

Анализ целесообразности применения водородного топлива для двигателей ближне- и среднемагистральных самолетов

С.А. Бурцев, доцент, канд. техн. наук¹

Дун Гэ, Ph.D., профессор²

¹ Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

² School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing, China

e-mail: burtsev@bmstu.ru, serg7573@yandex.ru, dongge@tshinghua.edu.cn

Ключевые слова:

авиационный двигатель, гибридная силовая установка, водород, альтернативное топливо, экологические требования.

Выполнен анализ схемных решений перспективной силовой установки для ближне- и среднемагистральных самолетов. Показано, что использование двигателей традиционных схем, работающих на авиационном керосине ТС-1, не позволит выполнить экологические требования, выдвигаемые ИКАО к самолету 2025–2035 гг. Переход на водород и/или сжиженный природный газ позволяет выполнить требования ИКАО по выбросам CO₂. Однако это приведет к существенному увеличению стоимости перевозки (за счет инфраструктуры получения и хранения водорода и сжиженного природного газа). Применение комбинированных силовых установок, использующих керосин и криогенное топливо, позволит повысить топливную эффективность и снизить эмиссию CO₂ на 16% при работе на водороде и на 2,5–4,5% при работе на метане. При этом частичный переход на водородное топливо позволит выполнить требования ИКАО при сохранении стоимости перевозки.

1. Введение

В настоящее время в пассажирской и транспортной авиации основной силовой установкой является двухконтурный турбореактивный двигатель со смешением потоков наружного и внутреннего контуров или без смешения. По этому пути идут как российские (ПС-90А2, ПД-14) и китайские (WS-20) производители, так и различные международные консорциумы (CFM56, V2500, SaM146).

Однако для перспективных самолетов гражданской авиации к 2025–2035 гг. прогнозируемый Международной организацией гражданской авиации (ИКАО, ICAO — International Civil Aviation Organization) уровень целевых показателей предполагает снижение расхода топлива на 60–70%, уменьшение на 50% уровня эмиссии по CO₂ и на 75–80% — по NO_x, снижение уровня шума в 2 раза и т.д. [1].

Если для снижения уровня шума можно использовать подходы, предложенные в [2], то с эмиссией вредных выбросов сложнее. Известно, что для обеспечения выполнения требований Рамочной конвенции ООН об изменении климата [3] уменьшение удельного расхода топлива, а также уровня эмиссии CO₂ на пассажиро-километр на 50% может быть достигнуто лишь при одновременном улучшении аэродинамических характеристик самолёта (вклад в долях ~20 %), эффективности двигателя (~40 %) и совершенствовании системы управления воздушным движением (~10 %) [4].

В качестве глобальной цели 37-я Ассамблея ИКАО наметила ежегодно до 2050 г. повышать топливную эффективность авиaperевозок на 2% [1]. Для реализации данной цели необходимо резко повысить эффективность двигателей перспективного самолета при одновременном снижении вредных выбросов,

что нельзя реализовать за счет традиционных путей, связанных с совершенствованием формы лопаточного аппарата [5], регулированием торцевого зазора между лопатками [6], интенсификацией теплообмена [7] и т.д. Возможными путями достижения цели могут быть переход на новые виды топлива [8, 9] и/или изменение схемных решений силовой установки самолета (например [10, 11]).

В [4, 11] был выполнен анализ вариантов конструктивно-схемных решений для двухконтурных турбореактивных двигателей (ТРДД) со сложными термодинамическими циклами, с системой турбовинтовой двигатель — «открытый ротор» и т. д. Экологические аспекты применения данных схем силовых установок для ближне- и среднемагистральных самолетов были рассмотрены в [12], где показано, что при сохранении тенденций по изменению КПД узлов двигателя в соответствии с данными [4] при работе на авиационном керосине ТС-1 выполнить требования ИКАО [1] невозможно. Пути снижения вредных выбросов активно обсуждаются, но единого подхода к решению этого вопроса пока нет [13].

2. Водород — топливо для двигателей и энергетических установок

Возможным путем выполнения требований ИКАО является применение в качестве топлива двигателей самолетов биотоплива [14], [15] или криогенного топлива (водорода или сжиженного природного газа) [16].

Водород представляет особый интерес по двум причинам: у него очень большая удельная теплота сгорания (120 МДж/кг против 44 МДж/кг для бензина), продукт сгорания водорода — вода, наличие которой не регламентируется требованиями ИКАО [1]. При этом водород может быть получен в ходе различных процессов: термохимических, электро- и фотолитических и биологических.

В ракетно-космической отрасли водород в качестве топлива используется уже несколько десятков лет. За этот период накоплен большой опыт использования ракетных двигателей и энергетических установок, отработаны технологии обеспечения экологической безопасности и аварийной защиты [17].

Областей использования водородной энергетики становится все больше. В 2008 г. в мире произведено 60 млн т водорода, ежегодный прирост производства составляет примерно 4%, ожидается существенное его увеличение в ближайшем будущем [18].

Однако использование криогенного топлива (водорода или сжиженного природного газа) в силовых установках самолетов требует создания соответствующей инфраструктуры в аэропортах и изменения

схемных решений силовых установок и/или компоновочных решений самолетов [4, 12].

3. Получение и хранение водорода

Водород очень легкий и это вызывает много проблем при хранении. Если принять массу и объем, занимаемый сосудом Дьюара с жидким водородом за единицу, то переход к хранению сжатого водорода (при давлении 15 МПа) приводит к увеличению занимаемого объема в 5,5–6,0 раз, а массы в 15–20 раз (в зависимости от объема баллонов) [19]. Кроме того, водород можно рассматривать как газ, близкий к идеальному, только до давления порядка 10 МПа, а при давлении примерно 50 МПа график зависимости плотность–давление существенно отклоняется от идеального, что приводит к резкому увеличению работы сжатия.

Аналогичная ситуация с использованием металлгидридов для хранения водорода. При допустимом объеме топливного бака его масса оказывается еще выше [20], чем для сжатого газа.

Соответственно для дальнейшего анализа возможного использования водорода в качестве авиационного топлива целесообразно рассматривать сжиженный водород, так как остальные варианты приводят к значительному увеличению массы системы хранения, что недопустимо в авиации.

В настоящее время большая часть водорода получается путем термохимических процессов: паровой конверсией (реформингом) метана или природного газа (около 50% суммарного производства), газификацией угля и биомассы, реформированием жидкой биомассы и расщеплением воды (солнечный нагрев). Данная технология позволяет получить водород с высоким содержанием примесей (углеводороды, CO, CO₂), который можно легко использовать в двигателях внутреннего сгорания (поршневых, газотурбинных и т.д.). Все свойства бинарных и более сложных смесей для легких (H₂) и тяжелых (CO₂, C_nH_m) компонентов достаточно легко можно определить по методике, представленной в [21].

Адсорбционные процессы очистки позволяют получать степень очистки свыше 99%, но требуют исходной смеси, содержащей не менее 75% H₂ при давлении 15–30 бар и расхода порядка 1000 м³/ч, а мембранные системы, хотя работают с исходной смесью, содержащей от 30 до 90% H₂ при давлении около 10 бар, но имеют степень очистки в пределах 70–99% [22].

В настоящее время каталитический паровой реформинг природного газа является самым дешевым и энергетически эффективным (КПД до 83%) способом получения водорода [23]. Стоимость водорода (в ценах 2007 г.), полученного из природного газа, на-

ходится в диапазоне 0,3–1,83 долл./кг, а полученного газификацией угля — 2,48–3,17 долл./кг [22].

4. Технология использования водорода в авиации для снижения эмиссии CO₂

Первые лётные испытания установки для бортового питания на водородных топливных элементах мощностью 20 кВт проведены компанией «Airbus» в феврале 2008 г. на самолёте Airbus A320. Они подтвердили, что пока использование водородных топливных элементов как привода основного двигателя (см., например, [4]) в ближне- и среднемагистальной авиации не рационально несмотря на снижение массогабаритных характеристик [24]. А если учесть их удельную стоимость и ресурс [24, 25], то и в дальнемагистальной авиации топливные элементы пока целесообразно использовать только как вспомогательную силовую установку для обеспечения функционирования летательного аппарата.

При этом, если водород, полученный в процессе парового реформинга природного газа, в дальнейшем использовать не в топливных элементах, а как топливо для газотурбинного двигателя, то проводить процессы очистки не требуется и себестоимость полученного водорода находится на нижней границе диапазона. Состав получаемого при абсолютном давлении 0,1 МПа «синтез-газа» для исходной смеси CH₄ : H₂O = 1 : 2 представлен в табл. 1.

Примем, что состав синтез-газа, полученного в процессе парового реформинга, при сжижении изменяется, так как диоксид (температура сублимации –78 °С) и монооксид (температура кипения –191,5 °С) углерода переходят из газообразного состояния намного раньше водорода (температура кипения –252,87°С). Соответственно в сжиженном водороде практически без применения специальных мер очистки можно увеличить долю водорода до 94–96%. Для дальнейших расчетов примем долю водорода 95%.

Для оценки воздействия на окружающую среду можно использовать индекс эмиссии вредных веществ в виде массы вредных выбросов (в граммах), отнесенной к расходу топлива (в килограммах). При условии полного окисления углерода, содержащегося в топливе, до углекислого газа можно для любого вида топлива определить индекс эмиссии CO₂. В табл. 2 приведены индексы эмиссии CO₂ для авиационного керосина, сжиженного природного газа и водорода.

авиационного керосина, сжиженного природного газа и водорода. При этом для сравнения приведены водород особо высокой чистоты (ТУ 2114-016-78538315-2008, объемная доля водорода не менее 99,99999%) и сжиженный водород, полученный после парового реформинга (без дополнительной очистки).

Из анализа данных табл. 2 видно, что индекс эмиссии CO₂ для сжиженного водорода примерно в 21 раз ниже, чем для авиационного керосина, и в 18 раз ниже, чем для сжиженного природного газа.

5. Анализ схем силовых установок

Известно, что полнота сгорания топлива на крейсерских режимах полета в газотурбинных двигателях, применяемых для ближне- и среднемагистральных самолетов, близка к 100%. Для анализа экологической безопасности примем, что двигатель работает на крейсерском режиме от 40–60% (ближнемагистральные) до 70–80% (среднемагистральные самолеты) полетного времени. Опыт эксплуатации Ту-155 показал, что если это необходимо, то для перехода с работы на сжиженном природном газе на работу на керосине необходимо порядка 5 секунд, т.е. в процессе полета возможен безаварийный переход на другое топливо. При этом аналогичные процедуры для перехода с водорода на керосин не прорабатывались [16]. Однако принципиальных проблем для решения данной задачи нет и технически можно обеспечить переход двигателя с одного топлива на другое без создания аварийной ситуации.

Известно, что одной из основных проблем при эксплуатации Ту-155 на криогенном топливе было снижение грузоподъемности по сравнению с Ту-154С и дальности полета с грузом (за счет размещения криогенных баков) [15]. Соответственно, возможным решением проблемы уменьшения эмиссии CO₂ для перспективного самолета может быть эксплуатация двигателя (двигателей), который часть полета выполняет на водороде. Это, с одной стороны, позволит снизить выбросы CO₂, а с другой — не приведет к значительному снижению количества перевозимых пассажиров и грузов. При этом постоянно растущие требования по снижению эмиссии CO₂ [1, 3] можно выполнять, увеличивая долю времени работы на водороде.

Таблица 2

Индексы эмиссии CO₂, г/кг

№	Топливо	Индекс эмиссии
1	Авиационный керосин ТС-1	3144
2	Сжиженный природный газ	2741
3	Водород ОСЧ 6.0 марка "А"	0
4	Водород после парового реформинга	~150

Таблица 1

Состав «синтез-газа», получаемого в процессе конверсии метана

Компонент	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄
Объемная доля, %	4,6	19,2	76,1	0,1

В данной ситуации для серийной эксплуатации самолетов на сжиженном водороде необходимо создать в аэропортах инфраструктуру по получению и хранению криогенного топлива и выполнить соответствующую модернизацию заправочного оборудования. Анализ проблем, связанных с решением этой задачи, представлен в [26].

Выполним анализ снижения эмиссии CO_2 на примере самолета Ту-155 при частичной работе (50%) на водороде одного из трех двигателей при суммарной дальности полета 3000 км. Такое количество водородного топлива позволит принципиально не менять компоновку самолета и не приведет к снижению количества пассажиров и грузов. Для сравнения рассмотрим варианты работы всех двигателей на авиационном керосине и полную и частичную работу одного двигателя на сжиженном природном газе. Для удобства сравнения введем относительный индекс эмиссии, показывающий долю эмиссии CO_2 при переходе на другие схемы работы силовой установки самолета. Результаты расчета представлены в табл. 3.

Из представленных результатов видно, что частичный переход на сжиженный водород даже одного двигателя позволяет значительно снизить эмиссию CO_2 без изменения схемы силовой установки самолета. При этом изменения в самолете, касающиеся использования криогенного топлива, позволят практически сохранить количество перевозимых пассажи-

ров и грузов и при умеренной цене на водород [22] не приведут к заметному росту стоимости перевозки.

Использование сжиженного природного газа в качестве топлива позволяет (без серьезного изменения грузоподъемности и пассажироместимости) лишь незначительно снизить эмиссию CO_2 , что не обеспечивает выполнение требований ИКАО [1] без значительного изменения схемы силовой установки самолета.

6. Заключение

Проведен анализ требований, выдвигаемых ИКАО, к самолету 2025–2035 гг. и показано, что использование двигателей традиционных схем, работающих на авиационном керосине ТС-1, не позволит выполнить данные требования. Проведен обзор схем перспективных силовых установок и топлива и показано, что использование криогенного топлива с большим содержанием водорода позволит снизить эмиссию CO_2 .

Проанализированы проблемы получения, хранения и использования криогенного топлива на борту самолета и выполнено сравнение результатов численного анализа эффективности применения двух вариантов криогенного топлива: сжиженного водорода и сжиженного природного газа. Показано, что использование сжиженного природного газа в качестве топлива без значительного изменения схемы силовой установки самолета позволяет без изменения стоимости перевозки лишь незначительно снизить эмиссию CO_2 , что не достаточно для выполнения требования ИКАО. При этом частичный переход на сжиженный водород позволяет значительно снизить эмиссию CO_2 (на 16%) без изменения схемы силовой установки самолета и увеличения стоимости перевозки. Однако дальнейшее увеличение доли водородного топлива приведет к снижению количества перевозимых пассажиров, и, соответственно, к увеличению стоимости перевозки даже при снижении стоимости водорода.

Таблица 3

Относительные индексы эмиссии CO_2 за полет, %

№	Топливо	Относительный индекс
1	Полет на авиационном керосине	100,0
2	Частичная работа на водороде 1 двигателя	84,0
3	Частичная работа на метане 1 двигателя	97,5
4	Полная работа на метане 1 двигателя	95,5

Литература

1. *Нынешние и будущие тенденции в области авиационного шума и эмиссии авиационных двигателей. Рабочий документ А37-WP/26, Монреаль: ИКАО, 2010. 10 с.*
2. *Арбеков А.Н., Дермер П.Б., Куникеев Б.А. Повышение эффективности и снижение шума газотурбинных установок // Безопасность в техносфере. 2015. Т. 4. № 5. С. 31–35. DOI: 10.12737/16961.*
3. *The United Nations Framework Convention on Climate Change, UN FCCC/1992/84, GE.05-62220 (E) 200705. 25p.*
4. *Эрохи Ю.А., Каленский С.М., Полев А.С., Дрыгин А.С. Предварительное исследование характеристик гибридных турбореактивных двухконтурных двигателей различных схем для ближне- и среднемагистральных самолетов // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 3. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/381537.html> (дата обращения 15.09.2015).*
5. *Архипов Д.В., Тумашиев Р.З. Расчетное исследование влияния тангенциального наклона и косоугольного обтекания лопаток направляющего аппарата на работу ступени осевого компрессора // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2015. № 11. С. 178–192. DOI: 10.7463/1115.0825832*
6. *Моляков В.Д., Куникеев Б.А. Особенности проектирования эффективных турбин с учетом влияния радиального зазора // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2014. № 9. С. 9–18.*

7. Бурцев С.А., Киселёв Н.А., Леонтьев А.И. Особенности исследования теплогидравлических характеристик рельефных поверхностей // ТВТ. 2014. Т. 52. № 6. С. 895–898.
8. Авиация и альтернативные виды авиационного топлива. Рабочий документ А37-WP/23. Монреаль: ИКАО, 2010. 5 с.
9. Яновский Л.С., Разносчиков В.В. Эмиссия углекислого газа силовыми установками транспортных самолетов на альтернативных топливах // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2012. № 4. С. 32–37.
10. Иванов В.Л., Щеголев Н.Л., Скибин Д.А. Повышение эффективности двухконтурного турбовентиляторного двигателя введением промежуточного охлаждения при сжатию // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2014. № 11. С. 75–83.
11. Эзрохи Ю.А., Каленский С.М., Полев А.С., Дрыгин А.С., Рябов П.А. Сравнительный анализ параметров и характеристик различных схем силовой установки с дополнительным выносным винтовентилятором // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 12. DOI: 10.7463/1212.0511469
12. Бурцев С.А., Самойлов М.Ю., Симаков М.В. Анализ экологических аспектов применения перспективных схем силовых установок ближне- и среднемагистральных самолетов // Безопасность в техносфере. 2015. Т. 4, № 2. С. 67–72.
13. Николайкин Н.И. Новые приоритеты в сфере защиты окружающей среды от воздействия гражданской авиации двигателями // Безопасность в техносфере. 2013. Т. 2, № 5. С. 25–30.
14. Чернова Н.И., Киселева С.В., Попель О.С. Эффективность производства биодизеля из микроводорослей // Теплоэнергетика. 2014. № 6, С. 14–21. DOI: 10.1134/S0040363614060010
15. Трансформация биомассы фототрофных микроорганизмов в метан / Сенько О.В., Гладченко М.А., Лягин И.В., Никольская А.Б., Маслова О.В., Чернова Н.И., Киселева С.В., Коробкова Т.П., Ефременко Е.Н., Варфоломеев С.Д. // Альтернативная энергетика и экология. 2012. № 3. С. 89–94.
16. Гуров В. Уникальный самолет Ту-155 с водородным двигателем // Двигатель. 2013. № 5. С.4–6.
17. Галеев А.Г. Обзор разработок по испытанию ракетных двигателей и энергетических установок на водородном топливе и проблемам обеспечения их безопасности // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2015. № 12. С. 16–27. DOI: 10.15518/isjaee.2015.12.002.
18. Le Duigou A., Miguet M., Amalric Y. French hydrogen markets in 2008–Overview and future prospects // International Journal of Hydrogen Energy. — 2011. V. 36. Iss. 15. pp. 8822–8830. doi:10.1016/j.ijhydene.2011.05.006.
19. Мацкерле Ю. Современный экономичный автомобиль / Пер. с чешск. В.Б. Иванова; Под ред. А. Р. Бенедиктова. — М.: Машиностроение, 1987. 320 с.
20. Dunikov D., Borzenko V., Malyschenko S. Influence of impurities on hydrogen absorption in a metal hydride reactor // International Journal of Hydrogen Energy. 2012. V. 37. pp. 13843–13848. DOI:10.1016/j.ijhydene.2012.04.078.
21. Бурцев С.А., Кочуров Д.С., Щеголев Н.Л. Исследование влияния состава бинарных смесей инертных газов на их теплофизические свойства // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 11. С. 217–237. DOI: 10.7463/1115.0822897
22. Дуников Д.О., Борзенко В.И., Малышенко С.П., Блинов Д.В., Казаков А.Н. Перспективные технологии использования биоводорода в энергоустановках на базе топливных элементов (обзор) // Теплоэнергетика. 2013. № 3. С. 48–57.
23. Abbas H.F., Wan Daud W.M.A. Hydrogen production by methane decomposition: A review // International Journal of Hydrogen Energy. 2010. V. 35, Iss. 3, pp. 1160–1190. DOI:10.1016/j.ijhydene.2009.11.036.
24. 潘相敏·林瑞·李昕等. 氢能与燃料电池的研发及商业化进展[J]. 科技导报, 2011, 29(27): 第73-79页
25. 李建秋, 方川与徐梁飞, 燃料电池汽车研究现状及发展. 汽车安全与节能学报, 2014. 5(1): 第17-29页.
26. Семенов В.Л. Возможности реализации инфраструктуры заправки, хранения и использования водорода // Насосы. Турбины. Системы. 2012. № 2. С. 14–18.

References

1. *Nyneshnie i budushchie tendentsii v oblasti aviatsionnogo shuma i emissii aviatsionnykh dvigateley. Rabochiy dokument A37-WP/26* [Present and Future Aircraft Noise and Emissions Trends. Working Paper A37-WP/26]. Montreal, ICAO, 2010. 9 p. (in Russian)
2. Arbekov, A., Dermer, P., Kunikeev, B. Povyshenie effektivnosti i snizhenie shuma gazoturbinnnykh ustanovok [Increasing Effectiveness and Decreasing Noise of Gas Turbine Units]. *Bezopasnost' v tekhnosfere* [Safety in Technosphere]. 2015, V. 4, I. 5, pp. 31–35. DOI: 10.12737/16961
3. The United Nations Framework Convention on Climate Change, UN FCCC/1992/84, GE.05-62220 (E) 200705. 25 p.
4. Ezrokhi Yu.A., Kalenskii S.M., Polev A.S., Drygin A.S. Predvaritel'noe issledovanie kharakteristik gibridnykh turboreaktivnykh dvukhkонтурnykh dvigateley razlichnykh skhem dlya blizhne- i srednemagistral'nykh samoletov [Preliminary research of characteristics of various implementations of hybrid turbofan engines for short- and medium-haul aircrafts]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman

- MSTU]. 2012, I. 3. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/381537.html> (accessed 15 September 2015). (in Russian)
5. Arkhipov D.V., Tumashev R.Z. Raschetnoe issledovanie vliyaniya tangentsial'nogo naklona i kosogo obtekaniya lopatok napravlyayushchego apparata na rabotu stupeni oseвого komпрессора [Numerical Investigation of Influence of Tangent Pitch and Slanting Flow of Guide Vanes on the Axial Compressor Stage Parameters]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU]. 2015, I. 11, pp. 178–192. DOI: 10.7463/1115.0825832 (in Russian)
 6. Molyakov V.D., Kunikeev B.A. Osobennosti proektirovaniya effektivnykh turbin s uchetom vliyaniya radial'nogo zazora [Designing efficient turbines taking into account radial clearance]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building]. 2014, I. 9 (654), pp. 9–18. DOI: 10.18698/0536-1044-2014-9-9-18
 7. Burtsev S.A., Kiselev N.A. Leont'ev A.I. Osobennosti issledovaniya teplogidravlicheskih kharakteristik rel'efnykh poverkhnostey [Peculiarities of Studying Thermohydraulic Characteristics of Relief Surfaces]. *Teplofizika vysokikh temperatur* [High Temperature]. 2014, V. 52, I. 6, pp. 869–872. DOI: 10.1134/S0018151X14060054.
 8. Aviatsiya i al'ternativnye vidy aviatsionnogo topliva. Rabochiy dokument A37-WP/23 [Aviation and Alternative Fuels. Working Paper A37-WP/23]. Montreal, ICAO, 2010. 5 p.
 9. Yanovskii L.S., Raznoschikov V.V. Emissiya uglekislogo gaza silovymi ustanovkami transportnykh samoletov na al'ternativnykh toplivakh [Carbon dioxide emission by power units of transport aircrafts on alternative fuels]. *Zashchita okruzhayushchei sredy v netegazovom komplekse* [Environmental protection in the oil and gas industry]. 2012, I. 4, pp. 32–37. (in Russian)
 10. Ivanov V.L., Shegolev N.L., Skibin D.A. Povyshenie effektivnosti dvukhkонтурного turboventilyatornogo dvigatelya vvedeniem promezhutochnogo okhlazhdeniya pri szhatii [Improving the efficiency of a bypass turbofan engine by intermediate cooling during compression]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building]. 2014, I. 11, pp. 75–83. DOI: 10.18698/0536-1044-2014-11-75-83
 11. Ezrokhi Yu.A., Kalenskii S.M., Polev A.S., Drygin A.S., Ryabov P.A. Sravnitel'nyy analiz parametrov i kharakteristik razlichnykh skhem silovoy ustanovki s dopolnitel'nyim vynosnym vintoventilyatorom [Comparative analysis of parameters and characteristics of diferent power plant schemes with an additional remote propfan]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU]. 2012, I. 12, pp. 541–556. DOI: 10.7463/1212.0511469 (in Russian).
 12. Burtsev S.A., Samoylov M.Yu., Simakov M.V. Analiz ekologicheskikh aspektov primeneniya perspektivnykh skhem silovoykh ustanovok blizhne- i srednemagistral'nykh samoletov [Ecological Aspects of Implementing Prospective Propulsion Schemes of Short and Medium Haul Aircrafts]. *Bezopasnost' v tekhnosfere* [Safety in Technosphere]. 2015, V. 4, I. 2, pp. 67–72. DOI: 10.12737/11335 (in Russian)
 13. Nikolaikin N.I. Novye priority v sfere zashchity okruzhayushchey sredy ot vozdeystviya grazhdanskoj aviatsii dvigatelyami [New Priorities in the Environment Protection against Civil Aviation Influence]. *Bezopasnost' v tekhnosfere* [Safety in Technosphere]. 2013, V. 2, I. 5, pp. 25–30 (in Russian).
 14. Chernova N.I., Kiseleva S.V., Popel' O.S. Effektivnost' proizvodstva biodizelya iz mikrovdorosley [Efficiency of the biodiesel production from microalgae]. *Teploenergetika* [Thermal Engineering]. 2014, I. 6, pp. 14–21. DOI: 10.1134/S0040363614060010
 15. Senko O.V., Gladchenko M.A., Lyagin I.V., Nikolskaya A.B., Maslova O.V., Chernova N.I., Kiseleva S.V., Korobkova T.P., Efremenko E.N., Varfolomeyev S.D. Transformatsiya biomassy fototrofnykh mikroorganizmov v metan [Biomass transformation of phototrophic microorganisms to methane]. *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal Al'ternativnaya energetika i ekologiya* [International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology]. 2012, I. 3, pp. 89–94. (in Russian)
 16. Gurov V. Unikal'nyy samolet Tu-155 s vodorodnym dvigatelem [The unique Tu-155 hydrogen-powered]. *Dvigatel* [Engine]. 2013, I. 5, pp. 4–6.
 17. Galeev A.G. Obzor razrabotok po ispytaniyu raketnykh dvigateley i energeticheskikh ustanovok na vodorodnom toplive i problemam obespecheniya ikh bezopasnosti [Review of Development on Testing Rocket Engines and Power Plants on Hydrogen Fuel and the Problem of Ensuring Their Safety]. *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal Al'ternativnaya energetika i ekologiya* [International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology]. 2015, I. 12, pp. 16–27. DOI: 10.15518/issj.2015.12.002.
 18. Le Duigou A., Miguet M., Amalric Y. French hydrogen markets in 2008 –Overview and future prospects. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2011, V. 36, I. 15, pp. 8822–8830. doi:10.1016/j.ijhydene.2011.05.006.
 19. Matskerle Yu. *Sovremennyy ekonomichnyy avtomobil'* [Modern economical car]. Moscow, Mechanical Engineering Publ., 1987. 320 p.
 20. Dunikov D., Borzenko V., Malysenko S. Influence of impurities on hydrogen absorption in a metal hydride reactor. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012. V. 37, pp. 13843–13848. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.04.078.
 21. Burtsev S.A., Kochurov D.S., Schegolev N.L. Issledovanie vliyaniya sostava binarnykh smesey inertnykh gazov na ikh teplofizicheskie svoystva [Investigation of the helium proportion influence on the Prandtl number value of gas mixtures]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana*

- [Science and Education of the Bauman MSTU]. 2015, I. 5, pp. 314–329. DOI: 10.7463/0514.0710811. (in Russian)
22. Dunikov D.O., Borzenko V.I., Malysenko S.P., Blinov D.V., Kazakov A.N. Perspektivnye tekhnologii ispol'zovaniya biovodoroda v energoustanovkakh na baze toplivnykh elementov (obzor) [Prospective Technologies for Using Biohydrogen in Power Installations on the Basis of Fuel Cells (a Review)]. *Teploenergetika* [Thermal Engineering]. 2013, V. 60, I. 3, pp. 202–211. DOI: 10.1134/S0040601512110043.
 23. Abbas H.F., Wan Daud W.M.A. Hydrogen production by methane decomposition: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2010. V. 35, I. 3, pp. 1160–1190. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.11.036.
 24. 潘相敏, 林瑞, 李昕等. 氢能与燃料电池的研发及商业化进展[J]. *科技导报*, 2011, 29(27): 第73-79页. (Pan X, Lin R, Li X, Ma J. Research Development and Commercialization Advances of Hydrogen Energy and Fuel Cell // *Science & Technology Review*. 2011. V. 29, Iss. 27, P. 73–79. (in Chinese))
 25. 李建秋, 方川与徐梁飞, 燃料电池汽车研究现状及发展. *汽车安全与节能学报*, 2014. 5(1): 第17–29页. (LI Jianqiu, FANG Chuan, XU Liangfei. Current status and trends of the research and development for fuel cell vehicles[J]. *Automotive Safety and Energy*, 2014, 5(1), pp. 17–29 (in Chinese))
 26. Semenov V.L. Vozmozhnosti realizatsii infrastruktury za pravki, khraneniya i ispol'zovaniya vodoroda [Possibilities of Realization of an Infrastructure of Refueling, Storage and Hydrogen Use]. *Nasosy. Turbiny. Sistemy* [Pumps. Turbines. System]. 2012, I. 2, pp. 14–18.

Feasibility Analysis of Hydrogen Fuel Using for Short and Medium Range Aircrafts' Engines

S.A. Burtsev, Ph.D. of Engineering, Associate Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
Dong Ge, Ph.D., Professor, School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing, China

An analysis of circuit design for a perspective propulsion system for short and medium range aircrafts has been carried out. It has been shown that use of traditional schemes engines working at aviation kerosene TC-1 will not allow match the ICAO ecological requirements for an aircraft of 2025–2035. Transition to hydrogen or liquefied natural gas allows match ICAO requirements for CO₂ emissions. However it will lead to an essential transportation value addition (due to hydrogen and liquefied natural gas production and storage infrastructure). Application of the combined propulsion systems using both kerosene and cryogenic fuel will allow increase fuel efficiency and reduce CO₂ emission by 16% for hydrogen and by 2.5–4.5% for methane. In such a case partial transition to hydrogen fuel will allow match ICAO requirements at the current freight charge

Keywords: aircraft engine, hybrid propulsion system, hydrogen, alternative fuel, ecological requirements.

О разработках самолета на газовом топливе

В середине 1980-х годов специалисты КБ Туполева начали создавать самолет, работающий на сжиженном газовом топливе. На базе пассажирского лайнера Ту-154 построили летающую лабораторию Ту-155 (см. «Наука и жизнь» № 1, 1989 г.). В качестве топлива был использован жидкий водород. Это почти идеальное экологически чистое топливо выделяет при сгорании в основном воду и незначительное количество окислов азота. По теплотворной способности водород втрое превосходит авиационный керосин. В то же время водород взрывоопасен, хранить и транспортировать его можно только в жидком состоянии при очень низких температурах, близких к абсолютному нулю (–273°C). Это представляет очень серьезную проблему. Чтобы обеспечить надежную взрыво- и пожаробезопасность самолета, из отсека с криогенным баком убрали почти всю электропроводку — источник возможного образования искры. Спроектировали и смонтировали дренажную систему, которая отводила из бака пары водорода на безопасное расстояние от двигателей и источников электричества. Всего было сконструировано более 30 дополнительных бортовых систем.

Переоборудованный таким образом Ту-155 впервые поднялся в воздух 15 апреля 1988 года. Его пилотировал летчик-испытатель В. А. Севанькаев.

Но скоро работа над силовой установкой на жидком водороде была остановлена. Разработчики переключились на более удобный в эксплуатации сжиженный природный газ (СПГ) — самое чистое и дешевое ископаемое топливо. Как и водород, СПГ значительно меньше загрязняет окружающую среду, его теплотворная способность на 15% выше, чем у авиационного керосина. Да и хранить СПГ в жидком виде гораздо проще (температура может быть около –160°C). Летающую лабораторию оснастили криогенным двигателем, работающим на СПГ, в январе 1989 года. Первые же полеты показали, что по сравнению с керосином удельный расход топлива снижается примерно на 15%, а экономичность воздушного лайнера существенно возрастает, поскольку себестоимость СПГ в несколько раз ниже, чем керосина. Экспериментальные полеты Ту-155 дали бесценный опыт для дальнейшего совершенствования авиационных криогенных топливных систем. Сейчас создается новый самолет на криогенном топливе.