DOI: 10.58168/AutTraInd2026_14-32
УДК 662.769.21

Горбунов В.П.
доктор техн. наук, доцент кафедры Технической эксплуатации авиационного, электрифицированного и пилотажно-навигационного оборудования Московского государственного технического университета гражданской авиации, РФ
Онищенко Д.О.
доктор техн. наук, профессор кафедры поршневые двигатели Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана, РФ
Спиридонов Е.Г.
доктор техн. наук, профессор Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», РФ
Прядкин В.И.
доктор техн. наук, профессор кафедры автомобилей и сервиса Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, РФ

Gorbunov V.P.
Doctor of technical sciences, Associate professor of the Electical and Flight Control - Navigation Systems Technical Operation Department
Moscow State Technical University of Civil Aviation, Russian Federation
Onishchenko D.O.
Doctor of technical sciences,
professor of the Department of Piston Engines Bauman Moscow State Technical University, Russian Federation
Spiridonov E.G.
Doctor of technical sciences, professor, Military Educational and Scientific Center of the Air Force «Air Force Academy named after Prof. N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin» Russian Federation
Pryadkin V.I.
Doktor of technical sciences, professor, department of cars and service, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Russian Federation

ВОДОРОД КАК ТОПЛИВО ДЛЯ АВИАЦИИ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

HYDROGEN AS AN AVIATION FUEL: PROBLEMS AND PROSPECTS

Аннотация. В статье представлен анализ снижения экологической нагрузки на окружающую среду от авиационных двигателей, и частности в Арктической зоне Российской Федерации, путем применения водорода в качестве топлива. Показаны основные направления развития авиации, использующей в качестве топлива водород. Приведены основные направления получения водорода и оценка влияния каждого способа на экологию. Проведенным анализом установлено, что водород является высокоэффективным и экологически чистым топливом для авиации. Однако применение водорода в качестве топлива для авиации требует решения новых научно-технических задач: разработки и создания сети заправочных станций и способов его хранения, изменения компоновки фюзеляжа самолетов различного исполнения, разработки более жестких требований безопасности и надежности эксплуатации оборудования на борту самолета, новых требований к квалификации обслуживающего персонала и других.

Abstract. The article presents an analysis of reducing the environmental impact of aircraft engines, particularly in the Arctic zone of the Russian Federation, by using hydrogen as a fuel. The main directions for the development of aviation that uses hydrogen as fuel are shown. The main methods of hydrogen production and an assessment of the environmental impact of each method are

© Горбунов В. П., Онищенко Д. О., Спиридонов Е. Г., Прядкин В. И., 2026

presented. The analysis has established that hydrogen is a highly efficient and environmentally friendly fuel for aviation. However, using hydrogen as a fuel for aviation requires solving new scientific and technical problems: developing and creating a network of refueling stations and methods for storing it, changing the fuselage layout of aircraft of various designs, developing stricter safety and reliability requirements for the operation of equipment on board the aircraft, new requirements for the qualifications of maintenance personnel, and others.

Ключевые слова: Арктика, воздушные суда, полярная авиация, двигатели, водородное топливо, экология.

Keywords: The Arctic, aircraft, polar aviation, engines, hydrogen fuel, ecology.

Введение

Развитие сети автомобильных дорог в Арктических районах существенно затруднено из-за необходимости преодоления географического и в особенности климатического фактора. Исходя из этого, до большинства населенных пунктов и небольших поселков большую часть года можно добраться только по воздуху. Кроме того, очевидно, что развитие более интенсивного судоходства по Северному морскому пути (СМП) не окажет существенную роль в проблеме доступности удаленных районов Арктической зоны, так как значительная часть арктических населённых пунктов расположена далеко от морского побережья. Более того, морской маршрут существенно уступает воздушному по скорости доставки. На основе проведённого анализа можно уверенно прогнозировать рост спроса на авиаперевозки в Заполярье. Уже в период с 2016 по 2019 годы наблюдался подъём на 30 %. Без быстрого доступа к Заполярью невозможно реализовать ни один крупный инвестиционный проект. Наличие авиатехники, способной к арктическому базированию и эксплуатации в условиях экстремально низких температур, остаётся ключевым фактором обеспечения безопасности Северного морского пути и повышения конкурентоспособности России на глобальном арктическом рынке. В связи с этим развитие полярной авиации было объявлено одной из приоритетных задач государственной политики Российской Федерации в Арктике до 2035 года [1].

Вместе с тем интенсивное использование воздушного транспорта приводит к значительному росту антропогенных выбросов в атмосферу. При полётах на высотных эшелонах в верхнюю стратосферу и нижнюю мезосферу попадает на порядок больше продуктов сгорания, чем в приземные слои. К числу наиболее устойчивых по эмиссии компонентов относятся окислы азота, углекислый газ и водяной пар. Именно поэтому наиболее критическое экологическое воздействие на экологию Крайнего Севера и Арктики оказывает именно развитие кросс-полярных маршрутов.

Полёты через Северный полюс и приполюсное пространство в настоящее время разрешены для гражданской авиации. Российская Федерация обеспечивает работу четырёх основных международных кросс-полярных маршрутов, включая маршруты Polar 1, Polar 2, Polar 3 и Polar 4, которые проходят непосредственно через Северный полюс. Эти направления активно используются авиакомпаниями Азии и ранее - Северной Америки как наиболее короткие пути между Азией и Америкой. Данные рейсы, продолжительностью до 17 часов, требуют обязательного оснащения воздушных судов высокоточными навигационными и спутниковыми средствами связи (GPS и Satellite Communication), а также сертификации по правилам ETOPS с максимальным временем полёта на одном двигателе до 370 минут (лидер - Airbus A350). Кроме того, трансполярные маршруты характеризуются повышенным уровнем коротковолновой солнечной радиации, что может вызывать перебои в работе радиооборудования и навигационных систем. Для обеспечения надёжности требуется дублирование бортовых навигационных и коммуникационных средств, а также мониторинг экипажей по количеству выполненных рейсов [2].

Интенсификация гражданской авиации может существенно повлиять на глобальный климат. При сохранении текущих темпов роста уже во второй четверти XXI века ожидается прекращение роста антропогенного потепления, а при дальнейшем увеличении числа воздушных судов - даже его снижение. Чем быстрее будет развиваться авиационный парк, тем раньше начнётся стабилизация и последующее снижение средней приземной температуры.

Состояние вопроса исследования и актуальность работы

В целях предотвращения дальнейшего роста глобального антропогенного потепления в 1997 году был принят Киотский протокол, который устанавливал ограничения на выбросы парниковых газов. Однако данный документ имел спекулятивный характер и был направлен преимущественно на торговлю квотами на углекислый газ. При этом в нём полностью отсутствовало упоминание о мировом океане, являющемся одним из главных поставщиков парниковых газов, в том числе водяного пара [1].

Выполнение обязательств по Киотскому протоколу оказалось крайне сложным из-за необходимости огромных финансовых вложений и разработки новых технологий снижения антропогенных выбросов. К настоящее время данный протокол прекратил своё действие. На смену ему пришло Парижское со-

глашение 2015 года, эффективность которого в настоящее время ещё предстоит оценить на практике.

Вместе с тем, как показывают проведённые выше исследования влияния авиации на климат, решение проблемы глобального потепления может быть достигнуто значительно меньшими затратами. В наше время активно изучается возможность использования в авиации альтернативного топлива. Авиакеросин, который сейчас используется по всему миру, получается путём переработки нефти, и соответственно, является невозобновляемым источником энергии. Вдобавок к этому, цена на него постоянно растёт, что влечет за собой снижение экономичности перелётов. Внедрение новых видов топлива позволит повысить экономичность летательных аппаратов, а также снизить загрязнение атмосферы. На данный момент самыми перспективными топливами являются сжиженный водород и природный газ. Для объективной оценки перспективных проектов силовой установки и летательного аппарата (ЛА - СУ - Т) наиболее эффективным подходом является системный анализ [2,3]. Он позволяет построить формализованную модель систему, сформулировать критерии решение задачи и последовательно выполнить её исследование.

В настоящее время газовые топлива (водород и природный газ) обладают рядом несомненных преимуществ. Их ресурсы практически неисчерпаемы, а продукты сгорания имеют наилучшие эколого-токсилогические показатели среди всех известных видов топлива. Это делает газовые топлива наиболее привлекательными среди прочих инструментов снижения вредных выбросов в атмосферу.

Диапазон воспламенения топливо-воздушной смеси на основе водорода варьируется от 5 до 75% его концентрации, что является недостижимым показателем для двигателя, работающего на керосине. Керосиновый двигатель не может поддерживать стабильную работу на сильно обеднённых или на слишком богатых смесях. Так же было установлено, что повысить эффективность керосиновых двигателей можно добавкой в керосино-воздушную смесь около 10% водорода (от массы керосина). Этот метод может значительно расширить диапазон возможностей современных гиперзвуковых двигателей.

Предмет исследования

Водород в настоящее время является высокоэффективным и экологически безопасным энергоносителем. Его крупномасштабное применение уже освоено в промышленных химических процессах и ракетной технике. По данным миро-

вого рынка, в 2025–2026 годах производство водорода превысило 110 млн тонн и продолжает расти стремительными темпами. Сейчас водород все еще незаметен в мировом энергобалансе из-за дороговизны технологий. 1 кг водорода сейчас в среднем стоит около 10 долларов США, но, как показывает практика, развитие технологического процесса и наращивание объёмов производства позволяет со временем снижать стоимость энергоносителей [4,5]. Как утверждают эксперты, в перспективе ближайших 15 лет удастся снизить стоимость водородного топлива на 50% [6]. Министерство энергетики Российской Федерации прогнозирует повышение спроса на водород в ближайшие годы, а в перспективе 20-25 лет мировой рынок водорода может достичь показателей объёма около 450 млн. тонн, что сделает его заметным в общем объёме мирового энергобаланса [4].

Водород является возобновляемым источником энергии, так как производится из воды с помощью ядерных, либо же возобновляемых ресурсов. Этот факт является одним из ключевых преимуществ водорода перед другими видами топлива. Диапазон его применения крайне широк: полученная с помощью водорода электроэнергия может закрывать как бытовые потребности, так и использоваться на транспорте, в авиации, промышленности и тд.

По способу получения, а также степени экологичности, выделяют цветовые градации водорода, представленные на рисунке 1. Большая часть объёма производства водорода по всему миру приходится на «серый» водород (около 75%). Он получается при смешении нагретого природного газа с паром, в результате чего выделяется большое количество углекислого газа. Этот метод является наименее экологичным, относительно других, но при этом требует минимальных затрат. «Бурый» или «Коричневый» водород получают при газификации угля. При этом процессе так же выделяются парниковые газы. К этому типу относится более 20% получаемого водорода в мире. Более чистым является метод получения «голубого» водорода: его получают из природного газа, улавливая отходы производства для вторичной переработки. Однако данный метод не является идеально чистым, так как диоксид углерода все же нужно утилизировать, что требует дополнительных затрат. «красный» водород производят с помощью атомной энергии. «Бирюзовый» водород получают, нагревая природный газ в вакууме, до температуры 900°C. При этом остается твердый углерод, который востребован в промышленности и не выхывает проблем с утилизацией [4,5]. Самый чистый – «зеленый» водород получают методом электролиза воды с использованием ВИЭ. При этом методе не выделяется ни-

каких вредных веществ, благодаря чему «зеленый» водород привлекателен для зеленой энергетики. Однако, несмотря на тенденцию снижения выбросов в атмосферу, и соответствия этому направлению чистых методов получения водорода, они являются наиболее затратными и менее обеспеченными сырьем. Сейчас по всему миру рассматривается возможность использования избытка электроэнергии от различных типов электростанций для синтеза водорода. Необходимость использовать в энергетических установках водород в чистом виде сопряжена с большим количеством проблем, связанных с коммерческим производством, нормами безопасности, а также сжиганием.

Методы и методология исследования

В качестве первого этапа развития водородной энергетики рассматривается добавление водорода в природный газ для использования в существующих магистральных и распределительных сетях. При этом сжигание водородсодержащих газов (ВСГ) позволит заметно снизить выбросы углекислого газа в атмосферу по сравнению с чистым природным газом.

Применение водорода в значительной степени ужесточит требования к надёжности оборудования, поскольку контакт с этим топливом вызывает сильное охрупчивание металла. В результате появляются риски растрескивания труб газопроводов и возникновения аварийных ситуаций. Поэтому необходимы разработка и внедрение принципиально новых подходов к проектированию, изготовлению и эксплуатации газотранспортных систем и оборудования.

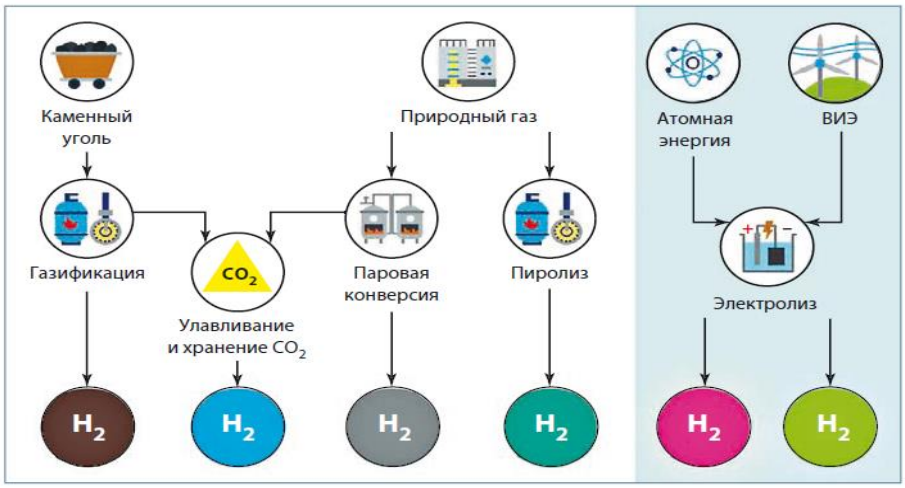

Рисунок 1 – Способы получения водородного топлива

По распоряжению Правительства Российской Федерации от 12 октября 2020 г. № 2634-р разработан план мероприятий «Развитие водородной энерге-

тики до 2024 года», направленный на расширение сферы применения водорода. в рамках этого плана, помимо прочего, планируется разработать и испытать котлы и газотурбинные установки на метано-водородном топливе, а так же осуществить выработку водорода на различных типах электростанций.

Согласно расчетам, снижение выбросов углекислого газа на 7–11% достигается добавлением 20-30% объема водорода в уже существующую систему распределения и транспортировки природного газа. Если же водород сжигается в чистом виде, продукты сгорания становятся полностью углерод-нейтральными, как видно на графике (рис. 2).

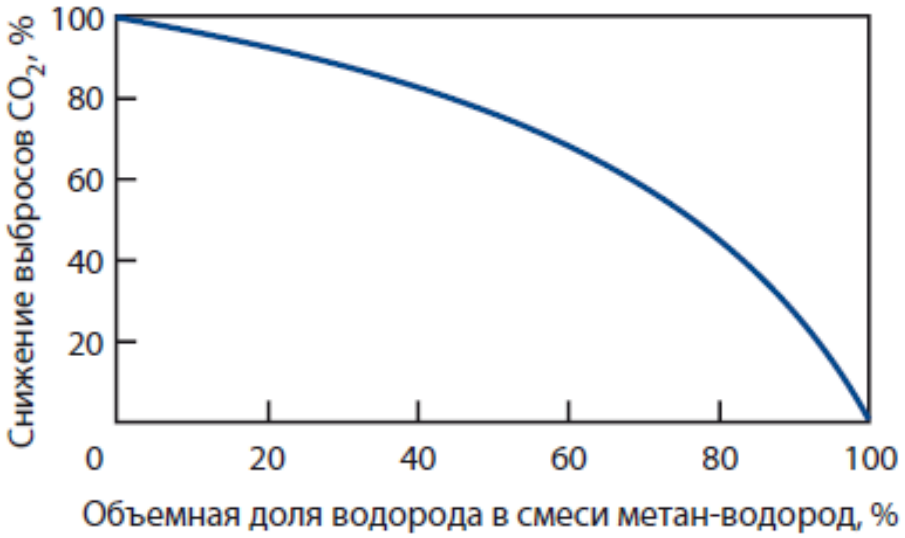

Рисунок 2 – График снижения выбросов CO2 в водородном двигателе

Проблему смены видов топлива сейчас решает не только авиация. Текущая «Нефтяная» эпоха рано или поздно сменится другой, более совершенной. Для этого сейчас важно решить главную задачу: сделать процесс синтеза водорода максимально простым и дешевым, чтобы его применение в качестве топлива было экономически целесообразным. В авиации же, актуальность проблемы перехода на новые виды топлива обусловлена тем, что новейшие разработки в области реактивных двигателей для сверхзвуковых и гиперзвуковых самолетов требуют значительного повышения эффективности двигателя. Для этого нужно максимально эффективно использовать топливную теплопроизводительность. Однако это невозможно, так как современные газовые турбины имеют диапазон рабочих температур примерно 1227 °C до 1927 °C. Даже при условии, что удастся создать газовую турбину, способную исправно работать при больших температурах, и КПД всех основных элементов двигателя будет

максимальным, ограниченные энергетические возможности авиакеросина не дадут поднять эффективность всей системы более чем на 10% [2].

В современных турбореактивных двигателях из всего диапазона эксергетических возможностей топлива, реализуется лишь его теплотворность. Однако и по этому показателю, газовые топлива превосходят классический авиакеросин, так как обладают примерно в 3 раза более высокой теплотой сгорания [7]. Помимо этого, использование криогенных топлив позволяет внедрить совершенно новые принципы работы систем СУ, которые невозможны при работе на керосине. Одним из таких принципов является охлаждение воздушного потока до компрессоров за счет хладоресурса газового топлива. Это позволяет продлить срок службы элементов двигателя, так как на них будет оказываться меньшая тепловая нагрузка. Так же, благодаря большей газовой постоянной относительно нефтепродуктов, водород способен совершать полезную работу еще до своего сгорания. Например, он способен дополнительно раскручивать вал турбины, что позволяет повысить эффективность использования топлива [7,12]. Возможность получения электрохимическим окислением газа электрического тока из водорода позволяет создать самолёты, оснащенные электрическими двигателями, эффективность которых можно дополнительно повысить созданием низких температур, получаемых за счет хладоресурса топлива.

Стоит отметить еще один фактор, подчеркивающий необходимость оптимизации применения топлива. Использование традиционного нефтяного топлива неизбежно связано с большим количеством вредных веществ, попадающих в атмосферу. Стандарт ИКАО (Охрана окружающей среды. Приложение № 16 к Конвенции о международной гражданской авиации. 2008) [4] предъявляет особые требования к экологичности магистральных самолетов. Еще более строгим документом является принятый в декабре 1997г. в г. Киото, в Японии, протокол к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата, направленный против глобального потепления. Нормы этих документов предъявляют серьезные требования к выбросам вредных веществ самолетами, которые на практике практически нереализуемы на традиционных видах топлива. К тому же, цена авиакеросина постоянно растёт, что негативно сказывается на экономичности авиаперевозок. Например, в России, в период 2000-2006 гг. цена на авиакеросин марки ТС-1 Выросла более чем в 4 раза. Вследствие этого, переход на новые виды топлива является одним из ключевых моментов стратегии решения этих проблем.

Помимо очевидных преимуществ водорода перед авиакеросином, у него есть некоторые особенности, которые создают сложности для повсеместного быстрого перехода на этот вид топлива. Первая из них – объём топливных баков. Из-за того, что даже в жидком состоянии, водород обладает меньшей плотностью, относительно авиакеросина (примерно в 11 раз) [7], он требует размещения на борту самолета топливных резервуаров, примерно в 3,8 раз превосходящих баки для керосина. При этом в общей массе, водородное топливо будет в 3 раза легче. Это вызывает необходимость внесения изменений в компоновку ЛА. Топливные баки можно разместить над удлиненной частью фюзеляжа (рис. 3), или же использовать подвесные топливные баки, что позволит освободить внутреннее пространство.

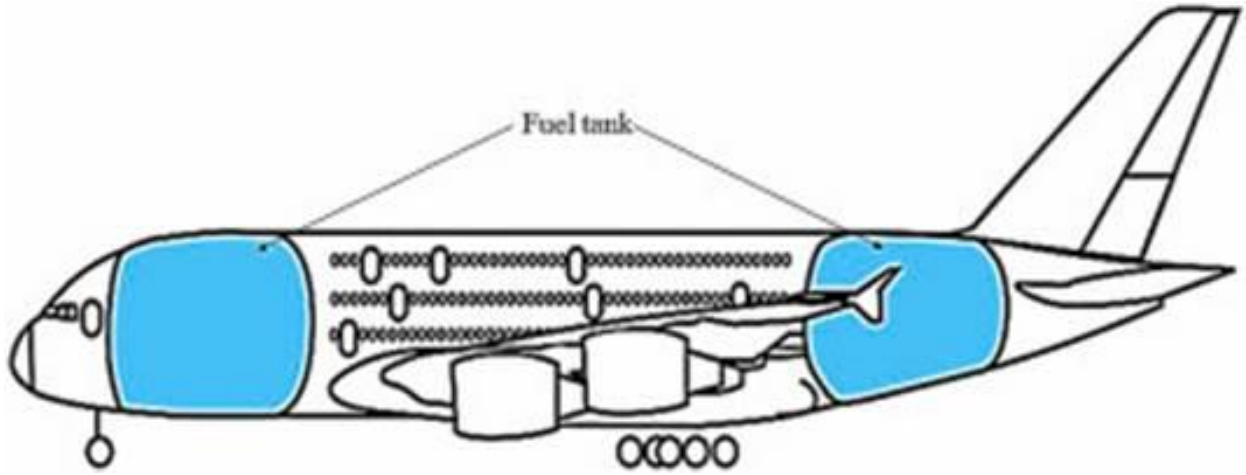

Рисунок 3 – Размещение баков с водородным топливом внутри фюзеляжа

Второй проблемой является взрывоопасность газового топлива. В случае утечки, водород, вступая в реакцию с кислородом, образует крайне взрывоопасную смесь двух объёмов водорода и одного объёма кислорода, получившую название гремучий газ. Из этого следует, что помимо прочих сложностей, обслуживающий персонал ЛА должен иметь более высокую квалификацию, чем персонал ЛА с традиционным топливом [7, 8]. При испытании самолетов на водородном топливе, на случай утечек, топливный отсек постоянно продувался азотом в целях противопожарной безопасности (рис. 4).

Все вышеуказанные факторы указывают на перспективность перехода летательных аппаратов на газовые топлива. Несмотря на то, что эта задача требует комплексного подхода к решению сложных проблем, возникающих при ее реализации, газовые топлива имеют большой потенциал, обеспечивающий им будущее применение в различных сферах.



Рисунок 4 – Баллоны с азотом на боту экспериментального самолета

Дискуссия

Первое упоминание о возможности использования водорода в качестве топлива уходит в далекий 1936 год, когда известный немецкий авиаконструктор Эрнст Хейнкель основатель фирмы «Heinkel», поручил одному из своих авиаконструкторов, а именно Хансу фон Охайну, создателю первого в мире турбореактивного самолета Не-178 с двигателем HeS-3 фон Охайна, разработать турбореактивный двигатель. В 1937 году фон Охайн обнаружил, что его экспериментальный турбореактивный двигатель хорошо работает и на газообразном водороде. После ряда доработок, в 1939 году был создан усовершенствованный двигатель HeS 3B, который работал на жидком топливе (бензине или дизельном). В августе 1939 года He 178 поднялся в воздух, что стало первым в мире полётом самолёта с турбореактивным двигателем. Разработка He 178 и двигателя HeS 3 стала важным этапом в истории авиации, доказав принципиальную возможность использования газотурбинных двигателей [9]. С тех пор в авиаконструкторы и разработчики двигателей в разных странах и на обоих континентах задумывались над возможностью использования водорода в качестве авиационного топлива в жидком или газообразном состоянии.

В США, после испытаний водородного двигателя J-57 американской фирмы «Пратт & Уитни» в 1957 году ученые оценили преимущества водородного топлива. В том же году был испытан самолет B-57, оснащенный водородной топливной системой [8]. Хотя в данной области учеными и конструкторами

обоих континентов и были достигнуты значительные успехи, в авиастроении, дальше чем создание экспериментальных прототипов небольших воздушных судов со смешанными силовыми установками, включающих также электрические силовые установки, дело не пошло. Наиболее значимые результаты исследований были получены советскими учеными ОКБ Туполева на самолете Ту-155 (рис. 5) [8]. По результатам испытаний, использование водородного топлива увеличивает ресурс работы двигателя самолета на 25%. Это обусловлено отсутствием нагарообразования в газовоздушном тракте. Но дальше экспериментальных полетов, как указывалось выше, процесс создания и использования в производстве грузовых или пассажирских авиалайнеров не нашел своего промышленного воплощения из-за ряда не решенных задач и конструктивных проблем, например, хранения топлива на борту.



Рисунок 5 – Экспериментальный самолёт Ту-155 ОКБ Туполева

С аналогичными проблемами столкнулись и другие мировые участники авиастроительной отрасли [19]. Так, крупнейший производитель самолетов в мире западноевропейский концерн Airbus, производящий порядка 800 гражданских воздушных судов в год, анонсировав в 2020 проект нового самолета с нулевым уровнем выбросов на водородном топливе, отказался от него уже в июне 2026 года по причине проблем в конструкции самолета и топливных баков, а также проблем в инфраструктуре, самом топливе и регуляторных ограничениях [10,11,12].

На горизонте ближайших 10-15 лет водородная авиация выглядит не как замена обычным турбореактивным двигателям «один к одному», а как переход к совершенно иной архитектуре самолёта. Причём наиболее перспективным крупные производители сейчас считают не просто сжигание водорода в турбине, а систему, совмещающую водородные топливные элементы и электродвигатели. Компания Airbus посчитала наиболее перспективной fuel-cell архитектуру, которая заключается в электрохимическом превращении водорода в электричество, которое приводит в действие электромоторы, вращающие лопасти винтов. Airbus делает именно на это ставку. Сейчас эта концепция выглядит наиболее перспективной для малых и региональных самолётов. В июле 2026 года Airbus объявил о намерении вместе с MTU создать совместное предприятие для разработки и сертификации полностью электрического водородного двигателя [10,11,12].

Британский двигателестроительный гигант «Rolls-Royce» продолжает одновременно исследовать водородное горение в газотурбинном двигателе и оценивает водородные топливные элементы (hydrogen fuel cells) как более подходящий вариант прежде всего для малых и средних мощностей. Компания указывает на возможность применения водородного горения в сегменте узкофюзеляжных самолетов, но считает технологию ещё требующей существенной доводки. Так как, согласно, результатов отечественных и зарубежных исследований [13,14,15,16,19], одной из наиболее важных технологических задач, как и согласно данных отечественных ученых приоритетным является обеспечение безопасного хранения водорода на борту и обращение с ним. Утверждается, что сжатого газообразного водорода может быть достаточно для небольших ближнемагистральных самолетов, но жидкий водород имеет решающее значение для дальнемагистральных самолетов, поскольку позволяет ограничить объем и вес бака. По оценкам ученых, при повышении гравиметрической эффективности бака более чем на 55%, что возможно при использовании водорода в жидкообразном состоянии LH_2, потребление энергии водородными самолетами снижается по сравнению с керосиновыми самолетами по мере увеличения дальности полета. Хотя баки для жидкообразного водорода LH_2 обычно используются в ракетах, баки для самолетов требуют более длительного срока службы и меньшей скорости выкипания. Кроме того, топливные системы самолетов должны выдерживать меньший массовый расход и большее количество циклов, чем системы ракетного топлива. В долгосрочной перспективе резервуары водорода в жидкообразном состоянии LH_2 с вакуумной изоляцией могут стать наиболее

эффективным решением для хранения водорода в самолетах. Исследовательские усилия должны быть направлены на снижение их веса с помощью новых материалов, конструкций и технологий производства. Встроенные резервуары – это еще один способ уменьшить вес бортового хранилища водорода. Конформные топливные баки как дополнительные внешние топливные баки, которые плотно прилегают к корпусу самолета могут быть оптимальным решением, если снижение веса компенсируется снижением лобового сопротивления планера. Водородные самолеты могут использовать обычные газовые турбины для приведения в движение. Усовершенствованные газовые турбины преобразуют топливо в механическую работу с эффективностью около 40%. При использовании газовых турбин используются существующие знания, инструменты проектирования и технологии производства. Камера сгорания, спроектированная с учетом тепловых свойств водорода и его горения, является единственным существенным изменением в турбомашинах. Ожидается, что удельная тяга водородных турбовентиляторных двигателей будет примерно такой же, как и у турбовентиляторных двигателей, работающих на керосине. За счет использования уникальных свойств водорода возможны дальнейшие усовершенствования существующих технологических решений и разработка новых технологических подходов [15].

Самолеты с двигательными установками на топливных элементах могут быть действительно летательными аппаратами с нулевым уровнем выбросов, если избежать образования инверсионного следа за счет управления водяным выхлопом. При этом стоит задача необходимости повысить удельную мощность, эффективность и долговечность авиационных топливных элементов (рис. 6).

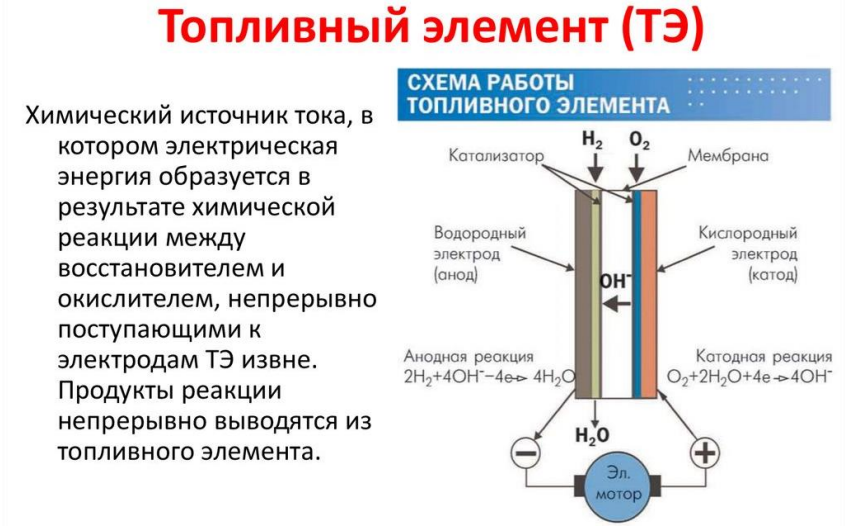

Рисунок 6 – Схема работы водородного топливного элемента

В зависимости от конструкции самолета и топливных элементов, силовая установка на топливных элементах для узкофюзеляжного транспортного самолета, по оценкам ученых, в три раза тяжелее аналогичной турбовентиляторной силовой установки. Для самолетов, работающих на топливных элементах, требуются тщательно разработанные системы терморегулирования, чтобы снизить вес и лобовое сопротивление. Инновационные конструкции могут использовать тепло, выделяемое топливным элементом, для других целей, таких как управление накопителем жидкообразного водорода LH_2 [15,16].

Обсуждение результатов исследования

В большинстве предлагаемых концепций водородных самолетов используется традиционная конструкция с цилиндрическим фюзеляжем и крылом, поскольку в отрасли имеются технологии и опыт проектирования воздушных судов классической схемы, состоящей из цилиндрического фюзеляжа и крыла. Однако значительный стимул для снижения веса и аэродинамического сопротивления, связанный с хранением водорода на борту, может подтолкнуть созданием конструкции самолетов к использованию нетрадиционных конфигураций, таких как комбинированные конструкции по типу единой обтекаемой конструкции фюзеляжа и крыльев. Водород обладает преимуществами в плане безопасности по сравнению с керосином. При утечке он быстро испаряется и поднимается вверх, поэтому не скапливается и не создает очагов возгорания на земле, как керосин. Однако водород обладает более широким диапазоном воспламеняемости, что облегчает его воспламенение. Сертификация водородных самолетов требует тщательного обнаружения утечек, изоляции от источников воспламенения и обеспечения безопасности конструкции [17,18].

С точки зрения климата, водородные самолеты будут иметь значительно меньшее воздействие, чем обычные самолеты, если водород будет производиться с использованием возобновляемых источников энергии, таких как энергия ветра, солнца или атомная энергия. Самолеты, работающие на водороде, не выделяют углекислый газ и могут снизить или вовсе исключить выбросы NOx, в зависимости от силовой установки. Влияние стойких инверсионных следов и перистых завихрений все еще остается неопределенным. Однако, по последним оценкам, их воздействие будет меньше, чем воздействие инверсионных следов и перистых завихрений от самолетов, работающих на керосине. Прогнозируемое снижение воздействия перистого инверсионного следа обусловлено тем, что выхлопные газы, образующиеся при сжигании водорода, не содержат сажи

или сульфатов, которые изменяют свойства кристаллов инверсионного льда и способствуют потеплению климата [17,18].

Необходимо еще раз подчеркнуть, абсолютно негативным фактором, связанным с использованием авиации в высоких Арктических широтах, являются выбросы вредных веществ в атмосферу. Большую часть этих выбросов составляют окислы азота и твердые частицы, индексы эмиссии которых прямо пропорциональны возрастанию тяги двигателей. Это характерно для крейсерских полетов на эшелоне воздушных судов. Напротив, индексы эмиссии угарного газа и углеводородов обратно пропорциональны тяге двигателей, вследствие чего масса выбросов этих элементов в высоких слоях атмосферы почти такая же, как в зоне аэропортов.

Воздействие инверсионных следов также может быть уменьшено за счет направления полетов в районы, где, вероятно, образуются стойкие инверсионные следы. Несмотря на то, что самолеты с водородными двигателями производят больше водяного пара, ожидается, что его прямые выбросы (за исключением инверсионных следов), особенно на высоте менее 8км, не окажут значительного влияния на климат [15].

С точки зрения экономики стоимость водородных самолетов до сих пор неизвестна, хотя большинство исследований предсказывают более высокие эксплуатационные расходы, чем у современных самолетов. Некоторое увеличение стоимости связано с более высокими расходами на приобретение и техническое обслуживание, связанными с хранением водорода. Более легкие баки жидкообразного водорода LH_2 помогают сократить количество потребляемого самолетом топлива. Известно, что стоимость электроэнергии доминирует над удельной стоимостью экологически чистого водорода. При этом, тенденция к снижению цен на возобновляемую электроэнергию приведет к снижению стоимости экологически чистого водорода. Увеличение же масштабов производства экологически чистого водорода также приведет к снижению удельной стоимости. Однако сами по себе эти изменения могут не сделать "зеленый " водород конкурентоспособным по стоимости с керосином в ближайшем будущем [15].

Применение жидкого водорода в авиации сейчас технически осуществимо. Внедрение этого вида топлива станет новым этапом развития воздушного транспорта. Для реализации подобных проектов требуется комплексный подход, позволяющий решать большое количество задач, связанных с новым видом топлива.

Крайне важным этапом выбора криогенного топлива является анализ его теплофизических и термодинамических свойств [7]. Основные свойства топлив приведены в таблице.

Таблица – Основные свойства топлив

	Показатель	Значение			
		ТС-1 (керосин)	СПГ (метан)	Водород	Пропан
1	Плотность, кг/м^3 (при температуре, К)	778,6 (288)	424,7 (111)	71,5 (20)	580,0 (230)
2	Теплотворность МДж/м^3	43,5	50,0	120,0	45,9
3	Энергоемкость МДж/м^3	33855	21100	8450	26620
4	Хладоресурс, кДж/кг	1330	2830	13030	3180
5	Газовая постоянная, Дж/кгК	57,42	518,26	4124,42	115,24
6	Диапазон жидкой фазы, К (при давлении 0,1 Мпа)	эксплуатационный	91…111	14…20	96…230

Анализируя представленные данные, можно сделать вывод, что из всего множества криогенных топлив, жидкий водород наиболее подходит для использования в авиации. В статье были рассмотрены как позитивные, так и негативные стороны применения водорода в качестве топлива. Благодаря меньшему удельному весу жидкого водорода по сравнению с авиакеросином, можно снизить взлетный вес летательного аппарата примерно на треть. Однако габаритные размеры воздушного судна увеличатся, т.к. для водорода требуются топливные баки большего объема. Высокая стоимость водорода нивелируется его небольшим расходом, благодаря большой теплотворности. Крайне низкая температура кипения водорода так же создает серьезные сложности при его хранении и транспортировке. Резюмируя все вышесказанное, можно уверенно сказать, что водородное топливо является перспективным направлением развития мировой энергетики, однако требует решения серьезных инженерных задач. Гарантией успешного решения всех технических задач в развитии авиации является активное участие не только государства, но и крупного бизнеса. Для Российской Федерации, реализующей масштабные проекты освоения природных ресурсов Арктики, развитие Полярной авиации становится стратегически необходимым условием. Без создания экологически чистых силовых установок на основе водородного топлива невозможно обеспечить устойчивое и безопас-

ное использование Северного морского пути и повышение конкурентоспособности России в высоких широтах.

Заключение

В настоящее время водород во всём мире рассматривается в качестве технически реализуемого и перспективного энергоносителя, способного стать основой для следующего этапа развития авиационной отрасли.

Необходимо признать, что переход на воздушные перевозки на водородных двигателях не однозначен так как требует решения многих сложных технологических задач, что в свою очередь подразумевает значительные инвестиции в развитие новых технологий для преодоления технически сложно решаемых проблем создания, прежде всего безопасных, принципиально новых воздушных судов и двигателей. Частные компании и проекты, финансируемые правительством, ограничиваются разработкой прототипов и их летными испытаниями. Но для достижения окончательного успеха требуется больше финансирования и передовых инженерных разработок с консолидацией усилий всей отрасли, что могло бы привести авиацию к разработкам совместимыми с требованиями по бережливому отношению к окружающей среде, когда появление самолетов с двигательными установками на водородном топливе могло бы стать массовым явлением, а авиация с летательными аппаратами с нулевым уровнем выбросов будет идти в ногу с климатом будущего.

Список литературы

1. Горбунов, В. П. Самолет и холод. Климатические испытания и эксплуатация воздушных судов в условиях экстремально низких температур, Арктики, Сибири и Крайнего Севера: монография / В. П. Горбунов. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2023. – 712 с.

2. Transpolar Flight Routes: Flying Over the Top of the World (2026). – URL: https://myflightroutes.com/blog/transpolar-flight-routes (Дата обращения 04.09.2026).

3. Разносчиков В. В., Чепанов А. И. Анализ использования криогенных и газовых топлив в силовых установках магистральных самолётов // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиаци. – 2008. – № 134. – С. 10–15.

4. Экология, энергетика, энергосбережение: бюллетень / под редакцией академика РАН А.В. Клименко. — Москва: ПАО «Мосэнерго», 2023. — ISBN 978-5-383-01681-7.

5. Росляков П. В. Особенности сжигания и транспортировки водородсодержащих газов / П. В. Росляков // Экология, энергетика, энергосбережение: Информационно-аналитический бюллетень ПАО «Мосэнерго»; под ред. А. В. Клименко. – Вып. 4. – Москва, 2023. – 42 с.

6. Занять свою нишу. Водород. Санкт-Петербург. Коммерсант. 2023. – URL: https://www.kommersant.ru/doc/5928520?ysclid=mtoj4j1jyt828231684 (Дата обращения 04.09.2026).

7. Краев, В. М. Экономическая эффективность применения криогенных топлив в авиации / В. М. Краев // Московский экономический журнал. – 2020. – № 11. – С. 699-712.

8. Кирдюшкин, Ю. С. Потенциал водородного топлива гражданской авиации будущего / Ю. С. Кирдюшкин // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2013. – № 194. – С. 110–114.

9. Водород как топливо для авиации. Project Bee. США.1955 год // Авиация и Техника. – URL: https://pikabu.ru/ (Дата обращения 3.09.2026).

10. Airbus reveals new zero-emission concept aircraft. – URL: https://www. airbus.com / en / newsroom / press - releases / 2020 - 09 - airbus - reveals-new-zero-emission-concept-aircraft (Accessed 03.09. 2026.) Airbus. Sept. 2020. – pp. 6, 12, 19, 34.

11. Замена самому популярному пассажирскому самолету в мире: Airbus eAction выйдет во второй половине 2030-х и не получит водородный двигатель. – URL: https://www.ixbt.com/news/2026/06/28/airbus-eaction-2030.html. (Дата обращения 05.09.2026).

12. Jens Flottau, Robert Wall. Why Airbus CEO Is Bullish On Launching A320 Replacement in 2030 June 25, 2026. – URL: https://aviationweek.com/air-transport/aircraft-propulsion/interview-why-airbus-ceo-bullish-launching-a320-replacement-2030 (Дата обращения 05.09.2026).

13. David Debney et al. Zero-Carbon Emission Aircraft Concepts. FlyZero report FZO-AIN-REP-0007. Aerospace Technology Institute, Mar. 2022. pp. 6, 19, 34.

14. Clean Sky 2 Joint Undertaking and Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking. Hydrogen-powered aviation: A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050. Report. Publications Office of the European Union, 2020. doi: 10.2843/471510. pp. 4, 6, 9, 19, 33, 35, 36, 40.

15. Eytan J. Adler, Joaquim R. R. A. Martins. (2023). Hydrogen-Powered Aircraft: Fundamental Concepts, Key Technologies, and Environmental Impacts Department of Aerospace Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, USA.

16. Kumar, N.R.S., Suryan, A., Manju, M.S. (2024). Hydrogen As An Alternative Aviation Fuel—A Review. In: Kumar, S., Agarwal, A.K., Khandelwal, B., Singh, P. Ammonia and Hydrogen for Green Energy Transition. Energy, Environment, and Sustainability. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-0507-8_12.

17. Филипов С., Голодницкий А., Кашин А. Топливные элементы и водородная энергетика // Энергетическая политика. № 11 (153). – 2020. – С. 28-39.

18. Козлов А. В., Теренченко А. С. Математическая модель водородного топливного элемента // Транспорт на альтернативном топливе. – № 3 (87). – 2022. – С. 42-52.

19. Палкин, В. А. Обзор работ за рубежом по применению альтернативных видов топлива в авиации / В. А. Палкин // Авиационные двигатели. – № 4 (13). – 2021. – С. 63-84.

20. Разносчиков В. В., Резников М. Е. Методика ЭИМ (эксергия – импульс - масса) предварительной оценки транспортной технической системы «ЛА-СУ-Т» (летательный аппарат - силовая установка - топливо) // XXVI научные чтения по космонавтике. – М.: ИИЕТ РАН, 2002.

References

1. Gorbunov, V. P. Aircraft and Cold. Climatic Testing and Operation of Aircraft in Extremely Low Temperatures, the Arctic, Siberia, and the Far North: a monograph / V. P. Gorbunov. – St. Petersburg: High-Tech Technologies, 2023. – 712 p.

2. Transpolar Flight Routes: Flying Over the Top of the World (2026). – URL: https://myflightroutes.com/blog/transpolar-flight-routes (Date of access: 04.09.2026).

3. Raznoschikov V. V., Chepanov A. I. Analysis of the use of cryogenic and gaseous fuels in power plants of mainline aircraft // Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation. – 2008. – No. 134. – pp. 10–15.

4. Ecology, Energy, Energy Saving: Bulletin / edited by Academician of the Russian Academy of Sciences A.V. Klimenko. — Moscow: PJSC “Mosenergo”, 2023. — ISBN 978-5-383-01681-7.

5. Roslyakov, P. V. Features of Combustion and Transportation of Hydrogen-Containing Gases / P. V. Roslyakov // Ecology, Energy, and Energy Conservation: Information and Analytical Bulletin of PJSC Mosenergo; edited by A. V. Klimenko. – Issue 4. — 2023. — 42 p.

6. Find your niche. Hydrogen. Saint-Petersburg. Kommersant. 2023. – URL: https://www.kommersant.ru/doc/5928520?ysclid=mtoj4j1jyt828231684 (Date of access: 04.09.2026).

7. Kraev, V. M. Economic efficiency of using cryogenic fuels in aviation / V. M. Kraev // Moscow Economic Journal. – No. 11. – 2020. – pp. 699-712.

8. Kirdyushkin, Yu. S. The potential of hydrogen fuel for civil aviation of the future / Yu. S. Kirdyushkin // Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation. – 2013. – No. 194. – pp. 110-114.

9. Hydrogen as a fuel for aviation. Project Bee. USA. 1955 // Aviation and Technology. – URL: https://pikabu.ru/ (Accessed on 03.09.2026).

10. Airbus reveals new zero-emission concept aircraft. – URL: https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2020-09-airbus-reveals-new-zero-emission-concept-aircraft (Accessed on 03.09.2026.) Airbus. Sept. 2020. – pp. 6, 12, 19, 34.

11. A replacement for the world’s most popular passenger aircraft: the Airbus eAction will be released in the second half of the 2030s and will not feature a hydrogen engine. – URL: https://www.ixbt.com/news/2026/06/28/airbus-eaction-2030.html (Date of access: 05.09.2026).

12. Jens Flottau, Robert Wall. Why Airbus CEO Is Bullish On Launching A320 Replacement in 2030 June 25, 2026. – URL: https://aviationweek.com/air-transport/aircraft-propulsion/interview-why-airbus-ceo-bullish-launching-a320-replacement-2030 (Date accessed 05.09.2026).

13. David Debney et al. Zero-Carbon Emission Aircraft Concepts. FlyZero report FZO-AIN-REP-0007. Aerospace Technology Institute, Mar. 2022. pp. 6, 19, 34.

14. Clean Sky 2 Joint Undertaking and Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking. Hydrogen-powered aviation: A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2000. Report. Publications Office of the European Union, 2020. doi: 10.2843/471510. pp. 4, 6, 9, 19, 33, 35, 36, 40.

15. Eytan J. Adler, Joaquim R. R. A. Martins. (2023). Hydrogen-Powered Aircraft: Fundamental Concepts, Key Technologies, and Environmental Impacts Department of Aerospace Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, USA.

16. Kumar, N.R.S., Suryan, A., Manju, M.S. (2024). Hydrogen As An Alternative Aviation Fuel—A Review. In: Kumar, S., Agarwal, A.K., Khandelwal, B., Singh, P. Ammonia and Hydrogen for Green Energy Transition. Energy, Environment, and Sustainability. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-0507-8_12.

17. Filipov S., Golodnitsky A., Kashin A. Fuel Cells and Hydrogen Energy // Energy Policy. No. 11 (153). 2020. Pp. 28–39.

18. Kozlov A. V., Terenchenko A. S. Mathematical model of a hydrogen fuel cell // Transport using alternative fuels. No. 3 (87). 2022. Pp. 42–52.

19. Palkin, V. A. Review of foreign research on the use of alternative fuels in aviation / V. A. Palkin // Aircraft engines. – No. 4 (13). – 2021. – Pp. 63–84.

20. Raznoschikov V. V., Reznikov M. E. The EIM (exergy–impulse–mass) methodology for preliminary assessment of the “LA-SU-T” (aircraft — propulsion system — fuel) transport technical system // XXVI Scientific Readings on Cosmonautics. – Moscow: IET RAS, 2002.