

УДК 629.7.025; 629.7.027

**Логинов В. В.**

доктор технических наук, старший научный сотрудник, начальник управления программ и проектов ЧАО “ФЭД”, Харьков, Украина, e-mail: flightpropulsion@gmail.com;

**Дмитриев С. В.**

начальник отдела маркетинга и научно-технической информации ГП “Ивченко-Прогресс”, Запорожье, Украина, e-mail: s.dmytriyev@ivchenko-progress.com;

**Украинец Е. А.**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры инженерно-авиационного факультета, Харьковский национальный университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков, Украина, e-mail: eukrainez@gmail.com;

**Глушченко П. А.**

адъюнкт научно-организационного отдела, Харьковский национальный университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков, Украина, e-mail: GlushchenkoPA@i.ua

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ УЛУЧШЕНИЯ ТОПЛИВНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАГИСТРАЛЬНОГО САМОЛЕТА

*Одной из исследовательских задач, направленных на достижение целей FLIGHTPATH 2050, является оценка методов улучшения топливной эффективности самолета на основе реализации концепции адаптивного крыла для снижения сопротивления самолета и применения электрического привода колес шасси. Проведена оценка способов снижения лобового сопротивления тяжелого дальнего магистрального самолета типа А340-600, оценено влияние использования для руления электропривода стоек шасси на топливную эффективность самолета. Показано, что ламинаризация поверхности планера самолёта без учета энергетических затрат на отсос пограничного слоя позволяет уменьшить затраты топлива приблизительно на 20%. Снижение времени использования маршевых двигателей самолета при рулении является мероприятием, которое сопоставимо по своей эффективности с уменьшением размеров щелей и уступов в органах управления и механизации крыла самолета. Самолет с электроприводом в передней стойке шасси имеет преимущество в топливной эффективности перед исходным самолетом только при рулении более 30 минут.*

**Ключевые слова:** экология, ACARE, Flightpath 2050, самолет, сопротивление, ламинаризация, двигатель, электропривод, топливная эффективность.

### Введение

Авиация вносит значительный вклад в антропогенное загрязнение окружающей среды. Данная проблема особенно актуальна для крупных аэропортов с интенсивным воздушным движением [1, 2]. Загрязнение верхней тропосферы и стратосферы имеет глобальные климатические и экологические последствия для человека и биосферы [3]. Поэтому страны-лидеры мирового авиастроения ставят долгосрочные цели развития авиации на основе экологической эффективности [4, 5], разработки новых технологий и поиска новых технических решений в авиации на уровне революционных подходов [6-9]. В Европейском Союзе главную роль в вопросах долгосрочной стратегии по проведению исследований, направленных на снижение воздействия авиации на окружающую среду и повышение конкурентоспособности, устойчивости европейской авиационной промыш-

ленности играет Advisory Council for Aeronautics Research in Europe (ACARE). Главная задача ACARE - инициировать сотрудничество между заинтересованными сторонами, направленное на достижение целей Flightpath 2050 [2]. Для анализа выполнения всех целей, изложенных в Flightpath 2050, в настоящее время, по инициативе партнеров проекта Perspectives for Aeronautical Research in Europe (PARE) проводятся исследования по определению уровня прогресса, разрывов и барьеров для каждой из этих целей и выработке рекомендаций по их устранению. Одной из исследовательских задач в проекте PARE является оценка методов улучшения топливной эффективности самолета на основе реализации концепции адаптивного крыла для снижения сопротивления самолета [10] и применения электрического привода колёс шасси.

Для обеспечения конкурентоспособности летательного аппарата актуальной задачей яв-

ляется исследование его экологических характеристик и топливной эффективности.

Целью представленных исследований является оценка влияния перспективных способов снижения расхода топлива тяжелого дальнего магистрального самолёта на основе улучшения аэродинамических характеристик.

**Постановка задачи**

Исследование экологических характеристик построено на знании параметров рабочего процесса двигателя силовой установки и аэродинамических характеристик самолета. Перспективными методами увеличения аэродинамического качества самолёта являются отказ от механизации передней и задней кромки крыла, отклоняемых органов управления самолета, искусственная ламинаризация элементов планера [6, 10]. Следствием увеличения аэродинамического качества самолета является повышение в той или иной степени его топливной эффективности. Другим примером повышения топливной эффективности самолёта является применение электропривода стоек шасси типа WheelTug для руления самолета при выключенных двигателях [11]. Однако такие решения требуют тщательных исследований.

**Методы исследований**

Для проведения исследований выбран тяжелый дальнемагистральный самолет типа А340-600. Исследования проведены для двух направлений: параметрические исследования лётно-технических характеристик (ЛТХ) самолета и оценка применения электропривода стоек шасси при рулении самолёта при выключенных двигателях до взлётной полосы.

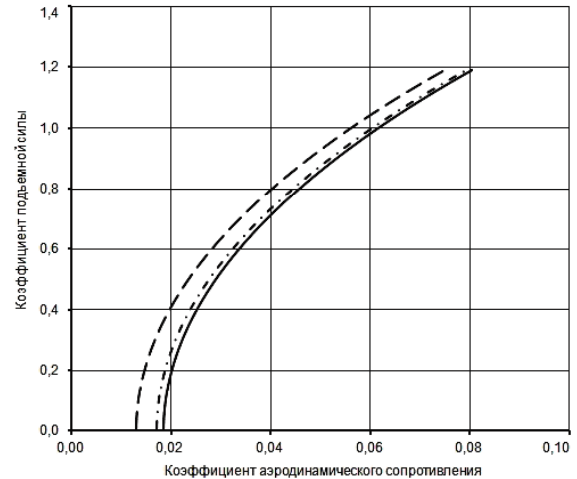
Параметрические исследования ЛТХ тяжелого дальнемагистрального самолёта проводились с помощью разработанного модульного программного комплекса на основе методики, изложенной в работах [12, 13]. Модульный программный комплекс позволяет проводить исследования как с дозвуковой, так и со сверхзвуковой скоростями полёта самолета.

В основе снижения аэродинамического сопротивления самолета является улучшение качества обтекаемой поверхности, сокращение числа внешних надстроек и конструктивных элементов, проведение других конструктивно-технологических мероприятий. Перспективными средствами уменьшения сопротивления трения дозвуковых самолетов являются искусственная и естественная ламинаризация обтекания. Используя профили специальных форм с благоприятными градиентами давления в передней части крыла, можно осуществить естественную ламинаризацию на крыле самолёта и за счёт этого уменьшить сопротивление трения [14-17].

Аэродинамические характеристики исходного и модернизированного варианта самолёта представлены в виде поляр (рис. 1) и зависимостей аэродинамического качества

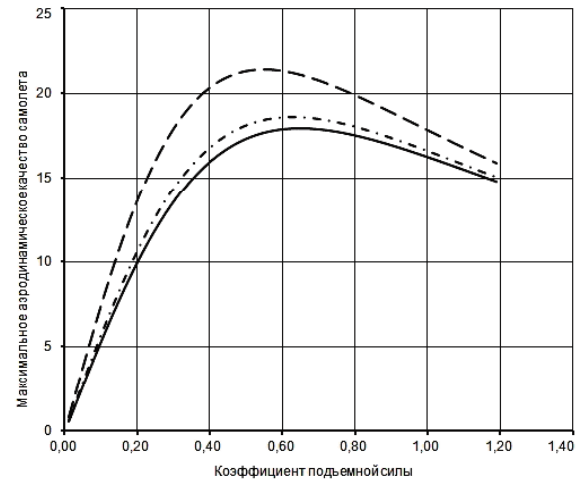
от коэффициента подъемной силы самолёта (рис. 2) для крейсерского режима полёта.

Показаны результаты расчета поляры и зависимости аэродинамического качества от коэффициента подъемной силы модернизированного самолета при полном отсутствии механизации передней и задней кромки крыла, отклоняемых органов управления самолета, ламинаризации фюзеляжа, крыла, оперения и мотогондол. Данные соответствуют крейсерскому режиму полёта самолёта.



**Рис. 1.** Поляра исходного и модернизированного самолета

- — — исходный самолет с механизацией
- — — самолет без механизации, элеронов и рулей с искусственной ламинаризацией
- · — · — самолет без механизации, элеронов и рулей



**Рис. 2.** Зависимость аэродинамического качества от коэффициента подъемной силы самолета

- — — исходный самолет с механизацией
- — — самолет без механизации, элеронов и рулей с искусственной ламинаризацией
- · — · — самолет без механизации, элеронов и рулей

В табл. 1 представлены результаты расчета расходных характеристик самолета с влиянием (турбулизует пограничный слой) и не влиянием предкрылка на структуру пограничного слоя на основном профиле. Также приведены результаты расчета величины дополнительного расхода топлива  $G_T$  при влиянии предкрылка в случае отсутствия механизации крыла, элеронов и рулей.

Таблица 1. Результаты расчёта расхода топлива самолёта типа А340-600

Название параметра	Исходный самолет (предкрылок влияет на структуру пограничного слоя на основном профиле / предкрылок не влияет)	Без предкрылков	Без закрылков (предкрылок влияет на структуру пограничного слоя на основном профиле / предкрылок не влияет)	Без элеронов (предкрылок влияет на структуру пограничного слоя на основном профиле / предкрылок не влияет)	Без механизации и элеронов	Без механизации, элеронов и рулей	Искусственная ламинаризация
Расход топлива за полёт, кг	139195,8 / 134080,5	133513,4	137213,3 / 132105,9	138657,3 / 133544,3	131004,4	128855,3	111140,6
Расход топлива на горизонтальном участке полета, кг	125505,3 / 120687,4	120152,3	123640,3 / 118823,1	124999,1 / 120181,4	117782,1	115748,9	98906,3
Остаток топлива, кг	16404,2 / 21519,5	22086,6	18386,7 / 23494,1	16942,7 / 22055,7	24595,6	26744,7	44459,4
Часовой расход топлива СУ ЛА, кг/час	11242 / 10842	10798	11087 / 10687	11200 / 10800	10601	10432	9030
Часовой расход топлива СУ ЛА на крейсерском режиме, кг/час	10914 / 10495	10448	10751 / 10332	10869 / 10451	10242	10065	8601
Километровый расход топлива СУ ЛА на крейсерском режиме, кг/км	14,42 / 13,87	13,81	14,21 / 13,66	14,37 / 13,81	13,54	13,30	11,37
Выигрыш по топливу $\Delta G_T$ по сравнению с исходным вариантом, кг	- / 5115,3	5682	1982 / 7090	538 / 5651,5	8191	10341	28055
Выигрыш по топливу $\Delta G_T$ по сравнению с исходным вариантом, %	- / 3,7	4,1	1,4 / 5,1	0,4 / 4,1	5,9	7,4	20,2

Для улучшения экологических характеристик самолета необходимо применение электрического привода колес шасси [11]. Использование этого устройства снижает количество вредных выбросов и уровень шума, а также позволяет самолету двигаться задним ходом без использования наземной техники. За счёт повышения мобильности самолёта возрастает интенсивность движения, что приводит к сокращению времени его нахождения на земле и увеличивает рентабельность авиaperезовок.

Получены результаты исследования топливной эффективности исходного самолёта за типовой полётный цикл с устройством типа WheelTug при различном времени руления самолёта на земле (рис. 3). Устройство весит 1000 килограмм, включая интерфейс в кабине и контроллеры, состоит из электромоторов, которые устанавливаются в колеса носовой стойки.

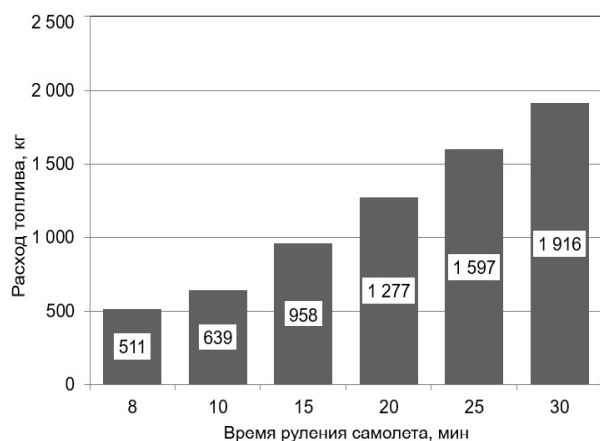


Рис. 3. Расход топлива при увеличении времени руления самолета (режим работы двигателя “малый газ”)

Увеличение расхода топлива при увеличении времени руления самолета (режим работы двигателя “малый газ”) показано на рис. 3. Следует отметить, что установка подобных систем уменьшает весовое совершенство самолета [10].

Исследования показали, что для данного самолета применение электропривода такой массы является эффективным в случае руления более 30 минут. При меньшем времени руления самолета с устройством типа WheelTug, масса сэкономленного топлива при рулении становится меньше той массы топлива, которая расходуется на воздушную перевозку дополнительной массы электропривода в составе самолета. Поэтому в дальнейших исследованиях целесообразно учитывать эту особенность при расчете характеристик самолета.

#### Заключение

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

Наиболее эффективным методом увеличения аэродинамического качества самолёта является ламинаризация поверхности планера. Ламинаризация поверхности без учёта энергетических затрат на отсос пограничного слоя позволяет уменьшить затраты топлива приблизительно на 20%. Оценочно, с учётом энергетических затрат на ламинаризацию, этот выигрыш может составить 13...15%.

Снижение времени использования маршевых двигателей самолёта при рулении является мероприятием, которое сопоставимо по своей эффективности с уменьшением размеров щелей и уступов в органах управления и механизации крыла самолёта. Установлено, что даже без учёта выработки ресурса маршевых двигателей тяжёлый дальний самолет, оборудованный устройством типа WheelTug, имеет преимущество перед исходным самолётом при рулении более 30 минут.

Результаты, представленные в данной работе, являются предварительными и позволяют оценить предельные возможности повышения топливной эффективности магистрального самолета.

#### Литература

1. Future of Europe [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://ec.europa.eu/commission/future-europe\\_en](https://ec.europa.eu/commission/future-europe_en), accessed 26 May 2018.
1. Flight 2050 Goals.[Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.acare4europe.org/sria/flightpath-2050-goals>, accessed 25 May 2018.
3. European Aviation Environmental Report [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [environmental-report-2016-72dpi.pdf](https://www.eurocontrol.europa.eu/aviation/Environmental-Report-2016-72dpi.pdf). – 84 p.
4. Airbus’ “BLADE” laminar flow wing demonstrator makes first flight [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2017/09/airbus-blade-laminar-flow-wing-demonstrator-makes-first-flight.html>, accessed 10 September 2017.
5. Nickol C. Assessment of the Performance potential of Advanced Subsonic Transport Concepts for NASA’s Environmentally Responsible Aviation Project [Text] / C.Nickol, W.Haller, 2016. – 34 p.
6. Morphing Wing Technologies. Large Commercial Aircraft and Civil Helicopters [Text] / A.Concilio, I.Dimino, L.Lecce at all. – 1st Edition, Butterworth-Heinemann. – 2017. – 978 p.
7. Graham W. R. The potential of future aircraft technology for noise and pollutant emissions reduction. [Text] / W. R. Graham, C. A. Hall, V. Morales // Transport Policy. – 2014. – Vol. 34. – P. 36–51.
8. Leylekian L. An Overview of Aircraft Noise Reduction Technologies [Text] / L. Leylekian, M.Lebrun, P.Lempereur // Aerospace Lab Journal, 2014. – Issue 7 : AL07-01.

9. Nae C. Advanced Aerodynamic Technologies for Future Green Regional Aircraft. [Text] / C. Nae // INCAS BULLETIN, 2014. – Vol. 6, Special Issue 1. – P. 99-110.
10. Белкин В. А. К проблеме повышения топливной эффективности гражданских самолетов [Текст] // Научный вестник МГТУ ГА. – 2015. – № 219. – С. 121-126.
11. Шасси с электроприводом для реактивного самолета [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.safran.ru/file/download/safranmag11\\_rus.pdf](https://www.safran.ru/file/download/safranmag11_rus.pdf). – 21 p.
12. Логинов В. В. Программный комплекс по формированию эксплуатационных характеристик двигателя силовой установки самолета [Текст] / Авиационно-космическая техника и технология. – 2015. – № 9 (126). – С. 149–152.
13. Loginov V. Analysis of operational characteristics of aviation diesel and gas turbine engines for light passenger aircraft [Text] / V. Loginov, Y. Ukrainets // Transactions of the institute of aviation. – Warsaw, 2016. – № 4 (245). – P. 103-115.
14. Краснов Н. Ф. Основы аэродинамического расчёта [Текст] / Н. Ф. Краснов. – М. : Высшая школа, 1981. – 436 p.
15. Burley C. L. Hybrid wing body aircraft system noise assessment with propulsion airframe aeroacoustic experiments [Text] / C. L. Burley, E. D. Olson, R. H Thomas // International Journal of Aeroacoustics. – 2017. – Vol. 11, no. 3&4. – P.45-64.
16. Michael J. Czech Propulsion airframe aeroacoustic integration effects for a hybrid wing body aircraft configuration [Text] / J. Czech Michael, H. Thomas Russell, Elkoby Ronen // Aeroacoustics. – 2012. – Vol.11, №3-4. – P. 335-368..
17. Shuo Zhang Small morphing wing aerial vehicle dynamic modelling basing on simulation and flight test [Text] / Shuo Zhang, Zhengjie Wang, Wenming Dong. // International Journal of Modelling, Identification and Control, 2017. – Vol. 27, Issue 3. – P. 219-229.

Поступила в редакцию 25.06.2018

**В. В. Логінов, С. В. Дмитрієв, Е. О. Українець, П. А. Глущенко. Аналіз методів покращення паливної ефективності магістрального літака**

*В роботі показано виконання однієї з цілей Європейської консультативної ради з досліджень в області авіації (ACARE), викладених в Flightpath 2050. Європейський союз проводить дослідження з визначення рівня прогресу, розривів і бар'єрів для кожної з цілей та надання рекомендацій щодо їх усунення. Основна увага приділяється проблемам забезпечення екологічних характеристик, паливної ефективності, задоволенню потреб пасажирів та підтримання глобального лідерства. Тому в роботі виконано дослідження методів поліпшення паливної ефективності літака на основі реалізації концепції адаптивного крила для зниження опору літака і застосування електричного приводу коліс шасі. Проведено оцінку способів зниження лобового опору важкого дальнього магістрального літака типу A340-600 на основі реалізації зазначеної концепції, а також вплив електроприводу стійок шасі на паливну ефективність літака. Показано, що основним показником, що характеризує конкурентоспроможність ЛА, є можливість забезпечити перевезення максимального комерційного навантаження на найбільшу дальність при мінімальній витраті палива.*

*Дослідження експлуатаційних характеристик літака проводилося за допомогою розробленого модульного програмного комплексу на основі проведення параметричних досліджень характеристик літака і його силової установки на етапах модернізації або попереднього проектування. Модульний комплекс включає обчислювальні програмні блоки, які взаємопов'язані між собою, і дозволяють проводити дослідження характеристик двигунів і літаків як з дозвуковою, так і з надзвуковою швидкістю польоту.*

*Результати досліджень показали, що ламінаризація поверхні планера літака без урахування енергетичних витрат на відсмоктування прикордонного шару дозволяє зменшити витрати палива приблизно на 20 %. Зниження часу використання маршових двигунів літака при рульній є заходом, який можна порівняти за своєю ефективністю зі зменшенням розмірів щілин і уступів в органах управління та механізації крила літака. Літак з електроприводом в передній стійці шасі має перевагу в паливній ефективності перед вихідним літаком тільки при рульній більше 30 хвилин. Отримані результати дозволяють оцінити граничні можливості підвищення паливної ефективності важкого дальнього магістрального пасажирського літака.*

**Ключові слова:** екологія, ACARE, Flightpath 2050, літак, опір, ламінаризація, двигун, електропривід, паливна ефективність.

**V.V. Loginov, S.V. Dmytriiev, E.A. Ukrainets, P.A. Glushchenko. Analysis of methods of improving fuel efficiency of trunk-route aircraft**

*The study demonstrates the fulfillment of one of the goals of the Advisory Council for Aeronautics Research in Europe (ACARE) outlined in Flightpath 2050. The European Union is conducting studies to determine the level of progress, gaps and barriers for each of the goals and to provide guidance on their elimination. The focus is on environmental performance, fuel efficiency, passenger satisfaction and global leadership. Therefore, there in the study is carried out research on methods for improving the fuel efficiency of the aircraft based on the implementation of the concept of adaptive wing to reduce the resistance of the aircraft and the use of electric drive wheel chassis. One conducted the estimation of ways to reduce the frontal resistance of a heavy long-distance trunk aircraft type A340-600 based on the implementation of this concept, as well as the effect of the electric drive chassis racks on the fuel efficiency of the aircraft. It is shown that the main indicator, which characterizes the competitiveness of aircraft, is the possibility to provide transportation of the maximum commercial load at the largest range with a minimum fuel consumption.*

*Exploration of the operational characteristics of the aircraft was carried out with the help of the developed modular software complex based on parametrical studies of the characteristics of the aircraft and its propulsion at the stages of modernization or preliminary design. The modular complex includes computational software blocks that are interconnected and allow the study of the characteristics of engines and aircraft, both with subsonic and with supersonic flight speed.*

*The results of studies have shown that laminarization of the aircraft's surface without taking into account the energy costs of exhausting the boundary layer reduces fuel consumption by about 20 %. Reducing the use of aircraft propulsion engines while taxiing is an action that can be compared in terms of its effectiveness with decreasing the size of cracks and ledges in the control and mechanization of the wing of the aircraft. Aircraft with an electric chassis in front of the chassis has an advantage in fuel efficiency before the aircraft only when taxiing for more than 30 minutes. The obtained results allow estimating boundary possibilities of increase of fuel efficiency of heavy long-distance main passenger aircraft.*

**Keywords:** ecology, ACARE, Flightpath 2050, aircraft, resistance, laminarization, engine, electric drive, fuel efficiency.

## References

1. Future of Europe. Available at: [https://ec.europa.eu/commission/future-europe\\_en](https://ec.europa.eu/commission/future-europe_en) (Accessed 26 May 2018).
2. FlightPath 2050 Goals. Available at: <http://www.acare4europe.org/sria/flightpath-2050-goals>, (Accessed 25 May 2018).
3. European Aviation Environmental Report 2016. Available at: <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/european-aviation-environmental-report-2016-72dpi.pdf>: 84 p.
4. Airbus' "BLADE" laminar flow wing demonstrator makes first flight. Available at: [http://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2017/09/airbus\\_-\\_blade\\_-\\_laminar-flow-wing-demonstrator-makes-first-flight.html](http://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2017/09/airbus_-_blade_-_laminar-flow-wing-demonstrator-makes-first-flight.html), (Accessed 10 September 2017).
5. Nickol C., Haller, W., Assessment of the Performance potential of Advanced Subsonic Transport Concepts for NASA's Environmentally Responsible Aviation Project, 2016.
6. Concilio I., Dimino L., Lecce R., Pecora. Morphing Wing Technologies. Large Commercial Aircraft and Civil Helicopters, 1st Edition, Butterworth-Heinemann: 978, 2017.
7. Graham W. R., Hall C. A., Morales V. The potential of future aircraft technology for noise and pollutant emissions reduction. Transport Policy, 2014, vol. 34, pp. 36–51.
8. Leylekian L., Lebrun M., Lempereur P. An Overview of Aircraft Noise Reduction Technologies. Aerospace Lab Journal, 2014, Issue 7: AL07-01.
9. Nae C. Advanced Aerodynamic Technologies for Future Green Regional Aircraft. INCAS BULLETIN, 2014, Vol. 6, Special Issue 1, pp. 99 – 110.
10. V.A. Belkin, K probleme povyshenija toplivnoj jeffektivnosti grazhdanskih samoletov [Problem of improving the fuel efficiency of civil aircraft]. Nauchnyj vestnik MGTU GA. 2015, no. 219, pp. 121-126.
11. Shassi s elektroprivodom dlya reaktivnogo samoleta [Landing gear with electric drive for a jet aircraft]. Available at: [https://www.safran.ru/file/download/safranmag11\\_rus.pdf](https://www.safran.ru/file/download/safranmag11_rus.pdf): 21 p.
12. V.V. Loginov. Programmnyj kompleks po formirovaniju jekspluacionnyh harakteristik dvigatelja silovoj ustanovki samoleta [Software for forming of operational performance of engine

aircraft power plant]. *Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija*. 2015. No. 9, pp. 149–152.

13. Loginov V., Ukrainets Y. Analysis of operational characteristics of aviation diesel and gas turbine engines for light passenger aircraft, *Transactions of the institute of aviation*. Warsaw, 2016, no. 4 (245), pp. 103-115.

14. N.F. Krasnov. *Osnovy aerodinamicheskogo rascheta* [Fundamentals of aerodynamic calculation]. M.: Vysshaya shkola. 1981. 436 p.

15. Burley C. L., Olson E. D., Thomas R.H Hybrid wing body aircraft system noise assessment with propulsion airframe aeroacoustic experiments.

*International Journal of Aeroacoustics*, 2017, Vol. 11, no. 3&4.

16. Michael J. Czech, Russell H. Thomas, Ronen Elkoby, Propulsion airframe aeroacoustic integration effects for a hybrid wing body aircraft configuration, *Aeroacoustics*, 2012, vol. 11, no. 3&4, pp. 335-368.

17. Shuo Zhang, Zhengjie Wang, Wenming Dong, Small morphing wing aerial vehicle dynamic modelling basing on simulation and flight test, *International Journal of Modelling, Identification and Control*, 2017, Vol. 27, Issue 3, pp. 219-229.