

Научная статья

Original article

УДК 662.756.3, 662.6/.9

doi: 10.55186/2413046X_2024_9_9_374

**ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕРСПЕКТИВНОГО
АВИАЦИОННОГО ТОПЛИВА
ECONOMIC EFFICIENCY OF PROMISING AVIATION FUEL**



Краев Вячеслав Михайлович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Управление персоналом», ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт», Москва, kraevvm@mail.ru

Масич Данила Игоревич, физико-математическая школа-интернат, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск

Алексеев Кирилл Андреевич, ГБОУ Школа №384 имени Д.К. Корнеева, г. Москва

Krayev Vyacheslav M., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Department «Human Resource Management», Moscow Aviation Institute, Moscow

Masich Danila I., Physics and Mathematics boarding school, Siberian Federal University, Krasnoyarsk

Alekseev Kirill A., GBOU School No. 384 named after D.K. Korneev, Moscow

Аннотация. Рассмотрены перспективное авиационное топливо метанол для летательных аппаратов различного назначения: беспилотная авиация, транспортная и пассажирская авиация. Проведен экономический анализ применения метанола. Показано, что метанол обладает неоспоримыми достоинствами, такими как стоимость производства, затраты на

инфраструктуру, эффективность метанольной двигательной установки. Рассмотрены потери при использовании метанола от его получения до преобразования метанола в аэродинамическую силу. Выявлено, что в современных экономических условиях метанол обладает рядом неоспоримых преимуществ. Сделан вывод о экономической эффективности применения метанола в качестве авиационного топлива.

Abstract. Promising aviation fuel methanol for aircraft of various purposes is considered: unmanned aircraft, transport and passenger aviation. An economic analysis of methanol fuel application has been carried out. It has been shown that methanol has undeniable advantages, such as the cost of production, infrastructure costs, and the efficiency of a methanol propulsion system. The losses during the use of methanol from its production to the conversion of methanol into aerodynamic force are considered. It has been revealed that in modern economic conditions methanol has a number of undeniable advantages. The conclusion is made about the economic efficiency of using methanol as an aviation fuel.

Ключевые слова: экономическая эффективность, авиационное топливо, коэффициент полезного действия, метанол, топливные элементы

Keyword: economic efficiency, aviation fuel, efficiency, methanol, fuel cells

Современные экономические внешние условия предъявляют новые требования к двигателям и другим энергоустановкам. С другой стороны, новые технологии позволяют практически реализовать высокие требования по эффективности и экологические требования для новых двигательных установок летательных аппаратов. В современных условиях и в ближайшей перспективе экологическая повестка приобретает статус межгосударственной политики в России и за рубежом. Основная идея заключается в снижении выбросов CO₂ и NO_x и переход к возобновляемым источникам энергии.

27 марта 2023 года Международная организация гражданской авиации (ИКАО, ИКАО) сообщила о принятии ряда важных поправок к международным авиационным стандартам по охране окружающей среды. Изменения касаются как уточнения требований применения Системы компенсации и сокращения выбросов углерода для международной авиации ИКАО (CORSIA), так и поправок к Приложению 16 «Охрана окружающей среды» к Конвенции о международной гражданской авиации, касающихся авиационного шума, эмиссии авиационных двигателей и эмиссии CO₂ [1].

Стоит отметить о существенном росте новых проектов, связанных с водородной энергетикой и гибридными двигательными установками в области авиации. Действительно, применение водорода позволяет снизить практически до нуля выбросы при использовании его как топлива. Причем преобразование водорода в энергию может быть организовано как в современных газотурбинных двигателях (ГТД), так и в топливных ячейках с выработкой электроэнергии для электрической (или гибридной установки). Однако, ранее мы уже высказывали мнение о существенных недостатках водорода как авиационного топлива [2, 3]. В современной авиации одним из основных критериев, определяющих потребительские свойства воздушного судна, является скорость его полета на крейсерском режиме и грузоподъемность. Исходя из этого практически все виды массовых воздушных судов относятся к аэродинамическим. Т.е. подъемная сила таких аппаратов создается за счет набегающего потока воздуха, который обеспечивается движением воздушного судна. Получается, что такие аппараты должны обладать минимальным аэродинамическим сопротивлением. Главным недостатком водорода в рассматриваемом случае является его низкая плотность, что требует топливных баков большого объема, и приводит к существенному росту аэродинамического сопротивления. Что является причиной увеличения расхода топлива и, в

итоге, приводит к уменьшению удельной эффективности всей двигательной установки.

Для второго пути развития авиационных двигателей – гибридные установки на базе аккумуляторов – также имеют весомый (как в переносном, так и прямом смысле этого слова) недостаток, связанный с большой массой системы аккумулирования энергии. В этом случае тоже приходится снижать полезную нагрузку и/или время полета за счет увеличения массы аккумуляторов.

С теоретической точки зрения наилучшей эффективностью должна обладать двигательная авиационная установка с минимальной стоимостью первичной энергии (топлива), минимальным удельным объемом топлива и минимальными потерями, связанными с преобразованиями энергии из химической в механическую. Подчеркнем, что мы будем рассматривать не только топлива, альтернативные керосину для ГТД и бензину для поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС), но и топлива, которые могут быть использованы в двигательных установках, альтернативных ГТД и ДВС. В данной работе под термином «бензин» мы понимаем исключительно авиационный бензин.

В современных проектах для беспилотных летательных аппаратов ГТД и ДВС успешно замещаются аккумуляторными электродвигателями. Для определенных целей, например, аэрофотосъемка и мониторинг поверхности, такой подход пока еще приемлем, т.к. стоимость таких аппаратов относительно невысока. Тем не менее, двигательные установки, использующие аккумуляторы в качестве накопителей энергии, имеют ряд недостатков, которые существенно сужают область их использования. Первый, и самый существенный недостаток – это ограниченное время полета и/или малый вес полезной нагрузки. Причина этого недостатка кроется в самом принципе накопления и хранения энергии – аккумуляторные батареи. Это один из самых тяжелых по весу видов хранения энергии, и перед

эксплуатантом летательного аппарата всегда будет стоять выбор – увеличить время полета и снизить полезную нагрузку, или наоборот – увеличить полезную нагрузку за счет сокращения веса (емкости) аккумуляторов. Вторым недостатком аккумуляторов является их емкостная «деградация» после 300 циклов зарядки/разрядки [4]. Еще одним недостатком является установленный факт уменьшения используемой емкости батарей при низких температурах [5]. Таким образом, можно сделать предположение о том, что дальнейшее улучшения стоимостных и эксплуатационных таких систем столкнется с непреодолимыми трудностями. Далее в работе такие типы двигательных установок, как и на базе водорода, рассматриваться не будут.

В анализ экономической эффективности перспективного авиационного топлива мы включим ГТД на керосине, ДВС на бензине и электрические двигатели с питанием от топливных элементов на метаноле.

В стандартных условиях метанол является бесцветной прозрачной жидкостью, схожей по своим физическим свойствам к обычному авиационному керосину (плотность $0,7918 \text{ г/см}^3$, динамическая вязкость $5.9 \times 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$, температура плавления -97°C , температура кипения $64,7^\circ\text{C}$). Такие свойства метанола существенно упрощают его хранение и транспортировку.

Одним из первых возможность использования метанола, как нового альтернативного топлива, наметил нобелевский лауреат по химии Джорж Олах [6]. В этой работе авторы обсуждают использование метанола в качестве реальной альтернативы сокращающимся ресурсам ископаемых топлив, а также масштабы наших невозобновляемых ресурсов ископаемого топлива.

Обращаем внимание на то, что в рамках данной работы анализ стоимости самих двигательных установок не проводится. Хотя, стоит привести основные отличия этих двигателей. ГТД обладает неоспоримыми удельными мощностными параметрами, т.е. в единице массы ГТД сосредоточено больше

всего возможной мощности. Для авиационной области это одна из принципиальных характеристик. Однако, ДВС обладает немного большим механическим КПД (до 40%), стоит дешевле в производстве и обслуживании, чем ГТД.

Коэффициент полезного действия (КПД) электродвигателя в среднем составляет до 95%, существенно это больше чем у ДВС. Электродвигатели значительно надежнее, чем ДВС и ГТД. В электродвигателях меньше подвижных и изнашиваемых деталей и агрегатов.

Стоимость расходов на поддержание эксплуатационной годности системы с электродвигателем примерно в 4-5 раз ниже, чем ДВС. Отличия расходов электродвигателя от ГТД еще выше. Таким образом, из проведенного выше сравнения следует, что стоимость самой двигательной установки ниже всего, если в ней используется электродвигатель.

Поскольку топливная составляющая в оценке экономической эффективности рассматриваемых двигателей является преобладающей, то логично провести более тщательный анализ именно топлива для рассматриваемых систем.

Анализ эффективности топлив проведем исходя из стоимости производства топлив, потерь при их транспортировке и хранении и КПД их финального преобразования в механическую энергию.

Стоит пояснить, что приведенная стоимость метанола на рис.1 отражает не самый экологичный способ производства метанола – из природного газа. В предыдущей работе [7] было проведено сравнение источников получения тепловой энергии исходя из их физической природы. Выработка метанола теоретически организуется различными способами. В настоящее время основным способом является получение его из угля и природного газа. Абсолютно возобновляемым процессом является выработка метанола из воды электролитическим способом при улавливании CO_2 из окружающей среды или других источников. Самая низкая стоимость электроэнергии

соответствует ее выработке на гидроэлектростанциях РФ [7]. Таким образом, стоимость метанола, приведенная на рис.1 в перспективе может быть снижена в разы.

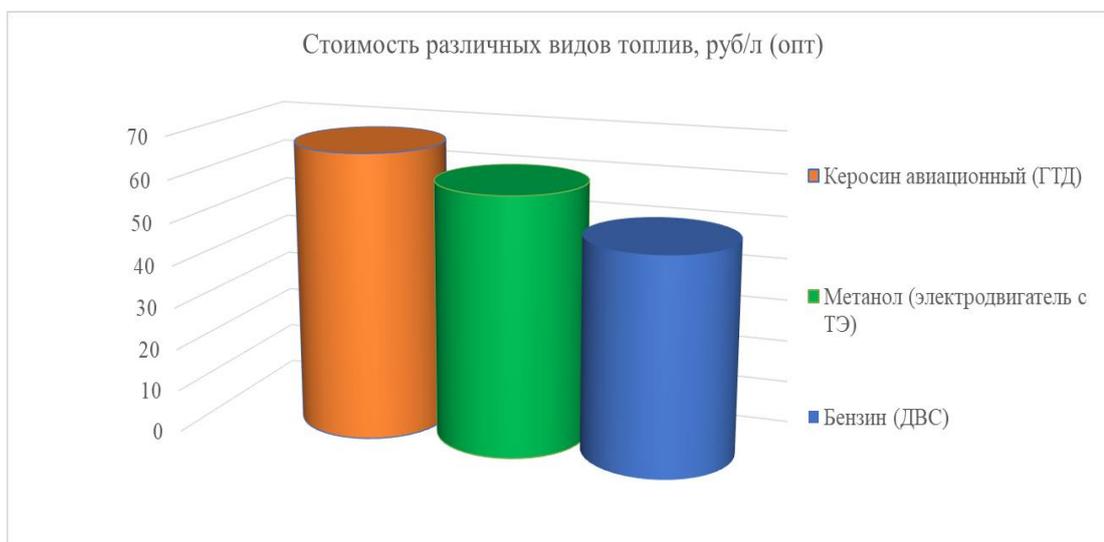


Рис.1. Сравнительная стоимость авиационных топлив

На рис.2 приведены оценочные значения КПД для рассматриваемых топлив.

Керосин является топливом для ГТД уже на протяжении почти века. Создана и совершенствуется инфраструктура обеспечения этим топливом. Бензин как авиационное топливо известно более 150 лет. С приходом ГТД в авиацию бензин был в большей степени вытеснен керосином, хотя в определенных нишах (сверхмалая и беспилотная авиация, и малые коммерческие самолёты) замену ему не удалось найти.

Современные тенденции авиастроения демонстрируют разворот в некоторых сегментах авиастроения от ГТД и ДВС в сторону электродвигателей. К неоспоримым преимуществам электрических двигателей стоит отнести относительно низкую стоимость производства, ремонта, более длительный межремонтный ресурс и незначительные расходы на техническое обслуживание.

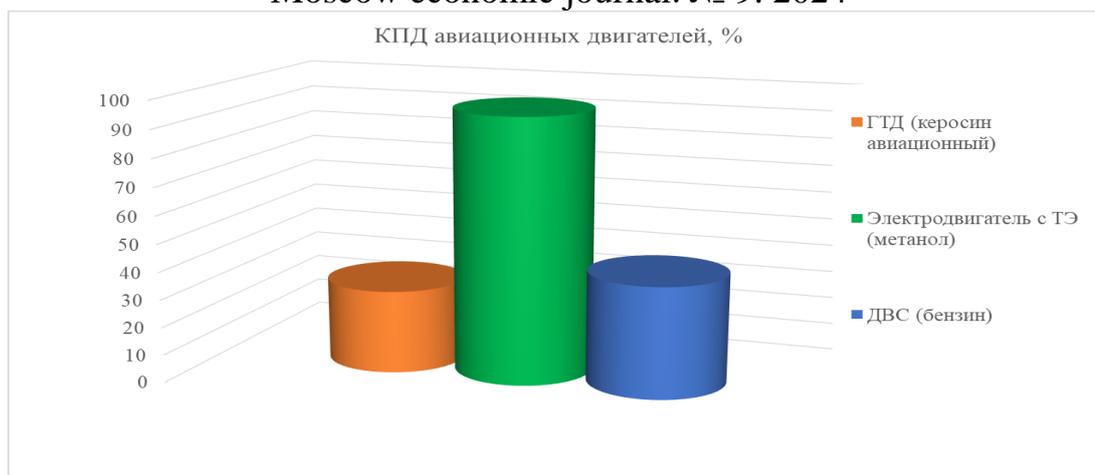


Рис.2. Оценка КПД для различных авиационных двигательных систем

Обратим внимание на то, что среди рассматриваемых двигателей два являются системами преобразования химической энергии топлив во внутреннюю энергию продуктов сгорания и, затем, в механическую (ГТД и ДВС). Электрический двигатель обладает существенно большим КПД, т.к. преобразовывает энергию более высокого уровня (электрическую) в механическую. Стоит указать, что источником электроэнергии является топливные элементы (ТЭ), которые преобразовывают химическую энергию метанола в электрическую. На современном этапе развития технологий КПД метанольных ТЭ достигает 60%. Это, конечно меньше, чем у водородных ТЭ, но в отличие от водорода, метанол как топливо можно считать идеальным [8].

Обратим внимание на летающий образец – демонстратор технологий, который был создан китайскими специалистами. За основу двигательной установки был взят электродвигатель с метанольным ТЭ [9]. Их разработка – беспилотный летательный аппарат FY-36 при массе около 15-ти килограмм смог продержаться в полете около 12 часов. Такой результат говорит о широких потенциальных возможностях применения этой технологии.

Стоимостной анализ, проведенный авторами [10] свидетельствует о целесообразности применения такой технологии – электроустановок на метанольных ТЭ.

В перспективе, развитие технологии метанольных ТЭ не только в авиации, но и других отраслях, потребует производства метанола в гораздо больших, чем сейчас объемах. Задача будет определена в максимально эффективной технологии производства метанола. Эффективность производства в рамках данной работы мы называем комплексный параметр, учитывающий как затраты на создание единицы продукции, так и отрицательное влияние на окружающую среду при этом. Как мы уже говорили выше, существуют различные способы производства метанола.

Объем мирового производства метанола составляет около 100 миллионов тонн. Из этого объема практически весь метанол производится из ископаемого топлива, такого как уголь и природный газ. Такие технологии нельзя назвать возобновляемыми. Ежегодные выбросы в окружающую среду CO_2 составляют около 10% от общего объема выбросов.

За последнее десятилетие производство метанола почти удвоилось, причем значительная доля этого роста приходится на Китай. Современные тенденции роста производства метанола позволяют прогнозировать его выработку до 500 миллионов тонн к 2050 году. С такими темпами загрязнение окружающей среды CO_2 также будет ускорено [11]. Использование исключительно природных ископаемых для производства метанола вызывает беспокойство и требует новых, более экологичных, технологий.

Наиболее привлекательным «зеленым» (возобновляемым) способом является каталитическая реакция диоксида углерода, взятого из атмосферы с водородом, выработанным электролизом воды с помощью возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Исследования по возможному применению гидроэлектростанций, являющимися фактически одним из видов возобновляемых источников энергии, для выработки водорода проводились нами ранее [7]. Водород, полученный таким способом, может служить сырьем для получения метанола. Такой процесс является возобновляемым

термо-химическим процессом. Возобновляемость этого процесса гарантируется тем, что в гидроэнергетике используется потенциальная энергия воды, перенесенная из крупных водоемов в горные районы. Перенос огромного количества воды на значительные расстояния осуществляется за счет солнечной энергии. Фактически, на гидроэлектростанциях может быть организовано производство водорода и метанола. Другими словами, речь идет об имитации природного фотосинтеза.

Выводы

В работе рассмотрена перспектива применения нового авиационного топлива – метанола взамен современных авиационных топлив – керосина и бензина. Проведен анализ стоимости выработки современных топлив и метанола. Отмечено, что современные технологии и конструкторские решения топливных элементов и электродвигателей, позволяют в существенно повысить КПД двигательной установки в авиации и не только. Показано, что метанол является наиболее эффективным видом топлива для массового применения. Рассмотрены экологически нейтральные способы получения метанола взамен традиционных из угля и природного газа.

Список источников

1. ICAO Environmental Protection. February 2024. ICAO is organizing the 2024 Green Airports Seminar to be held in Athens, Greece, on 18-19 April 2024. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/default.aspx>. Дата обращения 10.09.2024
2. Анализ источников выработки перспективного углеводородного топлива. Афанасьев В.Я., Краев В.М., Тихонов А.И. Уголь. 2024. № 1 (1176). С. 37-42.,
3. Перспективные способы аккумулирования энергии. Афанасьев В.Я., Краев В.М., Тихонов А.И., Серебрякова Г.В. Уголь. 2024. № 8. С. 104-109
4. Клименко Г.К., Сорокин М.И. Исследование энергетических характеристик аккумуляторов специального назначения // Инженерный журнал: Наука и инновации. 2014. № 2 (26). С. 9-20.

5. Облик двигательной установки перспективного гражданского беспилотного летательного аппарата для освоения арктического пространства. Краев В.М., Тихонов А.И. СТИН. 2023. № 1. С. 42-46.
6. Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy. George A. Olah, Alain Goepfert, G. K. Surya Prakash. Wiley. 2006. 290 p.
7. Краев В.М., Тихонов А.И. Перспективы применения водородной энергетики в странах европы. СТИН. 2023. № 4. С. 39-42.
8. Aftab Ahmed, Aftab Ahmed, Yasir Ali Fazlani, Yasir Ali Fazlani, Muhammad Najam-Uddin, Muhammad Najam-Uddin, Sikander Khan, Sikander Khan. A Technological, Economical and Efficiency Review of Direct Methanol Fuel Cell. Conference: 2018 International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies – iCoMET 2018At: Sukkur IBA University. March 2018. DOI: 10.1109/ICOMET.2018.8346445
9. Стивен Чен. Китайские ученые создали метанольную батарею, которая удерживает дрон в воздухе в течение 12 часов. Южно-Китайская утренняя почта. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://www.scmp.com/news/china/science/article/3042818/chinese-scientists-create-game-changer-methanol-battery-keeps>. Дата обращения 10.09.2024
10. Mauro Francesco Sgroi, Furio Zedde, Orazio Barbera, Michael Schuster. Cost Analysis of Direct Methanol Fuel Cell Stacks for Mass Production. Energies 9(12). November 2016. DOI: 10.3390/en9121008
11. Innovation. Renewable methanol. Irena. Январь 2021 года. ISBN 978-92-9260-320-5.

References

1. ICAO Environmental Protection. February 2024. ICAO is organizing the 2024 Green Airports Seminar to be held in Athens, Greece, on 18-19 April 2024. <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/default.aspx>. 10.09.2024
2. Analiz istochnikov vyrabotki perspektivnogo uglevodorodnogo topliva. Afanas'ev V.Ya., Kraev V.M., Tihonov A.I. Ugol'. 2024. № 1 (1176). S. 37-42

3. Perspektivnye sposoby akkumulirovaniya energii. Afanas'ev V.Ya., Kraev V.M., Tihonov A.I., Serebryakova G.V. Ugol'. 2024. № 8. S. 104-109
4. Klimenko G.K., Sorokin M.I. Issledovanie energeticheskikh harakteristik akkumulyatorov special'nogo naznacheniya // Inzhenernyj zhurnal: Nauka i innovacii. 2014. № 2 (26). S. 9-20.
5. Drone propulsion system for arctic use. Kraev V.M., Tikhonov A.I. Russian Engineering Research. 2023. V. 43. № 2. P. 211-214.
6. Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy. George A. Olah, Alain Goeppert, G. K. Surya Prakash. Wiley. 2006. 290 p.
7. Prospects for hydrogen power in Europe. Kraev V.M., Tikhonov A.I. Russian Engineering Research. 2023. V. 43. № 5. P. 618-620.
8. Aftab Ahmed, Aftab Ahmed, Yasir Ali Fazlani, Yasir Ali Fazlani, Muhammad Najam-Uddin, Muhammad Najam-Uddin, Sikander Khan, Sikander Khan. A Technological, Economical and Efficiency Review of Direct Methanol Fuel Cell. Conference: 2018 International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies – iCoMET 2018At: Sukkur IBA University. March 2018. DOI: 10.1109/ICOMET.2018.8346445
9. Stephen Chen. Chinese scientists create 'game-changer' methanol battery that keeps drone in the air for 12 hours. South China Morning Post. <https://www.scmp.com/news/china/science/article/3042818/chinese-scientists-create-game-changer-methanol-battery-keeps>. 10.09.2024
10. Mauro Francesco Sgroi, Furio Zedde, Orazio Barbera, Michael Schuster. Cost Analysis of Direct Methanol Fuel Cell Stacks for Mass Production. Energies 9(12). November 2016. DOI: 10.3390/en9121008
11. Innovation. Renewable methanol. Irena. Jan 2021. ISBN 978-92-9260-320-5.

© Краев В.М., Масич Д.И., Алексеев К.А., 2024. Московский экономический журнал, 2024, № 9.