DOI: 10.58168/BECGD2026_348-353
УДК 338.22

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ПОВЫШЕНИЮ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АВИАЦИОННОГО ТРАНСПОРТА

MODERN APPROACHES TO IMPROVING ENERGY EFFICIENCY OF AIR TRANSPORT

Локтева Д.В., кандидат физико-математических наук, доцент, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, Воронеж, Россия

Lokteva D.V., PhD in Physics and Mathematics, associate professor, Military Educational and Scientific Center of the Air Force, N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russia

Аннотация: Современный авиатранспорт, ответственный за генерацию большого количества антропогенных выбросов углекислого газа, вынужден искать более эффективные и экологически чистые решения для сохранения своей конкурентоспособности при соблюдении строгих экологических норм. В статье рассматриваются вопросы сокращения энергопотребления современным авиационным транспортом.

Abstract: Modern aviation, responsible for generating large amounts of anthropogenic carbon dioxide emissions, is forced to seek more efficient and environmentally friendly solutions to maintain competitiveness while complying with strict environmental regulations. This article examines the reduction of energy consumption in modern aviation.

Ключевые слова: транспорт, авиация, энергоэффективность, сокращение выбросов, подходы, топливо, материал, форма, оптимизация.

Keywords: transport, aviation, energy efficiency, emission reduction, approaches, fuel, material, form, optimization.

В условиях стремительного роста глобальных экологических требований и потребности в снижении антропогенного влияния на климат отечественная и мировая авиационная промышленность сталкивается с необходимостью радикального изменения основ своей деятельности. Особенно это заметно для российских предприятий, входящих в систему заводов Объединенной авиастроительной корпорации, и продолжающих попытки своего развития в условиях санкций.

Современный авиатранспорт, ответственный за потребление примерно 5 % мирового топлива и генерацию 2…3 % всех антропогенных выбросов углекислого газа, вынужден искать более эффективные и экологически чистые решения для сохранения своей конкурентоспособности при соблюдении строгих экологических норм [3, 5]. Основные направления оптимизации энергоэффективности авиационного транспорта представлены на рис. 1.

© Локтева Д. В., 2026

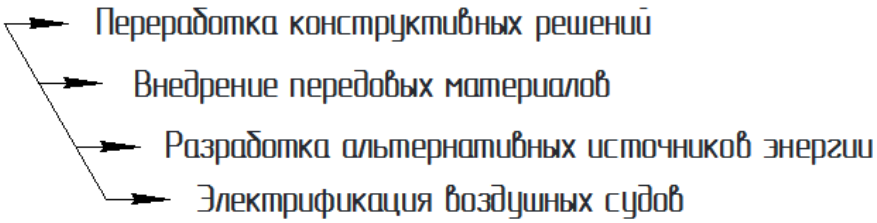
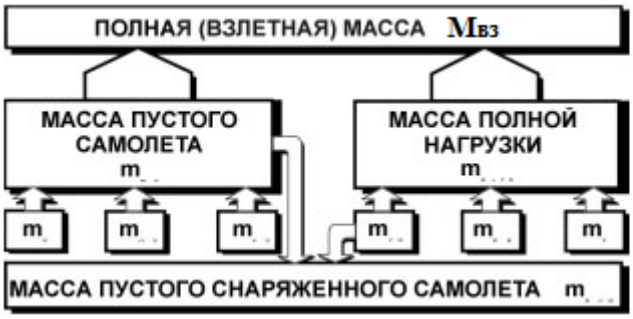


Рисунок 1 – Основные направления оптимизации энергоэффективности авиационного транспорта

Эта масштабная модернизация требует комплексного подхода, сочетающего инновации в области аэродинамики (в том числе – патентуемые), создания новых материалов (обладающих приемлемыми прочностными характеристиками и при этом конкурентоспособными в части стоимости). Кроме того, применение современных энергоаккумуляторов в совокупности должно обеспечить значительное сокращение энергопотребления и вредных выбросов при сохранении высокой скорости и безопасности полётов.

Выявим основополагающие факторы энергоэффективности авиационных транспортных средств.

Потребление топлива современными воздушными судами непосредственно зависит от двух ключевых факторов: их общей массы (рис. 2) и аэродинамического совершенства конструкции.



$$R_T = \frac{M_{вз}^{0,75}}{L/D}$$

Рисунок 2 – Характерные массы воздушного судна

Здесь особое значение приобретает фундаментальное уравнение, связывающее эти параметры с расходом топлива: потребление топлива R_T пропорционально показателю в степени 0,75 от максимальной взлётной массы $M_{вз}$ и обратно пропорционально отношению подъёмной силы к лобовому сопротивлению (L/D). Это означает, что даже небольшое снижение веса самолёта может дать значительный эффект в плане топливной экономичности – на каждые десять процентов уменьшения массы можно уменьшить расход энергоресурсов на 6…8 %, что является чрезвычайно важным показателем при анализе экономической эффективности эксплуатации воздушных судов.

В части аэродинамики оптимизация формы деталей для снижения лобового сопротивления воздушного судна позволяет добиваться существенного повышения

коэффициента подъёмной силы к сопротивлению до 22-25 единиц, что в свою очередь способствует значительному уменьшению расхода топлива и увеличению дальности полёта при сохранении тех же эксплуатационных характеристик [1]. Так, загнутые кончики крыльев позволяют снизить аэродинамическое сопротивление на четыре-пять процентов, а применение революционных обтекаемых форм фюзеляжа на Boeing 787 Dreamliner дало улучшение на 7 % лётных характеристик по сравнению с предшествующими моделями, что подтверждает высокую эффективность даже незначительных конструктивных модификаций. Перспективным представляется также внедрение двигателя в крыло, хотя по объективным причинам это не всегда возможно.

Касательно применяемых в авиационной промышленности материалов отметим, что современная авиационная техника переживает эпоху радикальной переоценки применяемых материалов, где традиционные алюминиевые и стальные сплавы (табл. 1) постепенно уступают место передовым композитам и новым инженерным материалам.

Таблица 1 – Достоинства и недостатки традиционных материалов

Материал	Плотность (кг/м³)	Преимущества	Ограничения
Алюминий (Al)	2700	Высокая коррозионная стойкость, легкость обработки	Низкая прочность (σ_{max} ~ 500 МПа)
Титан (Ti)	4500	Высокая жаропрочность, коррозионная стойкость	Высокая стоимость, сложность обработки
Сталь	7800	Высокая прочность	Большая масса, подверженность коррозии

Недостатки традиционных материалов обусловили рост интереса к композитным материалам, где особую роль играют углепластики на основе углеродных волокон (плотность 1500…1600 кг/м^3: ~в 2 раза легче алюминия),. Параллельно развиваются исследования в области графеновых композитов, которые могут обеспечить ещё более значительное повышение прочностных характеристик (теоретическая прочность ~130 Гпа: в 100 раз прочнее стали при той же массе), что открывает перспективы для создания самолётов с ещё более лёгкой и прочной конструкцией. Кроме того, разработаны биокомпозиты на основе древесины и бамбука (плотность ~ 500…1000 кг/м^3), которые находят применение в менее критичных элементах конструкции, дополнительно снижая общий вес самолёта.

В части возможности применения альтернативных энергетических ресурсов отметим, что снижение зависимости авиационного транспорта от традиционных видов топлива становится одной из ключевых задач современной инновационной деятельности в этой отрасли (табл. 2). Особое внимание уделяется разработке биотопливных технологий, где

наиболее перспективными считаются гидроочищенные эфиры и жирные кислоты, получаемые из растительных масел и микроскопических водорослей [2, 6].

Таблица 2 – Сравнение традиционных и перспективных авиатоплив:

Тип топлива	Удельная энергия (МДж/кг)	CO_2 выбросы (отн. ед.)	Основные Ограничения
Керосин (Jet-A1)	43	1 (базовый)	Высокие выбросы CO_2
Биотопливо (HEFA)	40…43	0,2…0,5	Высокая стоимость
Синтетическое (PtL)	43	0	Энергоёмкость Производства
Водород (LH_2)	120…142	0	Низкая плотность

Параллельно развиваются технологии синтетического топлива [4], где углеродсодержащие соединения, полученные из биомассы или атмосферного углекислого газа с помощью процессов Фишера-Тропша, могут производиться с нулевым уровнем выбросов, если энергия для их производства поступает из возобновляемых источников. Однако основным ограничением этих технологий остаётся их высокая стоимость, превышающая стоимость традиционного керосина в 5…7 раз.

Вместе с тем, наиболее революционным направлением развития альтернативных энергетических технологий остаётся водородная энергетика, где жидкий водород, хранимый при экстремально низких температурах, демонстрирует исключительно высокую удельную энергию (~120…142 МДж/кг: в 3 раза выше керосина). Тем не менее, реализация водородных технологий сталкивается с серьёзными вызовами, связанными со значительным увеличением объёмов топливных баков и отсутствием развитой инфраструктуры для хранения и заправки.

В части возможности электрификации и гибридизации авиационных систем отметим, что развитие электрических и гибридных технологий в авиационной промышленности открывает возможности для создания принципиально новых типов воздушных судов, способных значительно сократить вредные выбросы и уровень шума. Электрические самолёты, особенно малых и средних размеров, уже демонстрируют свою практическую реализуемость, где основным ограничивающим фактором остаётся низкая энергоёмкость современных аккумуляторных систем (~0,2…0,3 кВт·ч/кг против 10…12 кВт·ч/кг керосина). Это ограничение существенно снижает дальность полёта электрических самолётов (пока – 100…200 км), что делает их пригодными лишь для коротких маршрутов и городских авиаперевозок. Водородно-электрические технологии представляют собой ещё более перспективное направление, где топливные элементы, преобразующие водород в электричество с выходом лишь воды в качестве побочного продукта, могут обеспечить значительно большую дальность полёта – до 2000 километров для самолётов на 100…150

пассажиров. Гибридные системы, сочетающие традиционные двигатели внутреннего сгорания с электрическими компонентами, также находят своё применение, где рекуперация энергии при торможении и более гибкое управление мощностью позволяют снизить расход топлива на 20…30 %. Эти технологии находят применение в региональных самолётах и учебной авиации, где их реализация более оправдана с экономической точки зрения.

Анализ современных тенденций в развитии авиационной техники позволяет сделать вывод о необходимости комплексного подхода к решению проблем энергоэффективности, объединяющего конструктивные инновации, разработку передовых материалов, внедрение альтернативных источников энергии и электрификацию авиационных систем. В результате комплексного подхода возможна радикальная трансформация авиационной отрасли, где традиционные авиалайнеры будут постепенно замещаться более экологичными и энергоэффективными вариантами, способными обеспечить сохранение конкурентоспособности отрасли при одновременном снижении её негативного воздействия на окружающую среду.

Список литературы

1. Алесин В.С. Численное исследование влияния формы фюзеляжа на тягу толкающего воздушного винта / В.С. Алесин, В.В. Губский, О.В. Павленко // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2018. – № 6(78). – С. 3. – DOI: 10.18698/2308-6033-2018-6-1769.

2. Барабанов Д.С. Биотопливо и его применения на транспорте / Д.С. Барабанов, Н.А. Сердюкова, Д.В. Лиховая // Транспорт: наука, образование, производство (Транспорт-2021): труды международной научно-практической конференции, Воронеж, 19-21 апреля 2021 года. – Воронеж: РГУПС, 2021. – С. 7-10.

3. Казютина А.А. Анализ методов оценки экономической эффективности воздушного транспорта / А.А. Казютина, М.М. Гязова // Транспортное дело России. – 2024. – № 7. – С. 39-42.

4. Кочманбетова Г.Т. Роль неорганической химии в разработке экологически чистого авиационного топлива / Г.Т. Кочманбетова, А.Т. Турусбекова // Наука и инновационные технологии. – 2025. – № 4(37). – С. 353-360. – DOI: 10.33942/sit1515.

5. Ратнер С.В. Инновации в авиастроении: анализ результатов исследовательских программ по разработке альтернативных видов авиационного топлива / С.В. Ратнер // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2018. – Т. 14, № 3(360). – С. 492-506. – DOI: 10.24891/ni.14.3.492.

6. Шевцов А.А. Разработка энергоэффективной технологии производства биодизельного топлива с применением каскадного теплового насоса / А.А. Шевцов, Н.А. Сердюкова, В.В. Ткач // Южно-Сибирский научный вестник. – 2025. – № 6(64). – С. 422-427. – DOI: 10.25699/SSSB.2025.64.6.055.

References

1. Alesin V.S. Numerical Study of the Influence of Fuselage Shape on the Thrust of a Pusher Propeller / V.S. Alesin, V.V. Gubskiy, O.V. Pavlenko // Engineering Journal: Science and Innovation. - 2018. - No. 6 (78). - P. 3. - DOI: 10.18698/2308-6033-2018-6-1769.

2. Barabanov D.S. Biofuel and its Applications in Transport / D.S. Barabanov, N.A. Serdyukova, D.V. Likhovaya // Transport: Science, Education, Production (Transport-2021): Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Voronezh, April 19-21, 2021. - Voronezh: RGUPS, 2021. - P. 7-10.

3. Kazyutina A.A. Analysis of methods for assessing the economic efficiency of air transport / A.A. Kazyutina, M.M. Gyazova // Transport Business of Russia. - 2024. - No. 7. - Pp. 39-42.

4. Kochmanbetova G.T. The role of inorganic chemistry in the development of environmentally friendly aviation fuel / G.T. Kochmanbetova, A.T. Turusbekova // Science and innovative technologies. - 2025. - No. 4 (37). - Pp. 353-360. - DOI: 10.33942/sit1515.

5. Ratner S.V. Innovations in aircraft manufacturing: analysis of the results of research programs for the development of alternative types of aviation fuel / S.V. Ratner // National interests: priorities and security. – 2018. – Vol. 14, No. 3(360). – P. 492-506. – DOI: 10.24891/ni.14.3.492.

6. Shevtsov A.A. Development of an energy-efficient technology for the production of biodiesel fuel using a cascade heat pump / A.A. Shevtsov, N.A. Serdyukova, V.V. Tkach // South Siberian Scientific Bulletin. – 2025. – No. 6(64). – P. 422-427. – DOI: 10.25699/SSSB.2025.64.6.055.