

## Обзор работ за рубежом по применению альтернативных видов топлива в авиации

**Палкин В.А.**

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

Проведен анализ работ за рубежом по применению альтернативных видов топлива с целью достижения к 2050 году углеродно-нейтрального влияния авиации на климат. Дана оценка количества вырабатываемой электроэнергии от возобновляемых источников, необходимого для перевода авиации на альтернативные виды топлива. Представлено сравнение пассажирских самолетов на синтетическом топливе и водороде. Показано, что применение синтетического топлива и водорода, полученных по углеродно-нейтральным технологиям, позволяет за жизненный цикл топлива уменьшить эмиссию CO<sub>2</sub> на 100%. Однако к 2050 году невозможно добиться углеродно-нейтрального влияния авиации на климат даже при переводе всего парка пассажирских самолетов на водород. В настоящее время не существует другой технологии, технически осуществимой с точки зрения затрат средств и ресурсов, которая могла бы гарантировать такое влияние авиации на климат.

**Ключевые слова:** авиация, альтернативное топливо, водород, водородные баки, возобновляемый источник энергии, газотурбинный двигатель, окружающая среда, климат, силовая установка, стоимость владения, топливные элементы, цепочка поставки

## Review of the abroad works on an application of alternative fuels in aviation

**Palkin V.A.**

*CIAM, Moscow*

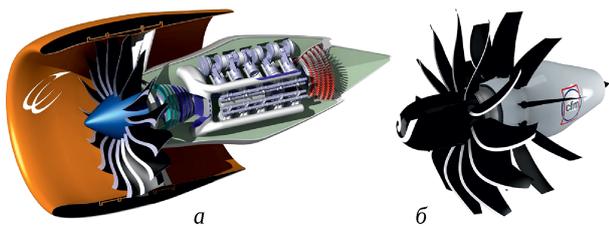
An analysis of works abroad an application of alternative fuels in order to achieve the zero climate impact of aviation is performed. An assessment of the needed amount of electricity produced by renewable energy sources at application of alternative fuels in aviation is presented. A comparison of civil aircraft at the using of synthetic fuel and hydrogen is performed. It is shown that an application of synthetic fuel and hydrogen produced by carbon-neutral technologies allows to reduce CO<sub>2</sub> emissions during the life cycle of fuel by 100%. However, by 2050 it is impossible to achieve a carbon-neutral impact of aviation on climate even with the replacement of an all civil fleet on hydrogen. Today there is no other technology technically feasible in terms of the funds and resources that could guarantee such impact of aviation on the climate.

**Keywords:** aviation, alternative fuel, hydrogen, hydrogen tanks, renewable energy sources, gas turbine engine, environment, climate, propulsion system, cost of ownership, fuel cells, supply chain

### Введение

В настоящее время авиационная техника гражданского назначения, прежде всего пассажирские самолеты и двигатели для их силовых установок, составляет основу продукции, выпускаемой ее ведущими производителями. Выручка от ее реализации в несколько раз превышает выручку от реализации авиационной техники военного назначения [1–5].

За более чем 75-летний период развития пассажирских самолетов с газотурбинными двигателями переход к новой схеме двигателя, повышение параметров рабочего процесса, внедрение новых конструкционных материалов и технических решений, а также улучшение аэродинамических характеристик самолетов позволили уменьшить расход топлива на пассажиро-километр более чем на 80%, и почти 50% снижения этого показателя было достигнуто благодаря двигателю [6]. Однако



**Рис. 1.** Двигатель комбинированного цикла по проекту ULTIMATE (а) и двигатель RISE компании CFM International (б) [7; 8]

возможности газотурбинных двигателей по улучшению характеристик еще не исчерпаны и новые схемы при дальнейшем повышении параметров рабочего процесса и степени двухконтурности позволят уменьшить расход топлива и, соответственно, эмиссию вредных веществ, даже при использовании авиационного керосина, до 20% (рис. 1) [7; 8].

Улучшение показателей авиационной техники гражданского назначения происходит при постоянном ужесточении со стороны ИКАО норм по уровню шума и эмиссии вредных веществ. ИКАО введены ограничения по шуму и эмиссии  $\text{CO}_2$  для дозвуковых пассажирских самолетов, а также на эмиссию вредных веществ ( $\text{HC}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ , дым) и нелетучих твердых частиц (нЛТЧ) для авиационных двигателей их силовых установок. В настоящее время для всех пассажирских самолетов и двигателей их силовых установок действуют нормы ИКАО по шуму (Глава 14) и эмиссии  $\text{NO}_x$  по циклу «взлет – посадка» (CAEP/8) [9–14].

В 2019 году действующие нормы выброса в атмосферу вредных веществ были дополнены ИКАО требованием по ограничению эмиссии нелетучих твердых частиц (нЛТЧ). Этот стандарт вступает в силу с 2023 года для новых и производимых двигателей номинальной тягой более 26,7 кН. Кроме того, разработан и вводится в действие новый международный стандарт, ограничивающий эмиссию  $\text{CO}_2$  для дозвуковых пассажирских самолетов с ГТД при осуществлении международных перевозок. С 1 января 2020 года он введен для новых самолетов, заявка на сертификацию которых подана после этой даты, с 1 января 2023 года будет введен для выпускаемых или модернизируемых самолетов, а с 1 января 2028 года производство самолетов, не удовлетворяющих этому стандарту, должно быть прекращено [15–17].

После 2023 года ИКАО планирует ввести нормы на эмиссию  $\text{NO}_x$  и нЛТЧ в крейсерском полете, а с 2027 года – обязательное участие авиакомпаний всех стран-членов ИКАО в разработанной CAEP Системе компенсации и сокращения выбросов углерода для международной авиации (CORSIA), в которой на начало 2021 года на добровольной основе участвовали авиакомпании 81 страны [18].

Однако, несмотря на предпринимаемые меры, за последние пять лет растущий спрос на воздушные перевозки привел к увеличению чистой эмиссии  $\text{CO}_2$  от авиационной техники на ~34%. Дальнейшее увеличение спроса на пассажирские воздушные перевозки вплоть до 2050 года прогнозируется на уровне ~3...5% в год (без учета их падения в 2020 и 2021 годах из-за пандемии коронавируса COVID-19), что может привести к увеличению эмиссии  $\text{CO}_2$  относительно 2020 года в ~3...3,5 раза [19].

Принимая во внимание увеличение спроса на воздушные перевозки и, соответственно, рост эмиссии  $\text{CO}_2$ , ИКАО еще в 2010 году предложила ограничить эмиссию  $\text{CO}_2$  для международных авиаперевозок путем повышения топливной эффективности пассажирских самолетов на 2% в год благодаря применению новых технологий и установить желаемый уровень чистой эмиссии  $\text{CO}_2$  на период с 2020 по 2050 год на уровне, достигнутом к 2020 году [15].

В свою очередь, Группа содействия воздушному транспорту (Air Transport Action Group, ATAG) предложила к 2050 году уменьшить эмиссию  $\text{CO}_2$  для международных перевозок на 50% относительно уровня эмиссии  $\text{CO}_2$  2005 года, а Еврокомиссия приняла закон, устанавливающий достижение к 2050 году углеродно-нейтрального влияния за жизненный цикл всей промышленности во всех странах ЕС [20; 21].

Для авиации эти решения означают поиск новых направлений уменьшения эмиссии вредных веществ в относительно короткий промежуток времени, а вопросы охраны окружающей среды приобретают все большее значение. Таким образом, экологические характеристики авиационной техники становятся одним из главных показателей, определяющим ее конкурентоспособность на мировом рынке и беспрепятственную эксплуатацию на международных авиалиниях, особенно в свете последних решений, принятых в США и Европе [21–23].

## Альтернативные виды топлива

Достичь поставленных целей по уменьшению эмиссии  $\text{CO}_2$  в авиации планируется благодаря применению новых технологий, совершенствованию системы управления воздушным движением, улучшению использования существующей инфраструктуры и применению альтернативных видов топлива, в том числе криогенных [20; 22].

Под альтернативными видами топлива понимаются прежде всего устойчиво производимые авиационные топлива (Sustainable Aviation Fuels, SAF) из возобновляемых источников сырья с использованием возобновляемых источников энергии, применение которых,

как ожидается, уменьшит эмиссию вредных веществ от авиационной техники, а авиакомпаниям позволит заметно сократить или освободиться от компенсационных платежей [16].

ИКАО под термином «устойчиво производимое авиационное топливо» (или «альтернативные виды топлива») понимает «любое топливо, которое потенциально может генерировать меньшие выбросы углерода за жизненный цикл, чем обычный керосин» [16]. Область применения этого термина, предпочитаемого в авиационной промышленности, шире, чем термина «биотопливо», которым обычно называют топливо, производимое из биологического сырья. Современные технологии позволяют производить топливо из различных источников сырья, в том числе неорганического, и термин «биотопливо» не совсем точно отражает текущее состояние производства альтернативных видов топлива [16].

В настоящее время примерно две трети объема потребления керосина, которое напрямую связано с эмиссией CO<sub>2</sub>, приходится на ближне- и среднемагистральные самолеты (БМС и СМС), доля которых в мировом парке составляет ~70%. Менее 5% расходуемого топлива и эмиссии CO<sub>2</sub> приходится на самолеты местных воздушных линий (МВЛ) и региональные самолеты (РС), доля которых в мировом парке составляет ~20%, а остальная часть топлива и эмиссии CO<sub>2</sub> (~30%) приходится на дальнемагистральные самолеты (ДМС), доля которых в мировом парке составляет ~10% [19; 24].

Что касается дальности полета, то более 20% выбросов приходится на полеты дальностью более 7000 км, но они составляют менее 5% всех маршрутов. На полеты дальностью менее 3000 км, независимо от типа самолета, приходится более 50% эмиссии CO<sub>2</sub> и ~90% всех маршрутов [19; 25].

Применение в перспективных образцах авиационной техники традиционного авиационного керосина, получаемого из ископаемых источников, даже при внедрении перспективных технологий в авиационную тех-

нику, совершенствовании системы управления воздушным движением и улучшении использования существующей инфраструктуры, не позволяет удовлетворить целям по сокращению эмиссии CO<sub>2</sub>, предложенным ИКАО и АТАГ. Проведенные исследования показали, что дополнительно к указанным выше мерам применение SAF (синтетическое топливо) или водорода во всем парке пассажирских самолетов, участвующих в международных перевозках, позволит к 2050 году достичь поставленных целей ИКАО/АТАГ по уменьшению эмиссии CO<sub>2</sub> [23].

Чтобы избежать негативного воздействия на климат (окружающую среду), авиационная промышленность старается продвигать альтернативные виды топлива только из экологически чистых источников. На рис. 2 показаны упрощенные схемы производства авиационного топлива из ископаемых и возобновляемых источников сырья [26].

По сравнению с топливом из ископаемых источников, экологически чистое (углеродно-нейтральное) синтетическое топливо для ГТД приводит к сокращению эмиссии CO<sub>2</sub> на протяжении его жизненного цикла, так как количество CO<sub>2</sub>, поглощаемое источниками сырья или при производстве, примерно эквивалентно количеству CO<sub>2</sub>, образующегося при сжигании топлива в двигателе, которое просто возвращается в атмосферу [26].

Использование синтетического топлива обеспечивает значительное сокращение чистой эмиссии CO<sub>2</sub> на протяжении жизненного цикла, в некоторых случаях до 80%, по сравнению с авиационным керосином. Кроме того, оно содержит меньше примесей серы, что позволяет еще больше сократить эмиссию диоксида серы и твердых частиц.

Поскольку физико-химические свойства синтетического топлива почти идентичны свойствам обычного авиационного керосина, то его можно безопасно смешивать с последним в различной пропорции, использовать ту же инфраструктуру и не требовать адаптации



Рис. 2. Упрощенные схемы производства авиационного топлива [26]:  
а – из ископаемых источников; б – из возобновляемых источников

к нему систем самолетов и/или двигателей. Топливо с такими свойствами называется «добавляемым топливом» (drop-in-fuels), которое можно автоматически добавлять в существующие системы заправки в аэропортах и смешивать в определенных пропорциях с обычным авиационным керосином [21; 27; 28]. Современные технологии позволяют производить синтетическое топливо из широкого спектра исходного сырья.

В октябре 2013 года 38-я сессия Ассамблеи ИКАО приняла резолюцию А38-18, в которой государствам-членам предлагалось разработать политические меры по ускорению разработки, внедрения и использования SAF для авиации в рамках пакета мер по ограничению выбросов CO<sub>2</sub> международной авиацией [29]. Сегодня во всем мире все больше стран занимается разработкой SAF на государственном и межгосударственном уровнях. В России «Транспортная стратегия до 2030 года» так же предусматривает перевод различных транспортных средств на экологически чистые виды топлива и стимулирование применения альтернативных, не нефтяных источников энергии [30].

Альтернативные виды топлива применяют в силовых установках самолетов в течение многих лет. С 2016 года синтетическое топливо в смеси с авиационным керосином начали регулярно использовать на пассажирских самолетах. С этого времени интерес авиакомпаний и аэропортов к синтетическому топливу продолжает расти и каждый год все больше аэропортов заказывают его поставки. По состоянию на начало мая 2021 года девять аэропортов распределяли смеси с синтетическим топливом, на которых с 2011 года совершено более 330 000 коммерческих полетов [31–33].

За рубежом синтетические топлива производятся в промышленных масштабах по сертифицированным Американским обществом по испытаниям и материалам (American Society of Testing and Materials, ASTM) технологиям, которые для применения на пассажирских самолетах должны соответствовать стандарту ASTM D4054 [34].

Ожидается, что при применении в ГТД синтетического топлива эмиссию CO<sub>2</sub> можно будет сократить, а эмиссии NO<sub>x</sub> и водяного пара останутся почти такими же, как при сжигании авиационного керосина.

Несмотря на то, что с технической точки зрения за последнее время был достигнут значительный прогресс в разработке альтернативных видов топлива, необходимо решить серьезные проблемы, прежде чем они станут доступны в значительном количестве во всем мире. Для этого необходимо инвестировать средства в их производство, а также принять политические решения, которые обеспечат применение таких топлив в авиации во всем мире. В настоящее время разница в цене по сравнению с авиационным керосином оста-

ется главным препятствием для их широкого применения в авиации [29].

Кроме синтетических топлив, в качестве альтернативного топлива для уменьшения эмиссии вредных веществ рассматриваются и криогенные топлива – водород и метан. Водород как топливо не содержит углерода и поэтому при его сжигании в ГТД не образуется CO<sub>2</sub>, но образуется в два с половиной раза больше паров воды. Что касается эмиссии NO<sub>x</sub>, то при использовании водорода ее можно снизить на ~50...80% без значительного снижения эффективности процесса горения, а при применении водородных топливных элементов она вообще отсутствует [16; 35].

Несмотря на возможность существенного уменьшения эмиссии вредных веществ, применение криогенных топлив (водорода или метана) будет связано с внесением изменений в конструкцию авиационной техники, созданием новой инфраструктуры и цепочки поставки топлива, а также организацией его производства. Далее рассмотрим особенности применения водорода в авиации.

## Применение водорода в авиации

Использование водорода в авиации – не новая идея. В разное время в мире хотя и было создано несколько демонстраторов технологий – летательных аппаратов с силовой установкой на водороде, большинство проведенных исследований было сосредоточено в основном на компонентах самолета и двигателя, но полного представления о том, что необходимо сделать для ее реализации, нет.

Наиболее известными демонстраторами технологий с использованием жидкого водорода (LH<sub>2</sub>) являются самолет Ту-155 и двигатель НК-88, созданные в СССР в 1980-е годы, которые успешно прошли стендовые и летные испытания. В дальнейшем на базе разработанных технологий были предложены проекты модифицированных криогенных самолетов Ту-204К, Ту-334К, Ту-330СПГ и нового регионального самолета Ту-136 (рис. 3) [35–38].

В начале 2000-х годов вновь возник интерес к применению водорода в авиации и в работах различных исследовательских групп была проведена оценка его влияния на окружающую среду, конструкцию самолета и необходимые компоненты. Однако тогда эти усилия не были доведены до реализации в конкретных проектах пассажирских самолетов. В тот же период времени начались работы по электрохимическим генераторам энергии – топливным элементам (ТЭ), которые открыли новое направление применения водорода в авиации.

За последние пятнадцать лет было разработано несколько прототипов легких самолетов с силовой установкой на водородных твердополимерных топливных



а



б

Рис. 3. Проекты самолетов на водороде ОКБ им А.Н. Туполева [38]:  
а – Ту-334К; б – Ту-136



а



б

Рис. 4. Самолет ZeroAvia (а) и летающая лаборатория на базе самолета Dornier 228 (б) с силовыми установками на водородных ТПТЭ [19; 43]



Рис. 5. Концепции перспективных пассажирских самолетов компании Airbus, использующие в качестве топлива жидкий водород [45]

элементах (ТПТЭ) (например, FCD компании Boeing, HY4 компании H2Fly GmbH, ZeroAvia стартап-компании ZeroAvia, летающая лаборатория DLR на базе самолета Dornier 228 и др.) (рис. 4) [19; 39–43].

Вспомогательные силовые установки на топливных элементах также прошли испытания на пассажирских самолетах, но в серийное производство они так и не были запущены [44].

В 2020 году компания Airbus представила три концепции пассажирских самолетов с низким уровнем эмиссии CO<sub>2</sub>, использующих в качестве топлива жидкий водород, которые могут быть введены в эксплуатацию к 2035 году (рис. 5) [45]. Эти концепции – все под условным названием ZEROe – включают:

- самолет традиционной схемы на 120...200 пассажиров, с дальностью полета до 3700 км, с модифицированным ТРДД, использующим в качестве топлива водород, бак с которым располагается в хвостовой части фюзеляжа;

- самолет традиционной схемы пассажироместностью до 100 человек и дальностью полета до 1850 км,

с модифицированным ТВД, использующим в качестве топлива водород;

- самолет по схеме «гибридное крыло» пассажироместностью до 200 человек и дальностью полета более 3700 км, который из-за своей ширины предоставляет много возможностей по выбору силовой установки и размещению баков с LH<sub>2</sub>.

Переход на LH<sub>2</sub> как основной источник энергии для пассажирских самолетов потребует тесного взаимодействия компаний из многих отраслей промышленности при поддержке со стороны правительств, которая будет иметь ключевое значение при проведении работ по созданию научно-технического задела для достижения углеродно-нейтрального влияния авиации на климат к 2050 году.

В рамках программы ZEROe компания Airbus предложила для регионального самолета электрифицированную распределенную силовую установку, состоящую из шести мотогондол с восьмилопастными электроприводными композитными винтами с питанием электродвигателей от водородных ТПТЭ (рис. 6) [46]. Каждая мото-



**Рис. 6.** Концепция перспективного пассажирского самолета компании Airbus с силовой установкой на водородных ТПТЭ [46]

гондола представляет собой автономную силовую установку с быстроразъемными соединениями компонентов, что может обеспечить уменьшение затрат времени на техническое обслуживание и, возможно, заправку водородом в аэропортах.

Однако для применения на «больших» пассажирских самолетах технологию ТПТЭ необходимо доработать. В настоящее время электрические (ЭСУ) или гибридные (ГСУ) силовые установки на базе ТПТЭ могут быть применены на самолетах с пассажироместимостью до 20 человек и небольшой дальностью полета. При увеличении пассажироместимости и дальности полета потребуются другие решения, на поиск которых компания и будет направлять свои усилия в ближайшие годы. Эти исследования будут нацелены на то, чтобы обеспечить существенное улучшение летно-технических характеристик пассажирских самолетов, но для их реализации необходимо решить ряд сложных технических проблем как по отдельным компонентам и системам, так и по созданию общей интегрированной авиационной инфраструктуры.

В настоящее время компания в рамках проекта ASCEND (Advanced Superconducting and Cryogenic Experimental powertrain Demonstrator) разрабатывает криогенные технологии для летательных аппаратов различного назначения на водороде.

Подразделение E-Aircraft System House компании Airbus в течение трех лет должно спроектировать и создать демонстратор технологий для экспериментальной проверки и оценки технологий, которые могут быть

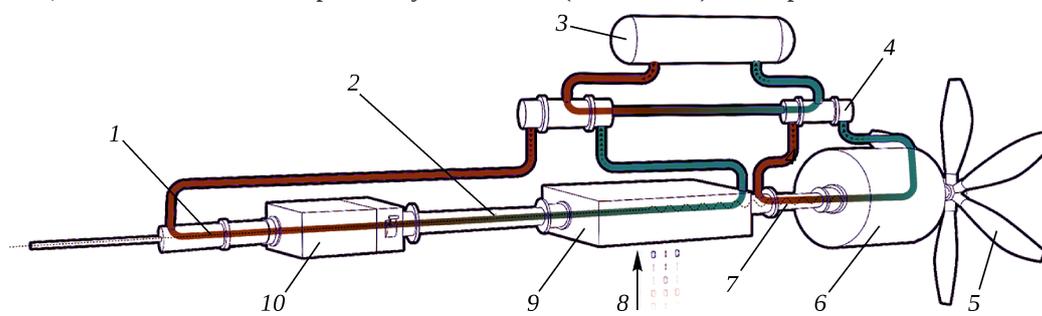
использованы в ТВД, ТРДД и ГСУ с ТВД. Демонстратор технологий будет включать в себя систему распределения энергии с шинами и блоком защиты, систему криогенного охлаждения с блоком управления и электродвигатель мощностью 500 кВт. Во всех этих компонентах электрической системы будет использоваться эффект сверхпроводимости (рис. 7) [47; 48].

Ожидается, что в результате проведения работ по проекту будут разработаны технологии, которые позволят уменьшить вес и потери в компонентах электрической системы более чем в два раза и снизить напряжение до уровня ниже 500 В по сравнению с существующими системами. В рамках проекта также будут оцениваться возможности создания криогенных систем мощностью от нескольких киловатт до нескольких мегаватт.

Компания Airbus планирует использовать проект ASCEND для изучения возможности применения разработанных технологий для силовых установок своего нового поколения самолетов с низким и углеродно-нейтральным влиянием на окружающую среду.

Ожидается, что проект ASCEND будет поддерживать улучшение характеристик существующих и перспективных силовых установок для всех разработок Airbus, включая вертолеты, электрические летательные аппараты вертикального взлета и посадки (eVTOL), а также региональные и узкофюзеляжные самолеты.

**Технологии для самолетов на водороде.** Применение водорода позволяет рассмотреть не только обычные силовые установки с ГТД, но и электрифицированные (ЭСУ и ГСУ), в которых в качестве источников энергии



**Рис. 7.** Основные компоненты демонстратора технологий по проекту ASCEND [47]:  
 1 – нагрузка; 2 – кабель постоянного тока; 3 – криогенная жидкость; 4 – криогенная система;  
 5 – движитель; 6 – электродвигатель; 7 – кабель переменного тока; 8 – связь с авионикой;  
 9 – блок управления электродвигателем; 10 – блок управления электросетью

могут применяться аккумуляторные батареи (АКБ) и/или ТПТЭ. Наиболее важными для самолетов на водороде и их силовых установок являются следующие технологии.

*Аккумуляторные батареи.* За последние 20 лет характеристики АКБ значительно улучшились. Однако их применение в авиации в качестве единственного источника энергии на борту пока возможно только для легких самолетов и полетов на короткие расстояния из-за низкой плотности энергии (~0,2...0,5 кВт·ч/кг) и малого количества циклов зарядки – разрядки. Для самолетов с большей дальностью полета потребуется значительный прорыв в улучшении характеристик АКБ, а системы быстрой зарядки или замены АКБ потребуют значительных изменений в инфраструктуре аэропортов. Однако АКБ могут применяться в сочетании с ТПТЭ или обычными силовыми установками (турбоэлектрическая силовая установка). В полете ЭСУ с АКБ оказывает слабое влияние на окружающую среду, поскольку не имеет эмиссии вредных веществ и связанных с ними эффектов.

*Топливные элементы.* В самолетах, работающих на ТПТЭ, водород обеспечивает выработку электроэнергии. Добавление к ним накопителя энергии в виде АКБ помогает обеспечить быстрое отслеживание нагрузки и снижение пиковой мощности для оптимизации размеров ТПТЭ, а также уменьшение воздействия на окружающую среду. Новые технологии должны обеспечить создание ТПТЭ с большей в 2...3 раза плотностью энергии, чем у существующих, и удельной плотностью не менее 1,5...2,0 кВт/кг. Предполагается, что они будут работать с КПД ~55...60%. При высокой мощности, несколько мегаватт, для их охлаждения потребуются эффективные и малообъемные теплообменники.

*ГТД на водороде.* Ожидается, что использование криогенного топлива в ГТД позволит немного повысить его эффективность по сравнению с ГТД на керосине. При использовании ГСУ с ГТД на водороде и ТПТЭ можно получить более высокие значения удельной мощности и КПД. Кроме того, ГТД на водороде должен обеспечить низкую эмиссию  $\text{NO}_x$  и оказывать меньшее влияние на окружающую среду.

*Бак для хранения жидкого водорода ( $\text{LH}_2$ -бак).* Водород можно хранить в виде газа под давлением или в жидкой форме. Хранение газообразного водорода больше подходит для полетов на короткие расстояния, и в настоящее время он доступен для приобретения. Однако основное внимание уделяется легким бакам для жидкого водорода с уменьшенной на 50% массой по сравнению с существующими прототипами, поскольку они имеют примерно вдвое меньший объем и значительно легче баков для газообразного водорода. Масса  $\text{LH}_2$ -бака выражается гравиметрическим индексом.

Последние концепции  $\text{LH}_2$ -баков для самолетов МВЛ имеют гравиметрический индекс до 20%. Для БМС и СМС необходимо достичь показателя в 35%, а для ДМС – 38%. Любое улучшение этого индекса улучшает экономические показатели самолета при его создании и эксплуатации. В настоящее время при одинаковом уровне энергообеспечения  $\text{LH}_2$ -баки примерно в четыре раза больше по объему по сравнению с баками для керосина. Лучшая форма  $\text{LH}_2$ -баков – сферическая или цилиндрическая, такие баки снижают потери на испарение, а для их интеграции в самолет его фюзеляж необходимо удлинить, что увеличивает вес пустого самолета.

*Система подачи и распределения топлива и ее компоненты* имеют решающее значение при применении водорода в авиации. Для подачи  $\text{LH}_2$  в ТПТЭ или ГТД в топливной системе должна поддерживаться температура не выше 20 К. При этом кипение необходимо поддерживать на низком уровне и предотвращать утечки водорода, а также охрупчивание материалов. В настоящее время безопасной и надежной системы, которая также могла бы осуществлять тепловое регулирование, нет – ее необходимо разработать, испытать и сертифицировать для применения на самолетах.

Также нужно обеспечить безопасную эксплуатацию самолетов на водороде в течение длительного срока службы.

Для создания НТЗ по компонентам для самолетов на водороде в ЕС была составлена дорожная карта НИОКР, структурированная по четырем направлениям: разработка ключевых компонентов силовой установки, разработка самолетных систем (включая новые концепции самолетов), создание инфраструктуры и разработка нормативно-технической документации [19; 49].

Выполнение НИОКР планируется проводить в три этапа:

– I этап (2020...2028 годы): разработка основных технологий; доведение самолетов МВЛ до сертификации; формирование пилотных проектов РС и БМС; формирование дорожной карты и определение основного объема работ по выпуску нормативно-технической документации;

– II этап (2028...2035 годы): разработка основных компонентов для СМС и доведение их до уровня готовности технологий  $\text{TRL} = 6$ ; подготовка ко второй волне применения водорода в авиации, обеспечивающей безопасную и эффективную заправку самолетов в аэропорту;

– III этап (2035...2050 годы): разработка революционных концепций и создание первых прототипов СМС и, возможно, ДМС; разработка новых технологий для доставки  $\text{LH}_2$  в больших объемах и быстрой заправки самолетов.

Достигнуть поставленных целей планируется в заданные сроки.

**Концепции самолетов на водороде.** Сравнение возможных концепций самолетов на водороде будет проводиться относительно базового самолета, который имеет схему «труба + крыло» с применением технологий 2030...2035 годов. В нем применяется силовая установка с ГТД на синтетическом топливе, изготовленном методом «энергия в жидкость» (power-to-liquid) по технологии улавливания CO<sub>2</sub> из воздуха, с использованием возобновляемых источников энергии.

Обычно продолжительность цикла разработки нового самолета до ввода его в эксплуатацию составляет 15...20 лет. Принимая во внимание цель по сокращению эмиссии вредных веществ, поставленную Еврокомиссией к 2050 году, и длительный период увеличения парка самолетов после начала их эксплуатации, можно предположить, что для БМС и СМС, на которые приходится основная часть эмиссии CO<sub>2</sub>, следующее окно появится примерно в 2030...2035 годах [19; 50]. Поэтому очень важно как можно быстрее достичь уровня готовности технологий TRL = 6, чтобы построить полностью функциональный прототип.

На этапе создания возможны две концепции самолета – эволюционная и революционная, каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки.

*Эволюционная концепция* характеризуется типичной для современных пассажирских самолетов схемой «труба + крыло», которая позволяет адаптировать планер для размещения LH<sub>2</sub>-баков. Она обеспечивает более быстрый ввод в эксплуатацию самолетов на водороде и позволяет использовать традиционные методы производства и сертификации. Несмотря на меньшую эффективность по сравнению с революционной концепцией, она более прагматична с точки зрения уменьшения эмиссии вредных веществ в коротких временных рамках.

*Революционные концепции* позволяют обеспечить лучшую интеграцию при размещении LH<sub>2</sub>-баков. Для небольших самолетов хорошо подходит концепция, представляющая собой трубу с распределенной силовой установкой вдоль передней кромки крыла, которая обеспечивает повышение его эффективности. В качестве опции для СМС и ДМС с большей длиной фюзеляжа может рассматриваться концепция с «пропульсивным фюзеляжем». Однако недостатком всех принципиально новых концепций самолетов являются длительные и непредсказуемые сроки их создания и доводки.

Рассмотренные схемы самолетов показаны на рис. 8, а их основные свойства приведены на рис. 9 [19].

Для самолетов МВЛ и РС рассматривается ЭСУ на базе ТПТЭ с распределенными вдоль крыла электроприводными винтами. Она также включает систему управления подачей и распределением топлива и энергии и АКБ для обеспечения работы на переходных режимах. Для них высокая эффективность ТПТЭ поможет

уменьшить энергопотребление на ~8...10%, стоимость владения на ~10...15% и влияние на окружающую среду на ~80...90%. При этом затраты на приобретение и техническое обслуживание будут немного ниже, а возможная стоимость пассажиро-километра увеличится на ~5...15% по сравнению с базовым самолетом.

Возможность появления на рынке самолетов такой концепции в течение ближайших 10...15 лет достаточно высока. Основными проблемами при их создании будут интеграция LH<sub>2</sub>-бака, системы управления подачей и распределением топлива и электроэнергии, ТПТЭ разной мощности и системы их охлаждения.

Для БМС, СМС и ДМС на водороде с целью более быстрого ввода их в эксплуатацию выбрана традиционная схема самолета «труба + крыло» с увеличенной длиной фюзеляжа для размещения LH<sub>2</sub>-баков. Большие расчетная дальность и крейсерская скорость полета могут ограничить применение новых технологий из-за увеличения энергопотребления и затрат топлива. Для них должна быть уменьшена расчетная дальность полета на ~25...50% и снижена скорость крейсерского полета до числа  $M \approx 0,70...0,72$ , что приведет к увеличению времени полета на ~5...15%.

Для БМС рассматривается применение параллельной ГСУ с ГТД на водороде и ТПТЭ. В условиях крейсерского полета основным источником энергии являются ТПТЭ. Размерность ГТД определяется из условия обеспечения потребной тяги на взлете и при наборе высоты. Такая силовая установка обеспечивает уменьшение влияния на окружающую среду благодаря более высокой эффективности и отсутствию эмиссии NO<sub>x</sub> при использовании ТПТЭ.

По сравнению с базовым самолетом для типового профиля полета данный сегмент самолетов может обеспечить уменьшение энергопотребления на ~4%, стоимости владения на ~5...10% и влияния на окружающую среду на ~70...80%, а также увеличение возможной стоимости пассажиро-километра на ~20...30%.

Основными проблемами при создании таких самолетов будут система безопасного и надежного распределения LH<sub>2</sub> от задней части фюзеляжа к двум установленным на крыле двигателям, ТПТЭ с номинальной мощностью более 10 МВт и система их охлаждения.

В долгосрочной перспективе можно рассмотреть схему самолета с «пропульсивным фюзеляжем» или частично распределенной силовой установкой, что позволит дополнительно уменьшить энергопотребление на ~5...10%.

Для СМС рассматривается обычная силовая установка с ТРДД на водороде. Для типового профиля полета данный сегмент самолетов увеличивает энергопотребление на ~22% и возможную стоимость пассажиро-километра на ~30...40%, но уменьшает влияние на окру-

- Высокоэффективное крыло
- Два  $\text{LH}_2$ -бака позади салона
- Распределенная электрическая силовая установка



а

- Два  $\text{LH}_2$ -бака позади салона
- ТПТЭ для питания электромоторов
- Привод электромоторов от вала ТРДД в крейсерском полете при выключенном ТРДД на водороде



б

- Два  $\text{LH}_2$ -бака: перед салоном и позади него
- ТРДД на водороде с приводом вентилятора через редуктор



в

- Два  $\text{LH}_2$ -бака: перед салоном и позади него
- ТРДД на синтетическом топливе с приводом вентилятора через редуктор



г

Рис. 8. Возможные концепции самолетов и их силовых установок на водороде [19]:

- а – МВЛ, РС: 19...80 пасс., 500...1000 км, крейсерская скорость  $M = 0,44$ ;
- б – БМС: 81...160 пасс., 2000 км, крейсерская скорость  $M = 0,72$ ;
- в – СМС: 161...250 пасс., 7000 км, крейсерская скорость  $M = 0,82$ ;
- г – ДМС: > 250 пасс., 10 000 км, крейсерская скорость  $M = 0,86$

		МВЛ	РС	БМС	СМС	ДМС
Потребность в энергии		-10%	-8%	-4%	+22%	+42%
Уменьшение выбросов $\text{CO}_2$		100%	100%	100%	100%	100%
Уменьшение влияния на климат		80...90%	80...90%	70...80%	50...60%	40...50%
Дополнительная стоимость		0...5%	5...15%	20...30%	30...40%	40...50%
Ввод в эксплуатацию		< 10 лет	10...15 лет	15 лет	20 лет	20...25 лет
Источник мощности СУ		ТПТЭ	ТПТЭ	ГСУ	ГТД на $\text{LH}_2$	ГТД на $\text{LH}_2$
$C_{0\text{max}}$		+15%	+10%	+14%	+12%	+23%

Рис. 9. Основные свойства самолетов на водороде

жающую среду на ~50...60%. Из-за более длинного фюзеляжа и веса  $\text{LH}_2$ -баков возрастают расходы на его эксплуатацию и ТОиР.

Основными проблемами при его создании будут  $\text{LH}_2$ -баки с гравиметрическим индексом не менее 35% и безопасная и надежная система распределения  $\text{LH}_2$  к двум установленным на крыле двигателям.

В долгосрочной перспективе можно рассмотреть схему самолета с гибридным крылом и частично распределенной силовой установкой, что позволит уменьшить энергопотребление на ~5...10%, но потребует большего времени на разработку.

Для ДМС рассматривается обычная силовая установка с двумя ТРДД на водороде. По сравнению с само-

летом на синтетическом топливе длина его фюзеляжа должна быть увеличена на ~30% и для типового профиля полета он увеличивает энергопотребление на ~42%, возможную стоимость пассажиро-километра на ~40...50%, стоимость владения на ~10% и уменьшает влияние на окружающую среду на ~40...50%.

Основными проблемами при его создании будут  $\text{LH}_2$ -баки с гравиметрическим индексом 38% или выше и их интеграция на самолете и безопасная и надежная система распределения  $\text{LH}_2$  к двум установленным на крыле двигателями.

В долгосрочной перспективе только крупный прорыв в разработке  $\text{LH}_2$ -баков или революционная концепция может привести к созданию конкурентоспособ-

ного самолета. Применение самолета с «гибридным крылом» и частично распределенной силовой установкой позволило бы уменьшить энергопотребление на ~15...25%, но потребует большего времени на разработку.

Возможность появления таких самолетов на рынке в течение ближайших 15...20 лет (БМС и СМС) и 20...25 лет (ДМС) достаточно велика.

Для анализа потребности в  $LH_2$ , необходимых изменений в существующей инфраструктуре и цепочке поставки топлива в [19] рассматривается два сценария развертывания самолетов на водороде.

В сценарии № 1 эффективного сокращения эмиссии  $CO_2$  самолеты с дальностью полета до 3000 км (МВЛ, РС, БМС и СМС) начнут заменяться самолетами на водороде к 2030...2040 годам. После увеличения мощностей по производству водорода в течение трех-четырёх лет все новые самолеты МВЛ, РС и БМС и ~50% СМС будут работать на  $LH_2$ . К 2050 году ~40% мирового парка пассажирских самолетов будут переведены на водород, а остальные будут работать на 100%-м синтетическом топливе.

В сценарии № 2 максимального сокращения эмиссии  $CO_2$  самолеты на водороде начнут заменять все самолеты с дальностью полета до 10 000 км после 2028...2038 годов. После увеличения мощностей по производству водорода в течение трех-четырёх лет все новые самолеты с дальностью полета до 10 000 км будут работать на  $LH_2$ . В этом сценарии к 2050 году ~60% мирового парка (МП) пассажирских самолетов будут переведены на водород, а остальные – на 100%-е синтетическое топливо.

**Прогнозируемый спрос на водород.** В настоящее время текущий мировой спрос на водород оценивается в ~116 млн т/год, при этом на чистый водород приходится ~74 млн т/год, а ~42 млн т/год водорода используется в смеси с другими газами в качестве сырья или топлива при производстве тепловой и электрической энергии. Более 95% мирового потребления водорода

приходится на традиционные отрасли (в первую очередь на нефтепереработку и химическую промышленность), самостоятельно обеспечивающие свои потребности путем его производства на заводах в месте потребления [51].

В структуре производства чистого водорода ~75% приходится на природный газ, ~23% – на уголь и ~2% – на электролиз. Из этих трех технологий производства только последняя является углеродно-нейтральной.

С учетом возможных потребностей в водороде при реализации национальных программ развития водородной энергетики стран Европы, Азиатско-Тихоокеанского региона и США дополнительный мировой спрос на водород к 2050 году может составить от 40 до 170 млн т/год в зависимости от темпов развития углеродно-нейтральной экономики и скорости освоения водородных технологий, что во многом будет зависеть от реализации механизмов государственной поддержки [51].

До 2035 года в сценарии № 2 и до 2040 года в сценарии № 1 общий спрос на  $LH_2$  ограничен и достигнет ~5 и ~10 млн т/год соответственно, для производства которых потребуется ~500 ГВт электроэнергии (рис. 10,а) [19]. Такое количество  $LH_2$  к 2040 году будет соответствовать ~5 и ~20% общемирового спроса на него.

Широкое применение водорода в авиации к 2050 году потребует создания новой инфраструктуры по всему миру. До 2050 года внедрение  $LH_2$  произойдет в сегментах самолетов МВЛ, РС и БМС, что превысит 50% парка воздушных судов, и проникнет в сегмент СМС (в сценарии № 2 и в сегмент ДМС). К 2050 году спрос на  $LH_2$  достигнет ~40 млн т/год в сценарии № 1 и ~130 млн т/год – в сценарии № 2, для его производства потребуется ~1500 ГВт электроэнергии (рис. 10,б) [19]. Такое количество  $LH_2$  к 2050 году будет соответствовать ~10 и ~25% общемирового спроса на него.

К 2050 году возникнет множество проблем, поскольку новая инфраструктура будет развиваться параллельно с существующей для заправки синтетическим топливом оставшейся части мирового парка самолетов,

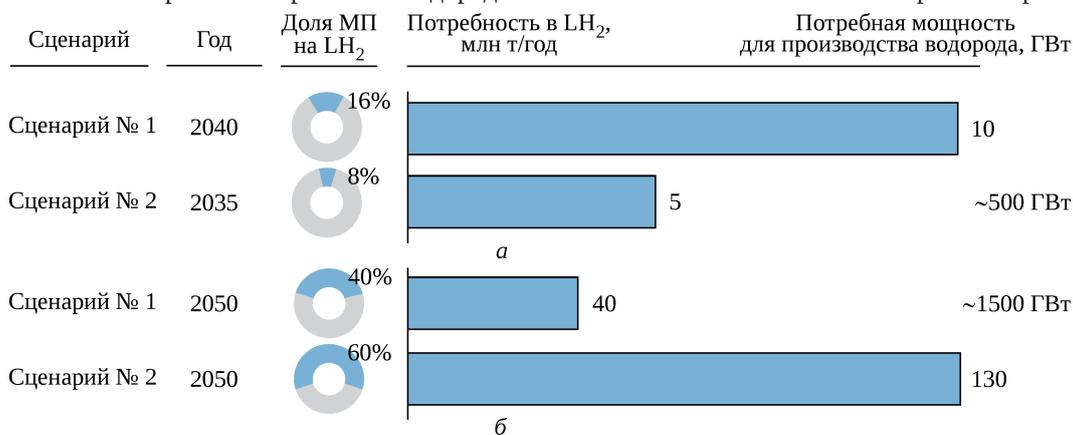


Рис. 10. Потребность в водороде при его применении в авиации к 2040 году (а) и к 2050 году (б) [19]

что вызовет проблемы в области других видов транспорта, где требуется переход на топливо с низким содержанием углерода.

**Необходимое изменение инфраструктуры.** В первые годы создания инфраструктуры (до 2035 года по сценарию № 2 и 2040 года по сценарию № 1) региональные аэропорты будут лидировать в использовании самолетов на водороде на местных и региональных маршрутах, особенно те, которые располагаются вблизи возобновляемых источников энергии, необходимых для производства «зеленого» водорода. Региональные аэропорты могут стать хорошей отправной точкой, так как обслуживают относительно небольшое количество других аэропортов и имеют меньше проблем с ограничениями на свободное пространство, что позволит постепенно создавать инфраструктуру, необходимую для применения водорода. LН<sub>2</sub>-трейлеры могут относительно легко доставлять водород в эти аэропорты, а поиск мест для заводов по его производству и хранилищ окажется менее трудным, чем в узловых аэропортах.

В первые годы, учитывая требуемую величину LН<sub>2</sub>, принципиальное изменение инфраструктуры заправки вряд ли понадобится. В этот период количество требуемых LН<sub>2</sub>-топливозаправщиков будет примерно вдвое превышать количество, необходимое при применении синтетического топлива, но будет составлять лишь небольшую долю от существующего парка топливозаправщиков в аэропорту. Надо учесть, что LН<sub>2</sub>-топливозаправщики сильно отличаются от обычных и потребуют обучения вождению и основам обеспечения безопасности при эксплуатации.

Кроме того, время заправки, вероятно, останется в пределах требуемого для оборота БМС. Шланги для LН<sub>2</sub> могут обеспечить ту же скорость его подачи в краткосрочной перспективе, что и шланги для керосина/синтетического топлива – около 900 л/мин, если приспособиться к их большому весу и меньшей маневренности. Учитывая более низкую плотность LН<sub>2</sub>, заправка им все равно будет намного медленнее, но если количество шлангов будет увеличено с одного до двух, то заправка БМС займет от 20 до 30 мин, что будет соответствовать норме. Обеспечение безопасности при заправке может исключить возможность проведения параллельных работ на самолете. Это может иметь серьезные последствия, так как потеря более 10 мин при обороте БМС и частоте полетов три-четыре раза в день приведет к уменьшению годового налета, что окажет отрицательное влияние на доход авиакомпании.

Для инфраструктуры аэропортов есть и другие факторы, которые необходимо решить в краткосрочной перспективе. Так как БМС может быть на пять метров длиннее обычного самолета, то потребуются минимальное обновление инфраструктуры для его размещения

у рукава при посадке/высадке пассажиров. Если LН<sub>2</sub> поставляется в аэропорт LН<sub>2</sub>-трейлерами извне, то для его хранения необходимо место за пределами аэропорта. Для обеспечения безопасности такого хранилища необходима территория вокруг него, требования к которой еще не определены. Наконец, стоит отметить, что в первые годы, когда не все аэропорты имеют инфраструктуру для работы с LН<sub>2</sub>, перенаправленные рейсы могут застрять в нем в ожидании заправки от LН<sub>2</sub>-топливозаправщика, если в нем нет соответствующей инфраструктуры.

Несмотря на проблемы, техническая осуществимость создания инфраструктуры для работы с LН<sub>2</sub> в первые годы (до 2040 года в сценарии № 1 и до 2035 года в сценарии № 2) достаточно высока даже в условиях ограничений существующей инфраструктуры. Основная проблема, скорее всего, будет заключаться в обеспечении необходимой координации между производителями самолетов, поставщиками топлива, аэропортами и авиакомпаниями, поскольку речь идет о создании новой отрасли.

В то время как создание инфраструктуры для обеспечения работы авиации на водороде сопряжено с множеством проблем, она может быть использована для решения других задач, в частности для обеспечения потребностей аэропорта в отоплении и электроэнергии, а также для предоставления его предприятиям, расположенным вблизи аэропорта, в качестве дешевого и надежного топлива.

Применение водорода в авиации приводит к появлению двух важных системных факторов. Во-первых, в сценарии № 2 внедрение LН<sub>2</sub> в сегмент ДМС снизит их максимальную дальность полета до 10 000 км. Если все полеты на большие расстояния будут обслуживаться такими самолетами, то возникнет необходимость внесения изменений в маршруты и продолжительность полетов, с введением промежуточной(ых) остановки(ок). Также внедрение водорода в авиацию может спровоцировать пересмотр сегментов самолетов, что приведет к необходимости оптимизации всей системы воздушного движения.

**Цепочка поставки топлива.** При применении водорода цепочка поставки топлива может выглядеть следующим образом. В первые годы LН<sub>2</sub> будут получать на заводе при электролизе воды с использованием возобновляемых источников энергии («зеленый» водород) или риформинге природного газа в сочетании с улавливанием и хранением углерода («голубой» водород). Оба эти способа могут существовать параллельно.

После производства водород должен быть распределен в жидком состоянии с помощью LН<sub>2</sub>-трейлеров для небольших аэропортов или газообразном состоянии по газопроводу для узловых аэропортов. Он также может быть доставлен в жидком состоянии при преоб-

разовании в аммиак или жидкие органические носители водорода. В аэропорту водород будет сжижаться (если не сжижен на заводе), храниться и поставляться для заправки самолетов LH<sub>2</sub>-топливозаправщиками или альтернативным способом (заправочные платформы или участки для заправки самолетов).

В свою очередь, для изготовления синтетического топлива будет использоваться водород, полученный при электролизе воды или риформинге природного газа, и углерод (CO<sub>2</sub>) из воздуха или промышленных выбросов, а для его транспортировки можно использовать те же способы доставки, хранения и заправки самолетов в аэропортах, что и при применении авиационного керосина.

Вероятно, к 2035 или 2040 году инфраструктура для производства и доставки водорода будет достаточно развита для применения его в авиации, за исключением каких-либо специальных мощностей по сжижению, необходимых в узловых аэропортах. При этом синтетическое топливо фактически окажется в невыгодном положении из-за падения спроса на него, что приведет к меньшему снижению затрат на развитие производства, чем в случае с LH<sub>2</sub> (рис. 11).

В сценарии № 1 к 2040 году прогнозируемый спрос на LH<sub>2</sub> эквивалентен спросу, который возник бы, если бы все региональные аэропорты сегодня перевели на LH<sub>2</sub> ~10% своей топливной инфраструктуры, а основные узловые аэропорты – ~5%.

Для среднего регионального аэропорта это изменение потребует поставки LH<sub>2</sub> около 5000 т/год, или около 10 т/день. Для таких аэропортов LH<sub>2</sub> может поставляться напрямую с заводов-изготовителей, которые уже производят его для других целей, полагаясь на существующие цепочки поставок. В качестве альтернативы для удов-

летворения потребности в LH<sub>2</sub> можно рассмотреть создание завода для электролиза в аэропорту, потребляющего ~50 МВт электроэнергии.

Для узловых аэропортов пятипроцентное переключение топливной инфраструктуры на LH<sub>2</sub> потребует его поставки около 40 000 т/год, или около 100 т/день. Для удовлетворения этих потребностей будут необходимы LH<sub>2</sub>-трейлеры или газопроводы от ближайшего завода по электролизу, потребляющего ~500 МВт электроэнергии. В этом случае потребуется строительство мощностей по сжижению водорода.

В сценарии № 2 для первых лет наращивания производства можно сделать те же выводы, за исключением того, что события произойдут примерно на пять лет раньше. Позже весь произведенный водород необходимо будет сжижать, что увеличит требуемые мощности для этой операции во всем мире, поскольку авиация будет одним из немногих крупных его потребителей.

В сценарии № 1 к 2050 году спрос на LH<sub>2</sub> был бы эквивалентен спросу, который возник бы, если бы все региональные аэропорты сегодня переключили на LH<sub>2</sub> ~50% своей топливной инфраструктуры, а узловые аэропорты – ~25%.

Среднему региональному аэропорту потребуется LH<sub>2</sub> около 20 000 т/год, или около 60 т/день. Если бы аэропорт нуждался в поставках с завода-изготовителя, то она осуществлялась бы LH<sub>2</sub>-трейлерами. Этот механизм по-прежнему применим для большинства региональных аэропортов.

Узловые аэропорты столкнутся с более серьезными проблемами поставок LH<sub>2</sub>. Таким аэропортам потребуется около 200 000 т/год или около 500 т/день. Удовлетворение этих потребностей LH<sub>2</sub>-трейлерами представляет для аэропортов угрозу безопасности, подъездные

										
Описание		Энергия	Производство H <sub>2</sub>	Захват CO <sub>2</sub> + синтез топлива	Ожижение H <sub>2</sub>	Поставка топлива	Распределение топлива	Ожижение H <sub>2</sub>	Хранение LH <sub>2</sub>	Заправка LH <sub>2</sub>
Обеспечение жидким водородом	Завод вне аэропорта + ТР	✓	✓		✓	✓	✓		✓	✓
	Завод вне аэропорта + ГЗП	✓	✓				✓	✓	✓	✓
	Завод в аэропорту	✓	✓					✓	✓	✓
Обеспечение SAF (синт. топливо)	Завод вне аэропорта	✓	✓	✓		✓	✓		✓	✓
	Завод в аэропорту	✓	✓	✓					✓	✓

Рис. 11. Цепочки поставок жидкого водорода и синтетического топлива (ТР – трейлер, ГЗП – газопровод) [19]

пути к ним и так перегружены. Поэтому предпочтительны поставки по газопроводу, хотя в некоторых ситуациях вариантом может быть доставка и другим видом транспорта. В любом случае необходимо будет реконструировать существующие газопроводы или построить новые специально для водорода.

В качестве альтернативы аэропорты в местах с хорошим доступом к возобновляемым источникам энергии могут обслуживаться напрямую электролизными заводами, расположенными поблизости.

Для удовлетворения потребностей в LH<sub>2</sub> среднего узлового аэропорта к 2050 году потребуются электролизный завод, потребляющий около 2 ГВт электроэнергии. Если бы на эти электролизные заводы энергия подавалась от ветроэнергетических установок, то потребовались бы четыре крупных морских парка мощностью 500 МВт каждый (сегодня это самый высокий уровень выработки электроэнергии в морском парке) для снабжения только одного аэропорта.

**Прогнозируемый спрос на электроэнергию.** Как было показано на рис. 10, в зависимости от сценария для удовлетворения спроса пассажирских самолетов на LH<sub>2</sub> потребуются от 500 до 1500 ГВт электроэнергии от возобновляемых источников, или от ~20 до ~60% электроэнергии, вырабатываемой ими в настоящее время.

При этом если было бы произведено эквивалентное по энергообеспечению количество синтетического топлива, то из-за менее эффективных технологических процессов для этого потребовалось бы в ~2,6 раза больше электроэнергии от возобновляемых источников при использовании технологии улавливания CO<sub>2</sub> из воздуха и в ~1,7 раза больше – при технологии улавливания CO<sub>2</sub> из промышленных выбросов, чем при производстве водорода при электролизе воды (рис. 12).

Это существенный недостаток синтетического топлива, так как мировая энергетическая система столкнется с проблемой значительного увеличения спроса на производство электроэнергии от возобновляемых источников.

Так, по сценарию № 1, когда к 2050 году ~40% самолетов будут работать на LH<sub>2</sub>, а остальные – на синтетическом топливе, общая потребность в электроэнергии для обеспечения авиации топливом составит около 28 ПВт·ч. Это приведет к увеличению выработки потребной электроэнергии от возобновляемых источников в пять раз по сравнению с производимой сегодня во всем мире, или в 20...30 раз по сравнению с тем, что вырабатывается в настоящее время в Европе (см. рис. 12).

Для получения такого количества электроэнергии из возобновляемых источников необходимо будет беспрецедентно увеличить ее выработку.

**Оценка стоимости топлива.** Создание необходимой инфраструктуры для применения водорода в авиации в конечном итоге отразится и на стоимости топлива для авиакомпаний, которая включает все расходы – от производства до заправки в самолет.

По оценкам, к 2040 году стоимость LH<sub>2</sub>, производимого в Европе, может составить от ~2,60 до ~3,50 долларов США за 1 кг LH<sub>2</sub> в зависимости от места производства и способа поставки (рис. 13). Стоимость LH<sub>2</sub>, изготовленного на заводе, расположенном на территории аэропорта, будет самой низкой, если поблизости будет находиться источник возобновляемой энергии. Стоимость LH<sub>2</sub>, изготовленного на заводе за пределами аэропорта и поставленного LH<sub>2</sub>-трейлерами, при небольших объемах может быть конкурентоспособной в сравнении с предыдущей. При больших объемах стоимость LH<sub>2</sub> при его транспортировке в аэропорт по газопроводу

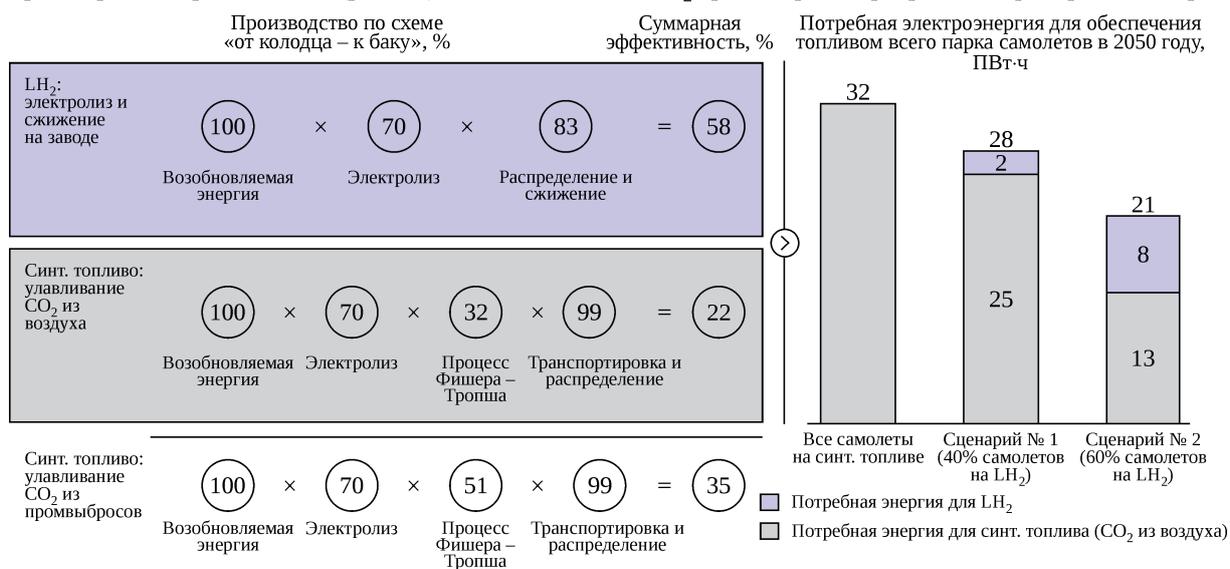


Рис. 12. Эффективность технологических процессов и потребность в электроэнергии от возобновляемых источников в зависимости от вида топлива и сценариев применения водорода в авиации [19]

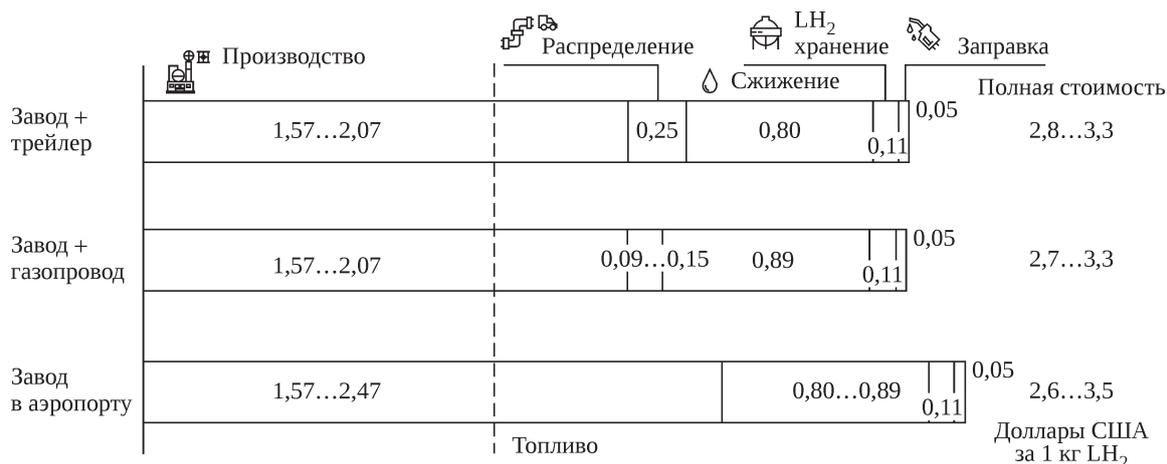


Рис. 13. Ориентировочная стоимость 1 кг LH<sub>2</sub> в зависимости от места производства и способа поставки в аэропорт в 2040 году [19]

может оказаться наиболее рентабельной. LH<sub>2</sub> из-за затрат на производство по-прежнему будет дороже керосина, стоимость которого оценивается в ~1,90 долл/кг в энергетическом LH<sub>2</sub>-эквиваленте (при условии неизменности затрат на производство керосина).

Если сравнить вероятную стоимость синтетического топлива, выраженную в долларах США за 1 кг в энергетическом LH<sub>2</sub>-эквиваленте, то с учетом потребностей в нем к 2040 году она может составить ~4,10 долл/кг при его производстве по технологии улавливания CO<sub>2</sub> из промышленных выбросов и ~6,80 долл/кг – при производстве по технологии улавливания CO<sub>2</sub> из воздуха. Таким образом, в энергетическом эквиваленте стоимость LH<sub>2</sub> будет ниже, чем стоимость синтетического топлива. Основная причина – разница в затратах на электроэнергию при производстве. «Зеленый» водород требует ~1,7 кВт·ч энергии для производства 1 кВт·ч топливной энергии (включая поставку и распределение). Для синтетического топлива, производимого по технологии улавливания CO<sub>2</sub> из промышленных выбросов, этот показатель ближе к 2,8 кВт·ч, а для производимого по технологии улавливания CO<sub>2</sub> из воздуха – к 4,6 кВт·ч.

Эта разница связана с тем, что процесс выделения CO<sub>2</sub> является довольно энергоемким, а дальнейшая переработка водорода и CO<sub>2</sub> в синтетическое топливо требует дополнительных технологических процессов.

Учитывая, что производство LH<sub>2</sub> и синтетического топлива является энергоемким, одним из способов снижения его стоимости заключается в выборе места, обеспечивающего доступ к дешевым возобновляемым источникам энергии. Так, перемещение выработки электроэнергии ветроэнергетическими установками из Европы на Ближний Восток позволит уменьшить стоимость 1 МВт·ч с ~36 до ~14 долл. Что касается синтетического топлива, то перемещение его производства из Европы на Ближний Восток снизит общую стоимость с ~6,80 до ~4,30 долл/кг в энергетическом LH<sub>2</sub>-эквиваленте.

LH<sub>2</sub> также можно производить дешевле на Ближнем Востоке, но, учитывая ожидаемые высокие транспортные расходы, его стоимость упадет до ~2,40 долл/кг.

Ожидается, что со временем, независимо от вида или источника топлива, стоимость будет падать по мере увеличения объемов поставок благодаря расширению производства, повышению эффективности процессов

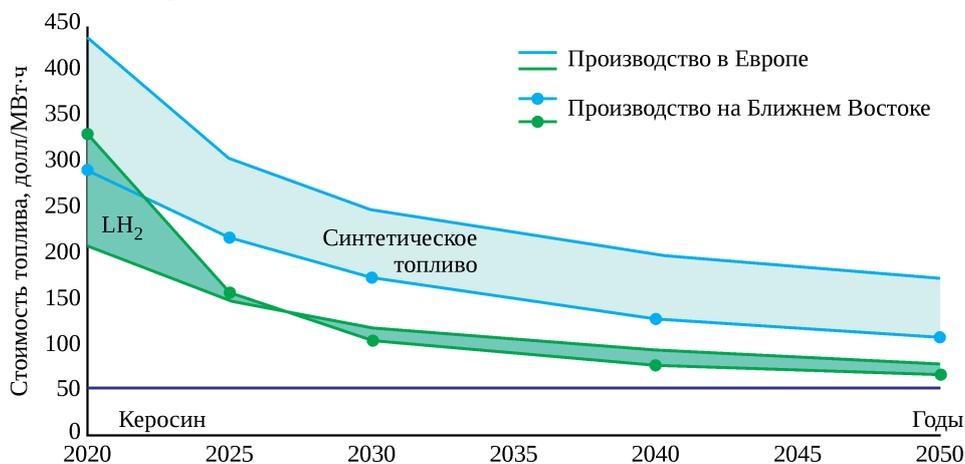


Рис. 14. Прогнозируемое изменение стоимости топлива [19]

и более оптимальному использованию инфраструктуры. На рис. 14 показана оценка изменения стоимости каждого вида топлива в зависимости от места производства.

Независимо от источника, альтернативные виды топлива будут становиться все более конкурентоспособными в сравнении с керосином. Ожидается, что стоимость  $LH_2$  к 2050 году упадет примерно до одинаковой с ним величины, а стоимость синтетического топлива будет по-прежнему выше в ~2 раза (см. рис. 14) [19].

**Оценка стоимости владения.** При сравнении экономической эффективности самолетов используют понятие общей стоимости владения (total costs of ownership, TCO), которая включает стоимости топлива и соответствующей инфраструктуры, самого самолета и эксплуатации, отличающиеся для самолетов на керосине и водороде. Сравнение самолетов на керосине и синтетическом топливе проще, поскольку у них отличаются только стоимости топлива и инфраструктуры для доставки топлива. При этом в стоимость не включаются косвенные затраты второго порядка, которые сегодня трудно представить и оценить [19].

Так, в 2040 году стоимость владения БМС на водороде с технологиями 2035 года увеличится на ~25% по сравнению со стоимостью владения самолета на керосине из-за увеличения затрат на энергопотребление (9%), капитальных затрат на самолет (7%) и затрат на техническое обслуживание (6%). Стоимость владения БМС на синтетическом топливе с технологиями 2035 года увеличится на ~32% по сравнению со стоимостью владения самолетом на керосине из-за увеличения затрат на энергопотребление (рис. 15) [16].

Увеличение стоимости владения БМС на водороде будет минимальным, для СМС оно может возрасти до ~35% за счет применения более крупных и тяжелых  $LH_2$ -баков, а для ДМС – даже до ~50%. При этом самолеты на синтетическом топливе, изготовленном по технологии прямого улавливания  $CO_2$  из воздуха, по сравнению с самолетами на водороде будут иметь: самолеты

МВЛ, РС и БМС – более высокую стоимость владения, СМС – примерно такую же, ДМС – потенциально более низкую. Для компенсации увеличения стоимости владения авиакомпании увеличат стоимость авиабилетов так, чтобы покрыть все затраты [19].

*Затраты на энергопотребление* зависят от стоимости топлива и энергии, необходимой для перемещения самолета. Самолет на водороде тяжелее, и для его перемещения требуется больше энергии, чем самолету на керосине. Водород также дороже в производстве по сравнению с керосином, хотя ожидается, что его стоимость будет быстро снижаться из-за увеличения спроса и связанного с этим снижения производственных затрат и к 2050 году цены на него приблизятся к цене на керосин.

Из-за более высоких затрат на электроэнергию при производстве синтетического топлива по технологии прямого улавливания  $CO_2$  из воздуха стоимость владения самолета выше, чем у самолета на водороде. Хотя со временем затраты на его производство также снизятся, они все равно останутся выше затрат на производство водорода из-за большего потребления электроэнергии и дополнительных технологических процессов. Затраты на топливо также будут зависеть от изменения спроса на самолеты с водородом по сравнению с самолетами на керосине.

Более высокие *капитальные затраты* для самолетов на водороде связаны с дополнительными затратами на  $LH_2$ -баки, силовую установку, более сложную систему распределения топлива и с увеличением размеров самолета. Затраты на ТОиР могут возрасти из-за больших размеров планера и наличия  $LH_2$ -баков, которые могут потребовать дополнительных проверок, особенно в первые годы их внедрения. В долгосрочной перспективе затраты на ТОиР могут снизиться.

*Прочие расходы* учитывают годовой налет самолета, аэропортовые сборы и сборы за услуги диспетчерской службы. Большее время заправки самолетов на водороде, чем у самолетов на керосине, приводит к сокращению

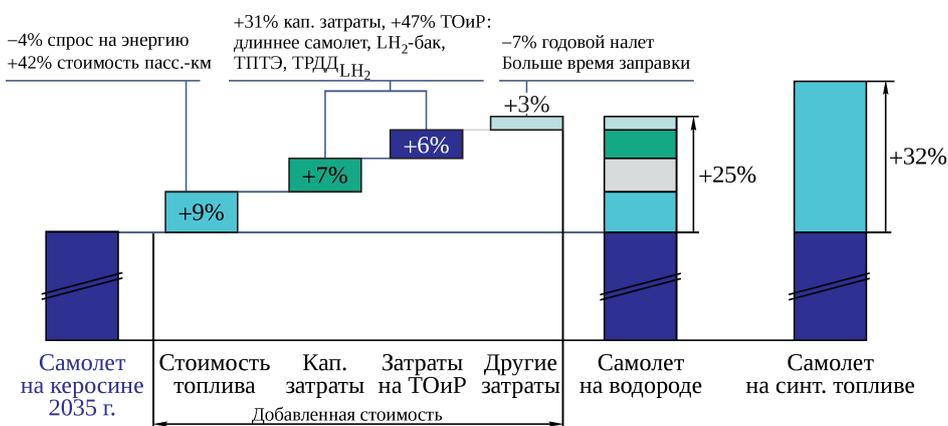


Рис. 15. Сравнение стоимости владения БМС при применении водорода и синтетического топлива по сравнению с самолетом на керосине в 2040 году [19]

годового налета на 5...10%. Чтобы избежать этого, необходимо разработать технологии, обеспечивающие уменьшение времени заправки самолетов на водороде по сравнению с самолетами на керосине или синтетическом топливе до тех пор, пока они не получат широкого распространения. Аэропортовые сборы и сборы за услуги диспетчерской службы зависят в основном от максимального взлетного веса самолета. Так как взлетный вес самолета на водороде больше, чем у самолета на керосине, то и сборы будут выше, но они могут быть компенсированы благодаря отсутствию сборов за превышение выбросов CO<sub>2</sub> (CORSIA) или изменены при разработке и широком применении углеродно-нейтральных технологий в авиации.

**Сравнение самолетов на водороде и синтетическом топливе.** При сравнении самолетов на водороде и синтетическом топливе необходимо учитывать не только стоимость владения, но и ряд других факторов, которые показаны на рис. 16 [19].

Как было показано выше, самолеты на водороде в зависимости от типа силовой установки и сегмента обеспечивают уменьшение влияния на климат на ~40...90%, в то время как самолеты на синтетическом топливе, изготовленном по технологии улавливания CO<sub>2</sub> из воздуха, – на ~30...60%.

При условии реализации основных технических решений применение водорода целесообразно на самолетах МВЛ, РС, БМС и СМС. Из-за большого веса LH<sub>2</sub>-баков и энергопотребления применение водорода на ДМС нецелесообразно. В долгосрочной перспективе революционные концепции самолетов могут улучшить экономические показатели для ДМС, но их реализация может выйти за рамки 2050 года. В свою очередь, синтетическое топливо нужно только сертифицировать и испытывать, чтобы использовать на существующих самолетах. При этом конструкция самолетов остается неизменной или подвергается незначительной модернизации.

При эксплуатации самолетов важными операциями являются заправка и наземное обслуживание. Поскольку LH<sub>2</sub> имеет больший объем, чем керосин, то заправка самолета LH<sub>2</sub> может занять в ~2 раза больше времени для самолетов МВЛ, РС и БМС и в ~3 раза – для СМС и ДМС. Сокращение времени заправки связано с разработкой новых технологий. Работа с новым топливом потребует также разработки новых правил техники безопасности, которые потенциально могут препятствовать проведению параллельных работ на самолете. Если синтетическое топливо сертифицировано и правила техники безопасности для него такие же, как и для керосина, то стоимость эксплуатации самолетов будет сопоставима со стоимостью эксплуатации самолетов на керосине.

Применение водорода требует изменения инфраструктуры аэропортов, включая создание объектов для сжижения и хранения LH<sub>2</sub>, а также заправки самолетов, в то время как синтетическое топливо совместимо с существующей инфраструктурой и средствами для заправки и хранения в аэропортах.

Производство LH<sub>2</sub> более эффективно, чем производство синтетического топлива, которое потребляет примерно в 2,6 раза больше электроэнергии от возобновляемых источников. Это серьезный недостаток синтетического топлива, особенно с учетом того, что к 2050 году мощности возобновляемых источников энергии не могут быть одинаковыми во всех регионах мира.

При сравнении самолетов на водороде и синтетическом топливе необходимо учитывать их влияние не только на эмиссию CO<sub>2</sub>, но и на климат (окружающую среду). Для этого применяется понятие «затраты на уменьшение влияния на климат» (climate impact abatement costs, CIAC), определяемые в CO<sub>2</sub>-эквиваленте.

Поскольку при применении водорода конструкция самолета изменяется, то затраты на уменьшение влияния на климат для разных сегментов самолетов будут отличаться.

	 Топливные элементы	 ГТД на водороде	 Синтетическое топливо
 Влияние на климат	Уменьшение на 70...90%	Уменьшение на 50...75%	Уменьшение на 30...60%
 Сегменты самолетов	Возможны для самолетов МВЛ, РС и БМС	Для всех сегментов, кроме ДМС с L > 10 000 км	Только незначительные изменения
 Эксплуатация самолета	В 2 раза больше времени на заправку (МВЛ, РС, БМС)	В 2...3 раза больше времени на заправку (СМС, ДМС)	То же время заправки
 Инфраструктура аэропорта	Необходимы объекты для сжижения и хранения LH <sub>2</sub> , а также для заправки самолетов		Пригодна существующая инфраструктура
 Цепочка поставки топлива	Требуется в 1,7 раза больше энергии для производства топлива		Требуется в 4,6 раза больше энергии для производства
 Стоимость владения (водород и синт. топливо)	Ниже для самолетов МВЛ, РС и БМС	Ниже для СМС, выше для ДМС	Выше, чем для самолетов МВЛ, РС, БМС и СМС на водороде

**Рис. 16.** Факторы, учитываемые при сравнении целесообразности применения самолетов на водороде и синтетическом топливе [19]

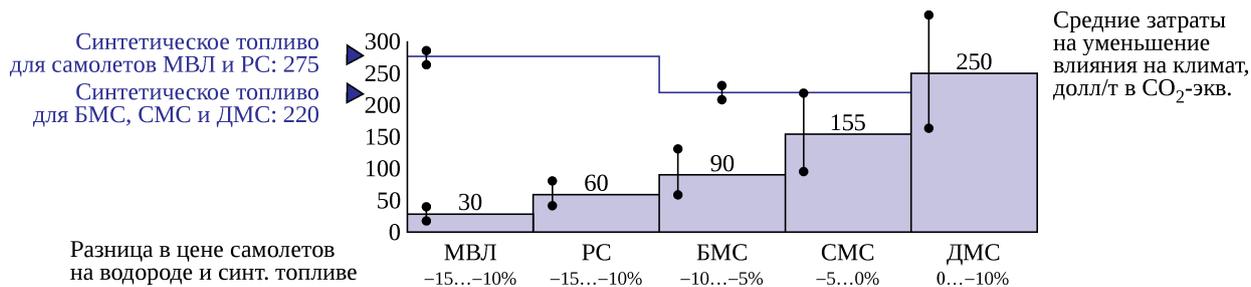


Рис. 17. Прогнозируемые средние затраты на уменьшение влияния на климат для самолетов в 2040 году [19]

Применение синтетического топлива не требует внесения изменений в конструкцию самолета, и этот вид затрат будет зависеть только от уменьшения влияния на климат каждого сегмента самолетов.

В 2040 г. затраты на уменьшение влияния на климат для самолетов МВЛ могут составить ~20...40 долл/т в CO<sub>2</sub>-эквиваленте, а для БМС – ~70...130 долл/т в CO<sub>2</sub>-эквиваленте. По оценкам, в 2040...2050 гг. затраты могут изменяться в диапазоне ~170...250 долл/т в CO<sub>2</sub>-эквиваленте. В этот диапазон укладываются все самолеты с малой дальностью полета и даже СМС, для которого эти затраты будут находиться на уровне ~100...220 долл/т в CO<sub>2</sub>-эквиваленте (рис. 17).

С другой стороны, затраты при применении в БМС и ДМС синтетического топлива, изготовленного по технологии прямого улавливания CO<sub>2</sub> из воздуха, для которых не требуется модификация самолета или системы подачи топлива, составят ~210...230 долл/т в CO<sub>2</sub>-эквиваленте. Однако для ДМС эти затраты при применении синтетического топлива, вероятно, будут меньше, чем при применении водорода, для которого они составят ~160...350 долл/т в CO<sub>2</sub>-эквиваленте.

В приведенном выше сравнении используется синтетическое топливо, которое является углеродно-нейтральным. Альтернативой такому способу его производства является технология улавливания CO<sub>2</sub> из промышленных выбросов. Такое синтетическое топливо не является углеродно-нейтральным, потому что углеродный цикл не замкнут. Углерод «перерабатывается» для еще одного использования в самолете. Если 50% промышленных выбросов засчитывается для повторного использования в самолете, то такое синтетическое топливо будет стоить ~1,00 долл/кг (по сравнению с 1,60 долл/кг), а затраты на уменьшение влияния на климат упадут до ~130...150 долл/т в CO<sub>2</sub>-эквиваленте. Такое синтетическое топливо уменьшит влияние на климат на ~15...35% в CO<sub>2</sub>-эквиваленте, а остальное потребует компенсации.

Затраты на уменьшение влияния на климат в CO<sub>2</sub>-эквиваленте являются прогнозными и зависят от нескольких факторов. Наиболее критичными являются стоимость LH<sub>2</sub>, капитальные затраты на самолет, назна-

ченный ресурс ГТД и время заправки. Предполагается, что начальная стоимость LH<sub>2</sub> составит 2,60 долл/кг при поставке в ЕС с Ближнего Востока и около 3 долл/кг – при производстве в Европе. Увеличение капитальных затрат на ~10% для БМС приведет к увеличению затрат на уменьшение влияния на климат в CO<sub>2</sub>-эквиваленте на ~12%, в то время как увеличение назначенного ресурса ГТД на ~10% (первоначальный ресурс составляет 30 000 ч) снизит затраты на уменьшение влияния на климат в CO<sub>2</sub>-эквиваленте на ~2%. Увеличение времени заправки LH<sub>2</sub> для БМС с 20 до 30 мин приводит к увеличению затрат на уменьшение влияния на климат в CO<sub>2</sub>-эквиваленте на ~9%.

Затраты на уменьшение влияния на климат в CO<sub>2</sub>-эквиваленте в 2050 году потенциально могут быть ниже, поскольку увеличение производства и накопленный опыт эксплуатации самолетов на водороде приведут к уменьшению стоимости LH<sub>2</sub>, а также к меньшей стоимости хранения LH<sub>2</sub> и стоимости силовой установки. Аналогичное снижение стоимости может быть достигнуто и для синтетического топлива (рис. 18).

Поскольку в настоящее время в авиации измеряется только эмиссия CO<sub>2</sub>, то самолеты с силовыми установками на водороде и синтетическом топливе, изготовленном по технологии прямого улавливания CO<sub>2</sub> из воздуха, обеспечат полное сокращение эмиссии CO<sub>2</sub>. При этом самолеты от МВЛ до СМС с силовыми установками на водороде будут более экономичными, чем на син-

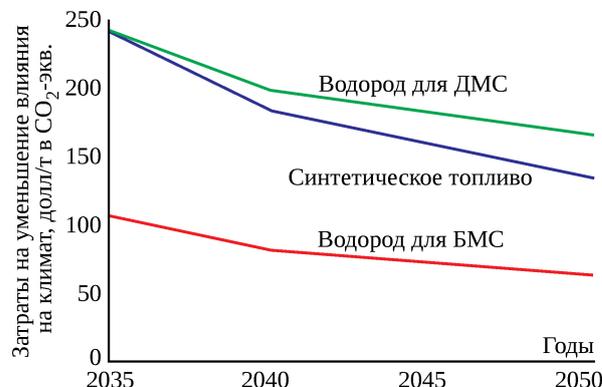


Рис. 18. Прогнозируемое изменение затрат на уменьшение влияния на климат в CO<sub>2</sub>-эквиваленте [19]

тетическом топливе. Так, если средние затраты на уменьшение влияния на климат для СМС на водороде составят ~250 долл/т в CO<sub>2</sub>-эквиваленте, то для СМС на синтетическом топливе – ~280 долл/т в CO<sub>2</sub>-эквиваленте (рис. 19).

На рис. 20 показано прогнозируемое снижение эмиссии CO<sub>2</sub> и влияния на климат в CO<sub>2</sub>-эквиваленте при применении в авиации водорода. В 2050 году по сценариям № 1 и 2 снижение эмиссии CO<sub>2</sub> может составить ~1,8 Гт. При этом уменьшение влияния на климат в CO<sub>2</sub>-эквиваленте по сценарию № 1 составит ~2,7 Гт (сокращение на ~47%), а по сценарию № 2 – ~3,0 Гт (сокращение на 53%). В обоих случаях установленные цели по сокращению эмиссии CO<sub>2</sub> (~50%) будут достигнуты.

Даже при переводе всех самолетов в каждом сегменте на LH<sub>2</sub>, что, по оценке, может быть достигнуто не ранее 2060 года, уменьшение влияния авиации на

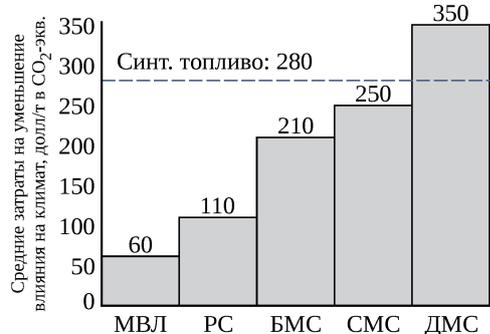


Рис. 19. Прогнозируемые средние затраты на уменьшение влияния на климат для самолетов в 2050 году [19]

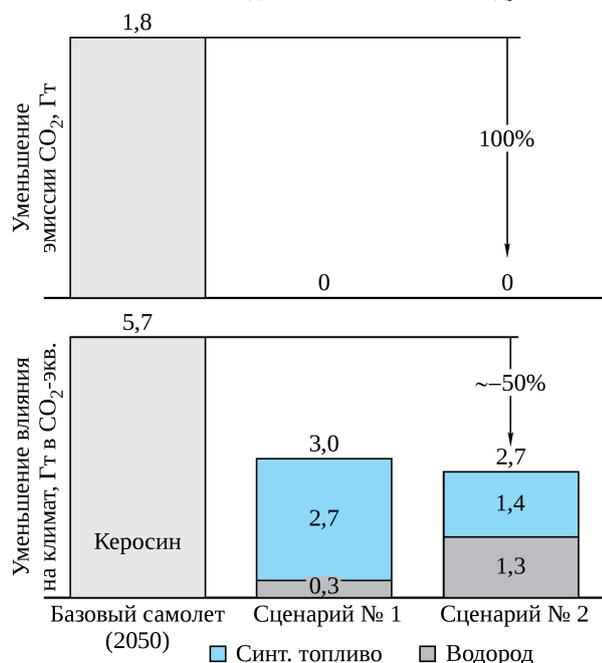


Рис. 20. Прогнозируемое сокращение эмиссии CO<sub>2</sub> и влияние на климат при применении на самолетах водорода и синтетического топлива в 2050 году [19]

климат в CO<sub>2</sub>-эквиваленте в 2050 году может приблизиться к 65%. Поэтому добиться нулевого влияния авиации на климат к этому сроку при переводе ее на водород невозможно. В настоящее время нет другой технологии, технически осуществимой с точки зрения затрат средств и ресурсов, которая могла бы гарантировать нулевое влияние авиации на климат к 2050 году.

## Заключение

Проводимые в настоящее время за рубежом исследования по применению альтернативных видов топлива в авиации с целью достижения к 2050 году углеродно-нейтрального влияния авиации на климат показали следующее.

Применение в авиации синтетического топлива, производимого с использованием возобновляемых источников энергии, позволит сократить влияние авиации на климат в CO<sub>2</sub>-эквиваленте на ~15...60% в зависимости от технологии его производства и сегмента пассажирских самолетов. Однако в этом случае не нужно создавать новую инфраструктуру, цепочку поставки топлива и вносить изменения в конструкцию самолетов и двигателей, изменять процедуру сертификации и правила техники безопасности при эксплуатации. При этом стоимость владения самолетом может увеличиться до ~30% из-за большей стоимости топлива.

Применение жидкого водорода, производимого с использованием возобновляемых источников энергии, позволяет сократить влияние на климат на ~40...90% в зависимости от типа силовой установки и сегмента пассажирских самолетов. Даже при переводе всех самолетов в каждом сегменте на водород, что, по оценке, может быть достигнуто не ранее 2060 года, уменьшение влияния авиации на климат в CO<sub>2</sub>-эквиваленте в 2050 году может приблизиться к 65%. Поэтому добиться нулевого влияния авиации на климат к этому сроку при переводе ее на водород невозможно. В настоящее время не существует какой-либо другой технологии, технически осуществимой с точки зрения затрат средств и ресурсов, которая могла бы гарантировать такое влияние авиации на климат к 2050 году.

При применении в авиации водорода потребуется создание новой инфраструктуры, включая объекты сжижения, хранения и заправки самолетов в аэропортах, цепочки поставки топлива, разработка процедуры сертификации и правил техники безопасности при эксплуатации, которые потенциально могут препятствовать проведению параллельных работ на самолете. При этом стоимость владения самолетом на водороде в зависимости от сегмента может увеличиться до ~50% из-за больших затрат на топливо, ТОиР, эксплуатацию и уменьшения годового налета.

Оценка целесообразности применения самолетов на водороде показала, что, несмотря на необходимость разработки новых технологий и изменения инфраструктуры, они могут стать основными самолетами для полетов на короткие и средние расстояния (МВЛ, РС, БМС и СМС). Однако для самолетов с пассажироместностью более 250 человек и дальностью полета более 10 000 км (ДМС) из-за большого веса  $\text{LH}_2$ -баков применение водорода нецелесообразно. Если не будут доступны революционные концепции ДМС и изменены существующие маршруты, то лучшим вариантом будет ДМС на синтетическом топливе.

При производстве эквивалентного по энергии количества синтетического топлива с использованием возобновляемых источников энергии в зависимости от технологии из-за менее эффективных технологических процессов потребуется в ~1,7 или в ~2,6 раза больше электроэнергии, чем при электролизе водорода. Это существенный недостаток синтетического топлива, так как

мировая энергетическая система столкнется с проблемой значительного увеличения спроса на производство электроэнергии от возобновляемых источников.

В зависимости от сценария к 2050 году на водород может быть переведено ~40 или ~60% мирового парка пассажирских самолетов, а потребность в нем составит ~40 или ~130 млн тонн в год, остальные же самолеты будут работать на синтетическом топливе. Даже при переводе только 40% мирового парка самолетов на водород и работе 60% на синтетическом топливе общая потребность в электроэнергии для производства топлива составит ~28 ПВт·ч. Это приведет к увеличению выработки потребного количества электроэнергии от возобновляемых источников в пять раз по сравнению с производимым сегодня во всем мире, или в 20...30 раз по сравнению с вырабатываемым в настоящее время в Европе. Для получения такого количества электроэнергии от возобновляемых источников необходимо будет увеличить ее выработку беспрецедентным образом.

## Литература / References

1. Скибин В.А., Солонин В.И., Палкин В.А. Работы ведущих авиадвигателестроительных компаний в обеспечение создания перспективных авиационных двигателей (аналитический обзор) / под общ. ред. В.А. Скибина и В.И. Солонина. М. : ЦИАМ, 2010. 676, [4] с.  
Skibin V.A., Solonin V.I., Palkin V.A. Raboty vedushchikh aviadvigatelistroitel'nykh kompanii v obespechenie sozdaniia perspektivnykh aviatsionnykh dvigatelei (analiticheskii obzor) [Activities of leading aircraft engine companies to ensure development of advanced aircraft engines (analytical review)]. Edited by V.A. Skibin and V.I. Solonin. Moscow: CIAM, 2010. 676, [4] p.
2. GE 2019 annual report / General Electric. 2020. 6, form 10-K 127, [3] p.
3. Rolls-Royce plc 2019 annual report / Rolls-Royce plc. 2020. 180 p.
4. Pioneering sustainable aerospace – resilience and responsibility : Airbus annual report 2019 / Airbus. 2020. 318 p.
5. Global aerospace resilience and resolve : The Boeing Company 2019 annual report / Boeing. 2020. 167 p. URL: [https://s2.q4cdn.com/661678649/files/doc\\_financials/2020/ar/2020\\_The\\_Boeing\\_Company\\_Annual\\_Report.pdf](https://s2.q4cdn.com/661678649/files/doc_financials/2020/ar/2020_The_Boeing_Company_Annual_Report.pdf).
6. Aerospace & Defense : 2011 year in review and 2012 forecast. 2012. Iss. 2 (February). PricewaterhouseCoopers LLP, 2012. iv, 28 p.
7. Conceptual design of ultra-efficient cores for mid-century aircraft turbine engines / Tomas Grönstedt, Carlos Xisto, Vishal Sethi, Andrew Rolt, Nicolás García Rosa, Arne Seitz, Dimitrios Missirlis, John Whurr, Nicolas Tantot, Martin Dietz, Anders Lundbladh. 22 p. ISABE-2019-24335.
8. Perry D. CFM launches open rotor demonstrator, promising 20% better fuel burn for mid-2030s applications // FlightGlobal. URL: <https://www.flightglobal.com/engines/cfm-launches-open-rotor-demonstrator-promising-20-better-fuel-burn-for-mid-2030s-applications/144141.article> (дата обращения: 02.07.2021). Publ. date: 14.06.2021.
9. Павлова Е.И., Новиков Е.К. Требования к гражданским воздушным судам // Общая экология и экология транспорта. 2017. URL: [https://studme.org/155252/ekologiya/trebovaniya\\_grazhdanskim\\_vozdushnym\\_sudam](https://studme.org/155252/ekologiya/trebovaniya_grazhdanskim_vozdushnym_sudam) (дата обращения: 02.05.2021).  
Pavlova E.I., Novikov E.K. Trebovaniia k grazhdanskim vozduzhnym sudam [Civil aircraft requirements]. Obshchaia ekologiia i ekologiia transporta [General ecology and transport ecology]. 2017. URL: [https://studme.org/155252/ekologiya/trebovaniya\\_grazhdanskim\\_vozdushnym\\_sudam](https://studme.org/155252/ekologiya/trebovaniya_grazhdanskim_vozdushnym_sudam) (Accessed: 02.05.2021).
10. Волков С.А., Мирзоян А.А. ЦИАМ в ИКАО: история и современность // АвиаСоюз. 2019. № 5 (77). С. 32–33.  
Volkov S.A., Mirzoian A.A. TsIAM v ICAO: istoriia i sovremennost' [CIAM in ICAO: history and present day]. AviaSoiuz [Aviasoyuz]. 2019. No. 5 (77). P. 32–33.
11. Arndt N. Environmentally friendly aero-engines for the 21st century : presentation / Rolls-Royce Deutschland. 2007. 23 p. (1st CEAS European Air and Space Conference (CEAS-2007) : Berlin, 12th September 2007).

- 
12. Халецкий Ю.Д. ИКАО: новый стандарт на шум самолетов гражданской авиации // Двигатель. 2014. № 2 (92). С. 8–11.  
Khaletskii Yu.D. ICAO: novyi standart na shum samoletov grazhdanskoi aviatsii [ICAO: a new noise standard for a civil aircraft]. Dvigatel' [Engine]. 2014. No. 2 (92). P. 8–11.
  13. ENOVAL. Ultra High Bypass Ratio Aero Engines : final report : FP7-604999 / ENOVAL Consortium. 2018.
  14. Penanhoat P. FORUM-AE European Network. FP7 European coordination action ; GA 605506 ; 2013-2017. Clean-Sky: European Technology Evaluation workshop Bruxelles – 17th Oct. 2018.
  15. Present and future aircraft noise and emissions trends : working paper A37-WP/26, EX/9, 21/7/10 / International Civil Aviation Organization ; (presented by the Council of ICAO). 2010. 9 p.
  16. Beginner's Guide to Sustainable Aviation Fuel. Ed. 3, November 2017. Air Transport Action Group, 2017. 24 p.
  17. Fact sheet 8: Aircraft CO2 Standard // Aviation benefits beyond borders : site / Air Transport Action Group (ATAG). URL: <https://aviationbenefits.org/downloads/fact-sheet-8-aircraft-co2-standard/> (дата обращения: 02.07.2021). Publ. date: 02.04.2019.
  18. Fact sheet 6: Understanding CORSIA // Aviation benefits beyond borders : site / Air Transport Action Group (ATAG). URL: <https://aviationbenefits.org/downloads/fact-sheet-6-understanding-corsia/> (дата обращения: 02.07.2021). Publ. date: 01.04.2019.
  19. 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, May 2020. 96 p.
  20. WayPoint 2050 : an Air Transport Action Group project. 1st ed.: September 2020. 96 p.
  21. 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.
  22. Destination 2050 : A route to net zero European aviation : NLR-CR-2020-510 : February 2021. NLR – Royal Netherlands Aerospace Centre, SEO Amsterdam Economics, 2021. vi, 186 p.
  23. ICAO global environmental trends – present and future aircraft noise and emissions : working paper A40-WP/54, EX/21, 5/7/19 / International Civil Aviation Organization ; (presented by the Council of ICAO). 2019. 8 p.
  24. Global Fleet & MRO Market Forecast Commentary 2019–2029 / Tom Cooper, Ian Reagan, Chad Porter, Chris Precourt. Oliver Wyman, 2019. 45 p. URL: <https://www.oliverwyman.com/our-expertise/insights/2019/jan/global-fleet-mro-market-forecast-commentary-2019-2029.html> (дата обращения: 02.10.2021).
  25. Short/medium-haul widebody airliner market 2013 : special report / Frigate-Ecojet. Flightglobal Inside, 2014. 24 p. URL: [http://www.frigate-ecojet.com/docs/SR\\_SMA\\_web\\_2013\\_EN.pdf](http://www.frigate-ecojet.com/docs/SR_SMA_web_2013_EN.pdf) (дата обращения: 02.10.2021).
  26. Decarbonising aviation: the sustainable way forward : A just transition to a net positive world. RSB, 2021. 14 p.
  27. Sustainable aviation fuels guide. Version 2, December 2018. ICAO, 2018. vi, 58 p. (Transforming global aviation collection).
  28. Сравнительный анализ показателей качества авиационных керосинов, биотоплив и их смесей / К.И. Грядунов, А.Н. Козлов, В.М. Самойленко, Ш. Ардешери // Научный вестник МГТУ ГА. 2019. Т. 22, № 5. С. 67–75.  
Gryadunov K.I., Kozlov A.N., Samoilenko V.M., Ardeshiri S. Comparative analysis of quality indicators of aviation kerosine, biofuels and their mixtures. Nauchnyi vestnik MGTU GA [The Civil Aviation High Technologies]. 2019. Vol. 22, no. 5. P. 67–75.
  29. Устойчиво производимые альтернативные виды топлива для авиации : рабочий документ : A39-WP/56, EX/33, 17/06/16 / ИКАО, Ассамблея – 39-я сессия, Исполнительный комитет ; (представлено Советом ИКАО). 2016. 5 с.  
Sustainable alternative fuels for aviation. Working paper A39-WP/56, EX/33, 17/06/16. ICAO, Assembly – 39th session, Executive Committee. (Presented by Council of ICAO). 2016. 4 p.
  30. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года : утверждена распоряжением Правительства Рос. Федерации от 22 ноября 2008 года № 1734-р. 207, 48 с.  
Transportnaia strategiiia Rossiiskoi Federatsii na period do 2030 goda [Transport Strategy of the Russian Federation for the period up to 2030] approved by Government Directive no. 1734-r on November 22, 2008. 207, 48 p.
  31. Commercial flights // ICAO : site. URL: <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Commercial-Flights.aspx> (дата обращения: 02.05.2021).
  32. ICAO Global Framework for Aviation Alternative Fuels // ICAO : site. URL: <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/default.aspx> (дата обращения: 02.05.2021).
-

- 
33. Sustainable aviation fuel // Aviation benefits beyond borders : site / Air Transport Action Group. URL: <https://aviationbenefits.org/environmental-efficiency/climate-action/sustainable-aviation-fuel/> (дата обращения: 02.05.2021).
  34. Conversion processes // ICAO : site. URL: <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Conversion-processes.aspx> (дата обращения: 02.05.2021).
  35. Гриценко Е., Орлов В. Криогенные газотурбинные двигатели из Самары // Двигатель. 2000. № 2 (8). URL: <http://engine.aviaport.ru/issues/08/page29.html> (дата обращения: 02.05.2021).  
Gritsenko E., Orlov V. Kriogennye gazoturbinnye dvigateli iz Samary [Cryogenic gas turbine engines from Samara]. Dvigatel' [Engine]. 2000. No. 2 (8). URL: <http://engine.aviaport.ru/issues/08/page29.html> (Accessed: 02.05.2021).
  36. Ту-155 // Википедия : свободная энциклопедия. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Ту-155> (дата обращения: 02.05.2021).  
Tu-155 // Wikipedia: the Free Encyclopedia. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Tupolev\\_Tu-155](https://en.wikipedia.org/wiki/Tupolev_Tu-155) (accessed: 02.05.2021)
  37. 33 года первому полету Ту-155 // Aviation Explorer : содружество авиационных экспертов. URL: <https://www.aex.ru/news/2021/4/15/227019/> (дата обращения: 02.05.2021). Дата публ.: 15.04.2021.  
33 goda pervomu poletu Tu-155 [33 years of the first flight of Tu-155]. Aviation Explorer : sodruzhestvo aviatsionnykh ekspertov [Aviation Explorer: fraternity of aviation experts]. URL: <https://www.aex.ru/news/2021/4/15/227019/> (accessed: 02.05.2021). Published: 15.04.2021.
  38. Саргсян Д.Р. Анализ опыта применения альтернативных топлив на воздушных судах // Научный вестник МГТУ ГА. 2011. № 174. С. 91–95. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-opyta-primeneniya-alternativnyh-topliv-na-vozdushnyh-sudah> (дата обращения: 02.05.2021).  
Sargsyan D.R. Analysis experience of alternative fuels on aircraft. Civil Aviation High Technologies. 2011. No. 174. P. 91–95.
  39. Electric aircraft // Wikipedia : the free encyclopedia. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Electric\\_aircraft#:~:text=Although manned flights in an,are still only experimental prototypes](https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_aircraft#:~:text=Although%20manned%20flights%20in%20an,are%20still%20only%20experimental%20prototypes) (дата обращения: 02.05.2021).
  40. HY4 (самолет) // Википедия : свободная энциклопедия. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/HY4\\_\(самолет\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/HY4_(самолет)) (дата обращения: 02.05.2021).  
DLR HY4 // Wikipedia: the Free Encyclopedia. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/DLR\\_HY4](https://en.wikipedia.org/wiki/DLR_HY4) (accessed: 02.05.2021).
  41. ZeroAvia provides the most practical solution // ZeroAvia : site. URL: <https://www.zeroavia.com/> (дата обращения: 12.04.2021).
  42. ZeroAvia completes world first hydrogen-electric passenger plane flight : press release // ZeroAvia : site. URL: <https://www.zeroavia.com/press-release-25-09-2020> (дата обращения: 12.04.2021). Publ. date: 25.09.2020.
  43. Dilba D. Hydrogen is the future // Aeroreport : the aviation magazine of MTU Aero Engines. 2021. Iss. 2. P. 4–8. URL: <https://www.aeroreport.de> (дата обращения: 12.04.2021).
  44. Fuel cell system development and testing for aircraft applications / J. Kallo, G. Renouard-Vallet, M. Saballus, G. Schmithals, J. Schirmer, K.A. Friedrich // 18th World Hydrogen Energy Conference 2010 : Proceedings of the WHEC : May 16–21 2010, Essen, Germany. P. 435–444.
  45. Airbus reveals new zero-emission concept aircraft // Airbus : site. URL: <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2020/09/airbus-reveals-new-zeroemission-concept-aircraft.html> (дата обращения: 21.12.2020). Publ. date: 21.09.2020.
  46. These pods could provide a blueprint for future hydrogen aircraft // Airbus : site. URL: <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2020-12-these-pods-could-provide-a-blueprint-for-future-hydrogen-aircraft> (дата обращения: 21.12.2020). Publ. date: 15.12.2020.
  47. Cryogenics and superconductivity for aircraft, explained. ASCEND aims for a breakthrough in electric propulsion for aircraft // Airbus : site. URL: <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2021-03-cryogenics-and-superconductivity-for-aircraft-explained> (дата обращения: 05.05.2021). Publ. date: 29.03.2021.
  48. Sampson B. How Airbus is boosting aircraft electrical propulsion systems with cryogenic cooling and superconductors // Aerospace Testing International. URL: <https://www.aerospacetestinginternational.com/news/electric-hybrid/how-airbus-is-boosting-aircraft-electrical-propulsion-systems-with-cryogenic-cooling-and-superconductors.html> (дата обращения: 05.05.2021). Publ. date: 29.03.2021.49.
  49. Hydrogen Roadmap Europe : A sustainable pathway for the european energy transition. Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking, 2019. 70 p. URL: <https://www.fch.europa.eu/news/hydrogen-roadmap-europe-sustainable-pathway-european-energy-transition> (дата обращения: 21.12.2020).
-

- 
50. A Hydrogen Strategy for a climate neutral Europe : #EU Green Deal. Publication Office of European Commission, 8 July 2020. 2 p.
  51. Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации : утверждена распоряжением Правительства Рос. Федерации от 5 августа 2021 г. № 2162-р. 22 с.  
Konseptsiia razvitiia vodorodnoi energetiki v Rossiiskoi Federatsii [The Concept of Hydrogen Energy development in the Russian Federation] approved by Government Directive no. 2162-r on August 5, 2021. 22 p.

*Материалы получены редакцией 11.10.2021*