дымовых газах или даже на прямом улавливании CO_2 из атмосферы. Некоторым компаниям, например LanzaTech, уже удалось создать топливо ATJ-SPK из CO_2 дымовых газов. Сырье для этого топлива – этанол – производят из оксидов углерода, содержащихся в дымовых газах, с использованием бактерий *Clostridium autoethanogenum*. Компания LanzaTech успешно продемонстрировала свою технологию в экспериментальном масштабе в Новой Зеландии, используя отходящие газы сталелитейной промышленности в качестве сырья для микробной ферментации [41].

В 2018 году была сертифицирована технология синтеза УСТ путем совместной переработки нефти и углеводородного сырья для альтернативных топлив [42]. Два синтетических топлива данного типа описаны в приложении 1 к стандарту ASTM D1655: топливо со-processed HEFA, получаемое путем совместной переработки нефтяного сырья и жиров и масел, и топливо со-processed FT, получаемое из нефти и углеводородов, синтезированных методом Фишера – Тропша [43].

С начала эксплуатации УСТ в авиации прошло более 10 лет, но доля УСТ в общем объеме потребляемого авиацией топлива остается небольшой. Основная причина этого – стоимость УСТ: по разным данным, цены на УСТ в среднем в $2...5$ раз выше, чем на традиционное нефтяное топливо. Так, согласно экономическим оценкам крупнейшей ирландской лизинговой компании FPG Anentum, для самолета A320neo, построенного в 2018 году, при среднем использовании воздушного судна 9 л.ч/день дополнительные ежегодные затраты авиакомпаний составляют $60\ 000$ долл. при добавке 1% УСТ к традиционному топливу, $300\ 000$ долл. при добавке 5% УСТ и $600\ 000$ долл. при добавке 10% УСТ в расчете на самолет в год, включая расходы на транспортировку, хранение и утилизацию топлива. Эти оценки соответствуют стоимости топлив в 2021 году: Jet A – $\sim 1,75$ долл/галлон, УСТ – ~ 4 долл/галлон [44]. По оценкам коалиции экспертов авиационной отрасли ATAG, по мере развертывания производства SAF и снижения его стоимости, цены на синтетические топлива значи-

тельно снизятся и приблизятся к ценам на традиционные нефтяные топлива, как это наблюдалось на других рынках возобновляемых источников энергии [45]. К настоящему времени авиакомпания заключили несколько крупных форвардных соглашений о покупке SAF, в соответствии с которыми цены на SAF лишь немного превышали цены на традиционное авиационное топливо [45].

О перспективах производства и применения авиационных синтетических углеводородных топлив в России

Работы по созданию альтернативных топлив для авиации и других видов транспорта в Российской Федерации находятся на начальном этапе. До недавнего времени эти работы ограничивались в основном отдельными исследованиями в области технологий производства альтернативных топлив. Данные исследования позволили создать определенный научно-технический задел. В МИТХТ им. М.В. Ломоносова была разработана технология получения реактивных топлив из биоэтанола [46]. Ее особенностью является использование гетерогенного цеолитного, содержащего железо катализатора, значительно ускоряющего конверсию биоэтанола в целевой продукт. Исследования технологических процессов получения альтернативного топлива из биомассы, в частности из микроводорослей, проводили в МГУ им. М.В. Ломоносова [47]. В Институте нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН в ходе выполнения работ в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014...2020 годы» были рассмотрены и изучены различные аспекты получения синтетических топлив из биомассы [48–50]. В РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина разрабатывают технологию производства FT-топлив типа GtL из попутного нефтяного газа [51; 52]. Также в РГУ проводят исследования в области использования растительного сырья для получения жидких углеводородных топлив [53; 54]. Совместно с ООО «Центр разработки низкоуглеродных технологий» университет ведет разработку новых оригинальных технологий получения УСТ. В частности, специалистами РГУ и ЦРНТ предложена технология производства авиационного топлива из лигноцеллюлозного сырья – SAF-PCN. Предлагаемая технология может быть реализована на нефтеперерабатывающих заводах, располагающих установками замедленного коксования и глубокого гидрокрекинга [55; 56].

В НИЦ «Курчатовский институт» исследовали возможность переработки липидов в биотопливо посред-

ством специальных катализаторов. Для этого был создан штамм дрожжей *Yarrowia lipolytica*, на клеточной стенке которого локализованы ферменты – липазы, катализирующие процесс переработки липидов в биотопливо. Дрожжевая культура *Yarrowia lipolytica* помогла сохранить все преимущества ферментного катализа и исключить дорогостоящий процесс выделения и очистки фермента. Дополнительное преимущество рассматриваемой технологии в том, что дрожжевая культура *Yarrowia lipolytica* демонстрирует хороший рост на глицерине, который образуется в качестве побочного продукта при производстве биотоплива [57].

Специалисты ЦИАМ им. П.И. Баранова в кооперации с Институтом нефтехимического синтеза имени А.В. Топчиева РАН исследовали технологию получения высокоплотных синтетических реактивных топлив из каменного угля, базирующуюся на каталитической конверсии Фишера – Тропша [22]. Также в ЦИАМ провели тестирование углеводородного топлива, синтезированного в МИТХТ им. М.В. Ломоносова из биоэтанола, синтетического топлива, полученного в Институте горючих ископаемых из угля, и синтетического топлива, полученного в ООО «Объединенный центр исследований и разработок (ЮРД-Центр)» из природного газа [58]. Объем выполненных тестов соответствовал уровням 1...2 стандарта ASTM D4054.

Правительство РФ в 2021 году утвердило Транспортную стратегию Российской Федерации до 2030 года с прогнозом до 2035 года, которая в числе приоритетных путей снижения выбросов парниковых газов предусматривает развитие технологий производства альтернативных топлив [59]. В этой стратегии впервые четко сформулированы основные принципы государственной политики в отношении проблемы декарбонизации транспорта и применения альтернативных топлив.

Осенью 2021 года в СМИ появилось сообщение о намерениях российской энергетической компании «Газпром нефть» создать Евразийский SAF-альянс – ассоциацию разработчиков и производителей синтетических топлив – совместно с авиакомпаниями «Аэрофлот», «S7 Group» и «Волга-Днепр», НИЦ имени Н.Е. Жуковского и ГосНИИГА [60]. Планировалось разработать дорожную карту по исследованию свойств УСТ, поддержке соответствующих НИОКР, разработке стандартов и технических регламентов использования УСТ. Опытные партии синтетических топлив предполагалось выпустить на московском и омском нефтеперерабатывающих заводах компании «Газпром нефть». Первый полет самолета на отечественном синтетическом топливе планировалось выполнить не позднее 2024 года.

Россия имеет огромный сырьевой потенциал для производства биотоплив. В 2020 году выработка расти-

Табл. 2. Доступность сырья для производства биотоплива в России

Тип сырья	Виды сырья	Топливо	Годовой объем производства сырья в РФ
Масло жирное	Отработанные кулинарные масла и жир	HEFA-SPK, CHJ-SPK	80 тыс. т
	Талловые масла Биомасса из водорослей		160...240 тыс. т 13 тыс. т
Твердые бытовые отходы	Ил от очистки хозяйственно-бытовых сточных вод Пищевые отходы	FT-SPK, ATJ-SPK, SIP-HFS	275 млн м ³ (90% не перерабатываются)

тельных масел в РФ составила 7,3 млн тонн, увеличившись за последние три года на 26%. Это сопоставимо с объемом производства нефтяного авиационного керосина в 2021 году – 12,8 млн тонн [61]. При этом потребление растительных масел росло не так значительно, что подняло уровень экспорта с 3,7 до 4,9 млн тонн. Наибольшие относительные темпы роста наблюдаются в сегменте рапсового масла, объем производства которого за последние три года почти удвоился. Помимо растительных масел, существует потенциал по выработке перспективных видов сырья: порядка 160...240 тыс. тонн талловых масел и до 80 тыс. тонн отработанных кулинарных масел и жиров [61] (табл. 2).

Для Российской Федерации освоение альтернативных топлив актуально не только в связи с потребностями декарбонизации энергетики и транспорта, но и ввиду перспективы исчерпания основных континентальных месторождений нефти уже в ближайшие десятилетия. Согласно данным, опубликованным в 2022 году информационным агентством Neftegaz.ru, имеющихся запасов нефти хватит приблизительно на 39 лет [62]. Эти данные хорошо согласуются с оценкой геологоразведочного холдинга «Росгеология», согласно которой исчерпания запасов нефти можно ожидать приблизительно через 30 лет [63]. Перспективы нефтедобычи во второй половине XXI века в Российской Федерации связывают главным образом с арктическим шельфом. Однако добыча углеводородов на арктическом шельфе требует новых технологий, проведения большого объема геологоразведочных работ и привлечения значительных инвестиций. Вопрос о том, может ли Российская Федерация целиком покрыть потребности в углеводородах за счет арктического шельфа в современных условиях, остается пока открытым. Кроме того, существуют альтернативные оценки запасов углеводородов на континентальном шельфе Арктики, согласно которым объемы этих запасов не столь велики, как оценивают российские специалисты (см., например, [64; 65]). В этих условиях значение альтернативных топлив для реактивной авиации может существенно возрасти. Тем более, что сырьем для топлив класса FT-SPK могут служить природный газ и уголь, запасы которых в Российской Федерации значительно превышают запасы нефти.

Природный газ в сжиженном состоянии (СПГ) рассматривают и как самостоятельное альтернативное топ-

ливо для авиации [66]. В 1988...1989 годах в Советском Союзе испытывали летающую лабораторию Ту-154ЛЛ с двигателями, работающими на жидком водороде и СПГ. Эти исследования показали возможность применения СПГ в качестве авиационного топлива. СПГ обладает немалым потенциалом декарбонизации. Сокращение выбросов CO₂ при сжигании СПГ обусловлено тем, что массовая концентрация углерода в метане, основном компоненте СПГ, заметно меньше, чем в традиционном топливе. Однако, как и в случае с водородом, применению СПГ в качестве топлива препятствует его более низкая объемная энергетическая плотность: по этому параметру СПГ приблизительно в 1,5 раза уступает как нефтяным топливам, так и УСТ.

В Российской Федерации, с учетом ее природно-климатических условий, в качестве альтернативного авиационного топлива возможно применять сжиженные углеводородные газы или авиационное сконденсированное топливо (АСКТ), предложенное в качестве альтернативного топлива в ЦИАМ [67]. АСКТ – это смесь углеводородов от пропана до гексана, доминирующим компонентом в которой являются бутаны. Как и сжиженный природный газ, АСКТ характеризуются более низкой массовой концентрацией углерода. Продукты сгорания АСКТ экологически более чистые, чем продукты сгорания бензина, что обусловлено отсутствием в них ароматических углеводородов и серосодержащих соединений [68]. К настоящему времени успешно проведены стендовые испытания на АСКТ ГТД ТВ2-117ТГ, адаптированного к использованию этого топлива, и летные испытания экспериментального вертолета Ми-8 [69].

Особенности компонентного состава синтетических топлив и их характеристик горения

Как уже было отмечено выше, компонентный состав УСТ отличается от состава традиционных нефтяных топлив. Так, синтетические топлива класса FT-SPK, HEFA-SPK и ATJ, производство которых в промышленных масштабах либо уже ведется, либо осваивается, имеют две основные особенности: в их компонентном составе доминируют изоалканы – разветвленные изомеры из класса насыщенных углеводородов [70] – и почти полностью отсутствуют ароматические компоненты. Традицион-

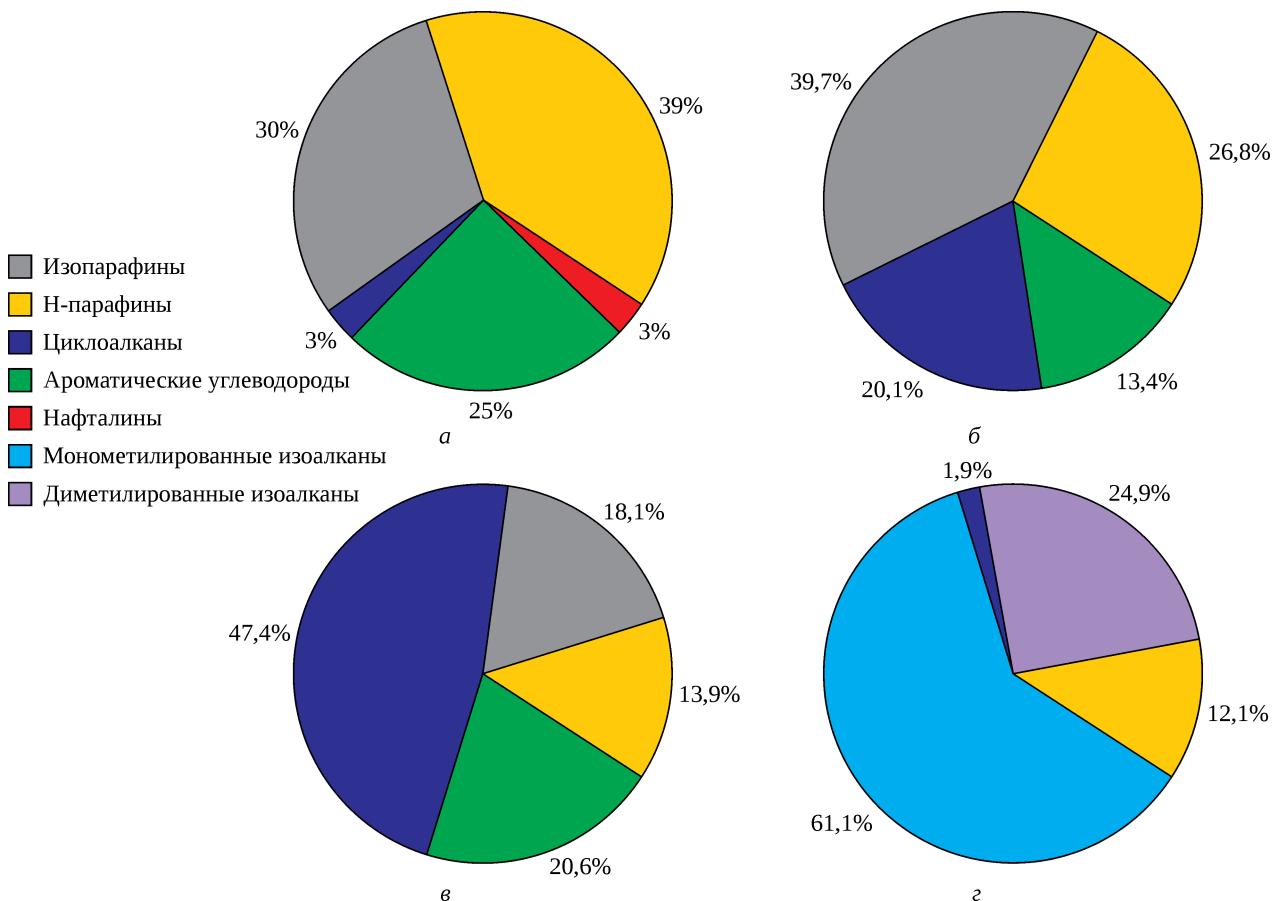


Рис. 5. Компонентный состав традиционных нефтяных топлив и FT-топлива, получаемого из природного газа: а – Jet A POSF 4658 [71]; б – JP-8 POSF 10264 [72]; в – JP-5 POSF 10289 [72]; г – S-8 [73]

ные нефтяные топлива содержат приблизительно равное количество изоалканов и нормальных алканов. На рис. 5 показан состав трех традиционных нефтяных топлив и FT-топлива Syntroleum S-8, получаемого из природного газа. Основные компоненты синтетического топлива S-8 – это монометилированные и диметилированные изоалканы. Общая концентрация изоалканов в топливе S-8 достигает 86%. Столь выраженное доминирование изоалканов является типичным для большинства FT-топлив (рис. 6). Именно этим объясняется увеличенное отношение Н/С в данных топливах по сравнению с обычными топливами (табл. 3). Если в традиционных топливах массовая концентрация водорода составляет 13,5...13,9% то в УСТ она может достигать 15,5%.

Следует подчеркнуть, что синтетические топлива, произведенные по методу Фишера – Тропша даже из одного и того же сырья, могут заметно различаться по групповому составу изоалканов. Так, в топливе Shell GTL, полученном из природного газа, содержатся преимущественно изоалканы с числом атомов углерода от 8 до 12 [78]. В топливе Syntroleum S-8 распределение изоалканов по длине углеродной цепочки более широкое: от C7 до C16 [78]. Такое многообразие групповых составов изоалканов, а также проблемы иденти-

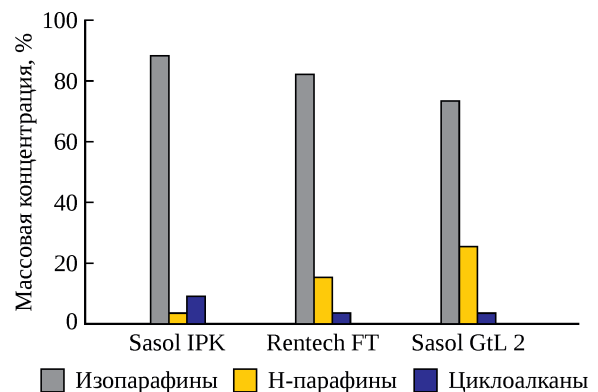


Рис. 6. Компонентный состав FT-топлив Sasol IPK, Rentech FT, Sasol GtL 2 [74; 75]

Табл. 3. Отношение Н/С в традиционных и FT-топливах

Топливо	Н/С	Источник
Jet A POSF 4658	1,96	[32]
JP-5	1,92	[76]
S-8 POSF 4734	2,14...2,19	[77]
Shell GTL	2,19...2,20	[77]
Sasol IPK	2,16...2,17	[77]
R-8 POSF 5469	2,152	[35]

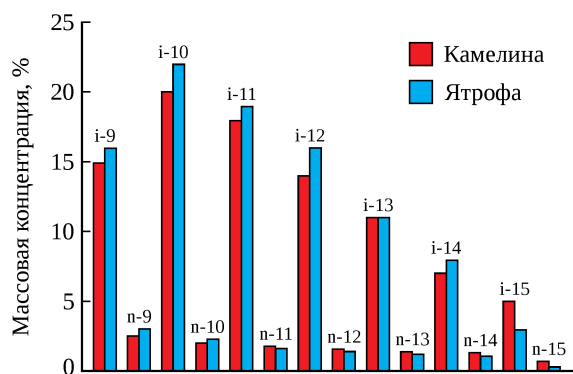


Рис. 7. Структурно-групповой состав топлив класса HEFA-SPK компании UOP, полученных из масла камелины и ятрофы [79]

фикации основных изомеров весьма затрудняют моделирование химических и физических свойств синтетических FT-топлив [78].

Доминирование изоалканов характерно и для биотоплив класса HEFA-SPK. Так, например, в составе топлив компании UOP, полученных из камелины и ятрофы, во всех группах от C9 до C15 количество изоалканов много больше, чем нормальных алканов (рис. 7) [79]. Еще более выражено преобладание изоалканов в топливах класса ATJ и SIP-HFS [70].

Отсутствие ароматических углеводородов в топливах FT-SPK, HEFA-SPK и ATJ является основной причиной проблемы совместимости этих топлив с резинами и герметиками, препятствующей использованию 100%-х УСТ в настоящее время. Ее решение может потребовать освоения промышленного производства УСТ, содержащих ароматические компоненты, – топлив класса FT-SPK/A или CHJ, технологии изготовления которых пока недостаточно развиты с точки зрения их коммерческого применения [80]. Нужно, однако, подчеркнуть, что работы по адаптации ГТД к использованию 100%-х УСТ, ведущиеся в настоящее время, ориентированы в первую очередь на биотоплива класса HEFA-SPK, которые характеризуются наименьшим углеродным следом. В частности, 100%-е УСТ этого класса использовались в упомянутых выше полетных испытаниях авиалайнера A319neo, а также в испытаниях ГТД в компаниях General Electric и Pratt & Whitney. Весьма вероятно, что в результате этих работ будет создана технология (присадки к топливу, новые материалы и т.п.), обеспечивающая совместимость топлив HEFA-SPK с ГТД, и освоения промышленного производства топлив FT-SPK/A или CHJ не потребуются.

ВВС США имеют определенный опыт эксплуатации топлив с низким содержанием ароматических углеводородов. Речь идет, в первую очередь, о топливе JP-7 с высокой термоокислительной стабильностью, которое применяли ранее в самолете-разведчике SR-71 Blackbird, а в настоящее время рассматривают как основное топ-

ливо для высокоскоростных прямоточных воздушно-реактивных двигателей, например SJX61-1 компании Rocketdyne [81]. Согласно опубликованным данным, топливо JP-7 содержит лишь три объемных процента ароматических углеводородов [82]. Нужно, однако, отметить, что двигатель самолета-разведчика SR-71 – ГТД J58-P4 компании Pratt & Whitney – был весьма специфичен (например, для розжига камеры сгорания в нем использовалось топливо на основе алкилированных борводородов), поэтому применимость использованных в нем технических решений, в частности обеспечивающих совместимость топлива с резинами и герметиками, для гражданских ГТД не является очевидной.

Особенности компонентного состава синтетических топлив FT-SPK, HEFA-SPK и ATJ отражаются на многих их характеристиках, и в частности на характеристиках горения. Наиболее выраженные различия между ними и традиционными топливами здесь проявляются в периоде задержки воспламенения (ПЗВ) топливных паров в смесях с воздухом. Обусловлено это в основном двумя факторами. Первый фактор – существенно бóльшие ПЗВ у изоалканов, чем у нормальных алканов. Показателем продолжительности предпламенного периода, как известно, является цетановое число. Цетановые числа линейных изомеров алканов намного больше, чем у разветвленных изомеров. Например, линейный изомер молекулы $C_{16}H_{34}$ – н-гексадекана характеризуется максимальным цетановым числом 100, тогда как цетановое число разветвленного изомера молекулы $C_{16}H_{34}$ – 2,2,4,4,6,8,8-гептаметилнонана равно 15, т.е. в шесть раз меньше [83]. Поэтому увеличение доли разветвленных алканов в топливе и уменьшение доли линейных алканов всегда ведет к увеличению ПЗВ. С другой стороны, ароматические углеводороды характеризуются еще более продолжительными предпламенными периодами (например, этилбензол имеет цетановое число 8 [83]), и поэтому удаление ароматических углеводородов из топлива, наоборот, способствует уменьшению ПЗВ. Какой из этих двух факторов оказывается в итоге решающим, зависит от химического состава конкретного топлива.

На рис. 8 показаны экспериментальные зависимости ПЗВ трех FT-топлив: S-8, Sasol IPK, Shell GTL – от обратной температуры в стехиометрических смесях с воздухом при давлении 20 атм в сравнении с аналогичной зависимостью для традиционного нефтяного топлива Jet A [77]. Качественно кривые температурных зависимостей ПЗВ синтетических топлив повторяют кривую топлива Jet A и также состоят из областей высокотемпературного воспламенения, низкотемпературного воспламенения и области NTC (область обратной температурной зависимости). Однако, в количественном отношении имеет место заметное различие:

в области NTC, а также в низкотемпературной области топлива S-8 и Shell GTL характеризуются более коротким ПЗВ; ПЗВ топлива Shell GTL меньше, чем ПЗВ топлива Jet A, приблизительно в 2 раза в области NTC и в 3...4 раза в области низкотемпературного воспламенения. Интересно отметить, что топливо S-8, которое так же, как и топливо Shell GTL, производится из природного газа, ближе по времени воспламенения к топливу Jet A, чем топливо Shell GTL. Одна из причин этого – отмеченное выше различие в групповом составе алканов и изоалканов этих топлив. Топливо Sasol IPK, производимое из угля, имеет увеличенное по сравнению с топливом Jet A время задержки воспламенения в области NTC, а по сравнению с топливом Shell GTL период задержки воспламенения топлива Sasol IPK в области NTC в 3 раза больше. Такая разница в характерис-

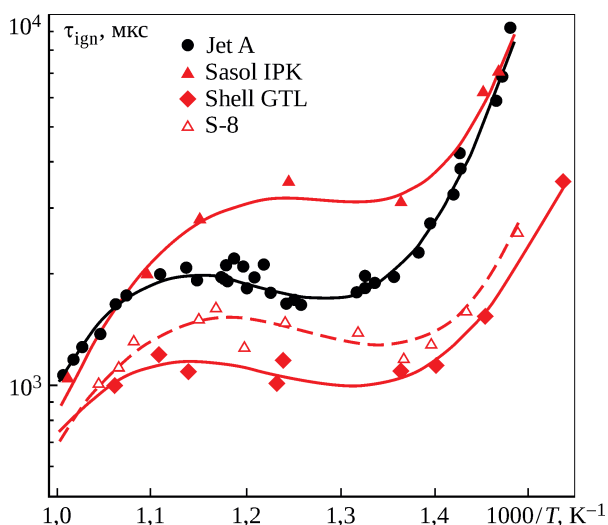


Рис. 8. Период задержки воспламенения паров топлив Jet A, Sasol IPK, Shell GTL и S-8 в смесях с воздухом, $\phi = 1$, $p = 20$ атм [77]

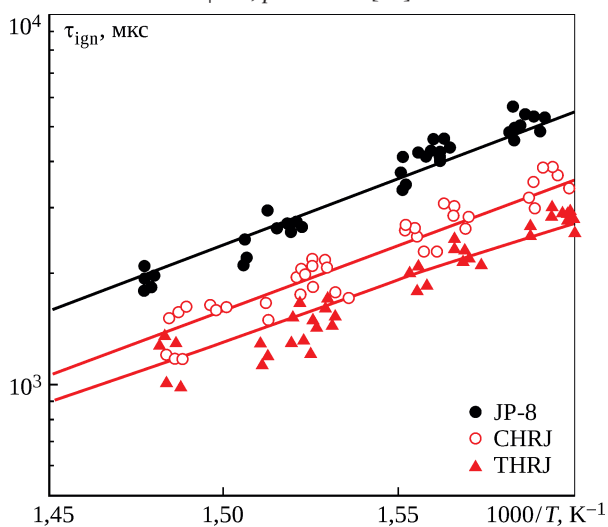


Рис. 9. Период задержки воспламенения паров топлив JP-8, CHRJ, и THRJ в смесях с воздухом, $\phi = 1$, $p = 20$ атм [84]

тиках воспламенения FT-топлив значительно затрудняет разработку моделей их суррогатов и кинетических моделей воспламенения и окисления паров FT-топлив в смесях с воздухом.

На рис. 9 показаны ПЗВ биотоплива CHRJ (топливо HRJ, произведенное из камелины) и биотоплива THRJ (топливо HRJ, произведенное из талловых жиров) в низкотемпературной области воспламенения в сравнении с ПЗВ топлива JP-8. Можно видеть, что биотоплива CHRJ и THRJ имеют более короткий ПЗВ по сравнению с топливом JP-8.

Биотопливо HRJ-5 в сравнении с традиционными нефтяными топливами JP-5 и JP-8 (рис. 10) в низкотемпературной области воспламенения при давлении 20 атм также имеет более короткий ПЗВ. В области NTC ПЗВ биотоплива приблизительно в 2 раза короче, чем ПЗВ

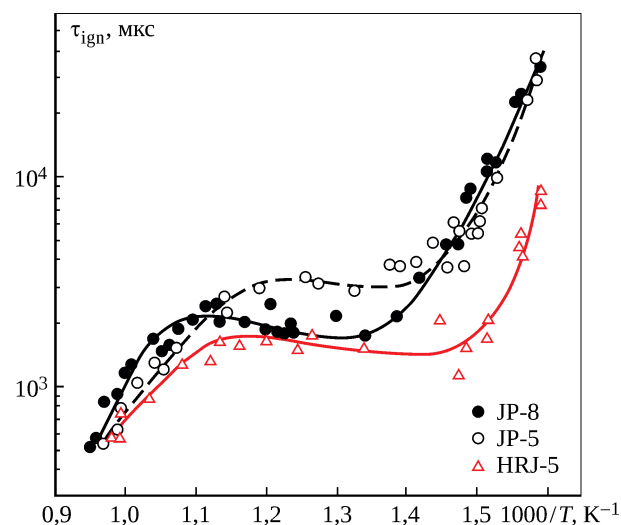


Рис. 10. Период задержки воспламенения паров топлив JP-8, JP-5 и HRJ-5 в смесях с воздухом, $\phi = 1$, $p = 20$ атм [85]

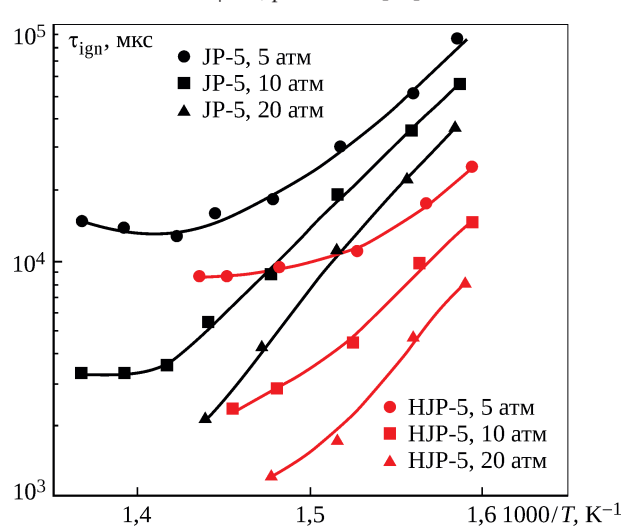


Рис. 11. Период задержки воспламенения паров топлив JP-5 и HRJ-5 в смесях с воздухом при разном давлении, $\phi = 1$ [86]

топлива JP-5. В высокотемпературной области воспламенение биотоплива HRJ-5 происходит с той же скоростью, что и топлив JP-5 и JP-8.

В низкотемпературной области воспламенения при разном давлении: 5, 10 и 20 атм (рис. 11) – ПЗВ биотоплива HRJ-5 в 2...3 раза меньше, чем топлива JP-5.

Из данных, приведенных на рис. 8 и рис. 10, следует, что в высокотемпературной области воспламенения ПЗВ FT-топлив и топлив класса HRJ близки к ПЗВ традиционных нефтяных топлив. У топлив класса ATJ, напротив, в экспериментах обнаружилось некоторое увеличение ПЗВ. На рис. 12 показаны ПЗВ синтетических топлив BioJet ATJ и GEVO ATJ [87] в стехиометрических смесях с воздухом при давлении 3 атм.

Компонентный состав топлив влияет и на другие характеристики горения, такие, например, как скорость распространения пламени и температура вспышки. На рис. 13 приведены экспериментальные данные [35] о скорости распространения ламинарного пламени в смесях с воздухом паров топлива JP-8, FT-топлива Sasol IPK и биотоплива CHRJ при температуре 470 К и атмосферном давлении. Вследствие более высокой скорости окисления паров синтетических топлив кислородом скорость распространения пламени в их смесях с воздухом характеризуется увеличенными значениями. Температура вспышки FT-топлив Shell FT и Sasol FT, согласно данным Дейтонского университета и Лаборатории ВВС США, ниже на несколько градусов температуры вспышки топлива JP-8 [75].

Особенности компонентного состава синтетических топлив отражаются и на дистилляционной кривой топлива, или кривой разгонки топлив. В табл. 4 приведены данные [75] о температуре начала (t_n) и конца (t_k) кипения топлив JP-8, Shell FT и Sasol FT. Точки начала кипения этих топлив близки. Однако точки конца кипения синтетических топлив Shell FT и Sasol FT лежат заметно ниже. Это говорит, во-первых, о более узком фракционном составе синтетических топлив, а во-вторых, о более высокой упругости паров синтетических топлив при повышенных температурах.

Отсутствие ароматических углеводородов в синтетических топливах влияет не только на скорость окисления их паров в смесях с воздухом, но и на показатели сажеобразования, прежде всего такие, как высота некоптящего пламени и пороговый индекс сажеобразования. Высота некоптящего пламени синтетических топлив превышает показатель традиционных нефтяных топлив. Согласно ГОСТ 10227-2013 высота некоптящего пламени топлив ТС-1 и РТ должна быть не меньше 25 мм, показатель товарных топлив близок к этому пределу. Так, авиационное топливо ТС-1 первого сорта, произведенное Нижневартовским нефтеперерабатывающим объединением компании «Роснефть», имеет, согласно

данным лабораторных исследований, высоту некоптящего пламени 26 мм [88]. Авиационное топливо ТС-1 высшего сорта, произведенное ООО «Лукойл-Волгоград-нефтепереработка», имеет высоту некоптящего пламени 25,5 мм. У синтетических топлив регистрируют увеличенную высоту некоптящего пламени. По данным лабораторных исследований, выполненных в ЦИАМ, высота некоптящего пламени синтетического топлива, полу-

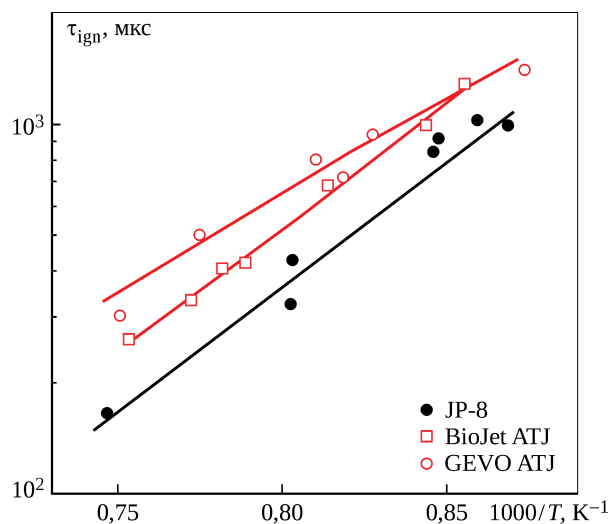


Рис. 12. Период задержки воспламенения паров топлив JP-8, BioJet ATJ и GEVO ATJ в смесях с воздухом, $\phi = 1$, $p = 3$ атм [87]

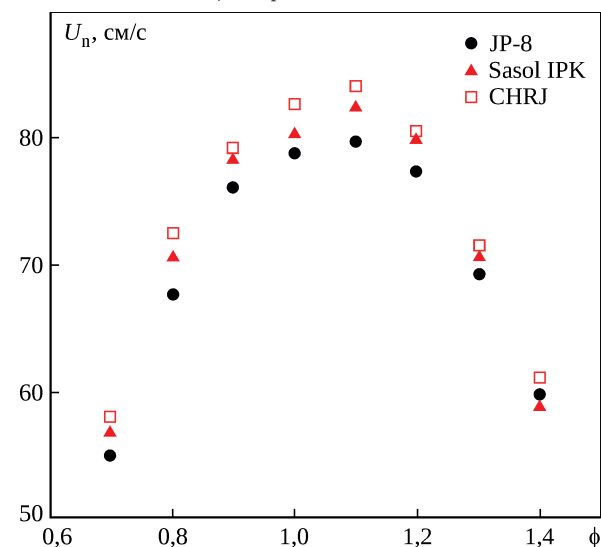


Рис. 13. Скорость распространения ламинарного пламени в смесях паров топлив JP-8, IPK и CHRJ с воздухом при разной стехиометрии, $T = 470$ К, $p = 1$ атм [35]

Табл. 4. Температура начала и конца кипения традиционного топлива и FT-топлив [75]

Топливо	t_n , °C	t_k , °C
JP-8	152	260
Shell FT	146	198
Sasol FT	149	228

ченного из угля, достигает 36 мм [58]. Пороговый индекс сажеобразования (TSI) связан с высотой некоптящего пламени: чем больше высота некоптящего пламени, тем меньше значение TSI. Типичные значения TSI традиционных нефтяных топлив находятся в диапазоне 19...24 [33; 87]. Для УСТ значения TSI заметно ниже: Shell SPK – 8,4; CHRJ – не более 12; THRJ – не более 11,6 [87].

Следствием различий в характеристиках горения УСТ и традиционных нефтяных топлив могут быть некоторые изменения в работе камеры сгорания ГТД при использовании синтетических топлив. В настоящее время, когда их применяют в смесях, эти изменения можно не принимать в расчет, так как всегда можно выбрать такую пропорцию, что особенности характеристик горения УСТ не будут сказываться на работе камеры сгорания заметным образом. Однако в будущем, когда ГТД будут работать на чистых синтетических топливах, учитывать влияние специфических особенностей химии горения этих топлив на характеристики камеры сгорания необходимо. В первую очередь, это касается тех характеристик камеры, которые отличаются особой чувствительностью к кинетике окисления топливных паров: границы бедного и богатого срыва, полнота сгорания при холодном и высотном запуске ГТД, эмиссионные характеристики. Задачей первостепенной важности при адаптации существующих ГТД к использованию 100%-х УСТ или при разработке перспективных ГТД, предназначенных для работы на чистых синтетических топливах, безусловно, является обеспечение надежного розжига камеры сгорания при высотном запуске ГТД. В настоящее время объем жаровой трубы выбирают исходя из условия обеспечения стабильной и устойчивой

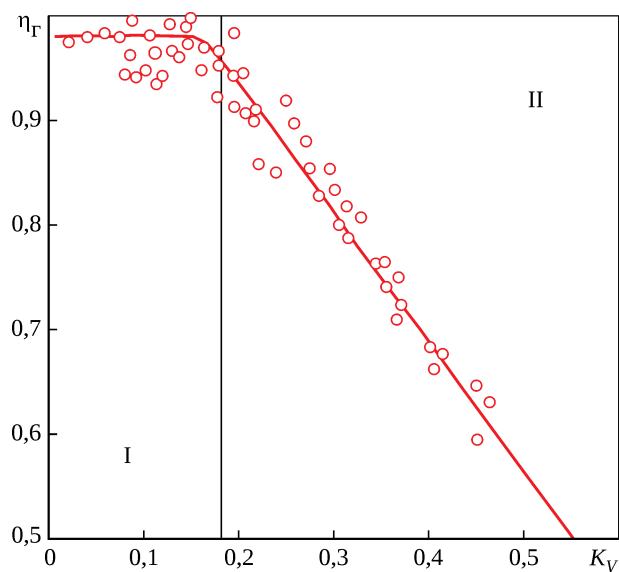


Рис. 14. Зависимость полноты сгорания от параметра форсирования для трубчато-кольцевых камер сгорания [90]

работы камеры сгорания на режиме высотного запуска [89]. При этом используют зависимость полноты сгорания топлива (η_r) от критерия форсированности камеры сгорания (K_V) [89]:

$$\eta_r = f(K_V), \quad K_V = \frac{G_B}{p_k^{*1,25} T_k^* V_{ж}}$$

Здесь G_B – расход воздуха через жаровую трубу; p_k^* и T_k^* – давление и температура торможения за компрессором; $V_{ж}$ – объем жаровой трубы. На рис. 14 показана зависимость η_r от критерия K_V для трубчато-кольцевых камер сгорания [90], на которой выделяются две характерные области: I – область, в которой полнота сгорания определяется эффективностью смешения; II – область, в которой полнота сгорания определяется химической реакцией окисления. На режиме высотного запуска ГТД камера сгорания работает в области II и для надежного розжига камеры и раскрутки ротора с оборотов авторотации полнота сгорания должна быть не меньше 0,7 [89]. Это вынуждает увеличивать объем жаровой трубы относительно ее оптимальных размеров на взлетном или крейсерском режиме, поскольку температура и особенно давление на режиме высотного запуска с оборотов авторотации: $T_k^* = 270$ К, $p_k^* = 3,92 \cdot 10^4$ Па – существенно ниже, чем на взлетном или крейсерском режиме [89]. По своему физическому смыслу критерий K_V характеризует отношение времени химической реакции к времени пребывания топливоздушной смеси в камере сгорания [89]. У синтетических топлив, для которых характерна повышенная скорость окисления, время химической реакции может быть меньше, чем у традиционных топлив, и в таком случае потребный объем жаровой трубы может быть уменьшен. Однако если синтетическое топливо реагирует с кислородом воздуха медленнее, чем традиционное, как, например, топливо GEVO ATJ (см. рис. 12), то объем жаровой трубы, наоборот, необходимо увеличить. В противном случае полнота сгорания топлива может оказаться недостаточной для розжига камеры. Этот простой пример наглядно демонстрирует необходимость детального и всестороннего изучения химии и физики горения синтетических топлив.

Учитывая требования к безопасности полетов воздушных судов, исследованиям процессов горения синтетических топлив в США, Европе и Китае уделяют повышенное внимание. В США эти исследования, как уже было отмечено, являются частью национальной программы по исследованию и совершенствованию углеводородных реактивных топлив – NJFCP [12]. Программа NJFCP включает в себя семь основных направлений, некоторые из них имеют прямое отношение к химии горения топлива. Так, первое направление посвящено изучению химии горения углеводородных топлив в ла-

бораторных условиях с проведением экспериментов на ударных трубах, машинах быстрого сжатия, проточных реакторах, диффузионных горелках и горелках с предварительным смешением, калориметрических бомбах и другом экспериментальном оборудовании, предназначенном для исследования химии горения. Еще одно направление исследований включает в себя эксперименты с оптической диагностикой горения, в том числе горения в турбулентном потоке. В отдельное направление выделены исследования, связанные с разработкой теоретических моделей суррогатов топлив и реакционных кинетических моделей воспламенения и горения топлив. Примечательно, что за разработку моделей суррогатов в программе NJFCR отвечает Принстонский университет, а за разработку реакционных кинетических моделей – Стэнфордский университет. Привлечение столь авторитетных научно-исследовательских центров отражает то значение, которое придают разработке данных моделей как составных частей более общих цифровых моделей рабочего процесса в камерах сгорания перспективных ГТД.

Для Российской Федерации проведение исследований в области горения синтетических авиационных топлив также представляется крайне важной и актуальной задачей. В результате таких исследований будет создан научно-технический задел, который обеспечит технологический суверенитет страны в области разработки ГТД на синтетических топливах. В этой связи нужно отметить, что специалисты ЦИАМ могли бы принять участие в исследованиях, посвященных химии горения синтетических топлив, аналогичных тем, что ведутся в рамках программы NJFCR. Лаборатория диагностики реагирующих потоков ЦИАМ имеет возможность выполнять тонкие физические эксперименты с диффузионными пламенами и пламенами в предварительно перемешанных смесях. Лаборатория оснащена современным экспериментальным оборудованием для оптической диагностики, в том числе ЛИФ-диагностики (лазерно-индуцированная флуоресценция), ПЛИФ-диагностики (планарная ЛИФ) и КАРС-диагностики (когерентное антистоксово рассеяние света). Специалисты лаборатории провели эксперименты с диффузионными пламенами суспензий наночастиц высокоэнергетических материалов в углеводородах [91], в которых был обнаружен ряд специфических эффектов, требующих детального исследования [92]. Кроме того, в ЦИАМ продолжает развиваться научная школа химии и физики горения реактивных топлив, созданная в свое время А.М. Стариком и Н.С. Титовой. В ходе реализации различных исследовательских проектов было разработано семейство реакционных кинетических механизмов. В настоящее время ведется разработка комплексных многокомпонентных суррогатов нового поколения, вос-

производящих как химические, так и физические свойства топлива, включая его дистилляционную кривую [93]. Также начата разработка суррогатов АСКТ и реакционных кинетических механизмов их воспламенения и горения [94].

Переход на углеродно-нейтральные синтетические топлива позволит, как ожидается, решить проблему авиационной эмиссии CO_2 . Но ГТД на УСТ, как и ГТД на традиционных топливах, должны соответствовать требованиям ИКАО и по уровню эмиссии NO_x , CO , негоревших углеводородов и нелетучих твердых частиц. Полного понимания, как изменяются эмиссионные характеристики ГТД при замене традиционных топлив синтетическими, пока нет. Существует точка зрения, что выбросы вредных веществ уменьшаются. Однако она отражает лишь данные экспериментов по исследованию эмиссии нелетучих твердых частиц. Что же касается эмиссии NO_x , то в экспериментах регистрировали не только ее снижение, но и повышение. Так, например, в испытаниях ГТД CFM56-5C4 на режиме крейсерского полета было обнаружено небольшое увеличение эмиссии NO_x при работе двигателя на смеси традиционного топлива и 10% УСТ [95]. Повышение уровня эмиссии NO_x на взлетном режиме, а также на режиме захода на посадку отмечали и в исследованиях эмиссии ГТД V2533-A5, работавшего на синтетическом топливе (эксперимент BurnFAIR при участии компании Lufthansa [96]). По всей видимости, из-за многообразия УСТ вопрос об эмиссионных характеристиках для каждого конкретного топлива нужно решать индивидуально, с применением численного эксперимента. Отдельного всестороннего изучения требует эмиссия альдегидов, увеличение которой наблюдалось в ряде испытаний газотурбинных двигателей разного типа, работающих на синтетических топливах (см., например, [97; 98]). Возможное увеличение эмиссии альдегидов, как одно из последствий замены традиционных топлив синтетическими, отмечали в расчетно-теоретическом исследовании эмиссионных характеристик ГТД на альтернативных топливах в ЦИАМ [99]. Контроль эмиссии альдегидов важен по двум причинам. Во-первых, с точки зрения аэропортовой эмиссии альдегиды (формальдегид, ацетальдегид, акролеин и пропиональдегид), согласно классификации ИКАО и российским природоохранным и санитарным нормам, относятся к опасным загрязнителям воздуха [100; 101]. Во-вторых, альдегиды считают основным прекурсором органических аэрозолей, формирующихся в выхлопных струях ГТД [102]. Эмиссия органических аэрозолей, как и сульфатных, может влиять на радиационные свойства атмосферы, и поэтому контроль за эмиссией альдегидов важен с точки зрения долгосрочного прогноза воздействия реактивной авиации на атмосферу и климат [103]. Еще одна особенность,

проявившаяся в экспериментах с ГТД на синтетических топливах – увеличение эмиссии азотистой кислоты [104]. Ранее специалисты ЦИАМ высказывали предположение о возможном увеличении концентрации азотной и азотистой кислот в выхлопных струях ГТД при работе на топливах, обогащенных водородом [105]. Топлива класса FT-SPK, которые рассматривались в [104], как раз характеризуются более высоким содержанием водорода, чем традиционные нефтяные топлива (см. выше). Следует подчеркнуть, что контроль за эмиссией азотной и азотистой кислот необходим не только с точки зрения защиты экосистем Земли от выпадения кислотных осадков, но и ввиду того, что азотная кислота является основным строительным материалом для так называемых стратосферных полярных облаков, на поверхности которых, как предполагают, активно идут реакции разрушения атмосферного озона. Учитывая это, необходимо еще до начала широкомасштабной эксплуатации синтетических топлив, обогащенных водородом, исследовать причины увеличения эмиссии азотных кислот и оценить уровень их эмиссии на различных режимах работы ГТД.

Заключение

В настоящее время в дозвуковой реактивной авиации сформировалось и успешно развивается новое направление, связанное с использованием авиационных синтетических топлив с пониженным углеродным следом. Это направление возникло как следствие усилий, предпринимаемых государствами – лидерами технологического и промышленного развития в области климатической политики, имеющей своей целью полную замену традиционных нефтяных топлив углеродно-нейтральными синтетическими топливами уже в ближайшие десятилетия.

К настоящему времени сертифицировано семь различных синтетических топлив и технологических процессов их производства по стандарту ASTM D4054. В промышленных масштабах производятся пока топлива двух классов: FT-SPK и HEFA-SPK. Идет подготовка к промышленному производству синтетических топлив ATJ-SPK – изобутанол и ATJ-SPK – этанол. Готовность к производству синтетических топлив других классов оценивают как невысокую.

С точки зрения декарбонизации авиации наиболее перспективны биотоплива, получаемые из растительного сырья или биомассы, поскольку эти топлива характеризуются минимальным углеродным следом. Совершенствование методов производства таких топлив в будущем обеспечит им полную углеродную нейтральность. Однако и сейчас применение синтетических топлив класса HEFA-SPK дает возможностькратно уменьшить выбросы диоксида углерода.

Сегодня авиационные синтетические топлива применяют только в смесях с традиционными нефтяными топливами. Однако такое смешение рассматривают лишь как промежуточный этап в декарбонизации авиации, достижение которой связывают с применением 100%-х синтетических углеродно-нейтральных топлив. Необходимость смешения обусловлена, с одной стороны, сниженной плотностью синтетических топлив, а с другой – проблемой их совместимости с ГТД, вызванной особенностями компонентного состава. Ведущие разработчики ГТД ищут технические решения, способные обеспечить совместимость синтетических топлив с ГТД. К настоящему времени проведены как наземные, так и полетные испытания ГТД на 100%-х синтетических топливах. Результаты этих экспериментов показали, что добиться совместимости углеродно-нейтральных топлив с ГТД возможно.

Развитие технологий создания синтетических топлив в Российской Федерации пока находится на начальном этапе. Усилиями отдельных исследовательских центров и организаций химической и авиационной промышленности, включая ЦИАМ, при содействии ведущих вузов России создан определенный научно-технический задел в области синтетических авиационных топлив. С учетом наличия достаточной ресурсной базы этот задел создает необходимые предпосылки для успешного развития отрасли синтетических авиационных топлив в Российской Федерации.

Различия в компонентном составе синтетических и традиционных топлив отражаются на многих физико-химических характеристиках топлив, в частности на характеристиках горения. Учитывая, с одной стороны, высокие требования к безопасности полетов воздушных судов, а с другой – особую чувствительность отдельных характеристик камеры сгорания к химии горения топлив, необходимо тщательно и всесторонне исследовать особенности горения синтетических топлив и работы камер сгорания ГТД на этих топливах. Данные исследования должны включать в себя и разработку математических моделей горения синтетических топлив, в том числе моделей суррогатов и реакционных кинетических моделей воспламенения и горения паров топлив в смесях с воздухом, как составных частей более общих цифровых моделей рабочего процесса в камерах сгорания ГТД.

Детального исследования требуют и эмиссионные характеристики ГТД на синтетических топливах. В экспериментах отмечено как уменьшение, так и увеличение эмиссии NO_x при замене традиционных топлив синтетическими. Учитывая ожидающееся ужесточение норм на эмиссию NO_x относительно текущего стандарта CAEP/8, уже в ближайшие годы необходимо всесторонне исследовать эмиссию NO_x на всех режимах работы ГТД, и в первую очередь на режимах стандартного взлетно-

посадочного цикла. Не менее тщательного изучения требует и эмиссия альдегидов, а также эмиссия азот-содержащих кислот, увеличение которых наблюдалось в некоторых экспериментах.

Авторы выражают благодарность Л.С. Яновскому за полезные консультации, обсуждение проблем использования синтетических топлив в дозвуковой реактивной авиации.

Литература / References

1. Deane P., Pye S. Biofuels for aviation: review and analysis of options for market development : policy report, February 2016 / INSIGHT_E. 2016. 65 p. (INSIGHT_E policy report ; 6).
2. Directive 2008/101/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 amending Directive 2003/87/EC so as to include aviation activities in the scheme for greenhouse gas emission allowance trading within the Community // Official Journal of the European Union. L series. 2009. P. L 8/3 – L 8/21. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32008L0101> (accessed: 09.06.2023).
3. ICAO. Resolution A39-3: Consolidated statement of continuing ICAO policies and practices related to environmental protection – global market-based measure (MBM) scheme. 2016. 8 p. URL: https://www.icao.int/environmental-protection/documents/resolution_a39_3.pdf (accessed: 13.04.2023).
4. Охрана окружающей среды : прил. 16 к Конвенции о международной гражданской авиации. Т. 3. Эмиссия CO₂ самолетов / Международная организация гражданской авиации. Изд. 1-е. Монреаль : ИКАО, 2017. 40 с. Разд. пар. (Международные стандарты и рекомендуемая практика).
Environmental protection : annex 16 to the Convention on International Civil Aviation. Vol. 3. Aeroplane CO₂ emissions / International Civil Aviation Organization. 1st ed. Montreal: ICAO, 2017. 40 p. Pag. var. (International Standards and Recommended Practices).
5. Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. The European Green Deal : Brussels, 11.12.2019 : COM(2019) 640 final / European Commission. 2020. 24 p. URL: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0002.02/DOC_1&format=PDF (accessed: 13.04.2023).
6. Hydrogen-powered aviation : A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050 / McKinsey & Company for the Clean Sky 2 JU and Fuel Cells and Hydrogen 2 JU. Publication Office of European Commission, 2020. 96 p. URL: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/55fe3eb1-cc8a-11ea-adf7-01aa75ed71a1/language-en> (accessed: 13.04.2023).
7. Потребность в альтернативных видах топлива для авиации : рабочий документ : CAAF/09-WP/3, 16/10/09 / Международная организация гражданской авиации ; (представлено Секретариатом). 6, А-5 с. (Конференция по авиации и альтернативным видам топлива, Рио-де-Жанейро, Бразилия, 16–18 ноября 2009 года). URL: https://www.icao.int/Meetings/caaf2009/Documents/CAAF-09_WP003_ru.pdf (дата обращения: 09.06.2023).
The need for alternative fuels for aviation : working paper : CAAF/09-WP/3, 16/10/09 / International Civil Aviation Organization ; (presented by the Secretariat). 5, А-4 p. (Conference on Aviation and Alternative Fuels. Rio de Janeiro, Brazil, 16 to 18 November 2009). URL: https://www.icao.int/Meetings/caaf2009/Documents/CAAF-09_IP009_en.pdf (accessed: 09.06.2023).
8. ICAO, Assembly – 38th session. A38-18: Consolidated statement of continuing ICAO policies and practices related to environmental protection – Climate change // Resolutions adopted by The Assembly / ICAO, Assembly – 38th session, Montréal, 24 September – 4 October 2013. Provisional edition. 2013. P. 90–101. URL: https://www.icao.int/Meetings/a38/Documents/Resolutions/a38_res_prov_en.pdf (accessed: 13.04.2023).
9. Иванова А. Декарбонизация встала на крыло // Neftegaz.ru. URL: <https://neftegaz.ru/analysis/ecology/706031-dekarbonizatsiya-vstala-na-krylo/> (дата обращения: 13.04.2023). Дата публ.: 03.11.2021.
Ivanova A. Dekarbonizatsiia vstala na krylo [Decarbonization took off]. Neftegaz.ru. URL: <https://neftegaz.ru/analysis/ecology/706031-dekarbonizatsiya-vstala-na-krylo> (accessed: 13.04.2023). Publ. date: 03.11.2021.
10. Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council on ensuring a level playing field for sustainable air transport : Brussels, 14.7.2021 : COM(2021) 561 final : 2021/0205 (COD) / European Commission. 25, [1] p. URL: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:00c59688-e577-11eb-a1a5-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_2&format=PDF (accessed 09.06.2023).
11. ASCENT – the Aviation Sustainability Center : website. URL: <https://ascent.aero/> (accessed: 13.04.2023).

-
12. Overview of the National Jet Fuels Combustion Program / M. Colket, J. Heyne, M. Rumizen, M. Gupta, T. Edwards and W.M. Roquemore, G. Andac and R. Boehm, J. Lovett, R. Williams, J. Condevaux, D. Turner, N. Rizk, J. Tishkoff and Ch. Li, J. Moder, D. Friend and V. Sankaran // *AIAA Journal*. 2017. Vol. 55, no. 4. 18 p. DOI 10.2514/1.J055361.
 13. Continuous Lower Energy, Emissions, and Noise (CLEEN) program // Federal Aviation Administration : website. URL: https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/apl/eee/technology_saf_operations/cleen (accessed: 13.04.2023).
 14. Continuous Lower Energy, Emissions and Noise (CLEEN) program : summary and status report // Federal Aviation Administration : website. Section "Newsroom". URL: <https://www.faa.gov/newsroom/continuous-lower-energy-emissions-and-noise-cleen-program> (accessed: 13.04.2023). Publ. date: 10.09.2021.
 15. Recent development in studies of alternative jet fuel combustion: progress, challenges, and opportunities / Chi Zhang, X. Hui, Y. Lin, Ch.-J. Sung // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 54. P. 120–138.
 16. Палкин В.А. Обзор работ за рубежом по применению альтернативных видов топлива в авиации // *Авиационные двигатели*. 2021. № 4 (13). С. 63–84.
Palkin V.A. Obzor rabot za rubezhom po primeneniiu al'ternativnykh vidov topliva v aviatsii [Review of the abroad works on an application of alternative fuels in aviation]. *Aviatsionnye dvigateli* [Aviation Engines]. 2021. No. 4 (13). P. 63–84.
 17. Rumizen M.A. ASTM D4054 users' guide / a publication of the Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative (CAAIFI) Certification-Qualification Team ; with support from members of the ASTM International Emerging Fuels Subcommittee. 2013. 54 p.
 18. Sustainable aviation fuel prescreening tools and procedures / J. Heyne, B. Rauch, P. Le Clercq, M. Colket // *Fuel*. 2021. Vol. 290. Art. 120004. 8 p. DOI 10.1016/j.fuel.2020.120004.
 19. Rumizen M.A. Qualification of alternative jet fuels // *Frontiers in Energy Research*. 2021. Vol. 9. Art. 760713. 8 p. DOI 10.3389/fenrg.2021.760713.
 20. Wang W.-Ch., Tao L. Bio-jet fuel conversion technologies // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 53. P. 801–822.
 21. Low-carbon aviation fuel through the alcohol to jet pathway / K.P. Brooks, L.J. Snowden-Swan, S.B. Jones, M.G. Butcher, G.-S.J. Lee, D.M. Anderson, J.G. Frye, J. Holladay, J. Owen, L. Harmon, F. Burton, I. Palou-Rivera, J. Plaza, R. Handler, D. Shonnard // *Biofuels for aviation : Feedstocks, technology and implementation* / ed. by C.J. Chuck. Academic Press, 2016. Chap. 6. P. 109–150.
 22. Получение из угля синтетических реактивных топлив, взаимозаменяемых с нефтяными топливами типа Джет А-1 и Т-8В / Л.С. Яновский, Н.И. Варламова, И.М. Попов, В.О. Самойлов, А.Б. Куликов, М.И. Князева, Р.С. Борисов, Д.Н. Рамазанов, А.Л. Максимов // *Нефтехимия*. 2020. Т. 60, № 1. С. 101–113.
Manufacturing of coal-based synthetic jet fuels interchangeable with Jet A-1 and T-8B petroleum fuels / L.S. Yanovskii, N.I. Varlamova, I.M. Popov, V.O. Samoilo, A.B. Kulikov, M.I. Knyazeva, R.S. Borisov, D.N. Ramazanov, and A.L. Maksimov // *Petroleum Chemistry*. 2020. Vol. 60, no. 1. P. 92–103.
 23. Perspectives on fully synthesized sustainable aviation fuels: direction and opportunities / S. Kramer, G. Andac, J. Heyne, J. Ellsworth, P. Herzig and K.C. Lewis // *Frontiers in Energy Research*. 2021. Vol. 9. Art. 782823. 7 p. DOI 10.3389/fenrg.2021.782823.
 24. Effect of fuels, aromatics and preparation methods on seal swell / A. Anuar, V.K. Undavalli, B. Khandelwal, S. Blakey // *The Aeronautical Journal*. 2021. Vol. 125, no. 1291. P. 1542–1565.
 25. Impact of alternative jet fuel and fuel blends on non-metallic materials used in commercial aircraft fuel systems : CLEEN project final report – submitted by The Boeing Company / Federal Aviation Administration. 2011. 58, [3] p. OTA no. DTFWA-10-C-0030.
 26. GE Aviation completes testing of Passport engine using 100% sustainable aviation fuel // GE Aerospace : website. Section "News". URL: <https://www.geaerospace.com/press-release/business-general-aviation/ge-aviation-completes-testing-passport-engine-using-100> (accessed: 13.04.2023). Publ. date: 23.05.2022.
 27. Passport : high bypass turbofan / GE. 2021. 2 p. Data sheet. URL: <https://www.geaerospace.com/sites/default/files/2022-01/GEPassport-DataSheet.pdf> (accessed: 09.06.2023).
 28. Pratt & Whitney successfully tests GTF Advantage engine on 100% sustainable aviation fuel // Pratt & Whitney : website. Section "Newsroom". URL: <https://www.prattwhitney.com/en/newsroom/news/2022/03/15/pw-successfully-tests-gtf-advantage-engine-on-100-sustainable-aviation-fuel> (accessed: 13.04.2023). Publ. date: 15.03.2022.
 29. First A319neo flight with 100% sustainable aviation fuel // Airbus : website. Section "Newsroom". URL: <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2021-10-first-a319neo-flight-with-100-sustainable-aviation-fuel> (accessed: 13.04.2023). Publ. date: 29.10.2021.
-

-
30. LEAP-1A/-1B // MTU Aero Engines : website. URL: <https://www.mtu.de/engines/commercial-aircraft-engines/narrowbody-and-regional-jets/leap-1a/-1b/> (accessed: 09.06.2023).
 31. Blain L. World's largest aircraft engine is fully operational and ready to test // New Atlas : website. URL: <https://newatlas.com/aircraft/rolls-royce-ultrafan-test/> (accessed: 09.06.2023). Publ. date: 22.12.2022.
 32. The experimental evaluation of a methodology for surrogate fuel formulation to emulate gas phase combustion kinetic phenomena / S. Dooley, S.H. Won, J. Heyne, T.I. Farouk, Y. Ju et al. // *Combustion and Flame*. 2012. Vol. 159, no. 4. P. 1444–1466.
 33. Emulating the combustion behavior of real jet aviation fuels by surrogate mixtures of hydrocarbon fluid blends: implications for science and engineering / F.L. Dryer, S. Jahangirian, S. Dooley, S.H. Won, J. Heyne, V.R. Iyer, T.A. Litzinger, and R.J. Santoro // *Energy and Fuels*. 2014. Vol. 28, no. 5. P. 3474–3485.
 34. Experimental and kinetic modeling study of ignition characteristics of RP-3 kerosene over low-to-high temperature ranges in a heated rapid compression machine and a heated shock tube / Y. Mao, L. Yu, Zh. Wu, W. Tao, S. Wang, C. Ruan, L. Zhu, X. Lu // *Combustion and Flame*. 2019. Vol. 203. P. 157–169.
 35. Experimental studies on the combustion characteristics of alternative jet fuels / X. Hui, K. Kumar, Ch.-J. Sung, T. Edwards, D. Gardner // *Fuel*. 2012. Vol. 98. P. 176–182. DOI 10.1016/j.fuel.2012.03.040.
 36. Hileman J.I., Stratton R.W., Donohoo P.E. Energy content and alternative jet fuel viability // *Journal of Propulsion and Power*. 2010. Vol. 26, no. 6. P. 1184–1195.
 37. Pavlenko N., Kharina A. Policy and environmental implications of using HEFA+ for aviation : working paper 2018-06 / The International Council on Clean Transportation. 2018. 9 p.
 38. Do you know about sustainable aviation fuel (SAF)? // TotalEnergies : website. Section “Fuel and Services”. URL: <https://aviation.totalenergies.com/en/fuels-and-services-aviation/sustainable-aviation-fuel> (accessed: 13.04.2023).
 39. Neste my SAF // Neste : website. Section “Products”. URL: <https://www.neste.com/products/all-products/saf> (accessed: 13.04.2023).
 40. Sustainable aviation fuel // SkyNRG : Fueling a new era of progress in aviation : website. URL: <https://skynrg.com/sustainable-aviation-fuel/> (accessed: 13.04.2023).
 41. Simpson S. LanzaTech presentation. 2017. 33 p. (2017 Waste-to-Energy Workshop). URL: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/07/f35/BETO_2017WTE-Workshop_SeanSimpson-LanzaTech.pdf (accessed: 13.04.2023).
 42. Co-processing provision approved and added to ASTM 1655 Annex A1, enables renewable feedstocks in jet fuel // Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative : website. Section "News". URL: <https://www.caafi.org/news/NewsItem.aspx?id=10408> (accessed: 24.05.2023).
 43. Conversion processes // ICAO Environment : website. URL: <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Conversion-processes.aspx> (accessed: 24.05.2023).
 44. Sustainable aviation fuel is a game-changer. 2021. 2 p. (Aviation Insights / FPG Amentum ; June 2021). URL: https://www.fpg-amentum.aero/wp-content/uploads/2021/06/2021_June_Aviation-Insights_FPG-Amentum_Sustainable-aviation-fuel-is-a-game-changer.pdf (accessed: 24.05.2023).
 45. Beginner’s guide to sustainable aviation fuel / Air Transport Action Group. Ed. 3. 2017. 24 p.
 46. Способ получения реактивного топлива из биоэтанола : патент RU 2510389 C1 / Третьяков В.Ф., Французова Н.А., Третьяков К.В., Тальшинский Р.М., Илолов А.М. ; патентообладатель Моск. гос. ун-т тонких хим. технологий им. М.В. Ломоносова (МИТХТ им. М.В. Ломоносова). Заявка № 2012144527/04, 19.10.2012 ; опубл. 27.03.2014, Бюл. № 9.
Tret’jakov V.F., Frantsuzova N.A., Tret’jakov K.V., Talyshinskij R.M., Ilolov A.M. Sposob polucheniia reaktivnogo topliva iz bioetanola [Method of producing reactive fuel from bioethanol]. Patent RU 2510389 C1. Proprietor: Moskovskij gosudarstvennyj universitet tonkikh khimicheskikh tekhnologij imeni M.V. Lomonosova (MITKhT im. M.V. Lomonosova) [Lomonosov Moscow State University of Fine Chemical Technology]. Application no. 2012144527/04, 19.10.2012. Publ. date: 27.03.2014, Bull. no. 9.
 47. Получение газообразных продуктов при пиролизе биомассы микроводорослей / Н.И. Чернова, С.В. Киселева, О.М. Ларина, Г.А. Сычев // *Альтернативная энергетика и экология*. 2018. № 31/36 (279/284). С. 23–34.
Manufacturing gaseous products by pyrolysis microalgal biomass / N.I. Chernova, S.V. Kiseleva, O.M. Larina, G.A. Sytchev // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020. Vol. 45, no. 3. P. 1569–1577.
 48. Гюльмалиев А.М., Кадиев Х.М., Жагфаров Ф.Г. Термодинамика синтеза оксигенатов по Фишеру – Тропшу // *Химия и технология топлив и масел*. 2020. № 1 (617). С. 26–30.
Gyul’maliev A.M., Kadiev K.M., Zhagfarov F.G. Thermodynamics of oxygenatesynthesis by the Fischer-Tropsch method // *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2020. Vol. 56, no. 1. P. 36–42.
-

-
49. Животная биомасса как сырье для производства продуктов основного органического синтеза / М.В. Куликова, А.Ю. Крылова, Ф.Г. Жагфаров, К.О. Крысанова // *Химия и технология топлив и масел*. 2022. № 2 (630). С. 46–51.
Animal biomass as a raw material for basic organic synthesis products / M.V. Kulikova, A. Yu. Krylova, F.G. Zhagfarov, and K.O. Krysanova // *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2022. Vol. 58, no. 2. P. 327–332.
50. Растительная биомасса как сырье для производства продуктов основного органического синтеза // М.В. Куликова, А.Ю. Крылова, Ф.Г. Жагфаров, К.О. Крысанова, А.Л. Лapidус // *Химия и технология топлив и масел*. 2022. № 1 (629). С. 50–55.
Plant biomass as a raw material for producing basic organic synthesis products / M.V. Kulikova, A. Yu. Krylova, F.G. Zhagfarov, K.O. Krysanova, and A.L. Lapidus // *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2022. Vol. 58, no. 2. P. 320–326.
51. Зубарева В.Д., Оздоева А.Х. Особенности экономической оценки применения попутного нефтяного газа для технологии GTL // *Химия и технология топлив и масел*. 2019. № 4 (614). С. 3–8.
Zubareva V.D., Ozdoeva A.Kh. Characteristics of economic appraisal of associated petroleum gas use for GTL technology // *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2019. Vol. 55, no. 4. P. 365–372.
52. Оздоева А.Х. Оценка экономической эффективности применения попутного нефтяного газа для технологии GTL // *Химия и технология топлив и масел*. 2021. № 2 (624). С. 44–50.
Ozdoeva A.Kh. Assessment of the economic efficiency of the use of associated petroleum gas for GTL technology // *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2021. Vol. 57, no. 2. P. 270–278.
53. Продукты пиролиза биомассы – сырье для нефтехимического синтеза / Е.Ю. Сердюкова, Ю.В. Кожевникова, А.Э. Махмудова, Е.С. Зверев // *Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина*. 2021. № 2 (303). С. 95–105. DOI 10.33285/2073-9028-2021-2(303)-95-105.
Serdyukova E. Yu., Kozhevnikova Yu.V., Makhmudova A.E., Zverev E.S. Produkty piroliza biomassy – syr'e dlia neftekhimicheskogo sinteza [Biomass pyrolysis products as feedstock for petrochemical industry]. *Trudy Rossiiskogo gosudarstvennogo universiteta nefti i gaza imeni I.M. Gubkina* [Proceedings of Gubkin University]. 2021. No. 2 (303). P. 95–105. DOI 10.33285/2073-9028-2021-2(303)-95-105.
54. Фролков С.А., Сердюкова Е.Ю., Кожевникова Ю.В. Бионефть как опциональное сырье для производства продуктов, способных послужить альтернативой нефтепродуктам // *Материалы XV научно-практической конференции «Актуальные задачи нефтегазохимического комплекса», итогового заседания технологической платформы «Глубокая переработка углеводородных ресурсов» и I Научной школы молодых ученых «Низкоуглеродные энергоносители и продукты нефтегазохимии», 25 ноября 2022 г. М. : Изд-во РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2023. С. 41–42.*
Frolkov S.A., Serdyukova E. Yu., Kozhevnikova Yu.V. Bioneft' kak opsional'noe syr'e dlia proizvodstva produktov, sposobnykh posluzhit' al'ternativoi nefteproduktam [Bio-oil as an optional raw material for manufacturing of alternatives to petroleum products]. *Proceedings of the XV academic workshop “Relevant issues of petrochemical industry”, closing meeting of the technology platform “Deep processing of hydrocarbon resources” and I Scientific School of Young scientists “Low-carbon energy carriers and products of petrochemistry”*. November 25, 2022. Moscow: Gubkin Publishing House, 2023, P. 41–42.
55. Развитие технологий производства устойчивого авиационного топлива / А.О. Вихрицкая, Н.О. Буров, У.А. Махова, В.Д. Савеленко, М.А. Ершов // *Материалы XV научно-практической конференции «Актуальные задачи нефтегазохимического комплекса», итогового заседания технологической платформы «Глубокая переработка углеводородных ресурсов» и I Научной школы молодых ученых «Низкоуглеродные энергоносители и продукты нефтегазохимии», 25 ноября 2022 г. М. : Изд-во РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2023. С. 96–97.*
Vikhritskaia A.O., Burov N.O., Makhova U.A., Savelenko V.D., Ershov M.A. Razvitie tekhnologii proizvodstva ustoichivogo aviatsionnogo topliva [Development of technologies for producing sustainable aviation fuel]. *Proceedings of the XV academic workshop “Relevant issues of petrochemical industry”, closing meeting of the technology platform “Deep processing of hydrocarbon resources” and I Scientific School of Young scientists “Low-carbon energy carriers and products of petrochemistry”*. November 25, 2022. Moscow: Gubkin Publishing House, 2023, P. 96–97.
56. Разработка технологии получения устойчивого авиационного топлива SAF-ПЧН / Н.О. Буров, Н.А. Климов, В.Д. Савеленко, М.А. Ершов // *Материалы XV научно-практической конференции «Актуальные задачи нефтегазохимического комплекса», итогового заседания технологической платформы «Глубокая переработка углеводородных ресурсов» и I Научной школы молодых ученых «Низкоуглеродные энергоносители и продукты нефтегазохимии», 25 ноября 2022 г. М. : Изд-во РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2023. С. 98–99.*
-

- Burov N.O., Klimov N.A., Savelenko V.D., Ershov M.A. Razrabotka tekhnologii polucheniia ustoichivogo aviatsionnogo topliva SAF-PCH [Development of technologies for producing sustainable aviation fuel SAF-PCH]. Proceedings of the XV academic workshop “Relevant issues of petrochemical industry”, closing meeting of the technology platform “Deep processing of hydrocarbon resources” and I Scientific School of Young scientists “Low-carbon energy carriers and products of petrochemistry”. November 25, 2022. Moscow: Gubkin Publishing House, 2023, P. 98–99.
57. Способ получения гранулированного биокатализатора на основе иммобилизованных клеток дрожжей для проведения реакции переэтерификации : патент RU 2646104 С1 / Борголов А.В., Василов Р.Г., Горин К.В., Готовцев П.М., Дьяков А.В., Сергеева Я.Э. ; патентообладатель Нац. исследоват. центр «Курчатовский институт». Заявка № 2016150156, 20.12.2016 ; опубл. 01.03.2018, Бюл. № 7.
Borgolov A.V., Vasilov R.G., Gorin K.V., Gotovtsev P.M., Dyakov A.V., Sergeeva Ya.E. Sposob polucheniia granulirovannogo biokatalizatora na osnove immobilizovannykh kletok drozhzhei dlia provedeniia reaktsii pereeterifikatsii [Method for producing a granulated biocatalizer based on immobilized yeast cells for ester exchange]. Patent RU 2646104 C1. Proprietor: Natsionalnyj issledovatel'skij tsentr “Kurchatovskij institut” [National Research Centre Kurchatov Institute]. Application no. 2016150156, 20.12.2016. Publ. date: 01.03.2018, Bull. no. 7.
58. Российские авиационные керосины из альтернативного сырья / Л.С. Яновский, Е.П. Федоров, Н.И. Варламова, И.М. Попов, П.В. Бородако, М.Н. Падина // Двигатель. 2012. № 3 (81). С. 6–8.
Yanovskiy L.S., Fedorov E.P., Varlamova N.I., Popov I.M., Borodako P.V., Patsina M.N. Rossiiskie aviatsionnye kerosiny iz al'ternativnogo syr'ia [Russian aviation kerosene made from alternative raw materials]. Dvigatel' [Engine]. 2012. No. 3 (81). P. 6-8.
59. Правительство Рос. Федерации. Распоряжение от 27 ноября 2021 г. № 3363-р, Москва ; Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года. 285 с. Разд. пар.
Pravitel'stvo Rossiiskoi Federatsii [The Government of the Russian Federation]. Rasporiyazhenie ot 27 noiabria 2021 g. no. 3363-r [Order No. 3363-r dated November 27, 2021]. Moscow; Transportnaia strategiya Rossiiskoi Federatsii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda [Transport Strategy of the Russian Federation until 2030 with the forecast up to 2035]. 285 p. Separate pagination.
60. S7 Group совместно с партнерами создает «Евразийский SAF-альянс» // S7 Airlines : сайт. URL: <https://www.s7.ru/ru/news/s7-group-sovmestno-s-partnerami-sozdaet-evraziyskiy-saf-alyans/> (дата обращения: 13.04.2023). Дата публ.: 13.12.2021.
S7 Group sovmestno s partnerami sozdaet “Evraziiskii SAF-al'ians” [S7 Group together with partners creates “Eurasian SAF Alliance”]. S7 Airlines website. URL: <https://www.s7.ru/ru/news/s7-group-sovmestno-s-partnerami-sozdaet-evraziyskiy-saf-alyans/> (accessed: 13.04.2023). Publ. date: 13.12.2021.
61. SAF: новые возможности для России или новые проблемы? / М. Ершов, В. Савеленко, У. Махова, Н. Буров // Нефтегазовая вертикаль. 2022. № 4. С. 106–117.
Yershov M., Savelenko V., Makhova U., Burov N. SAF: novye vozmozhnosti dlia Rossii ili novye problemy? [SAF: new opportunities or new challenges for Russia?]. Neftegazovaia vertikal' [Oil and gas technology]. 2022. No. 4. P. 106–117.
62. Свинцова Е. России хватит разведанных запасов нефти на 39 лет // Neftegaz.ru. URL: <https://neftegaz.ru/news/gas/746022-rossii-khvatit-razvedannykh-zapasov-nefti-na-39-let/> (дата обращения: 13.04.2023). Дата публ.: 05.08.2022.
Svintsova E. Rossii khvatit razvedannykh zapasov nefiti na 39 let [Russia has enough proven oil reserves for 39 years]. Neftegaz.ru. URL: <https://neftegaz.ru/news/gas/746022-rossii-khvatit-razvedannykh-zapasov-nefti-na-39-let/> (accessed: 13.04.2023). Publ. date: 05.08.2022.
63. «Росгеология» уточнила, на сколько лет в стране хватит запасов газа и нефти // РИА Новости. URL: <https://ria.ru/20210920/zapasy-1750942406.html> (дата обращения: 13.04.2023). Дата публ.: 20.09.2021.
“Rosgeologiya” utochnila, na skol'ko let v strane khvatit zapasov gaza i nefiti [RosGeo clarified for how many years there will be sufficient reserves of gas and oil in Russia]. RIA Novosti [RIA News]. URL: <https://ria.ru/20210920/zapasy-1750942406.html> (accessed: 13.04.2023). Publ. date: 20.09.2021.
64. Circum-Arctic resource appraisal: estimates of undiscovered oil and gas north of the Arctic Circle / K.J. Bird, R.R. Charpentier, D.L. Gautier, D.W. Houseknecht, T.R. Klett, J.K. Pitman, T.E. Moore, C.J. Schenk, M.E. Tennyson, and C.J. Wandrey. 2008. 4 p. (U.S. Geological Survey fact sheet ; 3049). URL: <https://pubs.usgs.gov/fs/2008/3049/fs2008-3049.pdf> (accessed: 13.04.2023).
65. Assessment of undiscovered oil and gas in the Arctic / D.L. Gautier, K.J. Bird, R.R. Charpentier, A. Grantz, T.R. Klett, T.E. Moore, D.W. Houseknecht, J.K. Pitman, C.J. Schenk, J.H. Schuenemeyer, K. Sørensen, M.E. Tennyson, Z.C. Valin, C.J. Wandrey // Science. 2009. Vol. 324, no. 5931. P. 1175–1179. DOI 10.1126/science.1169467.

-
66. Roberts R.A., Nuzum S.R., Wolff M. Liquefied natural gas as the next aviation fuel. 2015. (13th International Energy Conversion Engineering Conference, July 27–29, 2015, Orlando, FL ; AIAA 2015-4247). DOI 10.2514/6.2015-4247.
67. Топлива для воздушно-реактивных двигателей / Дубовкин Н.Ф., Яновский Л.С., Харин А.А., Шевченко И.В., Верхоломов В.К., Суриков Е.В. ; отв. ред. Яновский Л.С., Дубовкин Н.Ф. М. : изд-во МАТИ – РГТУ им. К.Э. Циолковского, 2001. 443 с.
Dubovkin N.F., Yanovskiy L.S., Kharin A.A., Shevchenko I.V., Verkholomov V.K., Surikov E.V. Topлива dlia vozduшно-reaktivnykh dvigatelei [Fuels for airbreathing jet engines]. Publishing editors – Yanovskiy L.S., Dubovkin N.F. Moscow: Publishing House of МАТИ — Russian State Technological University, 2001. 443 p.
68. Зайцев В.П., Яновский Л.С., Шустов А.В. Газомоторное топливо для гражданской авиации // Авиадвигатели XXI века : всерос. науч.-техн. конф. : сб. тез. докл., Москва, ЦИАМ им. П.И. Баранова, 24–27 ноября 2015 г. М. : ЦИАМ, 2015. С. 988–989.
Zaitsev V.P., Yanovskiy L.S., Shustov A.V. Gazomotornoe toplivo dlia grazhdanskoi aviatsii [Gas engine fuel for civil aviation]. Aviadvigateli XXI veka [Aircraft engines of the XXI century]: all-Russian scientific and technological conference: collection of abstracts, Moscow, Central Institute of Aviation Motors, 24–27 November, 2015, Moscow: CIAM, 2015, p. 988–989.
69. Зайцев В.П., Яновский Л.С. Авиационное сконденсированное топливо и его преимущества // Транспорт на альтернативном топливе. 2012. № 5 (29). С. 18–21.
Zaytsev V.P., Yanovskiy L.S. Aviatcionnoe skondensirovannoe toplivo i ego preimushchestva [Aviation condensed (gas) fuel and its benefits]. Transport na al'ternativnom toplive [Alternative Fuel Transport]. 2012. No. 5 (29). P. 18–21.
70. Shahriar F., Khanal A. The current techno-economic, environmental, policy status and perspectives of sustainable aviation fuel (SAF) // Fuel. 2022. Vol. 325. Art. 124905. 49 p.
71. Surrogate definition and chemical kinetic modeling for two different jet aviation fuels / J. Yu, Z. Wang, X. Zhuo, W. Wang, and X. Gou // Energy & Fuels. 2016. Vol. 30, no. 2. P. 1375–1382.
72. A shock tube study of jet fuel pyrolysis and ignition at elevated pressures and temperatures / J. Shao, Y. Zhu, Sh. Wang, D.F. Davidson, R.K. Hanson // Fuel. 2018. Vol. 226. P. 338–344.
73. The combustion kinetics of a synthetic paraffinic jet aviation fuel and a fundamentally formulated, experimentally validated surrogate fuel / S. Dooley, S.H. Won, S. Jahangirian, Y. Ju, F.L. Dryer, H. Wang, M.A. Oehlschlaeger // Combustion and Flame. 2012. Vol. 159. P. 3014–3020.
74. Moses C.A. Comparative evaluation of semi-synthetic jet fuels : final report : prepared for Coordinating Research Council, Universal Technology Corporation : CRC Project no. AV-2-04a. 2008. 43, [6] p. URL: <https://online.fliphtml5.com/qzob/bmce/#p=1> (accessed: 13.04.2023).
75. Comparisons of emissions characteristics of several turbine engines burning Fischer-Tropsch and hydroprocessed esters and fatty acids alternative jet fuels / E. Corporan, M.J. DeWitt, C.D. Klingshirn, D. Anneken, L. Shafer, R. Streibich // ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition, June 11–15, 2012, Copenhagen, Denmark. Vol. 2: Combustion, fuels and emissions, pt. A/B. P. 425–436. DOI 10.1115/GT2012-68656.
76. Edwards T. “Kerosene” fuels for aerospace propulsion – composition and properties. 2002. (38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 7–10 July 2002, Indianapolis, Indiana ; AIAA 2002-3874). DOI 10.2514/6.2002-3874.
77. Wang H., Oehlschlaeger M.A. Autoignition studies of conventional and Fischer–Tropsch jet fuels // Fuel. 2012. Vol. 98. P. 249–258.
78. Detailed chemical kinetic mechanism for surrogates of alternative jet fuels / Ch.V. Naik, K.V. Puduppakkam, A. Modak, E. Meeks, Y.L. Wang, Q. Feng, T.T. Tsotsis // Combustion and Flame. 2011. Vol. 158, no 3. P. 434–445.
79. Blakey S., Rye L., Wilson C.W. Aviation gas turbine alternative fuels: a review // Proceedings of the Combustion Institute. 2011. Vol. 33, iss. 2. P. 2863–2885.
80. Biofuels for aviation : technology brief / International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi : IRENA, 2017. 50 p.
81. Scramjet engine completes testing in NASA tunnel // NASA : website. URL: <https://www.nasa.gov/aeroresearch/tech-excellence/2007/scramjet-engines-complete-testing> (accessed: 13.04.2023). Publ. date: 30.04.2007. Last updated: 07.08.2017.
82. Edwards T., Maurice L.Q. Surrogate mixtures to represent complex aviation and rocket fuels // Journal of Propulsion and Power. 2001. Vol. 17, no. 2. P. 461–466.
83. Compendium of experimental cetane numbers : technical report / J. Yanowitz, M.A. Ratcliff, R.L. McCormick, and J.D. Taylor, M.J. Murphy ; National Renewable Energy Laboratory. 2017. vi, 71 p. NREL/TP-5400-67585.
-

-
84. Ignition behavior and surrogate modeling of JP-8 and of camelina and tallow hydrotreated renewable jet fuels at low temperatures / C. Allen, D. Valco, E. Toulson, T. Edwards, T. Lee // *Combustion and Flame*. 2013. Vol. 160, no. 2. P. 232–239.
85. Autoignition behavior of synthetic alternative jet fuels: An examination of chemical composition effects on ignition delays at low to intermediate temperatures / D. Valco, G. Gentz, C. Allen, M. Colket, T. Edwards, S. Gowdagiri, M.A. Oehlschlaeger, E. Toulson, T. Lee // *Proceedings of the Combustion Institute*. 2015. Vol. 35, iss. 3. P. 2983–2991.
86. JP-5 and HRJ-5 autoignition characteristics and surrogate modeling / C. Allen, D. Valco, E. Toulson, Ji H. Yoo, and T. Lee // *Energy & Fuels*. 2013. Vol. 27, no. 12. P. 7790–7799.
87. Ignition delay times of conventional and alternative fuels behind reflected shock waves / Y. Zhu, S. Li, D.F. Davidson, R.K. Hanson // *Proceedings of the Combustion Institute*. 2015. Vol. 35, iss. 1. P. 241–248.
88. Топливо для реактивных двигателей, марка ТС-1 // Группа компаний «Нефтемаркет» : Оптовые поставки топлива : сайт. URL: <https://нефтемаркет.рф/product/kerosin-reaktivnoe-toplivo/aviatsionnyy-kerosin-ts-1/> (дата обращения: 13.04.2023).
Toplivo dlia reaktivnykh dvigatelei, marka TS-1 [Fuel for jet engines TS-1]. Gruppy kompanii “Neftemarket”: Optovye postavki topliva [Group of companies “Neftemarket”: wholesale fuel supplies], website. URL: <https://нефтемаркет.рф/product/kerosin-reaktivnoe-toplivo/aviatsionnyy-kerosin-ts-1/> (accessed: 13.04.2023).
89. Конструкция и проектирование авиационных газотурбинных двигателей / С.А. Вьюнов, Ю.И. Гусев, А.В. Карпов и др. ; под общ. ред. Д.В. Хронина. М. : Машиностроение, 1989. 565 с.
Vyunov S.A., Gusev Yu.I., Karpov A.V., etc. Konstruktsiia i proektirovanie aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigatelei [Structure and design of aviation gas turbine engines]. Under the general editorship of D.V. Khronin. Moscow: Mashinostroenie [Mechanical Engineering], 1989. 565 p.
90. Проектный расчет камеры сгорания авиационного ГТД / В.Е. Резник, В.П. Данильченко, Н.Б. Болотин, Ю.А. Ковылов, С.В. Лукачев. Куйбышев : КуАИ, 1982. 84 с.
Reznik V.E., Danilchenko V.P., Bolotin N.B., Kovylov Yu.A., Lukachev S.V. Proektnyi raschet kamery sgoraniia aviatsionnogo GTD [Design calculation of the combustion chamber for an aviation gas turbine engine]. Kuibyshev: Kuibyshevskii aviatsionnyi institut [Kuibyshev Aviation Institute: KuAI], 1982. 84 p.
91. Experimental study of combustion of composite fuel comprising n-decane and aluminum nanoparticles / V.V. Smirnov, S.A. Kostitsa, V.D. Kobtsev, N.S. Titova, A.M. Starik // *Combustion and Flame*. 2015. Vol. 162, no. 10. P. 3554–3561.
92. Diffusion combustion of n-decane with unpassivated aluminum nanoparticles additives: Analysis of mechanism and numerical simulation / A.M. Savel’ev, V.V. Smirnov, N.S. Titova, D.A. Yagodnikov // *Combustion and Flame*. 2022. Vol. 236. Art. 111761.
93. Применение четырехкомпонентного суррогата керосина для моделирования процессов воспламенения и горения паров авиационного топлива в смесях с воздухом / А.М. Савельев, В.А. Савельева, Н.С. Титова, С.А. Торохов, В.Е. Козлов // *Горение и взрыв*. 2021. Т. 14, № 4. С. 82–90.
Savel’ev A.M., Savelieva V.A., Titova N.S., Torokhov S.A., Kozlov V.E. Primenenie chetyrekhkomponentnogo surrogata kerosina dlia modelirovaniia protsessov vosplamneniia i goreniiia parov aviatsionnogo topliva v smesiakh s vozdukhom [Application of four-component kerosene surrogate for modeling ignition and combustion of aviation fuel vapors in mixtures with air]. *Gorenie i vzryv* [Combustion and Explosion]. 2021. Vol. 14, no. 4. P. 82–90.
94. Савельева В.А., Савельев А.М., Титова Н.С. Кинетический механизм воспламенения пропан-бутановых смесей при низких и высоких температурах: разработка и применение // *Физика горения и взрыва*. 2023. Т. 59, № 1. С. 3–24.
Savelieva V.A., Savel’ev A.M., Titova N.S. Kinetic mechanism of ignition of propane–butane mixtures at low and high temperatures: development and application // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2023. Vol. 59, no. 1. P. 1–21.
95. Zschocke A., Scheuermann S., Ortner J. High biofuel blends in aviation (HBBA) : ENER/C2/2012/420-1 : interim report / Lufthansa, WWEB. 2012. 156 p. URL: https://aireg.de/wp-content/uploads/2015/03/20150327_studie.pdf (accessed: 24.04.2023).
96. Проект BurnFAIR : Arbeitspakete 1.1 bis 1.4 : Abschlussbericht zu dem Vorhaben / Zuwendungsempfänger Deutsche Lufthansa ; Berichtstatter A. Zschocke. 2014. 261, [15] S.
97. Alternative aviation fuel experiment (AAFEX) : NASA/TM–2011–217059 / B.E. Anderson, A.J. Beyersdorf, C.H. Hudgins, et al. ; National Aeronautics and Space Administration, Langley Research Center. Hampton, 2011. vi, 402, [2] p.
-

-
98. Hydroprocessed renewable jet fuel evaluation, performance, and emissions in a T63 turbine engine / C.D. Klingshirn, M. DeWitt, R. Striebig, D. Anneken, L. Shafer, E. Corporan, M. Wagner, D. Brigalli // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2012. Vol. 134, no. 5. Art. 051506. 8 p.
99. Analysis of emission characteristics of gas turbine engines with some alternative fuels / A.M. Starik, A.M. Savel'ev, O.N. Favorskii, and N.S. Titova // *International Journal of Green Energy*. 2018. Vol. 15, no 3. P. 161–168.
100. Руководство по качеству воздуха в аэропортах : утверждено Генеральным секретарем и опубликовано с его санкции / Международная организация гражданской авиации. Изд. 1-е. ИКАО, 2011. 230 с. Разд. паг. Doc 9889. URL: <https://standart.aero/en/icao/book/документ-9889-руководство-по-качеству-воздуха-в-аэропортах-из-1-пу-11750> (дата обращения: 25.04.2023).
Airport air quality manual : approved by the Secretary General and published under his authority / International Civil Aviation Organization. 1st ed. ICAO, 2011. 200 p. Pag. var. Doc 9889. URL: <https://standart.aero/en/icao/book/doc-9889-airport-air-quality-manual-ed-1-en-9326> (accessed: 25.04.2023).
101. Рос. Федерация. О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения : федеральный закон : принят Государственной думой 12 марта 1999 года : одобрен Советом Федерации 17 марта 1999 года. Федеральный закон от 30.03.1999 № 52-ФЗ.
Rossiiskaia Federatsiia. O sanitarno-epidemiologicheskome blagopoluchii naseleniia [Russian Federation. On the sanitary and epidemiological welfare of the population]. Federal law adopted by the State Duma on March 12, 1999; approved by the Federation Council on March 17, 1999. Federal Law No. 52-FZ dated 30.03.1999.
102. Yu F., Turco R.P., Kärcher B. The possible role of organics in the formation and evolution of ultrafine aircraft particles // *Journal of Geophysical Research*. 1999. Vol. 104, no. D4. P. 4079–4087.
103. Савельев А.М., Старик А.М. Динамика образования сульфатных аэрозолей в струях реактивных двигателей // *Известия РАН. Механика жидкости и газа*. 2001. № 1. С. 108–117.
Savel'ev A.M., Starik A.M. Dynamics of sulfate aerosol formation in engine jets // *Fluid Dynamics*. 2001. Vol. 36, no. 1. P. 95–103.
104. Measurements of nitrous acid in commercial aircraft exhaust at the Alternative Aviation Fuel Experiment / B.H. Lee, G.W. Santoni, E.C. Wood, S.C. Herndon, R.C. Miake-Lye, M.S. Zahniser, S.C. Wofsy, J.W. Munger // *Environmental Science and Technology*. 2011. Vol. 45, no. 18. P. 7648–7654.
105. Старик А.М., Фаворский О.Н. Эмиссия из авиационных двигателей и воздействие авиации на атмосферные процессы и климат // *Экологические проблемы авиации* / под ред. Ю.Д. Халецкого. М. : Торус Пресс, 2010. (Труды ЦИАМ ; № 1347). С. 207–233.
Starik A.M., Favorskii O.N. Emissiia iz aviatsionnykh dvigatelei i vozdeistvie aviatsii na atmosferynye protsessy i klimat [Aircraft engine emissions and impact of aviation on atmospheric processes and climate]. *Ekologicheskie problemy aviatsii* [Ecological problems of aviation]. Edited by Yu.D. Khaletskiy. Moscow: Torus Press, 2010. (Proceedings of CIAM; No. 1347). P. 207–233.

Материалы получены редакцией 15.05.2023