

Научная статья
УДК 629.7.063.017
DOI: [10.34759/trd-2023-131-21](https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-21)

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ТЕХНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ АГРЕГАТОВ ТОПЛИВНОЙ СИСТЕМЫ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Евгений Вячеславович Фетисов¹, Иван Иванович Завялик²✉

^{1,2}Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,

Воронеж, Россия

¹mr_907@mail.ru

²zavyalik26@yandex.ru✉

Аннотация. В процессе совершенствования функциональных систем воздушных судов, направленном на повышение уровня надежности и безопасности полетов, ужесточаются требования к эксплуатационным свойствам авиационной техники. Несмотря на значительное влияние загрязненности авиационного топлива на надежность агрегатов топливной системы воздушного судна, этот вопрос остается недостаточно изученным. Особенно это касается установления количественных зависимостей вероятности безотказной работы наиболее чувствительных к качеству и чистоте авиационного топлива агрегатов топливной системы от степени и характера загрязнений и изменения условий эксплуатации воздушного судна.

Существующие на сегодняшний день методики оценки безотказности топливной системы воздушного судна базируются на определении значений показателей безотказности исходя из статистических данных по результатам испытаний и эксплуатации, что позволяет учитывать лишь сам факт проявления отказа и его последствия, но не дает возможности оценить влияние таких внешних факторов, как природно-климатические условия эксплуатации и применения авиационной техники, изменение чистоты применяемого авиационного топлива на вероятность проявления параметрических отказов и неисправностей агрегатов топливной системы воздушного судна. Для решения этой задачи в статье представлена разработанная в среде MATLAB Simulink имитационная математическая модель функционирования агрегатов топливной системы авиационного двигателя в различных условиях эксплуатации воздушного судна. Модель позволяет исследовать и прогнозировать техническое состояние агрегатов топливной системы авиационного двигателя в зависимости от изменения условий эксплуатации воздушного судна. Для этого в систему уравнений функционирования агрегатов топливной системы авиационного двигателя на основе применения агрегативного подхода заложена зависимость значений определяющих параметров агрегатов топливной системы от размера и концентрации частиц загрязнений, содержащихся в авиационном топливе в различных условиях эксплуатации воздушного судна. Использование разработанной имитационной модели при проведении исследований оценки работоспособности агрегатов топливной системы с расширением диапазонов значений входных параметров и внутренних параметров системы (агрегатов топливной системы силовой установки летательного аппарата) позволит получить

достоверную оценку технического состояния агрегатов топливной системы при изменении условий эксплуатации воздушного судна.

Ключевые слова: безотказность, топливная система, модель, определяющий параметр, техническое состояние

Для цитирования: Фетисов Е.В., Завялик И.И. Оценка влияния условий эксплуатации на техническое состояние агрегатов топливной системы авиационного двигателя // Труды МАИ. 2023. № 131. DOI: [10.34759/trd-2023-131-21](https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-21)

Original article

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF OPERATING CONDITIONS ON TECHNICAL CONDITION OF FUEL SYSTEM UNITS AIRCRAFT ENGINE SYSTEMS

Evgeny V. Fetisov¹, Ivan I. Zavyalik²✉

^{1,2}Air force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin, Voronezh, Russia

¹mr_907@mail.ru

²zavyalik26@yandex.ru✉

Abstract. Requirements to aviation equipment operational properties are being tightened in the process of the aircraft functional systems improving, aimed at increasing flight reliability and safety levels. Despite substantial impact of the fuel impurity on the reliability of the fuel system units, this issue is still remains understudied. Despite the significant impact of aviation fuel pollution on the reliability of aircraft fuel system units, this issue remains insufficiently studied. This is especially true for establishing

quantitative dependences of the probability of failure-free operation of the fuel system units most sensitive to the quality and purity of aviation fuel on the degree and nature of contamination and changes in the aircraft operating conditions. Conventional techniques for the aircraft fuel system failure-free assessment are based on the reliability factor values determining from statistical data on the results of tests and operation. It allows accounting for only the fact of the failure manifestation itself, but does not allow assessing such external factors impact as environmental conditions of aviation equipment operation and application, the impurity changing of the applied fuel effect on the probability of parametric failures and maloperation manifestation of the aircraft fuel system units. To solve this problem, the article presents a mathematical simulation model of the aircraft engine fuel system units functioning under various aircraft operating conditions developed with the MATLAB Simulink. The model allows studying and predicting technical condition of the aircraft engine fuel system units depending on changes in the aircraft operating conditions. For this, the dependence of the key parameters values of the fuel system on the impurity particles size and concentration in the aviation fuel in various conditions of the aircraft operation is being embedded into the system of equations, describing the aviation engine fuel system functioning based on the aggregative approach. The developed model application at conducting studies on the fuel units operability assessment with ranges expansion of input and internal parameters values (fuel system units of the aircraft power plant) will allow obtaining reliable assessment of the fuel system technical condition at the aircraft operating conditions changing.

Keywords: reliability, fuel system, model, defining parameter, technical condition

For citation: Fetisov E.V., Zavyalik I.I. Assessment of the impact of operating conditions on technical condition of fuel system units aircraft engine systems. *Trudy MAI*, 2023, no. 131. DOI: [10.34759/trd-2023-131-21](https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-21)

Введение

В настоящее время большое внимание авиационных специалистов уделяется сложной и актуальной проблеме обеспечения безопасности полетов воздушных судов (ВС) [1, 2]. Базовым положением технического обеспечения безопасности полетов является высокая надежность узлов и агрегатов функциональных систем ВС. Теоретические и экспериментальные исследования, проводимые на современном этапе развития отечественной авиации показывают, что в топливных системах (ТС) ВС при взаимодействии элементов и агрегатов системы с авиационным топливом протекают сложные физико-химические процессы, оказывающие влияние на уровень технического состояния, как отдельных агрегатов, так и ТС в целом, и, как следствие, на надежность функционирования ВС.

Для определения вида технического состояния агрегата ТС авиационного двигателя (АД) и анализа законов его изменения в процессе эксплуатации ВС необходимо выбрать определяющий параметр (ОП), характеризующий агрегат [3, 4]. Под ОП может быть выбрана одна из основных характеристик агрегата, которая удобна для контроля. Своевременно выявлять предотказные состояния, прогнозировать техническое состояние агрегатов и оценивать безотказность ТС ВС в целом, учитывая влияние внешних факторов в процессе эксплуатации, возможно по значениям ОП агрегатов, в качестве которых выбрано давление авиационного

топлива на выходе из каждого отдельно взятого канала управления агрегата ТС АД ВС.

В то же время для определения параметров технического состояния агрегатов ТС целесообразно выбирать такие режимы АД, при которых взаимосвязь между термогазодинамическими параметрами рабочего процесса АД, с учетом работы системы автоматического управления, наиболее простая. Очевидно, что такими режимами работы являются стационарные.

Анализ проведенных исследований показывает, что наиболее информативным режимом работы АД для оценки его технического состояния является максимальный. Это связано, прежде всего, с тем, что абсолютные значения отклонений функциональных параметров на этом режиме выше, чем на дроссельных режимах, а, следовательно, они в большей мере перекрывают ошибки измерений параметров, что позволяет обнаруживать неисправности на более ранних стадиях их развития [5, 6, 7].

ВС базируются и эксплуатируются в различных природно-климатических условиях, характеризующихся географическим расположением и состоянием атмосферы. Эти условия эксплуатации ВС должны обуславливать специфические особенности их технического обслуживания и учитываться при формировании программ технического обслуживания. Однако в настоящее время программа технического обслуживания носит «обобщенный» характер, без учета длительной эксплуатации ВС в конкретных природно-климатических условиях.

Существующие на сегодняшний день математические модели агрегатов ТС АД и методики оценки технического состояния ТС ВС базируются на определении

значений показателей безотказности исходя из статистических данных по результатам испытаний и эксплуатации, что позволяет учитывать лишь сам факт проявления отказа и его последствия, но не дает возможности оценить влияние таких внешних факторов, как природно-климатические условия эксплуатации и применения авиационной техники, изменение чистоты и качества применяемого авиационного топлива на вероятность проявления параметрических отказов и неисправностей агрегатов ТС ВС [7, 8, 9].

ТС АД представляет собой сложную техническую систему, включающую большое число узлов, элементов и агрегатов и, протекающих в них различных физико-химических процессов, с большим числом параметров, определяющих их техническое состояние.

В результате проведенных исследований было установлено, что изменение природно-климатических условий эксплуатации ВС вызывает нарушение функционирования таких агрегатов ТС АД, как насос-регулятор (НР), форсажный насос (ФН), регулятор сопла и форсажа (РСФ), которое приводит к снижению уровня безотказности ВС.

На современном этапе развития науки и техники моделирование стало неотъемлемой частью проектирования и исследования функциональных систем ВС. Оно позволяет сократить затраты времени и средств на изучение явлений и процессов в технических объектах, а также предоставляет новые возможности для решения проектных, технологических и эксплуатационных задач [10, 11, 12].

Для описания процесса функционирования ТС АД с учетом изменения условий эксплуатации ВС применяется агрегативный подход (А-схема), который

позволяет описать достаточно широкий класс процессов и дает возможность построения на его основе различных математических моделей [13,14]. В соответствии с агрегативным подходом основным рассматриваемым элементом является агрегат ТС АД. Таким образом, если целью моделирования является оценка ОП, то в основу моделирующего алгоритма должно быть положено такое представление А-схемы, в котором оцениваемый параметр явно входит в описание одного из агрегатов ТС.

Представление ТС двигателя в виде А-схемы показывает, что агрегаты, входящие в топливо-регулирующую аппаратуру, обеспечивают функционирование АД не по одному, а по нескольким каналам управления, что существенно снижает вероятность достоверности в оценке технического состояния агрегатов ТС ВС. Очевидно, что агрегат ТС сам может рассматриваться как А-схема, т.е. может разбиваться на элементы следующего уровня. В качестве примера выбран агрегат ТС двигателя АЛ 31-Ф РСФ-31Б, представленный на рисунке 1.

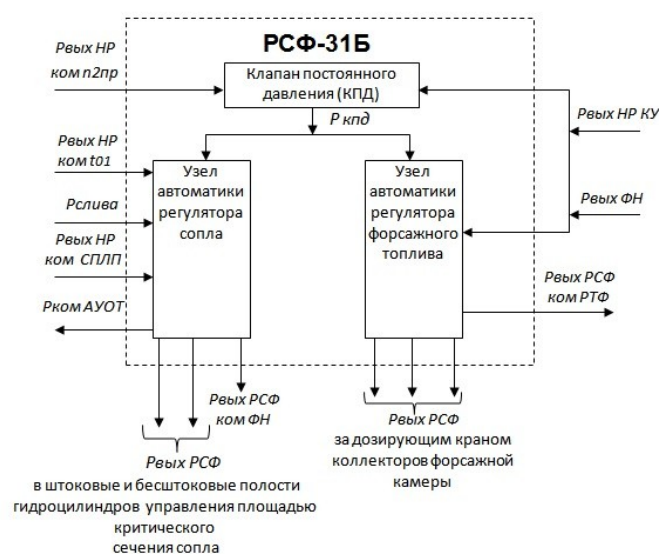


Рисунок 1 – Агрегат РСФ-31Б в виде А-схемы

В основе имитационной математической модели функционирования агрегатов ТС АД с учетом изменения условий эксплуатации ВС заложена зависимость значения ОП агрегата ТС от размера и концентрации частиц загрязнений, содержащихся в авиационном топливе [15, 16]:

$$P(t) = P_0 \exp \left\{ -\sigma_i T_\lambda N_{i0}^2 \left[1 - \exp \left(-\frac{2t}{T_\lambda} \right) \right] \right\}, \quad (1)$$

где $P_{(t)}$ – фактическое значение ОП; P_0 – паспортное значение ОП;

σ_i – коэффициент изнашивания, характеризующий отношение объема разрушений к квадрату размера частиц загрязнений;

T_λ – постоянная времени разрушения; N_{i0} – начальная штучная концентрация частиц загрязнений определенной размерной фракции;

λ_i – чувствительность агрегата к загрязнениям,

t – продолжительность эксплуатации АД.

Используя выражение (1) при решении задачи имитационного моделирования [17, 18], а также, учитывая конструктивные особенности агрегата РСФ для определения значений ОП агрегата, составлена система уравнений (2), описывающих модель функционирования агрегата РСФ-31Б по трем основным каналам управления командным давлением авиационного топлива с учетом изменения условий эксплуатации ВС.

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{зц}^{PC}(t) = P_{вых}^{PC\Phi} \exp \left\{ -\delta_i T_\lambda N_{io}^2 \left[1 - \exp \left(-\frac{2t}{T_\lambda} \right) \right] \right\}; \\ P_{ком.}^{\Phi H}(t) = P_{УАРС}^{PC\Phi} \exp \left\{ -\delta_i T_\lambda N_{io}^2 \left[1 - \exp \left(-\frac{2t}{T_\lambda} \right) \right] \right\}; \\ P_{ком.}^{AVOT}(t) = P_{КПД}^{PC\Phi} \exp \left\{ -\delta_i T_\lambda N_{io}^2 \left[1 - \exp \left(-\frac{2t}{T_\lambda} \right) \right] \right\}. \end{array} \right. \quad (2)$$

Разработанная имитационная математическая модель функционирования агрегата ТС АД РСФ-31Б с учетом изменения условий эксплуатации ВС реализована в программном продукте MATLAB с использованием пакета расширения Simulink [19, 20] структура, которой представлена на рисунке 2, состоит:

1. Блок исходных данных, в котором устанавливаются необходимые параметры моделирования.
2. Решатель запускает процесс моделирования по заданным каналам агрегата РСФ-31Б и обеспечивает управление движением имитационной моделью от начальных условий к решению в соответствии с законом расчета.
3. Отображение результатов моделирования.

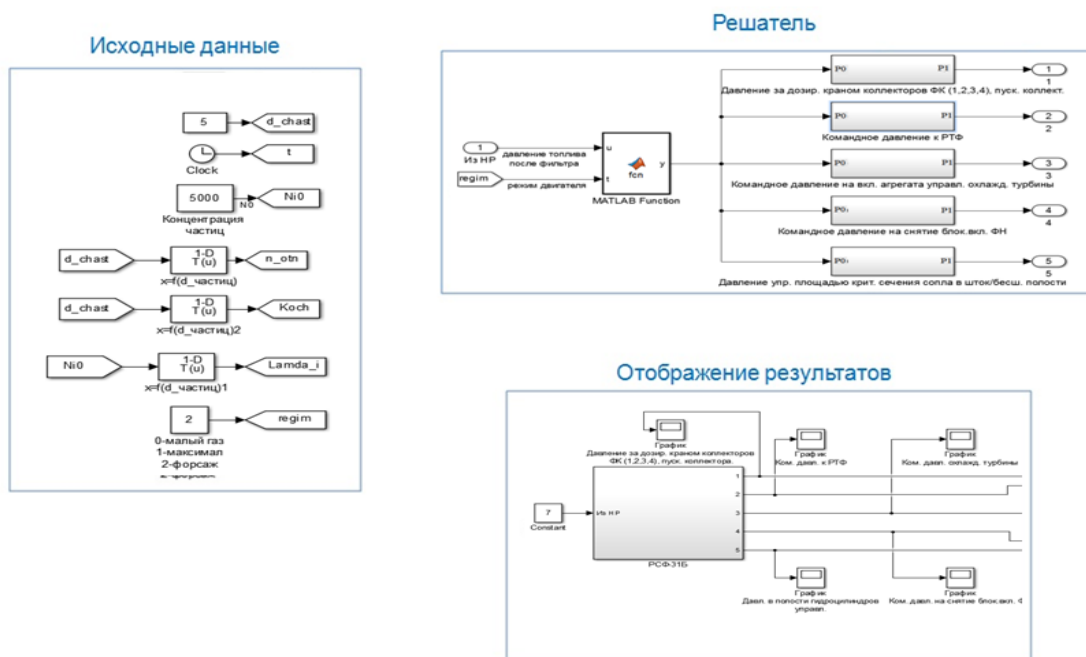
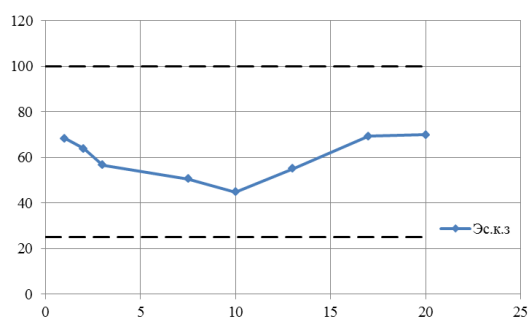


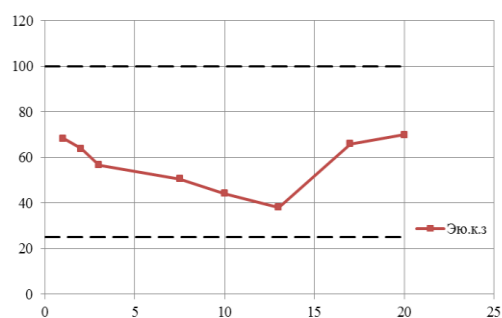
Рисунок 2 – Структура имитационного моделирования функционирования агрегата РСФ-31Б с учетом изменения условий эксплуатации ВС в среде MATLAB Simulink

Расчеты по определению возможности функционирования ТС с учетом изменения условий эксплуатации ВС, с помощью разработанной имитационной математической модели проведены в два этапа, на примере агрегата ТС АД АЛ-31Ф РСФ-31Б по каналу управления командным давлением на включение ФН.

На первом этапе проведено исследование изменений ОП агрегата РСФ-31Б по каналу управления командным давлением (P , кгс/см²), подаваемым к агрегату ФН в зависимости от изменения диаметра (D , мкм) частиц загрязнений, содержащихся в авиационном топливе, при эксплуатации ВС в средней (СКЗ) и южной климатических зонах (ЮКЗ) при 100 часах наработки АД.



а) средняя климатическая зона

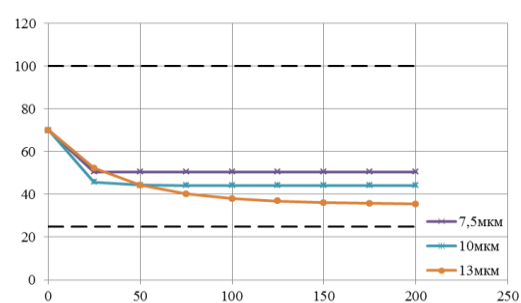
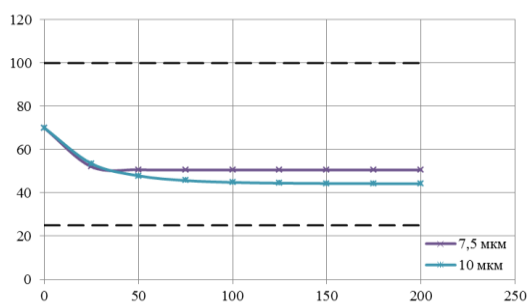


б) южная климатическая зона

Рисунок 3 – Графические зависимости изменения ОП агрегата РСФ-31Б по каналу управления командным давлением на включение ФН, в зависимости от размера частиц загрязнений

Результаты расчетов (рисунок 3) показали, что изменение значений ОП агрегата РСФ-31Б по каналу управления командным давлением $P(\text{кгс}/\text{см}^2)$ на включение ФН происходит в допуске рабочих параметров. Однако, наличие в авиационном топливе частиц загрязнений диаметром от 7,5 мкм до 13 мкм при эксплуатации ВС в ЮКЗ значительно снижают значение ОП, приближая его к нижнему допустимому значению.

На втором этапе проведено исследование изменений значений ОП агрегата РСФ-31Б по каналу управления командным давлением $P(\text{кгс}/\text{см}^2)$ на включение ФН, подаваемым к агрегату РСФ, в зависимости от продолжительности эксплуатации АД ($t, ч$) при использовании авиационного топлива с заданными параметрами загрязнений в различных условиях эксплуатации ВС.



а) средняя климатическая зона

б) южная климатическая зона

Рисунок 4 – Графические зависимости изменения ОП агрегата РСФ-31Б по каналу управления командным давлением на включение ФН в зависимости от наработки АД при эксплуатации ВС в различных условиях

Анализ графических зависимостей (рисунок 4) свидетельствуют о том, что содержание в авиационном топливе частиц загрязнений размером 10 и 13 мкм при эксплуатации ВС в ЮКЗ ускорит процесс перехода агрегата РСФ-31Б из работоспособного в частично работоспособное состояние. Поэтому даже на незначительном временном интервале эксплуатации ВС возможно изменение работоспособности агрегата ТС АД по отдельным каналам управления командным давлением авиационным топливом, что может привести к появлению отказа агрегата.

Оценка адекватности модели проведена по F -критерию Фишера, для чего были рассчитаны дисперсии экспериментальных и теоретических значений давления авиационного топлива по контролируемому каналу управления. Расчетное значение F -критерия для уровня значимости 0,05 составляет $F_{экс} = 2,02$, а

табличное значение $F_{крит} = 2,23$. Так как $F_{эксн} < F_{крит}$, то с вероятностью 95 % можно утверждать, что модель является адекватной.

Выводы. Таким образом, проанализировав существующие математические модели авиационного газотурбинного двигателя [11, 12, 17, 20] и методики оценки технического состояния АД [3, 4, 6] в статье представлена имитационная математическая модель функционирования агрегатов ТС АД на основе применения агрегативного подхода (А-схема) и зависимости значений выходных параметров агрегатов ТС от параметров частиц загрязнений, отличающуюся от известных описанием технического состояния агрегатов ТС по значениям определяющих параметров при изменении качества авиационного топлива в различных природно-климатических условиях эксплуатации ВС, что позволяет оценить и спрогнозировать изменение уровня технического состояния агрегатов и ТС в целом на различных стадиях жизненного цикла ВС с учетом изменения условий эксплуатации.

Список источников

1. Байнетов С.Д. Главная задача – безопасность полетов // Авиа-Союз. 2017. URL: <http://www.aex.ru/fdocs/2/2017/5/12/28293/>
2. Байнетов С.Д. Современный взгляд на формирование концепции безопасности полетов авиации Вооруженных Сил Российской Федерации // Авиапанорама. 2016. № 4 (118). С. 6-11.

3. Олешко В.С., Потоцкий М.В., Родионов А.В. Влияние эксплуатационных факторов на надежность авиационных газотурбинных двигателей // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2014. № 2 (122). С. 50-52.
4. Лубков Н.В., Спиридонов И.Б., Степанянц А.С. Влияние характеристик контроля на показатели надежности систем // Труды МАИ. 2016. № 85. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=67501>
5. Кречко А.В., Плужников В.И., Супонько К.Л., Щеголев Г.П. О преимуществах лидерной эксплуатации ГТД как основы продления им сроков службы // Авиационная промышленность. 2013. № 3. С. 57-61.
6. Brilliant H.M. Analysis of Scramjet Engines Using Energy Methods // AIAA Paper 1995-2767. 1995, pp. 1-12.
7. Visser W. Generic Analysis Methods for Gas Turbine Engine Performance: The development of the gas turbine simulation program GSP. PhD thesis. Technische Universiteit Delft, 2014. DOI: DOI:[10.4233/UUID:F95DA308-E7EF-47DE-ABF2-AEDBFA30CF63](https://doi.org/10.4233/UUID:F95DA308-E7EF-47DE-ABF2-AEDBFA30CF63)
8. Артеменко И.В., Олешко В.С. О вероятностном подходе к оценке эффективности разработки перспективных образцов авиационной техники // Вестник Самарского университета. Экономика и управление. 2020. Т. 11. № 3. С. 156-166. DOI: [10.18287/2542-0461-2020-11-3-156-166](https://doi.org/10.18287/2542-0461-2020-11-3-156-166)
9. Завялик И.И., Фетисов Е.В., Трофимчук М.В. Применение методов теории планирования эксперимента для оценки безотказности агрегатов топливной системы авиационного двигателя воздушного судна // Труды МАИ. 2018. № 100. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=93371>

10. Максимей И.В., Смородин В.С., Демиденко О.М. Разработка имитационных моделей сложных технических систем. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2014. – 298 с.
11. Кабанов А.А. Имитационное моделирование в производстве авиационных и ракетно-космических систем. Что предшествует эксперименту? // Труды МАИ. 2013. № 65. URL: <http://www.trudymai.ru/published.php?ID=35910>
12. Яновский Л.С., Казаков В.А., Павлов В.В. Моделирование процессов тепло-и массообмена биотоплив в трубопроводах авиационных теплообменников. // Труды МАИ. 2012. № 56. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=30309>
13. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 2001. – 343 с.
14. Завялик И.И., Фетисов Е.В., Шевцов С.А., Мокшин Д.А. Исследование надежности масляной системы вертолета армейской авиации на основе применения агрегативного подхода // Международная научно-техническая конференция, посвященной 50-тию МГТУ ГА «Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества» (Москва, 25-26 мая 2021): тезисы докладов. – М.: ИД Академии Жуковского, 2021. С. 33-35.
15. Тимеркеев Р.Г., Сапожников В.М. Промышленная чистота и тонкая фильтрация рабочих жидкостей летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1986. – 152 с.
16. Кровяков В.Б., Коротеев А.Ю., Ялпаев А.А. и др. Гидроимпульсная очистка и контроль загрязненности рабочих полостей жидкостных систем и агрегатов воздушных судов // Труды МАИ. 2016. № 91. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=75588>

17. Быщенко О.А., Мартынкевич Д.С., Олешко В.С., Стрижевская Н.О. Математическое моделирование нагружения восстановленных лопаток компрессоров газотурбинных двигателей // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2022. № 4. С. 111-115.
18. Грасько Т.В., Карпенко О.Н., Олешко В.С., Самойленко В.М. Результаты трехмерного термогазодинамического процесса в основной камере сгорания серийного газотурбинного двигателя // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2017. № 4 (136). С. 14-19.
19. Завялик И.И., Фетисов Е.В., Верещагин Ю.О. Расчет рабочих параметров агрегатов топливной системы силовой установки летательного аппарата с учетом изменения качества авиационного топлива. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016614253 от 19.04.2016.
20. Мухаммедов Н.А., Червонюк В.В. Моделирование запуска авиационного газотурбинного двигателя. // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2016. Т. 20. № 1 (71). С. 116-121.

References

1. Bainetov S.D. Glavnaya zadacha – bezopasnost' poletov, *Avia-Soyuz*. 2017. URL: <http://www.aex.ru/fdocs/2/2017/5/12/28293/>
2. Bainetov S.D. *Aviapanorama*, 2016, no. 4 (118), pp. 6-11.
3. Oleshko V.S., Pototskii M.V., Rodionov A.V. *Oboronnyi kompleks – nauchno-tekhnicheskomu progressu Rossii*, 2014, no. 2 (122), pp. 50-52.

4. Lubkov N.V., Spiridonov I.B., Stepanyants A.S. *Trudy MAI*, 2016, no. 85. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=67501>
5. Krechko A.V., Pluzhnikov V.I., Supon'ko K.L., Shchegolev G.P. *Aviatsionnaya promyshlennost'*, 2013, no. 3, pp. 57-61.
6. Brilliant H.M. Analysis of Scramjet Engines Using Energy Methods, *AIAA Paper 1995-2767*. 1995, pp. 1-12.
7. Visser W. *Generic Analysis Methods for Gas Turbine Engine Performance: The development of the gas turbine simulation program GSP*. PhD thesis. Technische Universiteit Delft, 2014. DOI: [DOI:10.4233/UUID:F95DA308-E7EF-47DE-ABF2-AEDBFA30CF63](https://doi.org/10.4233/UUID:F95DA308-E7EF-47DE-ABF2-AEDBFA30CF63)
8. Artemenko I.V., Oleshko V.S. *Vestnik Samarskogo universiteta. Ekonomika i upravlenie*, 2020, vol. 11, no. 3, pp. 156-166. DOI: [10.18287/2542-0461-2020-11-3-156-166](https://doi.org/10.18287/2542-0461-2020-11-3-156-166)
9. Zavvalik I.I., Fetisov E.V., Trofimchuk M.V. *Trudy MAI*, 2018, no. 100. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=93371>
10. Maksimei I.V., Smorodin V.S., Demidenko O.M. *Razrabotka imitatsionnykh modelei slozhnykh tekhnicheskikh sistem* (Development of simulation models of complex technical systems), Gomel, GGU im. F. Skoriny, 2014, 298 p.
11. Kabanov A.A. *Trudy MAI*, 2013, no. 65. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=35910>
12. Yanovskii L.S., Kazakov V.A., Pavlov V.V. *Trudy MAI*, 2012, no. 56. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=30309>

13. Sovetov B.Ya., Yakovlev S.A. *Modelirovanie sistem* (Systems Modeling), Moscow, Vysshaya shkola, 2001, 343 p.
14. Zavyalik I.I., Fetisov E.V., Shevtsov S.A., Mokshin D.A. *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya, posvyashchennoi 50-tiyu MGTU GA «Grazhdanskaya aviatsiya na sovremennom etape razvitiya nauki, tekhniki i obshchestva»*: tezisy dokladov. Moscow, ID Akademii Zhukovskogo, 2021, pp. 33-35.
15. Timerkeev R.G., Sapozhnikov V.M. *Promyshlennaya chistota i tonkaya fil'tratsiya rabochikh zhidkosti letatel'nykh apparatov* (Industrial purity and fine filtration of working fluids of aircraft), Moscow, Mashinostroenie, 1986, 152 p.
16. Krovyakov V.B., Koroteev A.Yu., Yalpaev A.A. et. al. *Trudy MAI*, 2016, no. 91. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=75588>
17. Bytsenko O.A., Martynkevich D.S., Oleshko V.S., Strizhevskaya N.O. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatsionnaya tekhnika*, 2022, no. 4, pp. 111-115.
18. Gras'ko T.V., Karpenko O.N., Oleshko V.S., Samoilenko V.M. *Oboronnyi kompleks – nauchno-tekhnicheskomu progressu Rossii*, 2017, no. 4 (136), pp. 14-19.
19. Zavyalik I.I., Fetisov E.V., Vereshchagin Yu.O. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM № 2016614253*, 19.04.2016.
20. Mukhammedov N.A., Chervonyuk V.V. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2016, vol. 20, no. 1 (71), pp. 116-121.

Статья поступила в редакцию 26.06.2023

Одобрена после рецензирования 29.06.2023

Принята к публикации 28.08.2023

The article was submitted on 26.06.2023; approved after reviewing on 29.06.2023; accepted for publication on 28.08.2023