

Том 28, № 02, 2025

ISSN 2079-0619
e-ISSN 2542-0119

Научный Вестник МГТУ ГА

Civil Aviation High TECHNOLOGIES

Vol. 28, No. 02, 2025

Издается с 1998 г.

Москва
2025

Научный Вестник МГТУ ГА решением Президиума ВАК Министерства образования и науки РФ включен в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

Главная редакция

Главный редактор: *Елисеев Б.П.*, заслуженный юрист РФ, проф., д. ю. н., ректор МГТУ ГА, Москва, Россия.

Зам. главного редактора: *Воробьев В.В.*, проф., д. т. н., зав. каф. МГТУ ГА, Москва, Россия.

Ответственные секретари главной редакции: *Наумова Т.В.*, доцент, д. филос. н., профессор кафедры МГТУ ГА, Москва, Россия;
Полешкина И.О., доцент, д. т. н., старший научный сотрудник отдела научных исследований МГТУ ГА, Москва, Россия.

Члены главной редакции:

Боев С.Ф., профессор, д. т. н., д. э. н., генеральный директор межгосударственной акционерной корпорации «Вымпел», Москва, Россия;

Гаранина О.Д., почетный работник науки и техники РФ, профессор, д. филос. н., профессор МГТУ ГА, Москва, Россия;

Желтов С.Ю., заслуженный деятель науки РФ, академик РАН, профессор, д. т. н., первый заместитель генерального директора ГосНИИАС, Москва, Россия;

Калугин В.Т., проф., д. т. н., декан МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия;

Козлов А.И., заслуженный деятель науки и техники РФ, проф., д. ф.-м. н., профессор МГТУ ГА, Москва, Россия;

Лукин Д.С., заслуженный деятель науки РФ, проф., д. ф.-м. н., профессор МФТИ, Москва, Россия;

Махутов Н.А., член-корреспондент РАН, профессор, д. т. н., г. н. с. ФГБУН Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия;

Трофименко Ю.В., профессор, д. т. н., зав. каф. МАДИ, Москва, Россия;

Туркин И.К., проф., д. т. н., зав. каф. МАИ (национального исследовательского университета), Москва, Россия;

Ченцов А.Г., член-корреспондент РАН, проф., д. ф.-м. н., г. н. с. Института математики и механики им. Н.Н. Красовского УрО РАН, Екатеринбург, Россия;

Чернышев С.Л., академик РАН, профессор, д. ф.-м. н., вице-президент РАН, научный руководитель ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, Москва, Россия;

Шапкин В.С., заслуженный работник транспорта РФ, профессор, д. т. н., первый заместитель генерального директора национального исследовательского центра «Институт имени Н.Е. Жуковского», Москва, Россия;

Дамиан Ривас Ривас, профессор, PhD, профессор Университета Севильи, Севилья, Испания;

Сюй Хаудзюнь, PhD, Университет военно-воздушных сил, Хиан, Китай;

Франческа де Кресченцио, профессор, кафедра промышленной инженерии, Болонский университет, Болонья, Италия;

Владимир Немец, PhD, транспортный факультет Яна Пернера, кафедра воздушного транспорта, Университет Пардубице, Пардубице, Чешская Республика;

Станислав Сзабо, PhD, факультет авиации, Технический университет в Кошице, Кошице, Словацкая Республика.

Editorial Board

- Editor-in-Chief:** *Boris P. Eliseev*, Professor, Doctor of Sciences, Rector, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;
- Deputy Editor-in-Chief:** *Vadim V. Vorobyev*, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;
- Executive Secretaries:** *Tatiana V. Naumova*, Associate Professor, Doctor of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;
Irina O. Poleshkina, Associate Professor, Doctor of Science, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia.

Chief Editorial Board:

Sergey F. Boev, Professor, Doctor of Sciences, General Director, Interstate Joint Stock Corporation "Vympel", Moscow, Russia;

Olga D. Garanina, Honorary Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

Sergey Y. Zheltov, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Academician, Russian Academy of Sciences, Professor, Doctor of Sciences, First Deputy General Director, State Research Institute of Aviation Systems, Moscow, Russia;

Vladimir T. Kalugin, Professor, Doctor of Sciences, Dean, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia;

Anatoly I. Kozlov, Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

Dmitry S. Lukin, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia;

Nikolay A. Makhutov, Corresponding Member, The Russian Academy of Sciences, Professor, Doctor of Science, Principal Researcher, FSBIS, Institute of Machine Science named after A.A. Blagonravov, Moscow, Russia;

Yuriy V. Trofimenko, Professor, Doctor of Science, Head of Chair, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia;

Igor K. Turkin, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia;

Aleksander G. Chentsov, Corresponding Member, The Russian Academy of Sciences, Professor, Doctor of Science, Principal Researcher, Institute of Mathematics and Mechanics, named after N.N. Krasovsky, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia;

Sergey L. Chernishov, Academician, Russian Academy of Sciences, Professor, Doctor of Sciences, Vice-President, Russian Academy of Sciences, Academic Adviser, National Research Center "Zhukovsky Institute", Moscow, Russia;

Vasily S. Shapkin, Honored Worker of Transport of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, First Deputy General Director, The National Research Center "Zhukovsky Institute" Moscow, Russia;

Damian Rivas Rivas, Professor, PhD, University of Seville, Seville, Spain;

Xu Haojun, PhD, Air Force Engineering University, Xi'an, China;

Francesca De Crescenzo, Professor, Department of Industrial Engineering DIN, University of Bologna, Bologna, Italy;

Vladimir Némec, PhD, Faculty of Transportation Sciences, Jan Perner Transport Faculty, University of Pardubice, Pardubice, Czech Republic;

Stanislav Szabo, Associate Professor, PhD, Dean, Faculty of Aeronautics, Technical University of Košice, Košice, Slovak Republic.

Редакционный совет

Абрамов О.В., заслуженный деятель науки РФ, проф., д. т. н., Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН, Владивосток, Россия;

Акиншин Р.Н., проф., д. т. н., в. н. с., секция оборонных проблем МО РФ при президиуме РАН, Москва, Россия;

Бачкало Б.И., проф., д. т. н., в. н. с. ЦНИИ ВВС МО РФ, Щелково, Россия;

Брусов В.С., проф., д. т. н., проф. МАИ (национального исследовательского университета), Москва, Россия;

Васильев О.В., проф., д. т. н., г. н. с. ООО «НПО НаукаСофт», Москва, Россия;

Вышинский В.В., проф. МФТИ, г. н. с. ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, Жуковский, Россия;

Горелик А.Г., проф., д. ф-м. н., проф. МИФИ, Москва, Россия;

Гузий А.Г., д. т. н., зам. директора ПАО «Авиакомпания «ЮТэйр»», Москва, Россия;

Давидов А.О., доцент, д. т. н., Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина;

Красильщик И.С., проф., д. ф-м. н., проф. МНУ, Москва, Россия;

Кузнецов В.Л., проф., д. т. н., зав. каф. МГТУ ГА, Москва, Россия;

Кузнецов С.В., проф., д. т. н., зав. каф. МГТУ ГА, Москва, Россия;

Логвин А.И., заслуженный деятель науки РФ, проф., д. т. н., профессор МГТУ ГА, Москва, Россия;

Пантелеев А.В., проф., д. ф-м. н., зав. каф. МАИ (национального исследовательского университета), Москва, Россия;

Полтавский А.В., д. т. н., с. н. с., ведущий научный сотрудник Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия;

Рухлинский В.М., д. т. н., председатель комиссии МАК по связям с Международной организацией гражданской авиации, Москва, Россия;

Самохин А.В., д. т. н., в. н. с. Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия;

Сарычев В.А., проф., д. т. н., г. н. с. АО «Радар-ММС», Санкт-Петербург, Россия;

Татарин В.Н., действительный член Академии электромагнетизма США, проф., д. т. н., проф. ТУСУР, Томск, Россия;

Увайсов С.У., проф., д. т. н., зав. каф. МТУ, Москва, Россия;

Халютин С.П., проф., д. т. н., ген. директор ООО «НПО НаукаСофт», Москва, Россия;

Харитонов С.А., проф., д. т. н., зав. каф. НГТУ, Новосибирск, Россия;

Ходаковский В.А., заслуженный деятель науки ЛССР, проф., д. т. н., Рига, Латвия;

Чинючин Ю.М., проф., д. т. н., проф. МГТУ ГА, Москва, Россия;

Шахтарин Б.И., академик РАЕН, заслуженный деятель науки и техники РФ, проф., д. т. н., проф. МГТУ им. Н.Э. Баумана (национального исследовательского университета), Москва, Россия;

Юрков Н.К., заслуженный деятель науки РФ, почетный работник высшего профессионального образования РФ, проф., д. т. н., проф. ПГУ, Пенза, Россия.

Editorial Council

Oleg V. Abramov, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia;

Ruslan N. Akinshin, Professor, Doctor of Sciences, Leading Researcher, Section of Applied Problems under the Presidium of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;

Boris I. Bachkalo, Professor, Doctor of Sciences, Leading Research Fellow, Russian Air Force Central Scientific Research Institute of Ministry of Defence, Shchelkovo, Russia;

Vladimir S. Brusov, Professor, Doctor of Sciences, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia;

Oleg V. Vasiliev, Professor, Doctor of Science, Principal Researcher, LLC "Scientific Production Association, NaukaSoft", Moscow, Russia;

Viktor V. Vyshinsky, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow Institute of Physics and Technology, Chief Research Fellow, Central Aerohydrodynamic Institute, Zhukovskiy, Russia;

Andrey G. Gorelik, Professor, Doctor of Sciences, Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia;

Anatoliy G. Guziy, Doctor of Sciences, UTair Airlines, Moscow, Russia;

Albert O. Davidov, Assistant Professor, Doctor of Sciences, National Aerospace University Kharkiv Aviation Institute, Kharkiv, Ukraine;

Iosif S. Krasilschik, Professor, Doctor of Sciences, Moscow Independent University, Moscow, Russia;

Valeriy L. Kuznetsov, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

Sergey V. Kuznetsov, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

Aleksandr I. Logvin, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation Moscow, Russia;

Andrey V. Panteleev, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia;

Alexandr V. Poltavsky, Doctor of Technical Sciences, Senior Scientific Researcher, Leading Researcher, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Science, Moscow, Russia;

Victor M. Rukhlinskiy, Doctor of Sciences, Chairman of the Commission for Relations with ICAO Board, International and Interstate Organizations of the Interstate Aviation Committee, Moscow, Russia;

Aleksey V. Samokhin, Doctor of Sciences, Leading Researcher, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Science, Moscow, Russia.

Valentin A. Sarychev, Professor, Doctor of Sciences, "Radar-MMS" Joint-Stock Company, St. Petersburg, Russia;

Viktor N. Tatarinov, Actual Member of the US Electrical Magnetism Academy, Professor, Doctor of Sciences, Tomsk State Radio Electronic and Control Systems University, Tomsk, Russia;

Saygid U. Uvaysov, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow Technological University, Moscow, Russia;

Sergey P. Khalyutin, Professor, Doctor of Sciences, Director General, CEO LLC "Scientific Production Association, NaukaSoft", Moscow, Russia;

Sergey A. Kharitonov, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia;

Vladimir A. Hodakovskiy, Honored Worker of Science of Latvian Soviet Socialist Republic, Professor, Doctor of Sciences, Riga, Latvia;

Yuriy M. Chinyuchin, Professor, Doctor of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

Boris I. Shakhtarin, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia;

Nikolay K. Urkov, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Penza State University, Penza, Russia.

СОДЕРЖАНИЕ

ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

Aghayev N.B., Nazarli D.Sh.

Hybrid forecasting model of non-scheduled passenger air transportation. 8

Некрасов С.В., Чичков Б.А.

Пример оценки загрязнения проточной части ТРДД противообледенительной жидкостью с использованием статистических моделей 22

Ogunvoul Bl., Budaev V.D., Sizikov D.O., Gorbakon N.V., Vlasova A.V.

To the analysis of methods and mechanisms of predictive modeling of onboard equipment reliability when solving problems of aircraft maintenance workload planning. 35

НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ

Курманов У.Э., Салморбекова Р.Б., Исмаилова Ж.К., Полешкина И.О.

Транспортная связанность и авиационная подвижность населения в развивающихся странах с горным рельефом: опыт Кыргызской Республики 51

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Туркин И.К., Рогов Д.А., Грачев В.А.

Динамическое поведение упругой оболочки вращения параболической формы с жесткой носовой вставкой под действием подвижной нагрузки 71

Харина В.К., Ратенко О.А., Варданян Г.Б.

Методика оценки долговечности шарнирных подшипников 81

CONTENTS

TRANSPORTATION SYSTEMS

Aghayev N.B., Nazarli D.Sh.

Hybrid forecasting model of non-scheduled passenger air transportation. 8

Nekrasov S.V., Chichkov B.A.

Example of BTJE flow path contamination assessment with anti-icing
fluid using statistical models 22

Ogunvoul Bl., Budaev V.D., Sizikov D.O., Gorbakon N.V., Vlasova A.V.

To the analysis of methods and mechanisms of predictive modeling of onboard
equipment reliability when solving problems of aircraft maintenance workload planning. 35

SCIENTIFIC REVIEWS

Kurmanov U.E., Salmorbekova R.B., Ismailova Zh.K., Poleshkina I.O.

Transport connectivity and aviation mobility of the population in developing countries
with mountainous terrain: Experience of the Kyrgyz Republic. 51

MECHANICAL ENGINEERING

Turkin I.K., Rogov D.A., Grachev V.A.

Reaction of the loaded shell of rotation with the rigid nose of the apparatus
to a shock wave in a liquid. 71

Harina V.K., Ratenko O.A., Vardanyan G.B.

Methodology for assessing the spherical plain bearings durability. 81

ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

2.9.1 – Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте;

2.9.4. – Управление процессами перевозок;

2.9.6 – Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники;

2.9.8 – Интеллектуальные транспортные системы

УДК 656.7

DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-2-8-21

Hybrid forecasting model of non-scheduled passenger air transportation

N.B. Aghayev^{1,2}, D.Sh. Nazarli¹

¹National Aviation Academy, Baku, Republic of Azerbaijan

²Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan Institute of Information Technology, Baku, Republic of Azerbaijan

Abstract: In the article, an ARIMA-Fuzzy-based hybrid model is proposed for forecasting time series of non-scheduled passenger air transportation. As it is known, the ARIMA model is applied to identify linear trends and regularities within time series data as well as for forecasting. The study of scientific research literature shows that the ARIMA model has its own limitations in managing non-linearity and random changes during forecasting. Since the process of non-scheduled air transportation depends on random changes as a stochastic process, the mentioned model does not cover the whole process. For this reason, the ARIMA model does not provide effective enough results outcome strong enough to model non-linear and random changes in the data in the process of non-scheduled air transportation. In this regard, the ARIMA model was applied together with the fuzzy model. The hybrid model, based on ARIMA's autoregression model, is applied together with the random deviation fuzzy model to further increase the accuracy of the forecast. The results obtained as a result of the application of the hybrid model show that the model in this form provides more reliable and efficient forecasts compared to independent models.

Key words: non-scheduled air transportation/transport/services, hybrid model, statistical analysis, fuzzy model, time series analysis, optimal model, forecasting, autoregressive model.

For citation: Aghayev, N.B., Nazarli, D.Sh. (2025). Hybrid forecasting model of non-scheduled passenger air transportation. Civil Aviation High Technologies, vol. 28, no. 2, pp. 8–21. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-2-8-21

Гибридная модель прогнозирования нерегулярных пассажирских авиаперевозок

Н.Б. Агаев^{1,2}, Д.Ш. Назарли¹

¹Национальная авиационная академия, г. Баку, Азербайджанская Республика

²Институт информационных технологий Министерства науки и образования Азербайджанской Республики, г. Баку, Азербайджанская Республика

Аннотация: В статье предлагается гибридная модель на основе ARIMA-Fuzzy для прогнозирования временных рядов нерегулярных пассажирских авиаперевозок. Как известно, модель ARIMA применяется для выявления линейных тенденций и закономерностей в данных временных рядов, а также для прогнозирования. Изучение научной литературы показывает, что модель ARIMA имеет свои ограничения в управлении нелинейностью и случайными изменениями во время прогнозирования. Поскольку процесс нерегулярных авиаперевозок как стохастический про-

цесс зависит от случайных изменений, указанная модель не позволяет описывать весь процесс. По этой причине модель ARIMA не дает достаточно эффективных результатов для моделирования нелинейных и случайных изменений данных в процессе нерегулярных авиаперевозок. В связи с этим для повышения точности прогноза в исследовании применяется гибридная модель, основанная на модели авторегрессии ARIMA вместе с нечеткой моделью случайных отклонений. Апробация разработанной гибридной модели осуществлена на примере прогнозирования пассажиропотоков нерегулярных рейсов в Азербайджане. Полученные результаты показывают, что модель в таком виде обеспечивает более надежные и эффективные прогнозы по сравнению с применением независимых моделей.

Ключевые слова: нерегулярные авиаперевозки, гибридная модель, статистический анализ, нечеткая модель, анализ временных рядов, оптимальная модель, прогнозирование, авторегрессионная модель.

Для цитирования: Агаев Н.Б., Назарли Д.Ш. Гибридная модель прогнозирования нерегулярных пассажирских авиаперевозок // Научный вестник МГТУ ГА. 2025. Т. 28, № 2. С. 8–21. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-2-8-21

Introduction

Forecasting of non-scheduled passenger air transportation is important for optimal management of operations in this area. There are more internal and external factors that affect the process of non-scheduled air transportation than regular air transportation. A part of these factors is formed depending on factors such as the economic situation of the country and the potential of holding internationally important events, and the other part is completely dependent on random factors. For this reason, the selection of the forecasting model and the consideration of the factors that can actively influence the process are crucial.¹ Although the process of non-scheduled passenger air transportation depends more on random factors, these factors change within a certain limited area, that is, there is a basic part that does not change in the process. This fact allows us to forecast it. It should be noted that this field is poorly studied. One of the important issues is the application of forecast models by analyzing the characteristic features of the non-scheduled air transportation process [1].

The researchers developed a combined forecasting method based on the IOWHA operator concept and ARIMA regression models for forecasting passenger traffic in air transport. The IOWHA (Integrated Operator Workload and Health Assessment) concept, when applied to air transportation forecasting, helps improve prediction accuracy by factoring in the workload and

health of operators (pilots, air traffic controllers). On the other hand, ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) is based on time series data; it accounts for trends and seasonal variations. It is a statistical approach. Univariate and multivariate regression analysis models, as well as ARIMA models for time series analysis, were used for passenger traffic forecasting. It was discovered that the models in their combined form provide more effective forecasting results [2]. In other works, in order to increase forecast accuracy, ARIMA and artificial neural network (ANN) models were studied. A machine learning model that can learn more complex relationships from data, suitable for non-linear patterns. In the study, calculations were made based on the airline's monthly passenger statistics. A short-term forecast was made to determine the future demand, and the errors of the results of both models were compared. It was found that the ANN model provides better results than ARIMA [3].

In the next study, a comparison of the distribution of passengers of two airlines was made using geometric Brownian motion (GBM) and ARIMA models. GBM models are ensemble models that improve weak models iteratively, enhancing the prediction accuracy. Since the GBM approach does not fully cover the process, comparisons were made using the traditional ARIMA model for time series forecasting [4].

Demand for passenger air transportation exhibits non-linearity and non-stationarity, respectively. To overcome these situations, a hybrid VMD-ARMA/KELM-KELM approach was analysed by the researchers for short-term forecasting. Here, VMD (Variational Mode Decomposition) is

¹ Doc 8991: Manual on air traffic forecasting. 3rd ed. // ICAO, 2006. 98 p.

used to decompose the time series data of passenger demand into intrinsic modes, helping capture the underlying patterns in the data. ARMA (Auto Regressive Moving Average) is applied to model the linear dependencies between the decomposed signals, improving prediction accuracy, and KELM (Kernel Extreme Learning Machine), a machine learning model, is used to predict passenger demand based on the features extracted from the previous steps. It improves the model's ability to capture non-linear relationships in the data. This approach was applied to predict the non-stationarity of the series and reduce the complexity. Basing on the results of the study, this approach provides effective strong forecasting outcome [5].

Another study investigated the separate application of ARIMA and BSTS models in forecasting demand for passenger and cargo air transportation. The BSTS (Bayesian Structural Time Series) model applies a Bayesian approach to time series forecasting, incorporating uncertainty into the model. It was determined that compared to the ARIMA model, the BSTS model also gave a strong outcome [6].

The modelling and forecasting of air cargo traffic was investigated by the researchers using the combined SARIMA-X/EGARCH model. The SARIMA-X/EGARCH model is used for forecasting cargo transportation in aviation. It combines two powerful methodologies. Here, SARIMA-X (Seasonal Auto Regressive Integrated Moving Average with Exogenous Variables) extends the SARIMA model by incorporating seasonal effects and external factors (exogenous variables) that influence cargo demand. It captures both trend and seasonality in the time series data of cargo transportation. EGARCH (Exponential Generalised Autoregressive Conditional Heteroskedasticity) is used to model the volatility or variability in the data, especially in cases where the variance is not constant over time. It helps capture sudden changes or shocks in the cargo transportation process that might not be predicted by traditional models. Socio-economic factors affecting the demand have been identified. As a result of the research, a forecast of air cargo traffic until 2030 was obtained [7].

Another study on air cargo traffic forecasting used ConvLSTM2D and an artificial neural network architecture approach. Here, ConvLSTM2D (Convolutional LSTM) is a deep learning model that learns spatial and temporal dependencies in time series data. As a result of the research, it was determined that GDP (Gross Domestic Product) and PCG (GDP per Capita) have a significant impact on the demand for domestic and international cargo air transportation. In addition, results for the next 5 years were obtained as a short-term forecast [8].

In the next study, the application of the gravity model for forecasting the demand for cargo air transportation was investigated. Through this model, the influence of external factors affecting the field of cargo air transport was also investigated [9].

ARIMA + GARCH + the bootstrap method was proposed by the researchers to forecast air passenger traffic. Here, GARCH (Generalised Autoregressive Conditional Heteroskedasticity) is used to model and predict the volatility (or variability) of time series data. On the other hand, the bootstrap method is a resampling technique used to estimate the uncertainty of forecasts. It generates multiple simulated datasets by randomly sampling from the original data, allowing researchers to assess the variability and robustness of their forecasted values. Statistical tests were used to evaluate the performance of the method. This method shows effective results [10].

An analysis of air traffic congestion during the COVID-19 pandemic, as well as research into forecasting recovery flight schedules for the future, has been conducted by researchers. Intervention analysis and SARIMAX methods (SARIMAX is an extension of the ARIMA model that includes seasonal effects and external factors (exogenous variables)) were applied for this [11].

An integrated mathematical model of Singular Value Decomposition (SVD), Genetic Algorithms (GA), and the Adaptive Neural Fuzzy Inference System (ANFIS) were applied in order to solve issues related to reducing transportation costs and CO₂ emissions in multimodal transportation (cargo). The model is based on the historical data of this area. Based on the results of the study, the

model provided effective and optimal results for multimodal transportation [12]. Research works in this field were continued using the fuzzy-analytic hierarchy process [13].

As a continuation of the research work, the development of an ARIMAX model (ARIMAX is similar to SARIMAX, but it does not necessarily account for seasonality) [14], short-term forecasting of passenger flow at the airport [15], the SARIMA damp trend grey forecasting model in the airline industry [16], forecasting of passenger flow in air transportation based on nonlinear vector auto-regression neural network [17], forecasting of the overload factor in transport systems based on nonlinear vector auto-regression neural network [18], a forecasting model based on ARIMA and artificial neural networks for end-of-life vehicles [19], and air transport passenger flow forecasting based on SARIMA-Backpropagation Neural Network were investigated [20].

As it can be seen from the scientific literature analysed above, the researched forecast models were applied in the forecasting of regular passenger and cargo air transportation. Non-scheduled air transportation has not been the subject of this type of research. Trend models perform better in forecasting scheduled air transportation than non-scheduled air transportation. Additionally, irregular air transportation is more stochastic in nature, so it was decided that an ARIMA-Fuzzy approach would better represent the process. The obtained forecast results prove this once again. Currently, among the methods we investigated (linear [21], non-linear regression, autoregression models, stochastic models, SVM method [1], etc.), ARIMA and fuzzy models have been chosen. Through this hybrid method, we have minimised the errors which occurred using other methods. It is possible to test other hybrid methods in future studies. We would like to point out that the research on the forecasting of non-scheduled air transportation has not been investigated by local and foreign researchers. Since this is a specific field, various methods have been analysed and applied basing on the characteristics of the mentioned field. The results obtained in this article and the previous studies can be observed in the list of references. Analysing the characteristic

features of the field of non-scheduled air transportation, the application of various forecasting methods to this field is examined. This also paves the way for obtaining new scientific results in the less researched field of air transportation.

Every model has its own advantages and relevant application areas. Depending on the application field, researchers tend to use more statistical methods in some cases, while deep learning and optimisation methods are employed in others. As it is shown in the analysis of the research literature, various models have been applied by researchers in forecasting regular passenger and freight air transportation. It is particularly noteworthy that, for the first time, we have applied some of these models in a hybrid form for forecasting the time series of non-scheduled passenger air transportation. By investigating the characteristics of non-scheduled passenger air transportation, applying forecasting models, and obtaining effective results, this leads to the emergence of relevant scientific results in this field.

Problem statement

The statistical indicators of the time series of non-scheduled passenger air transportation depend on many internal and external factors and, at the same time, are formed depending on the political and economic situation of the country to which the airline belongs. The economic changes taking place in the country, as in other areas, are also reflected in the non-scheduled air transport field. As a result, non-scheduled passenger air transportation for each country is country-specific, which makes it difficult to apply classical forecasting methods. The different nature of the changes makes it difficult to apply the same classic forecast model to all countries. Considering the mentioned facts, a hybrid ARIMA-fuzzy approach is applied to overcome this problem. Intra-series changes in non-scheduled passenger air transportation were taken as an additive dependence of trend changes and random changes. Another problem encountered during research in this field is the lack of information. This can be mainly explained by the stagnation in the field of civil aviation due to the global pandemic situa-

tion in recent years. On the other hand, the lack of influence of long-term internal and external factors in the time series of non-scheduled passenger air transportation makes it difficult to think about how the process changes. Despite all these problems, every airline that performs non-scheduled passenger air transportation has an aircraft fleet and infrastructure that do not change for a certain period of time, which it carries out transportation. This feature allows us to apply an ARIMA model for trend changes based on actual time series data.

A fuzzy approach is applied to the difference of forecast results of the ARIMA model with actual data of non-scheduled passenger air transportation. As a result, a hybrid ARIMA-Fuzzy forecasting model is proposed. The proposed hybrid model allows for minimizing the errors obtained from the application of the ARIMA model, as a result, to build a more accurate forecast model. This hybrid method was applied for the first time to forecast non-scheduled passenger air transportation, and effective results were obtained.

The research is dedicated to forecasting the time series of non-scheduled passenger air transportation in the Republic of Azerbaijan. As it is known, since the beginning of 2020, the world has been influenced by a global pandemic. This situation, as in other sectors of the economy, has caused significant disruptions in the civil aviation industry. After the pandemic, the pace of economic change has been different. Additionally, with the start of the large-scale Patriotic War in Azerbaijan during this period, a significant part of the territories of the country was liberated. This, in turn, contributed to the further diversification of the national economy. It should also be noted that large infrastructure projects, including the construction of new airports, were carried out in these liberated areas. Furthermore, the holding of several international socio-economic events in the country has led to an increase in the volume of non-scheduled passenger air transportation. Considering all these factors, the statistical data on non-scheduled passenger air transportation in the Republic of Azerbaijan can be divided into two periods: data until 2019 and data from 2020 onwards.

At the beginning of the study, it was decided to build a hybrid model using data from the new

phase of the country's economic development (i.e., data from 2020 onwards). This approach, based on the new pace of the country's economy, will lead to more effective and optimal forecasting results for non-scheduled passenger air transportation.

Taking into account the factors mentioned above, the monthly number of passengers in 2020–2023 (a total of 48 months) is included in the model for forecasting the time series of non-scheduled passenger air transportation. Calculations of the hybrid model will be made based on the statistics provided for 2020–2022. The data of 12 months of the last year (i.e., 2023) are chosen to test the accuracy of the forecast model. The data of the other 3 years are included in the calculations.

Solution method

Based on the above-mentioned facts in order to analyze the characteristics of non-scheduled passenger air transportation, the following model is proposed to solve the problem

$$Y_t = y_t + x_t. \quad (1)$$

Here, t indicates the current year, y_t is determined by the ARIMA model.

$$y_t = c + \phi_1 y_{t-1} + \phi_2 y_{t-2} + \dots + \phi_p y_{t-p}, \quad (2)$$

x_t characterizes random changes and is modeled based on a fuzzy approach.

We apply the method of least squares to find the unknown coefficients. For this, the following issue should be resolved:

$$\sum_{t=1}^N [(\bar{Y}_t - y_t)]^2 \rightarrow \min. \quad (3)$$

Here, $\bar{Y}_t$ is the actual data, Y_t is the final forecast results, and N is the number of data included in the research (by months), c is the constant, $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p, p$ is the autoregressive order.

The solution to problem (3) is reduced to the following matrix equation:

$$A\varphi = B, \quad (4)$$

A is a $(p+1)$ – dimensional square symmetric matrix, the vector $\varphi = (c, \phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p)$ is a $(p+1)$ dimensional vector.

$$A = \begin{pmatrix} N & \sum_{t=1}^N \bar{Y}_{t-1} & \sum_{t=1}^N \bar{Y}_{t-2} & \dots & \sum_{t=1}^N \bar{Y}_{t-p} \\ \sum_{t=1}^N \bar{Y}_{t-1} & \sum_{t=1}^N \bar{Y}_{t-1}^2 & \sum_{t=1}^N \bar{Y}_{t-2} \bar{Y}_{t-1} & \dots & \sum_{t=1}^N \bar{Y}_{t-p} \bar{Y}_{t-1} \\ \sum_{t=1}^N \bar{Y}_{t-p} & \sum_{t=1}^N \bar{Y}_{t-1} \bar{Y}_{t-p} & \sum_{t=1}^N \bar{Y}_{t-2} \bar{Y}_{t-p} & \dots & \sum_{t=1}^N \bar{Y}_{t-p}^2 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$B = \begin{pmatrix} \sum_{t=1}^N \bar{Y}_t \\ \sum_{t=1}^N \bar{Y}_t \bar{Y}_{t-1} \\ \sum_{t=1}^N \bar{Y}_t \bar{Y}_{t-p} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Considering expressions (5) and (6) in formula (4), unknown coefficients are found:

$$\bar{\varphi} = A^{-1} \cdot B. \quad (7)$$

Taking into account the coefficients calculated according to the formula (7) in (2), the calculations for the months of the forecast year are made. We define the difference of the results obtained with the actual data as x_t . As a result, 12 calculated (x_t). (x_t) characterizes the random deviations between the actual data and the model, and the modelling is as follows in the fuzzy approach.

Let us enter the following notation to build the hybrid model:

In each of the random time series (x_t), we get new vectors by passing one unit from the origin. Thus, more characteristic features of (x_t) changes gained are ensured. Note that by repeating these operations 11 times, all possible displacements can be taken into account.

Here, n is the number of displacement operations involved in the research;

In our case, we take $n = 3$ for simplicity.

x_{ij} is an element of the sequence obtained in the above-mentioned manner ($i = \overline{1, n}, j = \overline{1, 12}$).

As a characteristic of intra-series changes, the increase (or decrease) factor is calculated as follows:

$$M_{kj} = x_{kj} - x_{k-1,j} \quad (k = \overline{2, n}; j = \overline{1, 12}). \quad (8)$$

In the time series calculated by the formula (1), the thresholds are positive (the case of increases in non-scheduled passenger air transportation) (M_{kj}^+) and negative (the case of decreases) (M_{kj}^-). and their numbers are, respectively. It is denoted as (n^+) and (n^-). It is assumed that M_{kj} is 0. In this case, the value 0 is considered in (M_{kj}^+) or (M_{kj}^-) depending on the values before and after the occurrence of this case.

The maximum, minimum, and average quantities of increase (decrease) values for the corresponding months of the years involved in the study ($MAX^{\pm}(j)$, $MIN^{\pm}(j)$ and $O_{average}^{\pm}(j)$) are calculated. The absence of a positive or negative trend in any year should be taken into account in the calculation of the mentioned indicators.

Using these calculated values, a membership function for intra-series changes in non-scheduled passenger air transportation based on the terms “low increase” (“low decrease”), “average increase” (“average decrease”), and “high increase” (“high decrease”) can be constructed.

As mentioned above, numerous factors affecting the time series of non-scheduled air transportation prove that intra-series changes are of a fuzzy nature. Let us use the statistical method of constructing membership functions to evaluate the terms. With this method, it is possible to construct the membership function by taking positive signs as an increase and negative signs as a decrease. In this case, the above-mentioned terms are respectively defined as follows:

$$\mu^+(x, j) = \left\{ x : M \cdot N^+(j) / \text{little growth}, O_{average}^+(j) / \text{average growth}, MAX^+(j) / \text{too much growth} \right\}, \quad (9)$$

$$\mu^-(x, j) = \left\{ x : M \cdot N^-(j) / \text{little decrease}, O_{average}^-(j) / \text{averagedecrease}, M \cdot N^-(j) / \text{too much reduction} \right\}.$$

Let us determine the characteristics of intra-series changes using the above formulae. In this purpose, let us use the weighting coefficient for 12 quantities selected, the mean square deviation, and intra-series fractal changes for each value of n in which the increase or decrease characteristics of intra-series changes were involved in the study.

$$\delta_j^\pm = \frac{\sum_{i=1}^{n^\pm} M_{ij}^\pm}{\sum_{i=1}^n |M_{ij}|}, j = \overline{1,12}; \quad (10)$$

$$\sigma_j^\pm = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n^\pm} (M_{ij}^\pm - O_{ij}^\pm)^2}{n^\pm}}, j = \overline{1,12}; \quad (11)$$

$$v_j^\pm = \frac{\sigma_j^\pm}{O_{average}^\pm}, j = \overline{1,12}. \quad (12)$$

Based on the above calculations, the result for the forecast year (2023) is calculated. Based on the base year, let us calculate the indicators for the forecast year as follows:

Since the membership function characterizes the changes for 12 quantities selected of calculations are carried out for all n number of changes:

$$Q^\pm(x, j) = \mu^\pm(x, j) \cdot \delta^\pm(j). \quad (13)$$

Let us use the numerical value of the fractal dimension of the series as a random characteristic of the variations within the series.

$$P^\pm(j) = \sigma^\pm(j) \cdot v^\pm(j). \quad (14)$$

We can accept the numerical value of changes in all selected elements of the sequence x_t for the forecast year based on formula (8):

$$R(x, j) = (Q^+(x, j) + P^+(j)) + (Q^-(x, j) + P^-(j)), j = \overline{1,12}. \quad (15)$$

Taking R_x, j as the values of random deviations calculated using the fuzzy approach, a hybrid model is constructed according to formula (1).

Experimental results

First of all, statistical data for non-scheduled passenger air transportation were collected in order to build the calculation model. The statistical data used in the construction of the model

are based on the statistical indicators provided by Heydar Aliyev International Airport.

Figure 2 shows the autocorrelation function for statistical data on non-scheduled passenger air transportation. It is clear from here that calculations will be made according to formula (2), taking into account ($p = 3$) in the ARIMA model.

Here, **UCL** is the upper confident level and **LCL** is the lower confident level.

After the autocorrelation function is established, the ARIMA model is reported based on the preliminary results obtained. By substituting these values in formula (2), (ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3) and the values of c are obtained (reports were made in the MATLAB 2023a software package). Calculation results are shown in Figure 3. It can be seen from the comparison of the calculation results based on formula (2) with the actual indicators, that there are serious differences in some points from the observations made. This indicates that those actual results are anomalous in the general results. In general, anomalous deviations in the general trend are observed in non-scheduled passenger air transportation.

Based on the data in Figure 4, a series consisting of random variations for the ($n = 3$) condition is constructed. The values of the model in a fuzzy approach based on formulae (8)–(15) for the elements of that series are calculated. The obtained results are considered in formula (1). The final results are shown in Table 1.

According to Figure 6, it can be noted that the average relative error of the forecast results obtained with the independent ARIMA model is 14.2%, and this value is equal to 7.1% in the forecast results of the hybrid ARIMA-Fuzzy model. As it can be seen from the calculation results, the hybrid ARIMA-Fuzzy forecast model has more than 2 times stronger outcome than the independent ARIMA model.

Conclusions

As a result, it should be noted that in the article, for the first time, a fuzzy model was applied together with the Regression (ARIMA) model for the forecasting of non-scheduled passenger air transportation. The errors obtained based on the

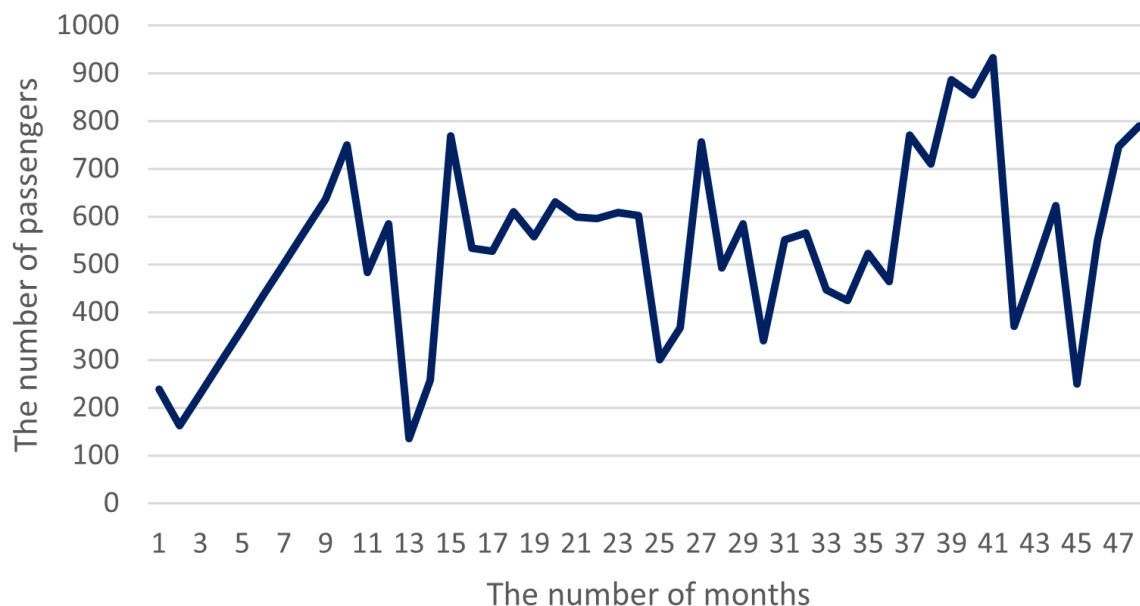


Fig. 1. Monthly dynamics of non-scheduled passenger air transportation

AUTOCORRELATION PLOT

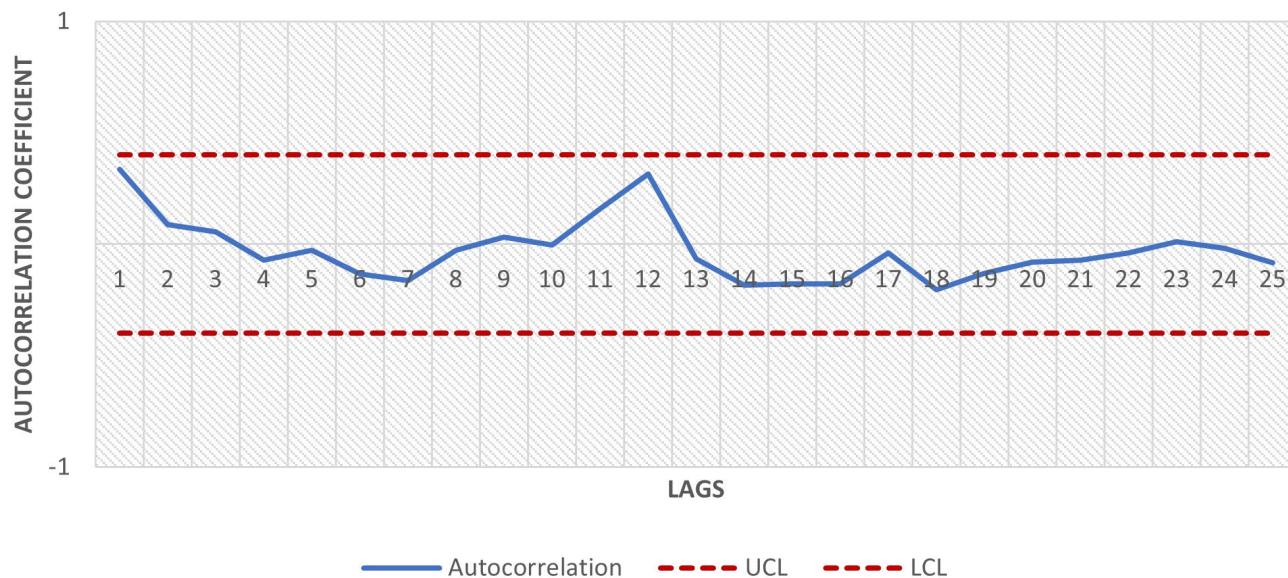


Fig. 2. Autocorrelation function according to Figure 1

ARIMA model were further fixed and strong forecast outcome was obtained based on the hybrid ARIMA-Fuzzy model. The conducted research is considered crucial for both airlines and airports.

The hybrid model will provide effective results in the increasing of economic efficiency, operational planning, resource allocation, etc. for non-scheduled passenger air transportation.

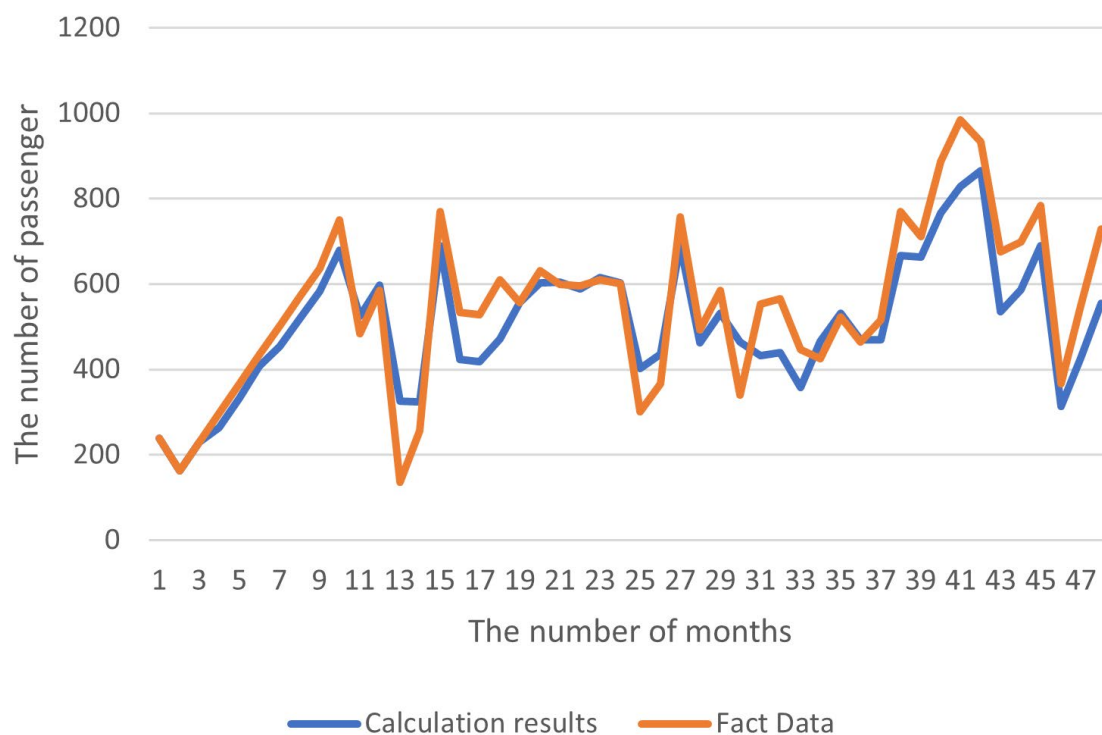


Fig. 3. Calculation results based on the formula (2)

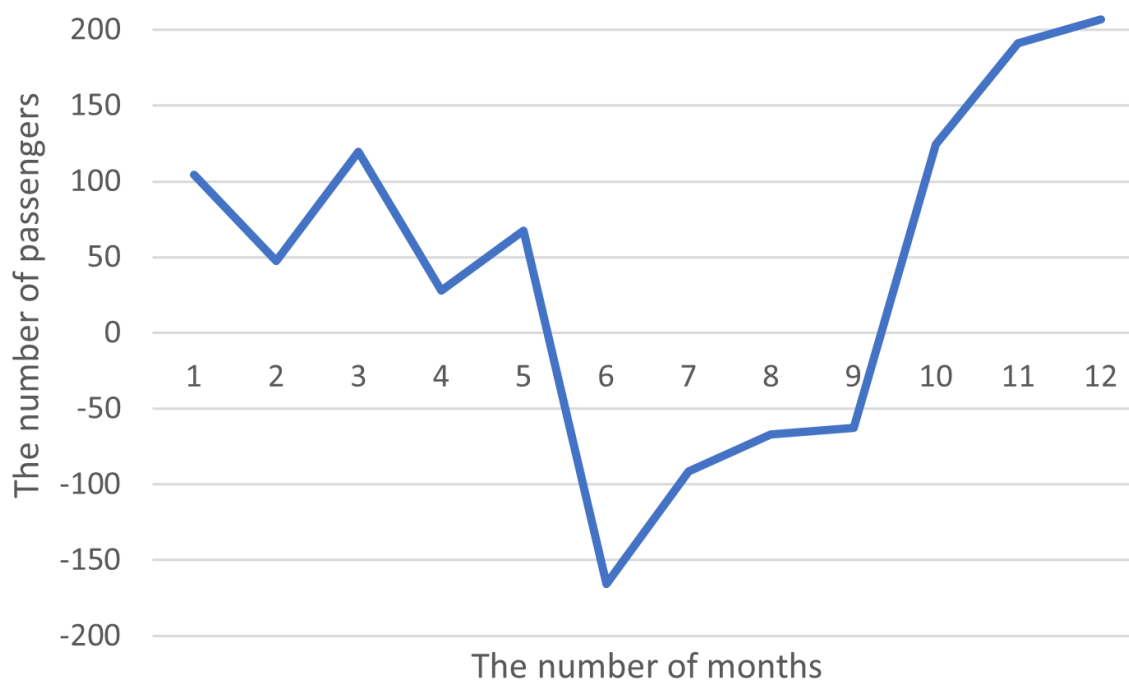


Fig. 4. The differences between the fact data and the calculation results

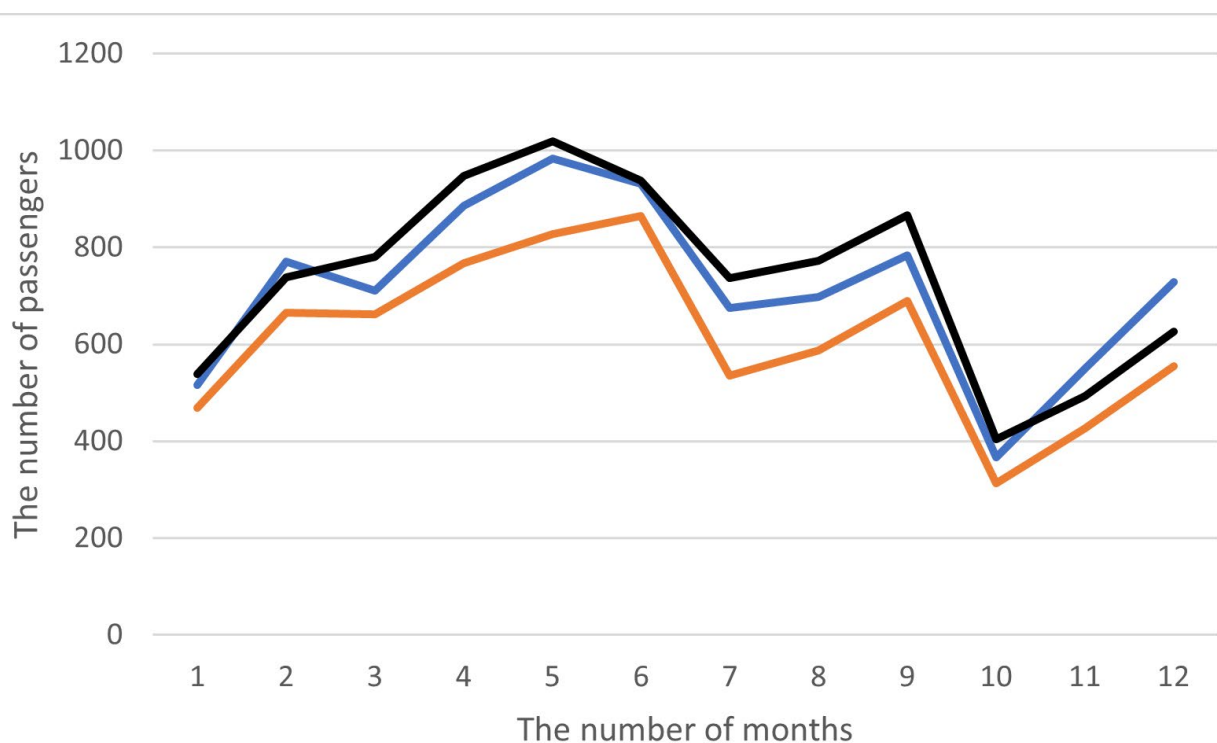


Fig. 5. Comparative forecasting results of ARIMA and hybrid ARIMA-Fuzzy models

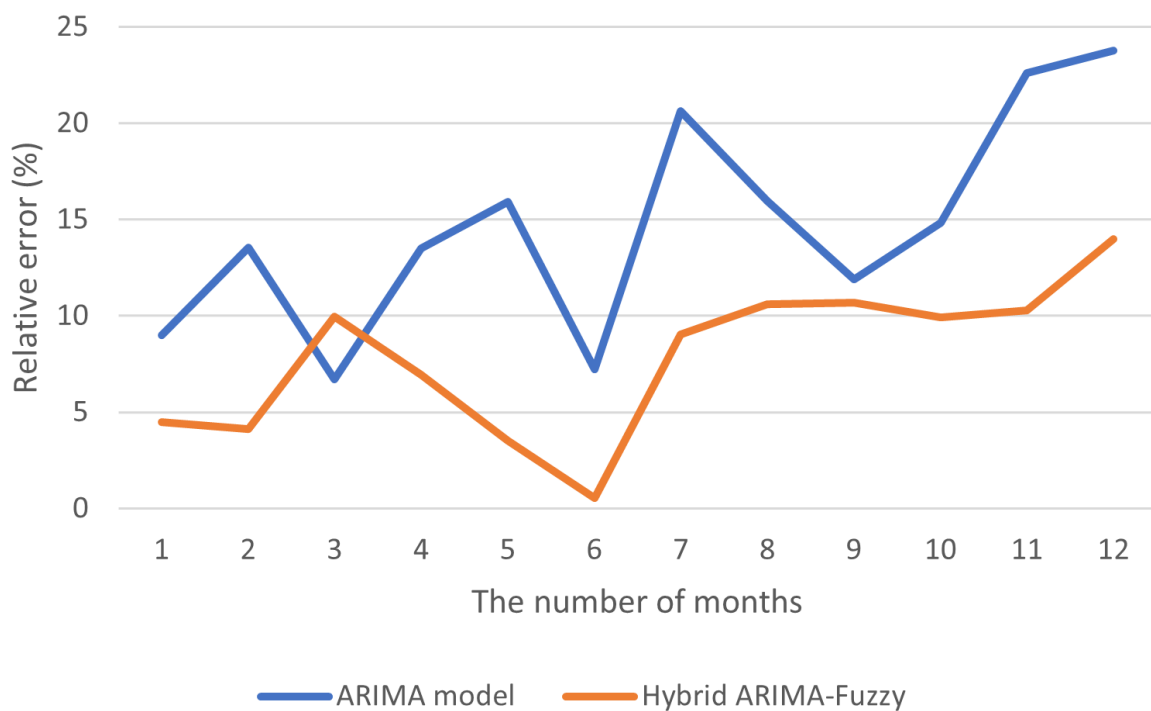


Fig. 6. Relative error of forecasting results of ARIMA and hybrid ARIMA-Fuzzy models based on actual indicators

Table 1

Forecasting results of non-scheduled passenger air transportation (2023) according to the hybrid (ARIMA-Fuzzy) model

Months	Rj	Hybrid ARIMA-Fuzzy model results for 2023	Fact data-2023
January	69.43171	538.0239	515
February	72.63433	738.2524	770
March	118.168	780.7149	710
April	181.1136	947.6439	886
May	191.5479	1018.746	984
June	72.37245	936.9405	932
July	200.2406	735.9233	675
August	185.4639	772.1275	698
September	176.7653	866.8007	783
October	90.84436	403.4238	367
November	67.66142	493.4551	550
December	71.0323	626.1355	728

References

1. Aghayev, N., Nazarli, D. (2024). Support vector machines for forecasting non-scheduled passenger air transportation. *Problems of Information Technology*, vol. 15, no. 1, pp. 3–9. DOI: 10.25045/jpit.v15.i1.01
2. Li, C. (2019). Combined forecasting of civil aviation passenger volume based on ARIMA-REGRESSION. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, vol. 10, pp. 945–952. DOI: 10.1007/s13198-019-00825-6
3. Ramadhani, S., Dhini, A., Laoh, E. (2020). Airline passenger forecasting using ARIMA and artificial neural networks approaches. In: *Proceedings of the 7th International Conference on ICT Smart Society (ICISS 2020)*, pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICISS50791.2020.9307571 (accessed: 18.12.2024).
4. Asrah, N., Nor, M., Rahim, S., Leng, W. (2018). Time series forecasting of the number of Malaysia airlines and AirAsia passengers. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 995, ID: 012006. DOI: 10.1088/1742-6596/995/1/012006 (accessed: 18.12.2024).
5. Jin, F., Li, Y., Sun, S., Li, H. (2020). Forecasting air passenger demand with a new hybrid ensemble approach. *Journal of Air Transport Management*, vol. 83, ID: 101744. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2019.101744 (accessed: 18.12.2024).
6. Madhavan, M., Sharafuddin, M.A., Piboonrunroj, P., Yang, C.-C. (2023). Short-term forecasting for airline industry: the case of Indian air passenger and air cargo. *Global Business Review*, vol. 24, issue 6, pp. 1145–1179. DOI: 10.1177/0972150920923316
7. Nguyen, Q.H., Tran, P.Q., Ngo, P.D. (2025). Air cargo traffic forecasting model: An empirical study in Vietnam using the SARIMA-X/(E)GARCH model. *Research in Transportation Business & Management*, vol. 59, ID: 101268. DOI: 10.1016/j.rtbm.2024.101268 (accessed: 18.12.2024).
8. Anguita, J.G.M., Olariaga, O.D. (2023). Air cargo transport demand forecasting

using ConvLSTM2D, an artificial neural network architecture approach. *Case Studies on Transport Policy*, vol. 12, ID: 101009. DOI: 10.1016/j.cstp.2023.101009 (accessed: 18.12.2024).

9. Alexander, D.W., Merkert, R. (2021). Applications of gravity models to evaluate and forecast US international air freight markets post-GFC, *Transport Policy*, vol. 104, pp. 52–62. DOI: 10.1016/j.tranpol.2020.04.004

10. Nieto, M.R., Carmona-Benítez, R.B. (2018). ARIMA+GARCH+Bootstrap forecasting method applied to the airline industry. *Journal of Air Transport Management*, vol. 71 (C), pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2018.05.007

11. Tolcha, T.D. (2023). The state of Africa's air transport market amid COVID-19, and forecasts for recovery. *Journal of Air Transport Management*, vol. 108, ID: 102380. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2023.102380 (accessed: 18.12.2024).

12. Aljanabi, M.R., Borna, K., Ghanbari, Sh., Obaid, A.J. (2024). SVD-based adaptive fuzzy for generalized transportation. *Alexandria Engineering Journal*, vol. 94, pp. 377–396. DOI: 10.1016/j.aej.2024.03.020

13. Tanwar, R., Agarwal, P.K. (2024). Assessing travel time performance of multimodal transportation systems using fuzzy-analytic hierarchy process: A case study of Bhopal City. *Heliyon*, vol. 10, issue 17, ID: e36844. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e36844 (accessed: 18.12.2024).

14. Djimasbe, R., Gyamfi, S., Iweh, C.D., Ribar, B.N. (2024). Development of an ARIMAX model for forecasting airport electricity consumption in Accra-Ghana: The role of weather and air passenger traffic. *e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 9, ID: 100691. DOI: 10.1016/j.prime.2024.100691 (accessed: 18.12.2024).

15. Hopfe, D.H., Lee, K., Yu, C. (2024). Short-term forecasting airport passenger flow during periods of volatility: Comparative investigation of time series vs. neural network models. *Journal of Air Transport Management*, vol. 115, ID: 102525. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2023.102525 (accessed: 18.12.2024).

16. Carmona-Benítez, R.B., Nieto, M.R. (2020). SARIMA damp trend grey forecasting

model for airline industry. *Journal of Air Transport Management*, vol. 82, ID: 101736. DOI: 10.1016/J.JAIRTRAMAN.2019.101736 (accessed: 18.12.2024).

17. Sun, S., Lu, H., Tsui, K., Wang, S. (2019). Nonlinear vector auto-regression neural network for forecasting air passenger flow. *Journal of Air Transport Management*, vol. 78, pp. 54–62. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2019.04.005

18. Shramenko, N., Muzylyov, D. (2019). Forecasting of overloading volumes in transport systems based on the fuzzy-neural model. In book: *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II*. Springer International Publishing, Cham, pp. 311–320. DOI: 10.1007/978-3-030-22365-6_31

19. Souza, J.A.F., de Silva, M.M., Rodrigues, S.G., Santos, S.M. (2022). A forecasting model based on ARIMA and artificial neural networks for end-of-life vehicles. *Journal of Environmental Management*, vol. 318, ID: 115616. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115616 (accessed: 18.12.2024).

20. Gu, W., Guo, B., Zhang, Z., Lu, H. (2024). Civil Aviation Passenger Traffic Forecasting: Application and Comparative Study of the Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average Model and Backpropagation Neural Network. *Sustainability*, vol. 16, issue 10, ID: 4110. DOI: 10.3390/su16104110 (accessed: 18.12.2024).

21. Aghayev, N., Nazarli, D. (2023). Forecasting models of non-scheduled passenger air transportation through regression analysis. *Scientific Journal*, vol. 25, no. 4, pp. 13–22. DOI: 10.30546/EMNAA.2023.25.4.2

Список литературы

1. Aghayev N., Nazarli D. Support vector machines for forecasting non-scheduled passenger air transportation // *Problems of Information Technology*. 2024. Vol. 15, no. 1. Pp. 3–9. DOI: 10.25045/jpit.v15.i1.01

2. Li C. Combined forecasting of civil aviation passenger volume based on ARIMA-REGRESSION // *International Journal of System Assurance Engineering and Management*. 2019. Vol. 10. Pp. 945–952. DOI: 10.1007/s13198-019-00825-6

3. **Ramadhani S., Dhini A., Laoh E.** Airline passenger forecasting using ARIMA and artificial neural networks approaches [Электронный ресурс] // Proceedings of the 7th International Conference on ICT Smart Society (ICISS 2020). Pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICISS.50791.2020.9307571 (дата обращения: 18.12.2024).
4. **Asrah N.** Time series forecasting of the number of Malaysia airlines and AirAsia passengers / N. Asrah, M. Nor, S. Rahim, W. Leng [Электронный ресурс] // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 995. ID: 012006. DOI: 10.1088/1742-6596/995/1/012006 (дата обращения: 18.12.2024).
5. **Jin F.** Forecasting air passenger demand with a new hybrid ensemble approach / F. Jin, Y. Li, S. Sun, H. Li [Электронный ресурс] // Journal of Air Transport Management. 2020. Vol. 83. ID: 101744. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2019.101744 (дата обращения: 18.12.2024).
6. **Madhavan M.** Short-term forecasting for airline industry: the case of Indian air passenger and air cargo / M. Madhavan, M.A. Sharafuddin, P. Piboonrungraj, C.-C. Yang // Global Business Review. 2023. Vol. 24, iss. 6. Pp. 1145–1179. DOI: 10.1177/0972150920923316
7. **Nguyen Q.H., Tran P.Q., Ngo P.D.** (2025). Air cargo traffic forecasting model: An empirical study in Vietnam using the SARIMA-X/(E)GARCH model [Электронный ресурс] // Research in Transportation Business & Management. 2025. Vol. 59. ID: 101268. DOI: 10.1016/j.rtbm.2024.101268 (дата обращения: 18.12.2024).
8. **Anguita J.G.M., Olariaga O.D.** Air cargo transport demand forecasting using ConvLSTM2D, an artificial neural network architecture approach [Электронный ресурс] // Case Studies on Transport Policy. 2023. Vol. 12. ID: 101009. DOI: 10.1016/j.cstp.2023.101009 (дата обращения: 18.12.2024).
9. **Alexander D.W., Merkert R.** Applications of gravity models to evaluate and forecast US international air freight markets post-GFC // Transport Policy. 2021. Vol. 104. Pp 52–62. DOI: 10.1016/j.tranpol.2020.04.004
10. **Nieto M.R., Carmona-Benítez R.B.** ARIMA + GARCH + Bootstrap forecasting method applied to the airline industry // Journal of Air Transport Management. 2018. Vol. 71 (C). Pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2018.05.007
11. **Tolcha T.D.** The state of Africa's air transport market amid COVID-19, and forecasts for recovery [Электронный ресурс] // Journal of Air Transport Management. 2023. Vol. 108. ID: 102380. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2023.102380 (дата обращения: 18.12.2024).
12. **Aljanabi M.R.** SVD-based adaptive fuzzy for generalized transportation / M.R. Aljanabi, K. Borna, Sh. Ghanbari, A.J. Obaid // Alexandria Engineering Journal. 2024. Vol. 94. Pp. 377–396. DOI: 10.1016/j.aej.2024.03.020
13. **Tanwar R., Agarwal P.K.** Assessing travel time performance of multimodal transportation systems using fuzzy-analytic hierarchy process: A case study of Bhopal City [Электронный ресурс] // Heliyon. 2024. Vol. 10, iss. 17. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e36844 (дата обращения: 18.12.2024).
14. **Djimasbe R.** Development of an ARIMAX model for forecasting airport electricity consumption in Accra-Ghana: The role of weather and air passenger traffic / R. Djimasbe, S. Gyamfi, C.D. Iweh, B.N. Ribar [Электронный ресурс] // e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy. 2024. Vol. 9. ID: 100691. DOI: 10.1016/j.prime.2024.100691 (дата обращения: 18.12.2024).
15. **Hopfe D.H., Lee K., Yu C.** Short-term forecasting airport passenger flow during periods of volatility: Comparative investigation of time series vs. neural network models [Электронный ресурс] // Journal of Air Transport Management. 2024. Vol. 115. ID: 102525. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2023.102525 (дата обращения: 18.12.2024).
16. **Carmona-Benitez R.B., Nieto M.R.** SARIMA damp trend grey forecasting model for airline industry [Электронный ресурс] // Journal of Air Transport Management. 2020. Vol. 82. ID: 101736. DOI: 10.1016/J.JAIRTRAMAN.2019.101736 (дата обращения: 18.12.2024).
17. **Sun S.** Nonlinear vector auto-regression neural network for forecasting air passenger flow / S. Sun, H. Lu, K. Tsui, S. Wang // Journal of Air Transport Management. 2019. Vol. 78. Pp. 54–62. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2019.04.005

18. Shramenko N., Muzylyov D. Forecasting of overloading volumes in transport systems based on the fuzzy-neural model. In book: *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II*. Springer International Publishing, Cham, 2019. Pp. 311–320. DOI: 10.1007/978-3-030-22365-6_31

19. Souza J.A.F. A forecasting model based on ARIMA and artificial neural networks for end-of-life vehicles / J.A.F. Souza, M.M. de Silva, S.G. Rodrigues, S.M. Santos [Электронный ресурс] // *Journal of Environmental Management*. 2022. Vol. 318, ID: 115616. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115616 (дата обращения: 18.12.2024).

20. Gu W. Civil Aviation Passenger Traffic Forecasting: Application and Comparative Study of the Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average Model and Backpropagation Neural Network / W. Gu, B. Guo, Z. Zhang, H. Lu [Электронный ресурс] // *Sustainability*. 2024. Vol. 16, iss. 10. ID: 4110. DOI: 10.3390/su16104110 (accessed: 18.12.2024).

21. Aghayev N., Nazarli D. Forecasting models of non-scheduled passenger air transportation through regression analysis // *Scientific Journal*. 2023. Vol. 25, no. 4. Pp. 13–22. DOI: 10.30546/EMNAA.2023.25.4.2

Information about the authors

Nadir B. Aghayev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Computer Systems and Programming, National Aviation Academy and Institute of Information Technology, nadir_avia@yahoo.com, nadiraghayev@naa.edu.az.

Dashqin Sh. Nazarli, Postgraduate Student, Department of Air Transport Production, National Aviation Academy, dnazarli.32073@naa.edu.az.

Сведения об авторах

Агаев Надир Бафадин оглы, доктор технических наук, профессор кафедры компьютерных систем и программирования Национальной авиационной академии, Институт информационных технологий, nadir_avia@yahoo.com, nadiraghayev@naa.edu.az.

Назарли Дашгин, аспирант кафедры авиатранспортного производства воздушного транспорта Национальной авиационной академии, dnazarli.32073@naa.edu.az.

Поступила в редакцию	28.10.2024	Received	28.10.2024
Одобрена после рецензирования	22.01.2025	Approved after reviewing	22.01.2025
Принята в печать	25.03.2025	Accepted for publication	25.03.2025

УДК 629.735

DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-2-22-34

Пример оценки загрязнения проточной части ТРДД противообледенительной жидкостью с использованием статистических моделей

С.В. Некрасов¹, Б.А. Чичков¹

¹*Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия*

Аннотация: Загрязнение проточной части – одна из распространенных неисправностей в процессе эксплуатации авиационных газотурбинных двигателей. При эксплуатации в зимний период существенную опасность представляет попадание противообледенительной жидкости и противогололедных агентов в проточную часть компрессора. Загрязнение рабочих лопаток компрессора (-ов) приводит к уменьшению проходных сечений межлопаточных каналов, изменению их формы и увеличению шероховатости поверхности пера лопаток. Все эти явления вызывают ухудшение характеристик компрессора: уменьшение КПД, снижение степени повышения давления и расхода воздуха, в результате чего происходит снижение тяги двигателя, рост температуры газов за турбиной, увеличение расхода топлива, снижение газодинамической устойчивости, изменение оборотов роторов. Для устранения загрязнения газозооушного тракта в эксплуатации выполняют периодические промывки проточной части, используя в качестве чистящего агента твердотельные очистители, жидкие моющие средства и воду. В статье анализируется изменение отклонений значений регистрируемых параметров турбореактивного двухконтурного двигателя от базовых значений как при загрязнении проточной части противообледенительной жидкостью, так и при устранении загрязнения с использованием статистических моделей, базирующихся на методах анализа временных рядов, динамики характеристик моделей, описывающих связи между параметрами, а также анализа синхронии изменения параметров двигателей одного воздушного судна. Статья не ставит целью сообщить среднестатистические значения изменения параметров для типа двигателя и конкретной неисправности, но показать в основном принцип и работоспособность метода диагностирования, использующего принцип оценки динамики значимости и устойчивости корреляционных связей между регистрируемыми параметрами, что в настоящее время недостаточно используется в научно-методических основах построения и применения в эксплуатации статистических диагностических моделей.

Ключевые слова: авиационный газотурбинный двигатель (ГТД), турбореактивный двухконтурный двигатель (ТРДД), загрязнение проточной части ТРДД, промывка проточной части, контролируемые параметры, отклонение значения регистрируемого параметра от базового значения, аппроксимация, модель статистическая, зависимость регрессионная.

Для цитирования: Некрасов С.В., Чичков Б.А. Пример оценки загрязнения проточной части ТРДД противообледенительной жидкостью с использованием статистических моделей // Научный вестник МГТУ ГА. 2025. Т. 28, № 2. С. 22–34. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-2-22-34

The example of BTJE flow path contamination assessment with anti-icing fluid using statistical models

S.V. Nekrasov¹, B.A. Chichkov¹

¹*Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

Abstract: Contamination of the compressor flow path is one of the most prevalent issues encountered during the operation of aircraft gas turbine engines (GTEs). During operation in winter, ingestion of anti-icing fluids and de-icing agents into the compressor flow path presents a substantial risk. In particular, contamination of the compressor rotor blades leads to the reduction in the cross-sectional areas of the inter-blade channels, changes in their shape, and an increase in the roughness of the

blade surfaces. All these phenomena compromise compressor performance: result in reduced efficiency, decreased pressure ratio, and airflow, resulting in lower engine thrust, increased jet pipe temperature, higher fuel consumption, reduced gas-dynamic stability, and altered rotor speeds. To eliminate contamination in the gas-air duct during operation, periodic washings of the flow part are performed using solid cleaners, liquid detergents, and water as cleaning agents. The article analyzes changes in deviations of bypass turbo-jet engine recorded parameters from baseline values both when contaminated with anti-icing fluids and after removing contaminants using statistical models based on time series analysis methods, dynamics of model characteristics describing relationships between parameters, as well as synchronization analysis of parameter changes in engines of the same aircraft. The article does not aim to report average parameter change values for a specific engine type and fault but rather demonstrates the principle and effectiveness of the diagnostic method that uses the principle of assessing the dynamics of significance and stability of correlation links between recorded parameters, which are currently underutilized in the scientific-methodological foundations of constructing and applying statistical diagnostic models in operational practice.

Key words: aviation gas-turbine engine (GTE), bypass turbo-jet engine (BTJE), contamination of BTJE flow path, washing of flow path, controlled parameters, deviations of bypass turbo-jet engine (BTJE) recorded parameters from baseline values, approximation, statistical model, regression dependence.

For citation: Nekrasov, S.V., Chichkov, B.A. (2025). The example of BTJE flow path contamination assessment with anti-icing fluid using statistical models. Civil Aviation High Technologies, vol. 28, no. 2, pp. 22–34. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-2-22-34

Введение

Загрязнение проточной части авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) вызывается попаданием в проточную часть песка, пыли, мелких камней, масла и других отложений; пылцы, летучих семян растений, насекомых в летний период; морской соли при полетах над океаном; вулканического пепла при полетах в зонах вулканической активности, а также противообледенительной жидкости и является естественной и одной из распространенных неисправностей в процессе эксплуатации. В зимний период эксплуатации попадание противообледенительной жидкости и противогололедных агентов в проточную часть компрессора приводит в основном к образованию отложений на корытце лопаток направляющих аппаратов первых ступеней. Загрязнение рабочих лопаток компрессоров вызывает уменьшение проходных сечений межлопаточных каналов, изменение их формы и увеличение шероховатости поверхности лопаток, следствием чего является ухудшение характеристик компрессора: уменьшение КПД, снижение степени повышения давления и расхода воздуха, снижение тяги двигателя, рост температуры газов за турбиной, увеличение расхода топлива, снижение газодинамической

устойчивости компрессора, изменение оборотов роторов. Для устранения загрязнения газозавоздушного тракта в эксплуатации выполняют периодические промывки проточной части с использованием в качестве чистящего агента твердотельных очистителей, жидких моющих средств и воды. В качестве противообледенительной жидкости применяют жидкости четырех типов. В зависимости от степени обледенения и атмосферных условий может применяться одноступенчатая и двухступенчатая противообледенительная защита самолета. Обработка может проводиться с запущенными и выключенными двигателями самолета¹.

Для проведения противообледенительной обработки воздушных судов (ВС) используют специальный автомобиль (рис. 1). Очистку твердотельными очистителями производят на работающем двигателе, в качестве твердотельного очистителя используют органический очиститель или карбопласт [1]. Очистку жидкими моющими средствами производят на режиме холодной прокрутки. Промывающую жидкость выбирают исходя из типа за-

¹ Руководство Р-2.2-01-18 (Версия 8). Противообледенительная защита воздушных судов силами общества с ограниченной ответственностью «Шереметьево Хэндлинг». М.: Шерем. Хэндлинг, 2021. 227 с.



Рис. 1. Машина Vestergaard Elephant Beta для противообледенительной обработки ВС

Fig. 1. The Vestergaard Elephant Beta machine for the aircraft de-icing

грязнения и температуры наружного воздуха. Например, для самолета типа A320 с двигателями типа CFM56-5B в соответствии с АММ² предусмотрено две процедуры промывки двигателей в соответствии с документами 72-00-00-100-028 «Очистка газозвдушного тракта с использованием чистящих средств»; 72-00-00-100-026 «Очистка газозвдушного тракта водой».

Очистка газозвдушного тракта с использованием специализированных чистящих жидкостей производится, когда газозвдушный тракт засорен органическими загрязнениями, масляными отложениями или параметр «Запас температуры газов» (EGTMargin) уменьшается более чем на 5 °С. Отличительной особенностью промывки газозвдушного тракта с использованием специализированных чистящих жидкостей в отличие от промывки водой являются следующие действия: после промывки чистящим средством один и более раз необходимо смыть остатки средства водой, для этого 3 раза выполняется процедура промывки двигателя, описанная выше. На рис. 2 показано оборудование, применяемое для выполнения процедуры промывки проточной части турбореактивного двухконтурного двигателя (ТРДД).

Для уменьшения случаев загрязнения проточной части ГТД противообледенительной



Рис. 2. Оборудование для промывки проточной части двигателя

Fig. 2. Equipment for washing the engine flow path

жидкостью (далее – загрязнения проточной части) рекомендуется: производить обработку противообледенительной жидкостью самолета с выключенными двигателями; не допускать прямого попадания струи противообледенительной жидкости в воздухозаборник двигателя; не обрабатывать элементы конструкции планера, находящиеся в непосредственной близости к не закрытым заглушками воздухозаборникам двигателя; случайно попавшую жидкость необходимо удалять до запуска двигателей; при необходимости устанавливать заглушки на воздухозаборник двигателя; удалять снежно-ледяные отложения на воздухозаборнике и лопатках вентилятора при помощи воздушного потока или мягкой щетки; удалять противообледенительную жидкость с перрона до начала руления самолета; не запускать двигатель в месте выполнения противообледенительной обработки.

² Руководство по технической эксплуатации семейства воздушного судна A320, 2022. 21 с.

Статья не ставит целью сообщить среднестатистические значения изменения параметров для типа двигателя и конкретной неисправности, но показать в основном принцип и работоспособность метода диагностирования, использующего принцип оценки динамики значимости и устойчивости корреляционных связей между регистрируемыми параметрами, что в настоящее время недостаточно используется в научно-методических основах построения и применения в эксплуатации статистических диагностических моделей.

Описание принципов оценки загрязнения проточной части по данным регистрируемых параметров с использованием статистических моделей

В процессе эксплуатации авиационных двигателей контролируется, регистрируется и обрабатывается для дальнейшего анализа ряд параметров³ [2–11], из которых в рамках настоящей статьи использованы и обозначены отклонение оборотов ротора высокого давления (ВД) от базового значения (базовой линии при графическом представлении) (GPCN25); отклонение температуры газов за турбиной от базового значения (DEGT); отклонение расхода топлива от базового значения относительное (GWFM); запас по температуре газов за турбиной на взлетном режиме работы (EGTHDM).

Перечень статистических (изложение их математического аппарата в работах [12–16]) диагностических моделей и общие принципы оценки загрязнения проточной части ТРДД с их использованием далее представлены на примере оценок для двух двигателей одного самолета.

На рис. 3–6 представлены результаты обработки основных параметров двигателей 1-го и 2-го типа CFM56-5b самолета типа Airbus A320, сглаженных скользящим средним по дан-

ным 10 полетов. Такого рода модели наглядны, работоспособны и массово используются в эксплуатации двигателей различных типов [3, 5–11] для оценки их технического состояния.

В рассматриваемом здесь примере имеет место снижение запаса по температуре газов за турбиной при работе на взлетном режиме работы (рис. 3). Для двигателя 1 оно составило около 9 °С; для двигателя 2 – около 14 °С. Снижение запаса происходит вследствие роста расхода топлива, снижения КПД компрессора и расхода воздуха [4]. Наблюдается синхрония изменения параметра двигателей. Большее изменение анализируемого параметра на двигателе 2 может быть обусловлено попаданием в него большего количества противобледенительной жидкости и (или) большей наработкой, сопровождаемой большим естественным эрозионным износом лопаток. Параметр EGTHDM может рассматриваться как основной параметр, характеризующий степень изменения геометрии проточной части газоздушного тракта двигателя при его загрязнении.

Проведенная эндоскопия газоздушного тракта подтвердила наличие дефекта, а именно засорение проточной части противобледенительной жидкостью. В момент обнаружения неисправности у двигателя 1 наработка после последнего ремонта 15824 ч и 5651 цикл; у двигателя 2 наработка после последнего ремонта 17374 ч и 5985 цикл.

На рис. 4 наблюдается рост расхода топлива на крейсерском режиме работы двигателя. Это может являться следствием изменения характера обтекания лопаток компрессора, которое привело к снижению КПД компрессора и уменьшению степени повышения давления в компрессоре. Поскольку в двигателе типа CFM56-5b реализована программа управления $N1 = \text{const}$, то для поддержания постоянных оборотов ротора низкого давления (НД) при сниженном КПД компрессора автоматика увеличивает подачу топлива в камеру сгорания. При сравнении изменения расхода топлива двигателей 1 и 2, представленного на рис. 4, так же, как и на рис. 3, наблюдается синхрония изменения параметров обоих двигателей.

³ Use of engine condition monitoring (ECM) Update [Электронный ресурс] // EASA. 2018. 3 p. URL: <https://www.easa.europa.eu/download/imrbpb/IP%20177%20-%20Use%20of%20Engine%20Condition%20Monitoring.pdf> (дата обращения: 20.08.2024).

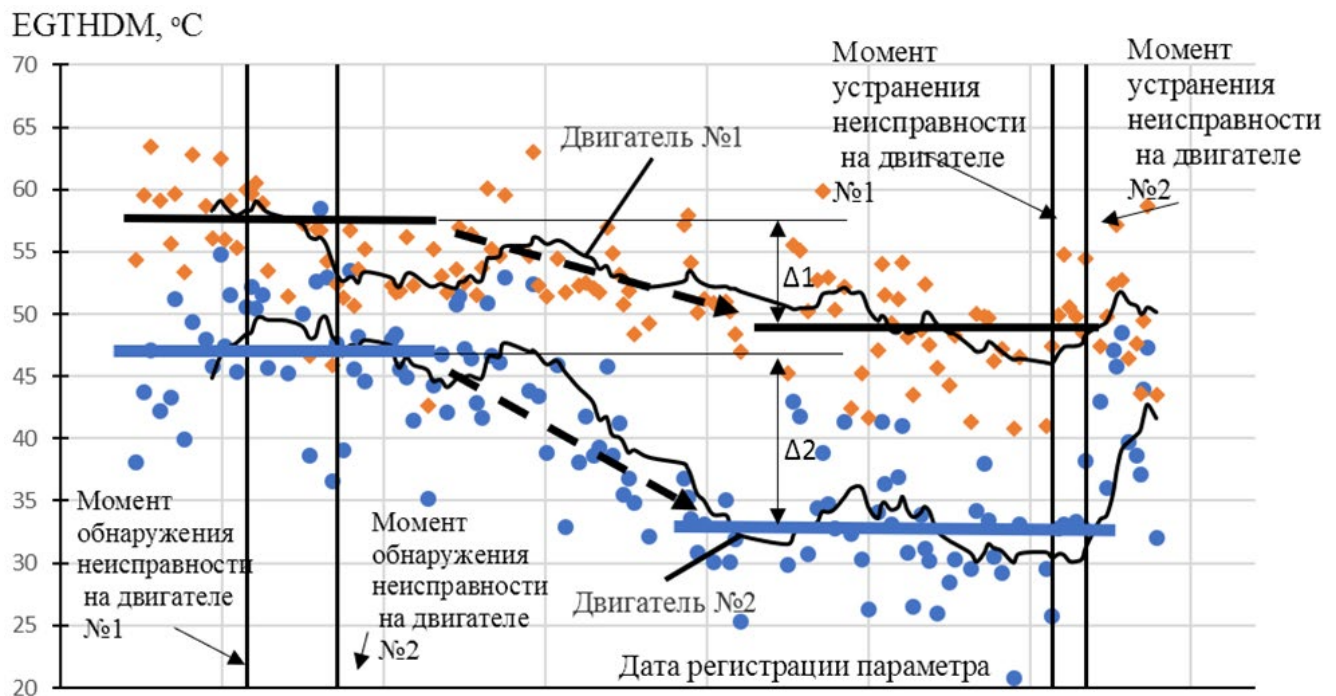


Рис. 3. Сравнение сглаженных по 10 полетам значений параметра «Запас по температуре газов за турбиной» на взлетном режиме двигателя 1 и 2 одного ВС

Fig. 3. Comparison of 10 flights smoothed values of the parameter “Jet Pipe Temperature Margin” in take-off mode for Engine No. 1 and Engine No. 2 of the same aircraft

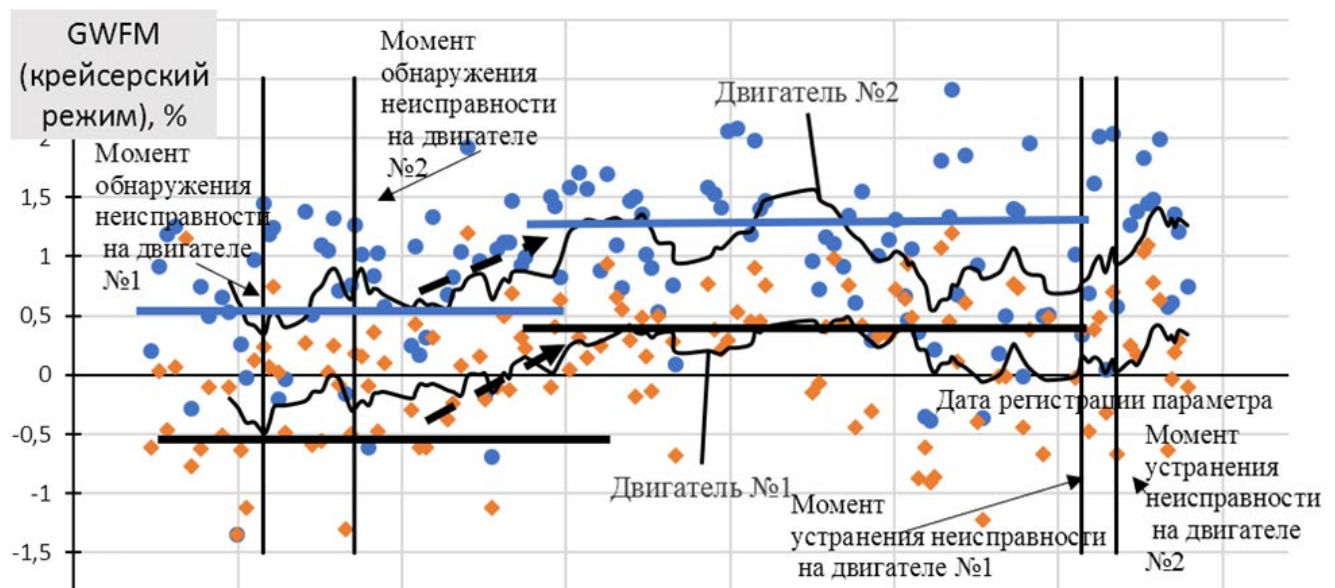


Рис. 4. Сравнение сглаженных по 10 полетам значений параметра «Отклонение значений расхода топлива от базовой линии» на крейсерском режиме полета двигателя 1 и 2 одного ВС

Fig. 4. Comparison of 10 flights smoothed values of the parameter “Deviation of Fuel Consumption Values from the Baseline” in cruise flight mode for Engine No. 1 and Engine No. 2 of the same aircraft

Также анализ изменения параметра «Отклонение температуры газов за турбиной от базовой линии», зарегистрированный на крейсерском режиме работы, результаты обработки которого представлены на рис. 5, показывает увеличение отклонения температуры газов за турбиной от базовой линии. Для двигателя 1 увеличение параметра составило около 10 °С, для двигателя 2 – около 8 °С.

На рис. 6 показаны результаты обработки данных параметра «Отклонение значений оборотов ротора высокого давления от базовой линии». Наблюдается незначительное уменьшение оборотов во время крейсерского режима работы двигателя: для двигателя 1 уменьшение составило 0,3 %; для двигателя 2 – 0,15 %. Изменение оборотов ротора высокого давления обусловлено изменением газодинамической связи между ротором НД и ротором ВД, ухудшением аэродинамики потока, приводящим к возрастанию нагрузки на турбину высокого давления.

В рамках совершенствования средств системы параметрического диагностирования двигателя типа CFM56-5b могут быть предложены следующие диагностические критерии для выявления рассматриваемой неисправности двигателя: значимое (более 70 %) изменение средних уровней основных параметров двигателя (GPCN25 (отклонение оборотов ротора ВД от базовой линии); DEGT (отклонение температуры газов за турбиной от базовой линии); GWFM (отклонение расхода топлива от базовой линии); EGTNDM (запас по температуре газов за турбиной на взлетном режиме работы)); снижение запаса по температуре газов за турбиной на взлетном режиме работы двигателя на 10–15 °С; увеличение расхода топлива на крейсерском режиме работы двигателя на 0,6–0,8 %; увеличение отклонения температуры газов за турбиной от базовой линии на крейсерском режиме работы двигателя на 8–10 °С; уменьшение оборотов ротора низкого давления на 0,15–0,3 %.

В рамках совершенствования методологического обеспечения параметрического диагностирования двигателя типа CFM56-5b обоснуем и выполнение анализа связей меж-

ду основными параметрами двигателя [2]: изменение технического состояния двигателя сопровождается изменением тесноты связей между параметрами и изменением конфигурации регрессионных моделей вида «Параметр_J=F(Параметр_I)» (I, J – параметры из перечня регистрируемых на двигателе), не представленного в работах схожей тематики [5–11].

Для оценки значимости связей между параметрами используется коэффициент парной корреляции R . Расчетный коэффициент признается значимым в случае, если его значение не меньше значения из таблицы значимых коэффициентов корреляции Фишера. Для выборки из 10 значений и уровне значимости $\alpha = 0,05$ значимым коэффициентом корреляции является $R_{кр} = 0,63$ [12].

Как следует из результатов, представленных на рис. 7, 8, до обнаружения загрязнения проточной части двигателя между параметрами GPCN25 (отклонение оборотов ротора ВД от базовой линии) и GWFM (отклонение расхода топлива от базовой линии) обоих двигателей присутствует стабильная корреляционная связь, которая подтверждает технически исправное состояние проточной части двигателя. Появление корреляционной связи в день до промывки проточной части двигателя 2 может быть обусловлено выгоранием продуктов засорения проточной части. После обнаружения загрязнения проточной части наблюдается потеря корреляционной связи между параметрами до момента выполнения работ по промывке проточной части (устранения неисправности). После устранения неисправности вновь наблюдается устойчивая корреляционная связь между рассматриваемыми параметрами. Перечисленные признаки являются критериями изменения технического состояния двигателя для рассматриваемой неисправности.

На рис. 9 показано изменение линейных регрессионных моделей (математический аппарат [12–16]), описывающих зависимости параметров $GWFM = F(GPCN25)$ двигателя 2. Как следует из представленной зависимости, до обнаружения загрязнения проточной части

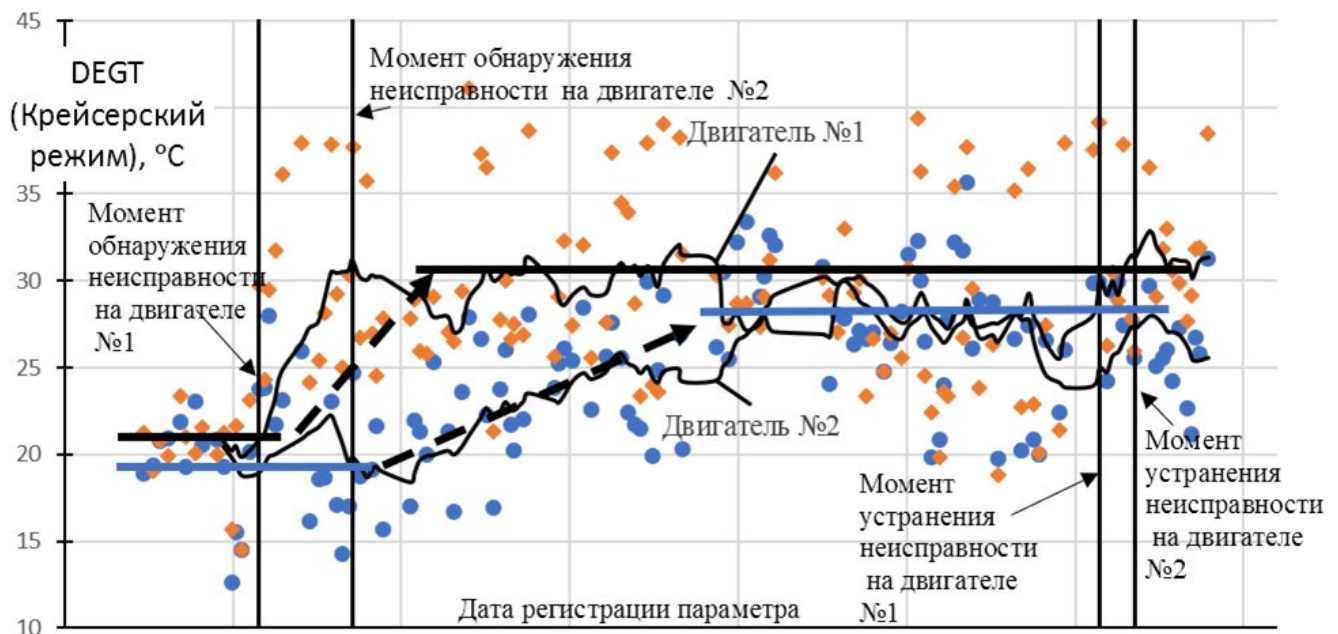


Рис. 5. Сравнение сглаженных по 10 полетам значений параметра «Отклонение значений температуры газов за турбиной от базовой линии» на крейсерском режиме двигателя 1 и 2 одного ВС

Fig. 5. Comparison of 10 flights smoothed values of the parameter “Deviation of Jet Pipe Temperature from the Baseline” in cruise mode for Engine No. 1 and Engine No. 2 of the same aircraft

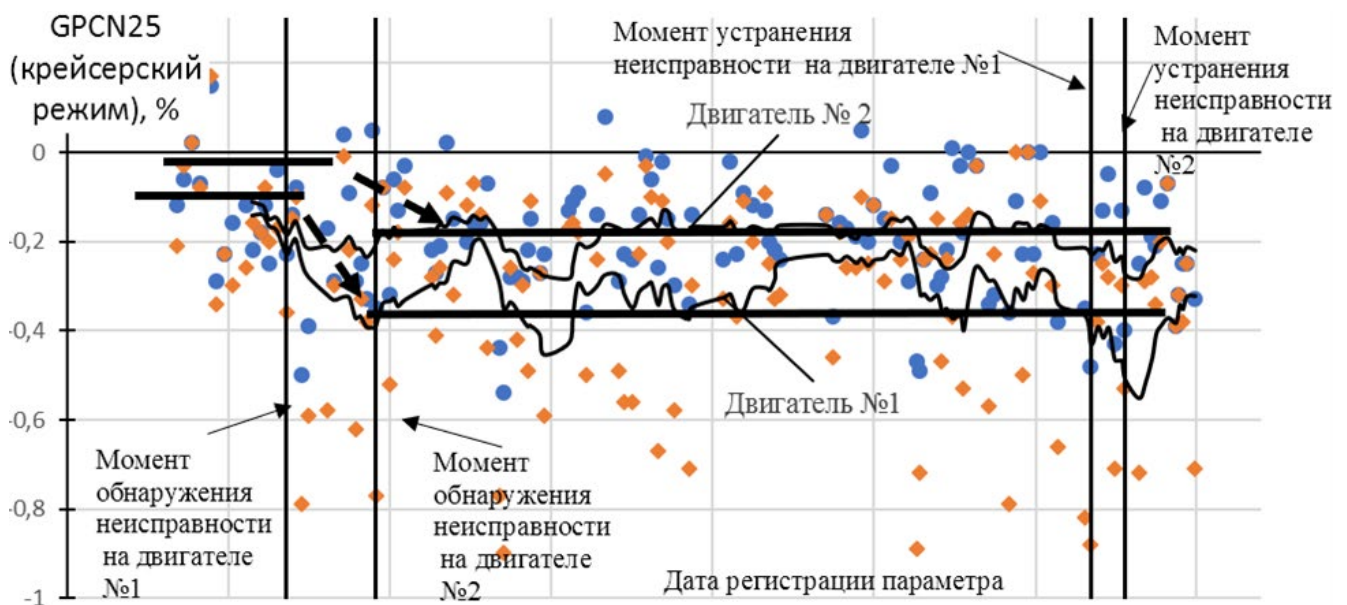


Рис. 6. Сравнение сглаженных по 10 полетам значений параметра «Отклонение значений оборотов ротора высокого давления от базовой линии» на крейсерском режиме двигателя 1 и 2 одного ВС

Fig. 6. Comparison of 10 flights smoothed values of the parameter “Deviation of High-Pressure Rotor Speed Values from Baseline” in cruise mode for Engine No. 1 and Engine No. 2 of the same aircraft



Рис. 7. Динамика изменения коэффициента парной корреляции параметров GPCN25 (отклонение оборотов ротора ВД от базовой линии) и GWFM (отклонение расхода топлива от базовой линии) двигателя 2

Fig. 7. Dynamics of change in the pair correlation coefficient of the GPCN25 parameters (deviation of a HP rotor speed from the baseline) and GWFM (a fuel consumption deviation from the baseline) for Engine No. 2

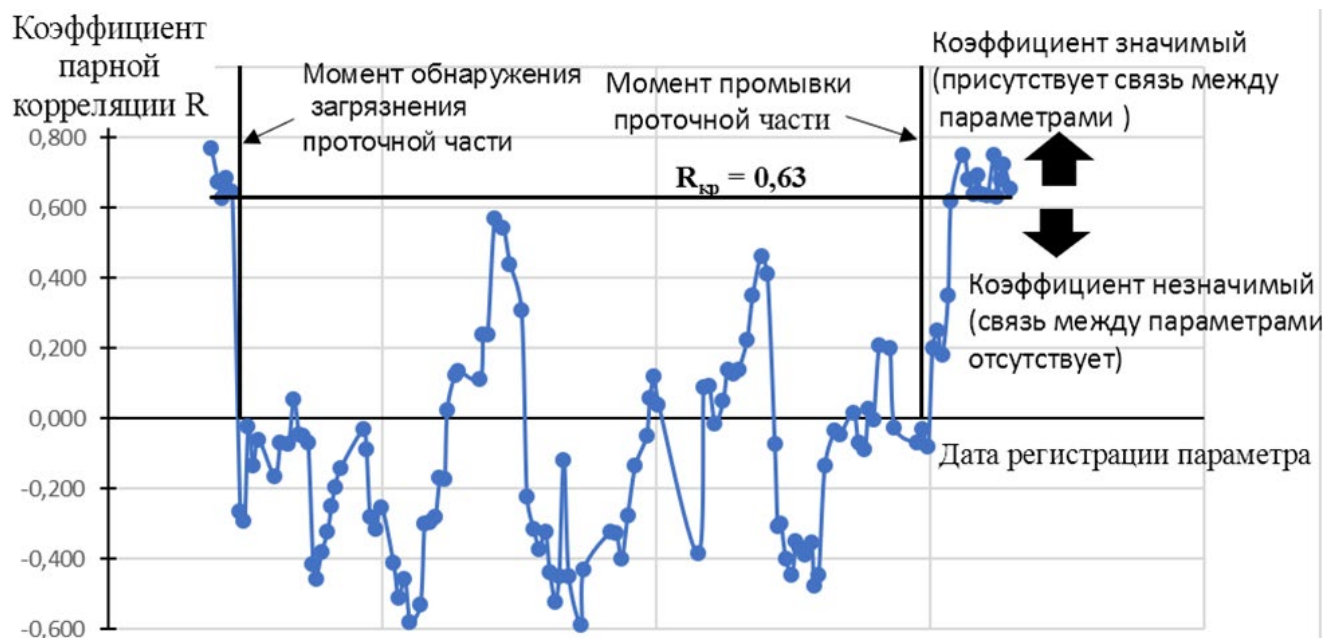


Рис. 8. Динамика изменения коэффициента парной корреляции параметров GPCN25 (отклонение оборотов ротора ВД от базовой линии) и GWFM (отклонение расхода топлива от базовой линии) двигателя 1

Fig. 8. Dynamics of change in the pair correlation coefficient of the GPCN25 parameters (deviation of a HP rotor speed from the baseline) and GWFM (a fuel consumption deviation from the baseline) for Engine No. 1

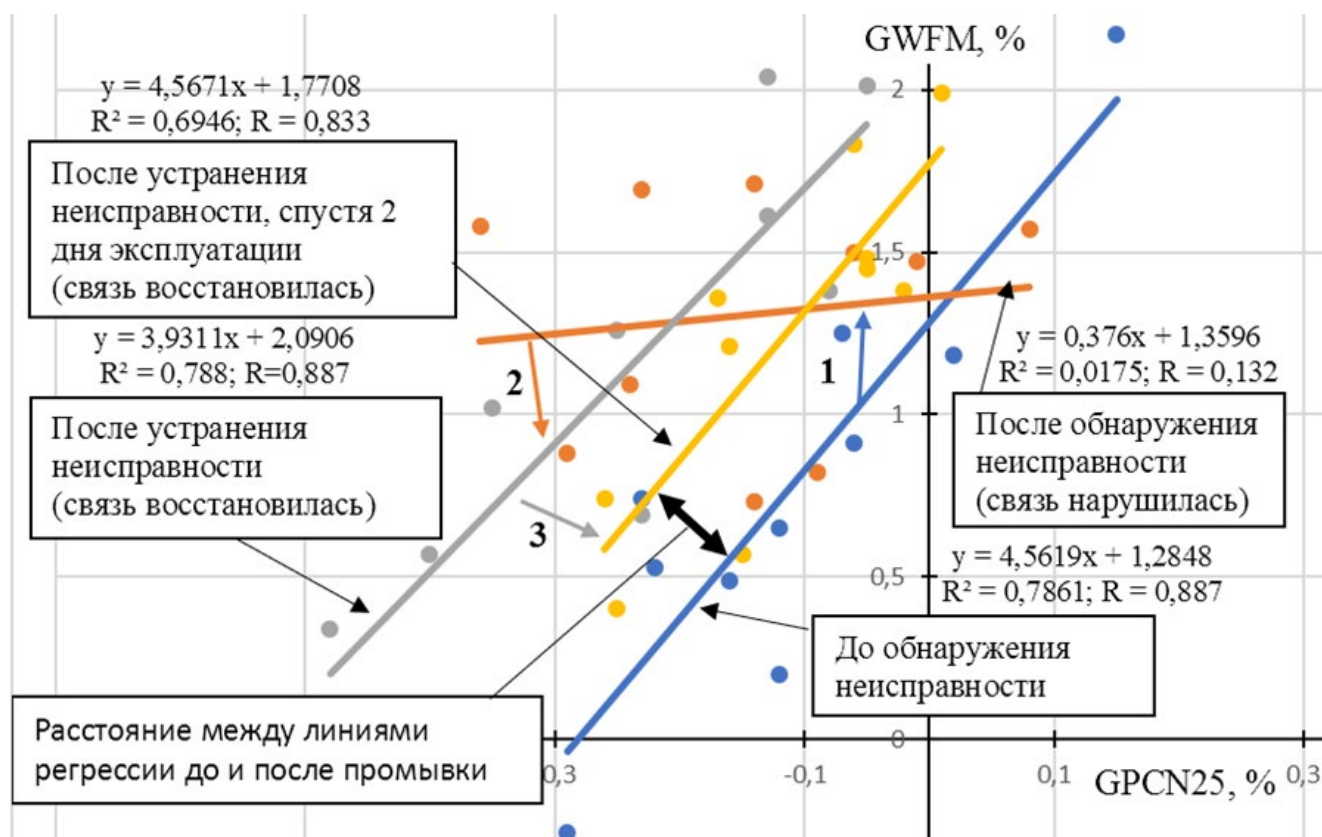


Рис. 9. Изменение регрессионных моделей, описывающих зависимость параметра GWFM (отклонение расхода топлива от базовой линии) от GPCN25 (отклонение оборотов ротора ВД от базовой линии), при разных состояниях проточной части двигателя 2

Fig. 9. Change of regression models describing the dependence of the GWFM parameter (a fuel consumption deviation from the baseline) on GPCN25 (deviation of HP rotor from the baseline) under different states of flow path of the Engine No. 2

наблюдается стабильная связь (о чем свидетельствует значимость коэффициента корреляции $R > R_{кр}$) $R = 0,887$ (синяя линия), после обнаружения загрязнения происходит потеря связи между параметрами ($R = 0,132$ (оранжевая линия)). После выполнения процедуры промывки (устранения неисправности) наблюдается восстановление связи между параметрами ($R = 0,887$ (серая линия)) и смещение линии регрессии влево относительно первоначальной линии до промывки. Данная особенность может быть связана с остатками моющей жидкости в проточной части или некачественно выполненной процедурой. Спустя 2 дня эксплуатации наблюдается тенденция к возвращению линии регрессии к первоначальному положению до промывки (желтая линия).

На рис. 10 показано изменение регрессионных моделей, описывающих зависимости параметров $GWFM = F(GPCN25)$ двигателя 1. Аналогично регрессионным моделям, представленным на рис. 9, до обнаружения загрязнения проточной части наблюдается стабильная связь между параметрами (о чем свидетельствует значимость коэффициента корреляции $R > R_{кр}$) ($R = 0,6744$ (синяя линия)), после обнаружения загрязнения происходит потеря связи между параметрами ($R = 0,132$ (оранжевая линия)). После выполнения процедуры промывки (устранения неисправности) наблюдается восстановление связи между параметрами $R = 0,636$ (серая линия) и смещение линии регрессии влево относительно первоначальной линии до промывки. Данная особенность может быть свя-

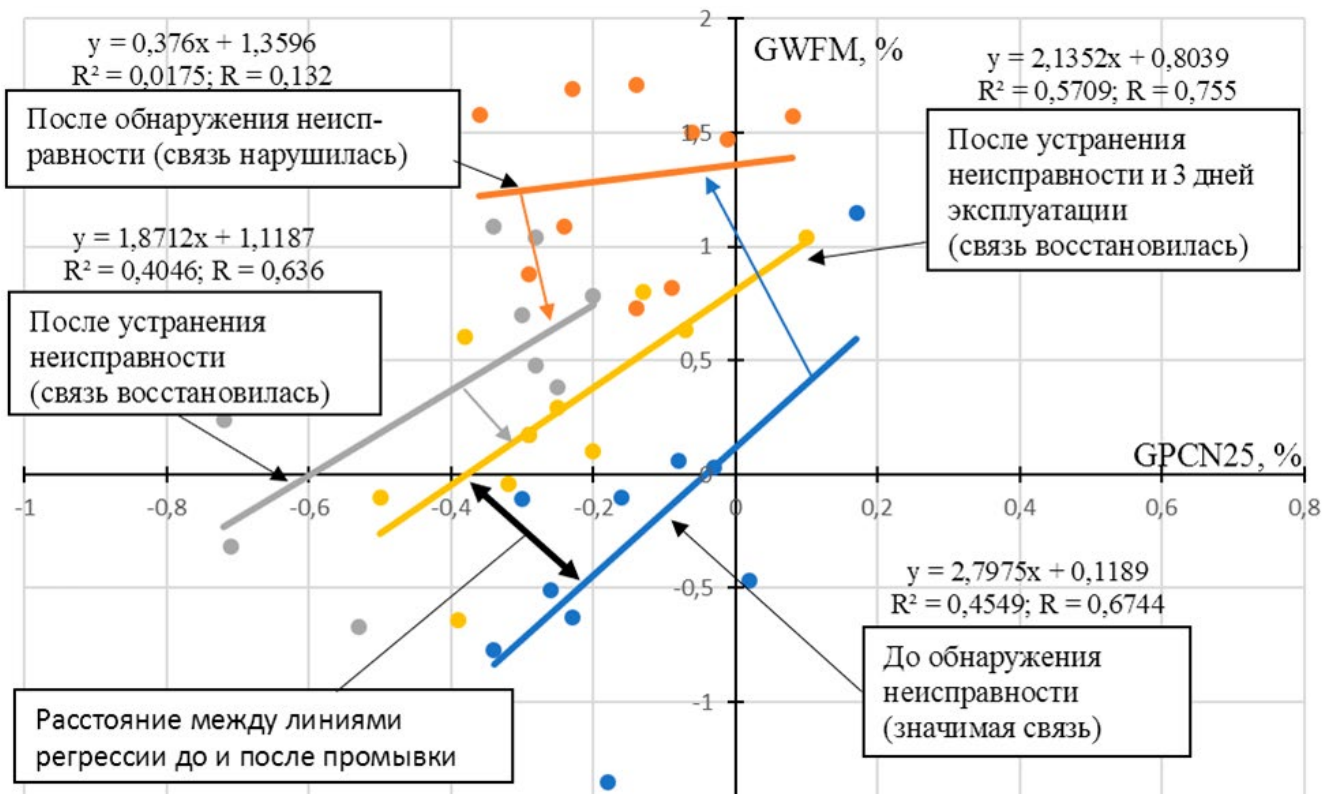


Рис. 10. Изменение регрессионных моделей, описывающих зависимость параметра GWFM (отклонение расхода топлива от базовой линии) от GPCN25 (отклонение оборотов ротора ВД от базовой линии), при разных состояниях проточной части двигателя 1

Fig. 10. Change of regression models describing the dependence of the GWFM parameter (a fuel consumption deviation from the baseline) on GPCN25 (deviation of HP rotor from the baseline) under different states of flow path of the Engine No. 1

зана с влиянием остатков моющей жидкости в проточной части или некачественно выполненной процедурой промывки. Спустя 3 дня эксплуатации наблюдается тенденция возвращения линии регрессии к первоначальному положению до промывки (желтая линия).

В целом из анализа представленных зависимостей следует, что изменение технического состояния проточной части двигателя сопровождается изменением тесноты связей между рассматриваемыми параметрами и изменением положения линии регрессии, используемой в соответствующей модели. О качестве выполненной процедуры промывки проточной части двигателя можно судить по степени возвращения линии регрессии (характеристик регрессионных моделей) к первоначальному положению (исходным характеристикам моделей).

Заклучение

Оценка загрязнения проточной части ТРДД с использованием рассмотренных в статье статистических моделей позволяет установить и подтвердить неисправность «загрязнение проточной части двигателя противообледенительной жидкостью и противогололедными агентами».

Предложен критерий оценки загрязнения проточной части на основании анализа динамики характеристик корреляционных связей между регистрируемыми в процессе эксплуатации и производными от них параметрами. Еще одним критерием изменения технического состояния ТРДД является изменение положения линий регрессионных моделей, описывающих зависимости между регистрируемыми

в эксплуатации параметрами, по отношению к базовой линии регрессии (для заведомо исправного двигателя).

Для случая загрязнения проточной части двигателя типа CFM56-5b противообледенительной жидкостью сформулированы следующие диагностические критерии: потеря корреляционной связи между параметрами GPCN25 (отклонение оборотов ротора ВД от базовой линии) и GWFM (отклонение расхода топлива от базовой линии); смещение линий регрессионных моделей, описывающих зависимость GWFM (отклонение расхода топлива от базовой линии) от DEGT (отклонение значений температуры газов за турбиной от базовой линии), вправо относительно линии, характеризующей исправное состояние двигателя (фактические значения см. в тексте статьи).

Критерием качества выполненной процедуры очистки двигателя от продуктов противообледенительной обработки, может являться степень возвращения линии регрессионной модели к первоначальному положению.

Список литературы

1. **Ночовная Н.А., Никитин Я.Ю.** Современное состояние вопроса в области очистки проточной части компрессора ГТД от эксплуатационных загрязнений [Электронный ресурс] // Труды ВИАМ. 2017. № 3 (51). С. 45–54. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-3-5-5 (дата обращения: 20.08.2024).
2. **Чичков Б.А.** Параметрическая диагностика АД: учеб. пособие. М.: ИД Академии Жуковского, 2018. 84 с.
3. **Verbist M.** Gas path analysis for enhanced aero-engine condition monitoring and maintenance: Doctoral Thesis. Delft University of Technology, 2017. 176 p. DOI: 10.4233/uuid:e1079009-84c2-482d-afe4-e1f9fde0d137
4. **Литвинов Ю.А., Боровик В.О.** Характеристики и эксплуатационные свойства авиационных турбореактивных двигателей. М.: Транспорт, 1979. 288 с.
5. **Ribeiro S.** Implementation of an engine condition monitoring tool for airbus aircraft [Электронный ресурс] // semanticscholar.org. 2015. 10 p. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Implementation-of-an-Engine-Condition-Monitoring-Ribeiro/065452dec758be3cd6c63d9f49a5513f89ee21a0> (дата обращения: 20.08.2024).
6. **Stamatis A.G.** Engine condition monitoring and diagnostics. In book: Progress in Gas Turbine Performance. Greece: University of Thessaly, 2013. Pp. 187–212. DOI: 10.5772/54409
7. **Binner M., Friedrichs J.** MTU – Engine Condition Monitoring (ECM) [Электронный ресурс] // MTU Maintenance, 2009. 22 p. URL: https://files.messe.de/abstracts/34119_MDA_Vortrag_Friedrichs_MTU_230409.pdf (дата обращения: 20.08.2024).
8. **Смирнов Н.Н.** Техническая эксплуатация летательных аппаратов: учебник для вузов. М.: Транспорт, 1990. 423 с.
9. **Šplíchal M., Červenka M., Juracka J.** Engine condition monitoring on small single engine turboprop // Aircraft Engineering and Aerospace Technology. 2023. Vol. 9, no. 9. Pp. 1335–1343. DOI: 10.1108/AEAT-09-2022-0249
10. **Clifton D.** Condition monitoring of Gas-Turbine engines. University of Oxford, 2006. 60 p.
11. **Herzog J.** High performance condition monitoring of aircraft engines / J. Herzog, J. Hanlin, S.W. Wegerich, A.D. Wilks [Электронный ресурс] // Proceedings of GT2005 ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea and Air, 2005. 10 p. DOI: 10.1115/GT2005-68485 (дата обращения: 20.08.2024).
12. **Химмельблау Д.** Анализ процессов статистическими методами / Пер. с англ. В.Д. Скаржинского, под ред. В.Г. Горского. М.: Мир, 1973. 957 с.
13. **Harrell F.E.** Regression modeling strategies with applications to linear models, logistic and ordinal regression, and survival analysis. 2nd ed. Springer Cham, 2015. 582 p. DOI: 10.1007/978-3-319-19425-7
14. **Дрейпер Н., Смит Г.** Прикладной регрессионный анализ. В 2 кн. Кн. 1. М.: Финансы и статистика, 1986. 366 с.

15. Box G.E.P., Hunter J.S., Hunter W.G. Statistics for experimenters: design, discovery, and innovation. 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc., 2005. 672 p.

16. Box G.E.P. Time series analysis: forecasting and control / G.E.P. Box, G.M. Jenkins, G.C. Reinsel, G.M. Ljung. 4th ed. John Wiley & Sons, Inc., 2008. 765 p.

References

1. Nochovnaya, N.A., Nikitin, Ya.Yu. (2017). The current state of the question in the field of cleaning of the compressor gte from operational pollution (review). *Proceedings of VIAM*, no. 3 (51), pp. 45–54. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-3-5-5 (accessed: 20.08.2024). (in Russian)

2. Chichkov, B.A. (2018). Parametric diagnostics of aircraft engine: Tutorial. Moscow: Izdatelskiy Dom Akademii Zhukovskogo, 84 p. (in Russian)

3. Verbist, M. (2017). Gas path analysis for enhanced aero-engine condition monitoring and maintenance: Doctoral Thesis. Delft University of Technology, 176 p. DOI: 10.4233/uuid:e1079009-84c2-482d-afe4-e1f9fde0d137

4. Litvinov, Yu.A., Borovik, V.O. (1979). Characteristics and operational properties of aircraft turbojet engines. Moscow: Mashinostroyeniye, 288 p. (in Russian)

5. Ribeiro, S. (2015). Implementation of an engine condition monitoring tool for airbus aircraft. *Semanticscholar.org*, 10 p. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Implementation-of-an-Engine-Condition-Monitoring-Ribeiro/065452dec758be3cd6c63d9f49a-5513f89ee21a0> (accessed: 20.08.2024).

6. Stamatis, A.G. (2013). Engine condition monitoring and diagnostics. In book: Progress in Gas Turbine Performance. Greece: University of Thessaly, pp. 187–212. DOI: 10.5772/54409

7. Binner, M., Friedrichs, J. (2009). MTU – Engine Condition Monitoring (ECM). *MTU Maintenance*, 22 p. Available at: https://files.messe.de/abstracts/34119_MDA_Vortrag_Friedrichs_MTU_230409.pdf (accessed: 20.08.2024).

8. Smirnov, N.N. (1990). Technical operation of aircraft: a textbook for universities. Moscow: Transport, 423 p. (in Russian)

9. Šplíchal, M., Červenka, M., Juracka, J. (2023). Engine condition monitoring on small single engine turboprop. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, vol. 95, no. 9, pp. 1335–1343. DOI: 10.1108/AEAT-09-2022-0249

10. Clifton, D. (2006). Condition monitoring of Gas-Turbine engines. University of Oxford, 60 p.

11. Herzog, J., Hanlin, J., Wegerich, S.W., Wilks, A.D. (2005). High performance condition monitoring of aircraft engines. In: *Proceedings of GT2005 ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea and Air*, 10 p. DOI: 10.1115/GT2005-68485 (accessed: 20.08.2024).

12. Himmelblay, D.M. (1970). Process analysis by statistical methods. Publisher: John Wiley & Sons Inc, 463 p.

13. Harrell, F.E. (2015). Regression modeling strategies with applications to linear models, logistic and ordinal regression, and survival analysis. 2nd ed. Springer Cham, 582 p. DOI: 10.1007/978-3-319-19425-7

14. Drejper, N., Smit, G. (1986). Applied regression analysis: In 2 books. Book 1. Moscow: Finansy i statistika, 366 p. (in Russian)

15. Box, G.E.P., Hunter, J.S., Hunter, W.G. (2005). Statistics for experimenters: design, discovery, and innovation. 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc., 672 p.

16. Box, G.E.P., Jenkins, G.M., Reinsel, G.C., Ljung, G.M. (2008). Time series analysis: forecasting and control. 4th ed. John Wiley & Sons, Inc., 765 p.

Сведения об авторах

Некрасов Сергей Владимирович, выпускник МГТУ ГА, sergey.nekrasov.999@mail.ru.

Чичков Борис Анатольевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры двигателей летательных аппаратов МГТУ ГА, b.chichkov@mstuca.ru.

Information about the authors

Sergey V. Nekrasov, Graduate of Moscow State Technical University of Civil Aviation, sergey.nekrasov.999@mail.ru.

Boris A. Chichkov, Doctor of Technical Science, Professor, Professor of the Chair of Aircraft Engine Engineering, Moscow State Technical University of Civil Aviation, b.chichkov@mstuca.ru.

Поступила в редакцию	25.11.2024	Received	25.11.2024
Одобрена после рецензирования	29.01.2025	Approved after reviewing	29.01.2025
Принята в печать	25.03.2025	Accepted for publication	25.03.2025

УДК: 629.05

DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-2-35-50

To the analysis of methods and mechanisms of predictive modeling of onboard equipment reliability when solving problems of aircraft maintenance workload planning

**B.I. Ogunvoul¹, V.D. Budaev¹, D.O. Sizikov¹,
N.V. Gorbakon¹, A.V. Vlasova¹**

¹Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

Abstract: The article deals with a method for aircraft maintenance planning based on advanced mathematical modeling techniques. In the course of the research, a mathematical model for forecasting the failure rate of onboard equipment is developed and tested, designed to solve the problems of optimizing decision-making processes for maintenance on the basis of reliability assessment of aviation equipment. The application of Poisson distribution regression in combination with polynomial features allows to reveal the regularities of equipment failures, which depend on operating conditions and maintenance history. For the study, a synthesized dataset was created to simulate different operational scenarios and equipment degradation process. At the first stage, the data were freed from outliers and errors, then normalized to unify the scale of different variables. Next, the data were categorized according to the operating conditions, after which Poisson distribution regression was applied to predict failures. Finally, an efficient maintenance plan that takes into account the predicted failures has been developed using an optimization algorithm. Validation of the model's predictive capabilities and optimization of the maintenance strategy are performed by comparing with archived data on previously performed work. The analysis of the results revealed the peculiarities of the model operation, namely, the application of least squares regression with single coding demonstrates perfect forecasts, which may indicate the need for model transformation and requires additional verification. At the same time, alternative versions of the methodology revealed more realistic error and correlation limits, which also confirms the reliability of the predictive models. The results of the study show that a combined approach using Poisson distribution regression and polynomial signs can significantly improve the accuracy of forecasts. This method, in particular, has demonstrated its effectiveness in modeling onboard equipment failures, which allows to optimize maintenance processes in order to reduce repair costs. The obtained conclusions confirm the possibility of introducing more accurate proactive methods of maintenance planning, which allows to improve aircraft reliability and reduce the inefficiency of their downtime on the ground.

Key words: reliability assessment, aircraft maintenance planning, Poisson distribution regression, predictive modeling of maintenance processes, stochastic processes modeling, operational efficiency, flight safety standards, data-driven maintenance optimization, statistical methods in reliability engineering.

For citation: Ogunvoul, B.I., Budaev, V.D., Sizikov, D.O., Gorbakon, N.V., Vlasova, A.V. (2025). To the analysis of methods and mechanisms of predictive modeling of onboard equipment reliability when solving problems of aircraft maintenance workload planning. Civil Aviation High Technologies, vol. 28, no. 2, pp. 35–50. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-2-35-50

К анализу методов и механизмов прогностического моделирования надежности бортового оборудования при решении задач планирования объемов работ по техническому обслуживанию воздушных судов

**Б.И. Огунвоул¹, В.Д. Будаев¹, Д.О. Сизиков¹,
Н.В. Горбакон¹, А.В. Власова¹**

¹Московский государственный технический университет гражданской авиации, г. Москва, Россия

Аннотация: В статье рассматривается метод планирования технического обслуживания воздушных судов на основе усовершенствованных методов математического моделирования. В ходе исследования разработана и апробирована математическая модель прогнозирования частоты отказов бортового оборудования, предназначенная

для решения задач оптимизации процессов принятия решений по техническому обслуживанию на основе оценки надежности авиационной техники. Применение регрессии распределения Пуассона в сочетании с полиномиальными признаками позволяет выявить закономерности отказов оборудования, которые зависят от условий эксплуатации и предыстории технического обслуживания. Для исследования был создан синтезированный набор данных, моделирующий различные сценарии эксплуатации и процесс деградации оборудования. На первом этапе данные были освобождены от выбросов и ошибок, затем нормализованы для унификации масштабов различных переменных. Далее они были разделены на категории в зависимости от условий эксплуатации, после чего применена регрессия распределения Пуассона для прогнозирования отказов. Наконец, с помощью алгоритма оптимизации был разработан эффективный план технического обслуживания, учитывающий прогнозируемые отказы. Валидация прогностических возможностей модели и оптимизация стратегии технического обслуживания осуществляются путем сопоставления с архивными данными о ранее проведенных работах. Анализ результатов выявил особенности функционирования модели, а именно: применение регрессии методом наименьших квадратов с однократным кодированием демонстрирует идеальные прогнозы, что может свидетельствовать о необходимости преобразования модели и требует дополнительной верификации. В то же время альтернативные варианты методологии позволили выявить более реалистичные пределы погрешности и корреляции, что также подтверждает надежность прогностических моделей. Результаты исследования показывают, что комбинированный подход, использующий регрессию распределения Пуассона и полиномиальные признаки, позволяет значительно повысить точность прогнозов. Этот метод, в частности, продемонстрировал свою эффективность при моделировании отказов бортового оборудования, что позволяет оптимизировать процессы технического обслуживания с целью снижения затрат на ремонт. Полученные выводы подтверждают возможность внедрения более точных упреждающих методов планирования ТО, что дает возможность повысить надежность воздушных судов и снизить неэффективность их простоев на земле.

Ключевые слова: оценка надежности, планирование ТО воздушных судов, регрессия распределения Пуассона, прогностическое моделирование процессов ТО, моделирование стохастических процессов, эксплуатационная эффективность, стандарты безопасности полетов, оптимизация процессов ТО на основе данных, статистические методы проектирования надежности.

Для цитирования: Огунвоул Б.И. К анализу методов и механизмов прогностического моделирования надежности бортового оборудования при решении задач планирования объемов работ по техническому обслуживанию воздушных судов / Б.И. Огунвоул, В.Д. Будаев, Д.О. Сизиков, Н.В. Горбаконь, А.В. Власова // Научный вестник МГТУ ГА. 2025. Т. 28, № 2. С. 35–50. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-2-35-50

Introduction

The aviation industry imposes high requirements on the reliability and safety of flights due to the potential negative consequences of technical failures. Of particular importance is the reliability of aircraft onboard equipment, which has a direct impact on flight safety. Maintenance planning plays a key role in ensuring optimal performance and reliability of aircraft systems. Modern aviation equipment is becoming increasingly complex, which requires the introduction of new, more advanced methods of maintenance planning [1, 2].

One of the most active scientific directions is mathematical modeling, which allows to perform quantitative analysis of onboard equipment reliability taking into account various factors such as failure statistics, operating conditions and applied

maintenance strategies [3–5]. The purpose of this study is to develop a mathematical model that allows estimating the reliability parameters of on-board equipment and facilitating the formation of a maintenance program that meets industry standards for flight safety and operational efficiency [6].

The main objectives of this study are:

- 1) development of a mathematical modeling method for predicting the reliability of aircraft equipment;
- 2) application of the accumulated experience for parameterization of the developed model for the purpose of reliable forecasting of failure rate and volumes of required maintenance.

As part of the literature review, the known research results on different approaches to assessing the reliability of on-board aircraft equipment are considered.

The following sections of the article will examine in detail the mathematical methods used, present the modeling results, and analyze the impact of the developed maintenance planning program on flight safety and the reliability of aircraft operation.

The aviation industry has traditionally paid special attention to reliability issues. Numerous studies demonstrate the effectiveness of statistical methods such as Poisson regression and Weibull analysis for failure prediction [7]. These methods, which have proven their effectiveness in various industries, provide a basis for improving maintenance planning in aviation. The introduction of on-board condition monitoring systems [8, 9] has contributed to the accumulation of significant amounts of operational data, which has opened new prospects for the development of predictive maintenance based on data analysis models [10, 11].

Modern advances in mathematical modeling have led to the development and implementation of more sophisticated methods, including stochastic models, for predicting reliability and determining maintenance requirements for complex systems. These models take into account not only mean time between failures data, but also operational parameters affecting component degradation processes.

Nevertheless, the problem of integrating these models into a comprehensive maintenance planning system that meets the specific requirements of flight safety standards remains relevant. This study aims to solve this problem by synthesizing classical statistical methods with modern approaches of mathematical modeling to develop an effective maintenance planning system.

Principles of analysis and modeling

This section presents a description of the mathematical model developed within the framework of this study. The model is based on the Poisson process, a widely used approach to modeling countable data for rare events, which include technical systems failures [12].

The mathematical model of onboard equipment reliability is based on the time dependence $R(t)$. To calculate the failure rate $\lambda(t)$, the Poisson distribution regression method is used, which is based on statistical analysis of product failures

data. This method helps to predict the probability of product failures depending on the operating time and a number of other factors, and is determined by the following formula

$$\lambda(t) = f(t)/R(t) = \exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k), \quad (1)$$

where $\lambda(t)$ is the expected failure rate, $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ are regression coefficients, and $x_1, x_2, \dots, x_k$ are predictors (e.g., operating hours, operating conditions, etc.).

where $f(t)$ is the probability density function of the time-to-failure distribution.

To calculate $\lambda(t)$, statistical product failures data are used, and the distribution regression parameters are estimated using the maximum likelihood method.

Maintenance planning is formulated as an optimization problem, the goal of which is to minimize the expected downtime $D(t)$, determined by the following formula

$$D(t) = \int_0^t (1 - R(s)) ds, \quad (2)$$

where $R(s)$ is the reliability function at time s .

Maintenance activities are scheduled at times that minimize $D(t)$, taking into account operational constraints.

The Poisson distribution regression method was chosen to analyze rare events such as equipment failures. This method is appropriate when events occur rarely and can be described in terms of a counting process. The advantage of the Poisson distribution regression is its ability to accurately model the relationship between failure rates and flight hours [12].

The dependent variable y_i (number of events) for the i^{th} observation is assumed to obey the Poisson distribution, with λ_i representing both the mean and variance of the distribution for the i^{th} observation.

The relationship between the mean value of λ_i and the predictors is established by means of a log-linear model of the form

$$\log(\lambda_i) = \mathbf{x}_i^T \boldsymbol{\beta}, \quad (3)$$

where $\mathbf{x}_i$ is the vector-string of predictors for the i^{th} observation, $\boldsymbol{\beta}$ is the vector-column of regression coefficients.

This model allows estimating the influence of various factors on the failure rate of onboard equipment.

The basic Poisson distribution regression model is not always accurate enough to solve the research problems. To take into account non-linear dependencies between predictors and response, polynomial functions were added. These functions are created using polynomial transformers that expand the original feature vectors [13]. This approach improves the flexibility and accuracy of the model, especially when analyzing complex and nonlinear relationships. The use of polynomial features contributes to a better fit of the model to the original data and improves the accuracy of predictions, which is critical for predictive maintenance tasks.

The basic statements and assumptions when using polynomial features include:

1) polynomial transformation – for a given set of predictors $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip}]$ polynomial features are formed by generating all possible polynomial combinations of predictors up to a given degree d ;

2) extended feature vector – the initial feature vector x_i is augmented with polynomial terms, for example, for two predictors x_1 and x_2 at degree $d = 2$ the extended feature vector takes the following form

$$\mathbf{x}_i^{(\text{poly})} = [1, x_{i1}, x_{i2}, x_{i1}^2, x_{i1}x_{i2}, x_{i2}^2], \quad (4)$$

where the components of the vector include:

- constant (1);
- linear terms (x_{i1}, x_{i2});
- quadratic terms (x_{i1}^2, x_{i2}^2);
- product of predictors ($x_{i1}x_{i2}$).

The use of an extended feature vector allows to take into account non-linear types of interactions between predictors, which is especially important when analyzing complex systems such as aircraft on-board equipment.

The Poisson distribution regression model uses polynomial signs to account for complex relationships between predictors. The process begins by expanding the feature space, which involves transforming the original data to a higher dimension. The next step is to construct a logarithmic linear model taking into account the new features,

and estimate the parameters using the maximum likelihood method (MLE). This approach allows taking into account more complex dependencies between variables, improves the accuracy of forecasts and has the following form

$$\log(\lambda_i) = \mathbf{x}_i^{(\text{poly})T} \boldsymbol{\beta}_i, \quad (5)$$

where $\mathbf{x}_i^{(\text{poly})}$ is the extended polynomial feature vector.

To optimize computing resources and simplify the implementation, the mathematical model with polynomial features is limited to the second degree. Let us consider in more detail the mathematical description of the model with polynomial features of the second degree, which includes:

1. Initial vector of predictors

$$\mathbf{x}_i = [1, x_{i1}, x_{i2}]. \quad (6)$$

2. Extended polynomial feature vector (degree $d = 2$)

$$\mathbf{x}_i^{(\text{poly})} = [1, x_{i1}, x_{i2}, x_{i1}^2, x_{i1}x_{i2}, x_{i2}^2]. \quad (7)$$

3. Logarithmic linear model with polynomial features

$$\log(\lambda_i) = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \beta_3 x_{i1}^2 + \beta_4 x_{i1}x_{i2} + \beta_5 x_{i2}^2. \quad (8)$$

4. Linear predictor expressed through polynomial signs

$$\eta_i = \log(\lambda_i) = \mathbf{x}_i^{(\text{poly})T} \boldsymbol{\beta} = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \beta_3 x_{i1}^2 + \beta_4 x_{i1}x_{i2} + \beta_5 x_{i2}^2. \quad (9)$$

5. Mean value (and at the same time dispersion) of the Poisson distribution

$$\lambda_i = \exp(\eta_i). \quad (10)$$

6. Logarithmic likelihood function for the Poisson distribution regression model logarithmic likelihood is defined by the following expression

$$\log L(\boldsymbol{\beta}_i) = \sum_{i=1}^n [y_i \log(\lambda_i) - \lambda_i - \log(y_i!)]. \quad (11)$$

Substituting the expression for λ_i from equation (11) into equation (12), we obtain the expanded form of the logarithmic likelihood function of the form

$$\log L(\beta_i) = \sum_{i=1}^n \left[y_i \left(\mathbf{x}_i^{(\text{poly})T} \beta_i \right) - \exp \left(\mathbf{x}_i^{(\text{poly})T} \beta_i \right) - \log (y_i!) \right]. \quad (12)$$

7. Maximum likelihood estimation (MLE), in which the coefficients β_i are estimated by maximizing the logarithmic likelihood function using a formula of the form

$$\hat{\beta}_i = \arg \max_{\beta} \log L(\beta_i). \quad (13)$$

The maximum likelihood β method allows to find the optimal values of the coefficients β_i , which most fully correspond to the observed data, which provides a reliable basis for predicting the failure rate of onboard equipment, taking into account the nonlinear interactions between the factors.

Thus, the Poisson distribution regression model with polynomial signs allows to take into account non-linear dependencies between predictors and failure rate of onboard equipment. This approach is especially effective when analyzing complex technical systems, where interrelations between factors may be more complicated.

The choice of polynomial features of the second degree is conditioned by the desire to balance between increasing the accuracy of the model and refusal from retraining the program. Polynomials of the second degree allow to take into account nonlinear dependencies, while preserving the interpretability of the model.

Extending the feature space to second degree polynomials provides a compromise between the complexity of the model and its ability to reflect nonlinear interactions. This makes it possible to improve the accuracy of failure prediction without excessive complication of computational processes.

When applying this model to the tasks of forecasting the technical condition of aviation equipment, the following aspects should be taken into account:

1. Predictor selection – the parameters most relevant to assessing the reliability of specific systems and components must be carefully selected.

2. Interpretation of the coefficients – polynomial terms complicate the direct interpretation of the coefficients, so it is important to analyze their combined effect on the predicted failure rate.

3. Model validation – requires rigorous testing of the model against independent data to assess its predictive ability under real-world operating conditions.

4. Consideration of operational factors – the model should adapt to different equipment operating modes and aircraft operating conditions.

The application of the described methodology allows to create a flexible tool for predicting the reliability of onboard equipment, which in turn also contributes to the optimization of maintenance processes and improvement of flight safety.

The process of optimization of maintenance planning is based on the following criteria:

1. Minimization of total aircraft downtime.

2. Minimization of the intervals between maintenance forms.

3. Minimization of total maintenance costs.

4. Ensuring the required level of component reliability.

These criteria are taken into account in the objective function of the optimization procedure with appropriate weighting coefficients.

Data preparation

The data preparation process is a key step in the study to ensure the validity and correctness of the subsequent analysis. The methodology involves several steps of transforming raw statistical data on maintenance into a structured data set suitable for Poisson distribution regression analysis and predictive modeling.

1. Data Collection – complete maintenance logs and records of failure events for the annual period of operation of various aircraft components, from critical systems to support equipment are collected.

2. Data cleaning – a comprehensive processing of the original data set is carried out, including:

– identifying and eliminating outliers using statistical z-score analysis;

– processing missing values by interpolation methods based on nearby data points;

– correction of input errors and standardizing of component classification.

3. Data Transformation – continuous time-to-failure data is converted into discrete failure count intervals to prepare for Poisson regression.

4. Data Normalization – minimax normalization is carried out with respect to time-to-failure indicators to ensure comparability of data across different components, regardless of their usage.

5. Categorization – classification of components according to their criticality for aircraft operation, taking into account their functional role and the impact of failures on flight safety.

6. Generating the final dataset – the dataset prepared for the software is structured to reflect the failure cases of each component based on operating hours and operating conditions.

The result of this process is a comprehensive dataset that provides a robust basis for subsequent regression analysis of the Poisson distribution and predictive maintenance modeling. A sample data-

set with different components is presented in Table 1.

Table 1 presents mean time between failures of the aircraft, number of failures, operating conditions and maintenance activities taken for the different component types during 2020, they provide a reliable basis for the presented analysis.

Preparation of data for modeling also includes:

1. Data cleaning to ensure the integrity and reliability of the dataset, including:

a) deviation detection and elimination, in which, using the inter-quartile range (IQR) method, deviations were identified and excluded from further analysis: mean time between failures and the number of failures that were 1.5 times greater the IQR from the quartiles;

Table 1

Dataset sample with diverse components

Component	MTBF	Number of failures	Operating conditions	Maintenance activities	Date of incident
Comp_A	3034.80	1	Extreme	Repair	2020-08-14
Comp_B	4369.73	3	Normal	Inspection	2020-04-08
Comp_B	710.00	3	Severe	Inspection	2020-07-19
Comp_B	2527.25	5	Normal	Repair	2020-12-25
Comp_C	907.73	2	Severe	Repair	2020-02-02
Comp_C	603.78	1	Extreme	Repair	2020-02-10
Comp_C	4924.54	3	Severe	Repair	2020-08-03
Comp_C	1547.47	4	Severe	Repair	2020-09-24
Comp_C	4881.90	3	Severe	Repair	2020-11-23
Comp_D	2221.08	0	Extreme	Repair	2020-03-02
Comp_D	2234.37	3	Normal	Inspection	2020-04-10
Comp_D	3561.38	1	Severe	Inspection	2020-06-20
Comp_D	559.69	5	Normal	Inspection	2020-08-01
Comp_D	3252.44	1	Severe	Replacement	2020-09-17
Comp_E	2861.49	3	Severe	Repair	2020-01-28
Comp_E	4739.91	5	Severe	Inspection	2020-02-04
Comp_E	3282.74	5	Extreme	Inspection	2020-02-17
Comp_E	2299.37	3	Severe	Repair	2020-05-14
Comp_E	531.80	4	Normal	Repair	2020-08-18
Comp_E	2600.43	1	Extreme	Inspection	2020-10-19

b) calculation of missing values, in which a linear interpolation method was used to provide a complete data set for analysis.

2. Data transformation for their adaptation and regression of the Poisson distribution, for which the following transformations were implemented:

a) The distribution of mean time between failures, with continuous mean time between failures distributed among cells to facilitate modeling of the number of failures within these intervals;

b) number of failures – was directly used as a response parameter in the Poisson distribution regression model, which met the requirements for its formation.

3. The data was normalized in the Python programming language using the Scipy library. The code is as follows

```
def min_max_normalize(data): return (data - data.min()) / (data.max() - data.min())  
normalized_data = min_max_normalize(data).
```

This allowed the mean time between failures to be between 0 and 1, which allowed for a standardized scale for the different components.

4. Categorization of components by classification based on their criticality to aircraft operation, in particular:

a) critical components – engines and avionics that directly affect the safety and operational capabilities of the aircraft [14];

b) non-critical components – interior lighting and passenger entertainment systems whose failures have an insignificant impact on overall safety.

5. The final dataset was carefully assembled to ensure that all pre-processing steps were accurately reflected. This dataset formed the basis for a Poisson regression analysis and subsequent predictive maintenance modeling to provide insight into the failure patterns and maintenance needs of aircraft onboard equipment.

6. Application of Poisson distribution regression analysis to model aircraft component failure rates. The choice of Poisson distribution regression is due to its adequacy for analyzing count data typical for reliability studies.

The model is expressed as

$$\log(\lambda_i) = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \dots + \beta_n X_{ni}, \quad (14)$$

where λ_i is the expected failure rate of the component i , $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$ coefficients reflecting the influence of the variables $X_1, \dots, X_n$ on the failure rate.

Stages of regression analysis:

1. Variable selection:

– the dependent variable is the number of failures;

– independent variables are operating hours, operating conditions, maintenance activities;

2. Data Coding:

– operating conditions – “Normal” = 0, “Severe” = 1, “Extreme” = 2;

– maintenance activities – “Inspection” = 0, “Repair” = 1, “Replacement” = 2.

3. The model is $\log(\lambda) = \beta_0 + \beta_1 \times \text{Operating time} + \beta_2 \times \text{Operating condition} + \beta_3 \times \text{Maintenance measures}$;

4. To estimate the model parameters, the maximum likelihood method is applied to estimate the coefficients β .

5. When interpreting the results, it is important to take into account that the analysis of β coefficients allows to evaluate the influence of each factor on the failure rate. A positive coefficient indicates an increase in the failure rate with the growth of the corresponding parameter.

The presented approach also provides a reliable basis for predicting the failure rate of onboard equipment and optimizing maintenance strategies.

Algorithm for optimization of maintenance planning

The main goal of optimization is to minimize equipment downtime and maintenance costs while ensuring the required level of reliability and flight safety [15].

Optimization Criteria:

1. The objective function is qualitatively a combination of expected downtime due to failures and preventive maintenance costs:

– downtime cost (the product of the average downtime per failure event and the associated cost per hour of downtime);

– maintenance costs (the cost of each type of maintenance activities (inspection, repair, replacement)).

2. Restrictions:

- frequency of maintenance (established intervals (forms) of maintenance, taking into account technological schedules and availability of required resources);

- resource constraints (limits on the number of maintenance activities in a given period);

- regulatory requirements (compliance with safety and regulatory standards).

3. The genetic variant of the algorithm is chosen because it efficiently handles nonlinear problems containing many constraints.

The genetic algorithm generates and evaluates different variants of maintenance plans, iteratively improving their performance with respect to downtime and actual costs.

4. Analysis of the optimized maintenance process schedule involving evaluation of the resulting plan according to the criteria:

- efficiency (reduction of expected downtime and maintenance costs);

- feasibility (compliance with operational and regulatory requirements);

- improvement potential (identification of components or periods for further optimization).

In practice, based on a synthetic dataset, the optimization algorithm takes into account the failure rate of each component and maintenance statistics, for example, more frequent preventive maintenance may be recommended for components with high failure rates in harsh operating conditions.

The result of optimization is a maintenance plan that balances equipment reliability, operating costs and compliance with regulatory safety requirements.

The algorithm can show that product Comp_C that exhibits a high failure rate in harsh conditions significantly benefits from preventive replacement every 1000 hours of operation, reducing the total downtime by 20% compared to the existing schedule.

This detailed approach allows to determine how a genetic algorithm can be used to develop an optimal maintenance plan, significantly improving the efficiency of maintenance processes and equipment reliability based on comprehensive synthetic data analysis.

Model Adequacy Testing

To evaluate the effectiveness of the model, its predictions are compared with actual equipment failure data, using two main metrics:

- Root Mean Square Error (RMSE) – measures the accuracy of the predictions;

- Pearson Correlation Coefficient – measures the strength of the relationship between predicted and actual values. The following are provided:

Step 1. Cross-Validation Setup.

Cross-validation is used to evaluate the predictive performance of the model, where the dataset is divided into a training set (80%) used to develop the model and a test set (20%) used to evaluate its predictions. This division ensures that the model is tested on the data by simulating real-world forecasting scenarios.

Step 2. Model Performance Metrics.

Several metrics are used to quantify the accuracy and reliability of the model. These include:

1. Root Mean Square Error (RMSE), to measure the root mean square of prediction errors, providing an indication of the accuracy of the model by a formula of the following form

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}, \quad (15)$$

where y_i is the current failure value, $\hat{y}_i$ is the predicted failure rate, and n is the number of observations on the test set.

2. Pearson correlation coefficient (r), which estimates the linear correlation between the actual and predicted failures rate using the formula of the following form

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2}}, \quad (16)$$

where $\bar{y}$ and $\bar{\hat{y}}$ are the mean values of current and predicted failures, respectively.

Step 3. Applying the model to the test set.

The parameters of the Poisson distribution regression model are estimated on the training dataset, after which the model is applied to the test set

to predict the number of failures. These predictions are then used to evaluate the performance of the model using the metrics defined above (Step 2).

Step 4. Evaluation of the optimization algorithm.

The effectiveness of the optimization algorithm is evaluated by implementing the optimized maintenance plan on a test plant and observing the resulting changes in failure rate and maintenance costs.

The optimized maintenance plan is compared to the actual plan used during the test period, assessing differences in performance and cost effectiveness.

Step 5. Statistical analysis to validate model predictions, including:

1. Significance testing using statistical tests such as the chi-squared test, which are used to determine whether differences between actual and predicted failure rates are statistically significant.

2. Calculating confidence intervals for Pearson correlation coefficients and root mean square error to quantify the uncertainty of model performance metrics.

Step 6. Validation.

The reliability of the results is assessed by analyzing the numerical performance metrics of the model. The main criteria include the root mean square error of prediction (RMSE), the Pearson correlation coefficient between actual and predicted values, as well as an assessment of the economic efficiency of the optimized maintenance plan.

Comparing model predictions with actual data allows to determine:

- accuracy of prediction failures of the aviation equipment product;
- effectiveness of the proposed maintenance strategy;
- the potential for further improvement of the model.

Regular updating of the model based on new operational data will ensure that its predictive ability is maintained with the required level of accuracy.

The results of the analysis are of key importance for improving the methodology of predict-

ing the technical condition of aviation equipment products.

The application of the developed Poisson distribution regression models with polynomial features contributes to improving the accuracy of failure prediction, optimizing maintenance intervals and minimizing the risks of random failures of critical systems. This study makes a significant contribution to the development of the predictive maintenance concept in the aviation industry, which ultimately leads to improved flight safety and aircraft operational efficiency.

One of the key areas of applications of predictive models is the optimization of maintenance schedules. Accurate failure rate predictions help to determine the optimal timing of maintenance activities, ensuring that components are serviced before they fail. This proactive approach minimizes unexpected downtime and improves the efficiency of aircraft maintenance processes. By planning maintenance based on actual data rather than fixed intervals, airlines can reduce unnecessary maintenance costs and improve the overall reliability of their fleet.

The developed models facilitate decision making based on up-to-date operational data. This will allow maintenance planners to optimally allocate resources by focusing on critical components with a high probability of failure in the near future. This approach will improve maintenance efficiency and ensure timely maintenance of critical aircraft systems.

The article emphasizes the importance of model validating by comparing its predictions with actual maintenance statistics data. This verification process ensures the reliability and accuracy of the model predictions. Regularly updating the model using new operational data allows for continuous improvement of its predictive capabilities, leading to a constant improvement in the quality of maintenance planning and execution.

Thus, the results of the Poisson distribution regression and polynomial analysis provide useful information to help to plan maintenance, optimize resource allocation, reduce costs and improve the overall reliability and safety of aircraft operation. These models help to avoid the

occurrence of unexpected events through a proactive maintenance strategy, ensuring that aviation products are maintained at the highest level of technical condition.

The dependencies presented in Figures 1–4 show the expected number of failures at a given operating time of products in the process of technical operation. The results are obtained by applying various methods of predicting the technical condition of products under expected operating conditions. Using each method, the mean square errors and Pearson correlation coefficients were estimated for the data set from Table 1.

Figure 1 shows a weak positive correlation between operating time and failure rate. The basic Poisson regression model shows a significant spread of predicted values relative to actual data, which is reflected in a high error (RMSE: 1.446) and low correlation (0.162).

Figure 2 shows the improvement in prediction accuracy due to the inclusion of nonlinear dependencies. The addition of polynomial features allowed the model to more accurately track changes

in the number of failures at different operating hours, as evidenced by a decrease in RMSE to 1.146 and an increase in correlation to 0.240.

Figure 3 shows a complete coincidence of the predicted values with the actual data. The single-coded least squares method demonstrates unrealistically accurate prediction of the expected number of failures at any operating time (RMSE: $5.03e-14$, correlation: 1.0), which indicates the need to change the data set for machine training of the model.

Figure 4 shows the results after removing the non-numerical parameters from the model. The dependence between operating time and number of failures becomes more realistic, with a moderate spread of predicted values (RMSE: 1.391, correlation: -0.319), which more fully corresponds to the real processes of technical operation.

Table 2 presents the results of the evaluation of the effectiveness of the proposed research methods. For approbation of the research results, the detailed mathematical formulation

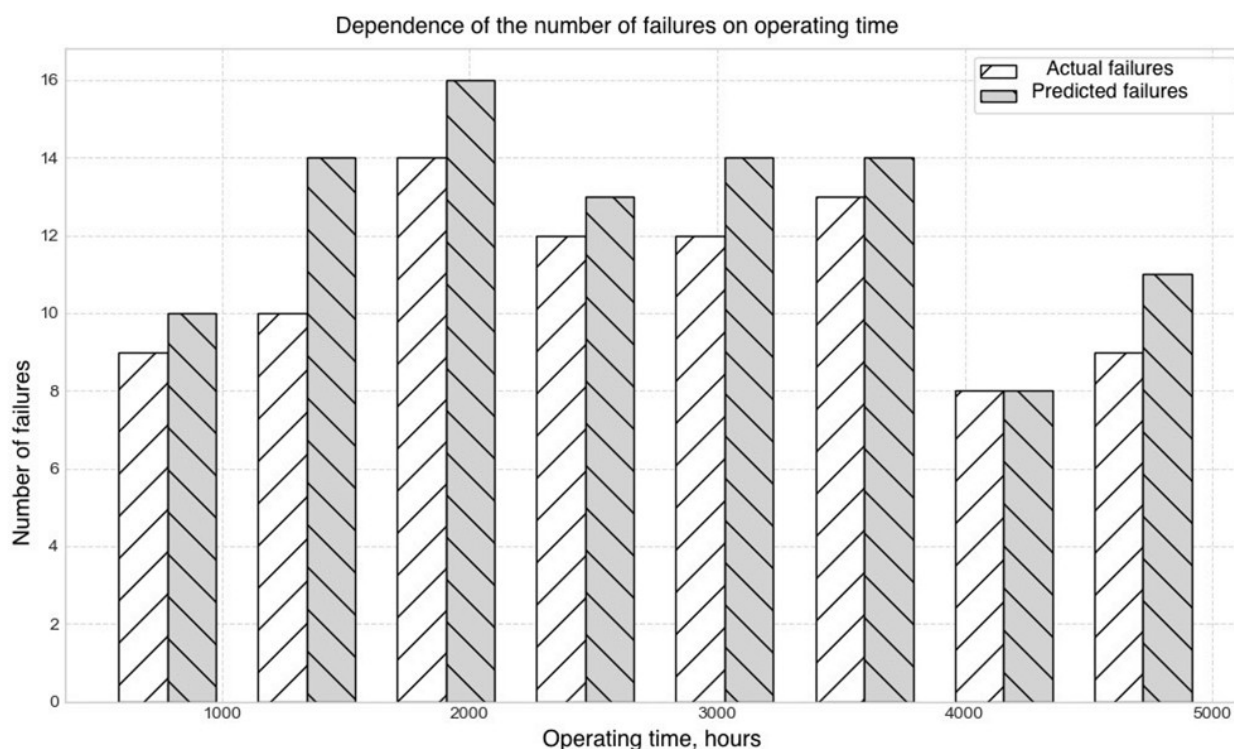


Fig. 1. Dependence of the number of failures on operating time using Poisson distribution regression.
RMSE: 1.446000013304307; Pearson Correlation Coefficient: 0.1624522626478234

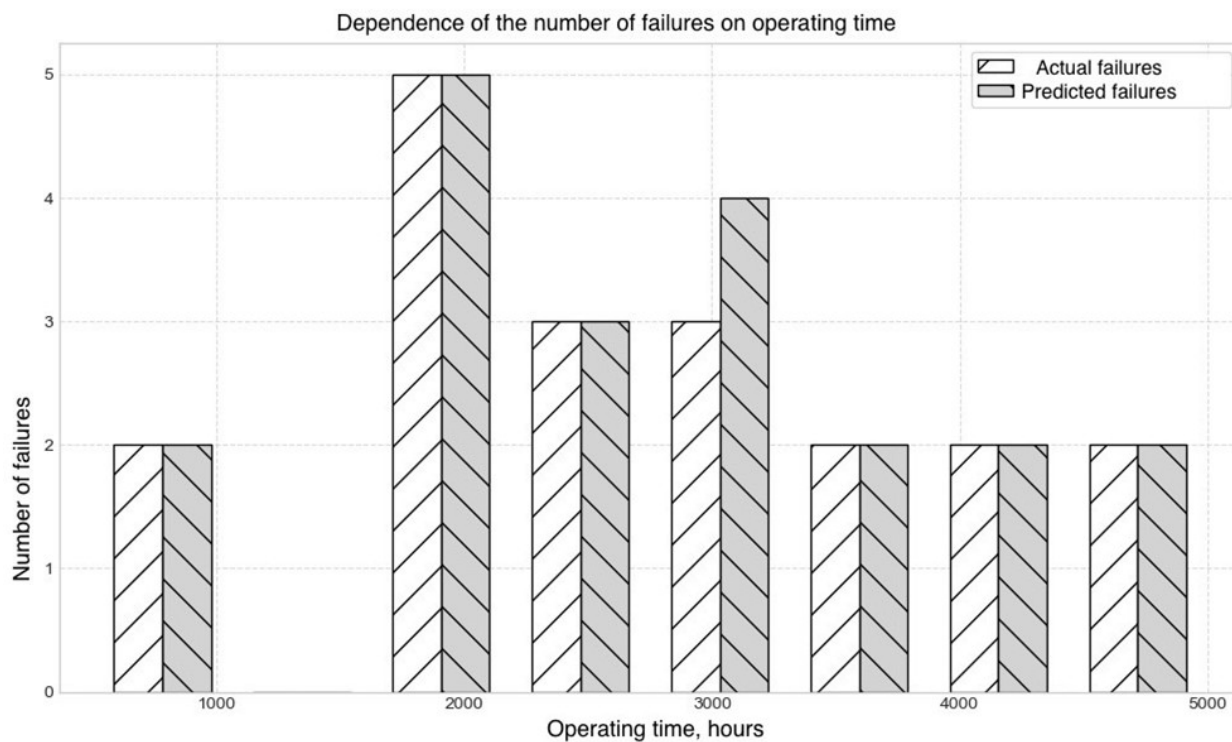


Fig. 2. Failures prediction using polynomial features in the Poisson distribution regression model.
RMSE: 1.1465954900923936; Pearson Correlation Coefficient: 0.240611370124739

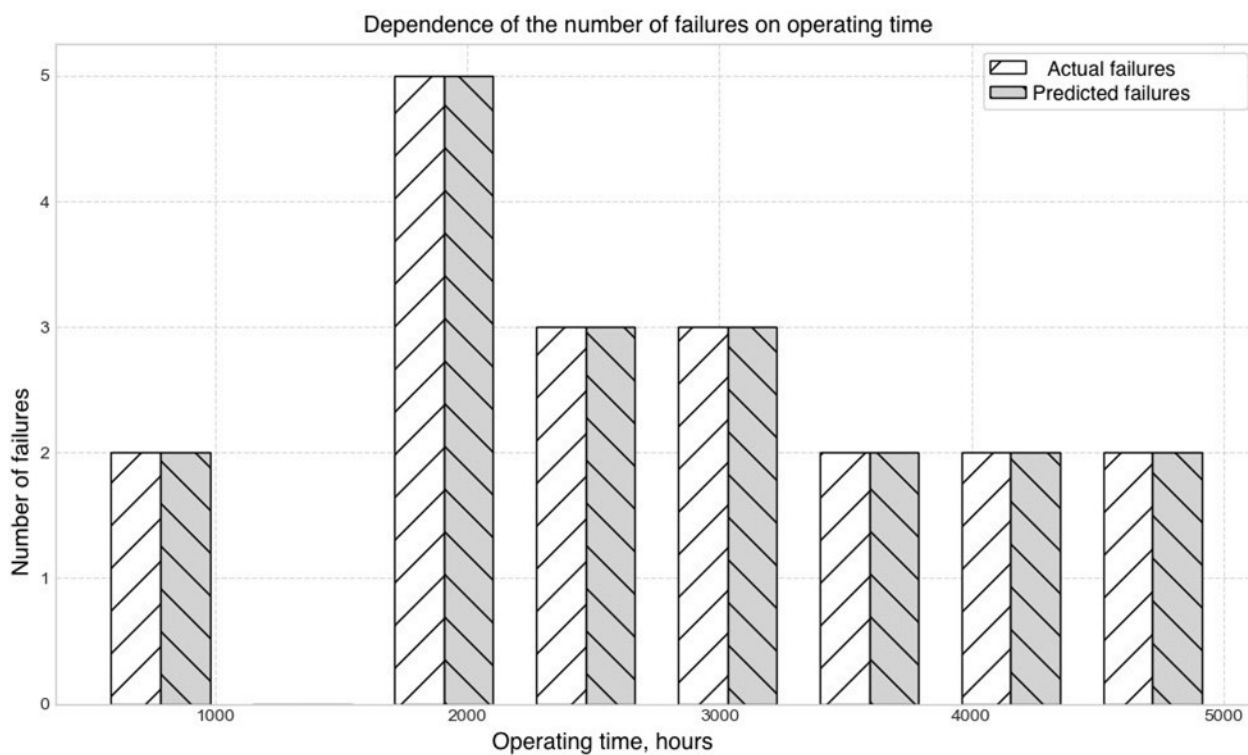


Fig. 3. Least squares simulation of failures with single encoding.
RMSE: 5.034734662940756e-14; Pearson Correlation Coefficient: 1.0

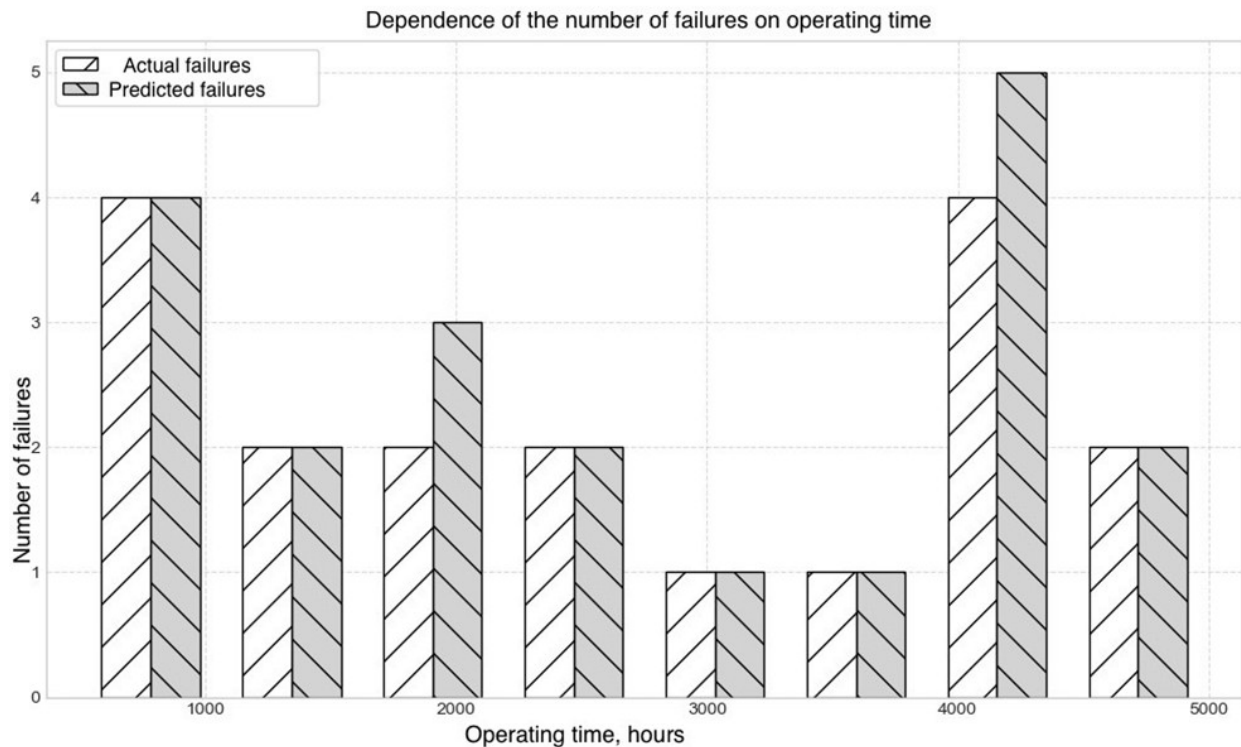


Fig. 4. The results of predicting failures using the least squares method after removing non-numeric parameters.
RMSE: 1.3905425046960287; Pearson Correlation Coefficient: -0.3194427708423738

Table 2

Research methodology effectiveness

Code file	Methodology	Model used	RMSE	Pearson correlation coefficient
danyaplug2.py	Poisson distribution regression (fig. 1)	Generalized linear model	1.446000013304307	0.16245226264782342
danyaplug3.py	Polynomial signs (fig. 2)	Poisson distribution regression	1.1465954900923936	0.240611370124739
danyaplug4.py	Single coding (fig. 3)	Least squares regression	5.034734662940756e-14	1.0
danyaplug5.py	Single coding with removal of non-numeric columns (fig. 4)	Least squares regression	1.3905425046960287	-0.3194427708423738

of the proposed methods in the form of program codes has been placed in cloud storage.¹

¹ Detailed mathematical formulation of the proposed methods in the form of Python program codes. *Yandex disk*. Available at: <https://disk.yandex.ru/d/1IUjY12SX4nmug> (accessed: 02.04.2025). (in Russian)

Comparative analysis of the results shows that the Poisson distribution regression method with polynomial features (danyaplug3.py, fig. 2) demonstrates the best balance between accuracy (RMSE = 1.146) and generalization ability (correlation coefficient = 0.240). The single-coded least squares method (danyaplug4.py, fig. 3)

shows suspiciously perfect results, which may indicate model overfitting.

Abnormally high results for the least squares method with single coding ($RMSE \approx 5.03e-14$, correlation coefficient = 1.0) indicate probable overfitting of the model. This may be due to the fact that the model has adjusted too accurately to the features of the synthetic data, losing its generalization ability. In real conditions, such results are unlikely and require additional verification on an array of independent data.

Conclusion

1. Quantitative analysis of the performance of the prediction methodologies showed significant differences in the accuracy of the models. The basic regression of Poisson distribution demonstrated $RMSE = 1.446$ and Pearson correlation coefficient equal to 0.162. The introduction of polynomial signs led to improvement of indicators: $RMSE$ decreased to 1.146, correlation coefficient increased to 0.240, which confirms the effectiveness of polynomial signs application for modeling of nonlinear dependencies in the processes of technical operation of an aviation product.

2. The single-coded least-squares regression method showed statistically abnormal results ($RMSE \approx 5.03e-14$, correlation coefficient = 1.0), indicating the overfitting of the model on synthetic data. This effect requires the implementation of regularization and cross-validation methods to improve the generalizing ability of the model.

3. Application of the Poisson distribution regression model with polynomial signs of the second degree provides an optimal balance between the complexity of the model and its ability to reflect nonlinear interactions in the processes of technical operation of the aviation product, which is confirmed by the improvement of prediction accuracy indicators.

4. The main limitation of this study is the use of synthetic data, which does not fully reflect the complexity and variability of real aircraft maintenance processes. In particular, synthetic data do not take into account all possible anomalies and rare cases of failures, which may lead to distortion of modeling results.

5. The results of the study confirm the effectiveness of using Poisson distribution regression with polynomial signs for predicting failures of aviation product. At the same time, the revealed limitations of synthetic data indicate the necessity of model validation on real operational data.

6. The practical significance of the developed models lies in the possibility of their integration into the aircraft maintenance program to predict failures of aviation product and optimize maintenance and repair works, which potentially contributes to the reduction of operating costs and improvement of flight safety.

7. To overcome the identified limitations, it is further necessary to:

- Conduct model validation on real operational data;
- Implement regularization methods to prevent overfitting;
- Develop mechanisms for model adaptation to different aviation product types and operating conditions;
- Explore the possibilities of integrating additional factors into the model to improve prediction accuracy.

References

1. Aleksanyan, A.R., Itskovich, A.A., Faynburg, I.A. (2014). The method of integrated logistics support when forming procedures for maintenance of aircraft airworthiness. *Nauchnyy vestnik MGTU GA*, no. 205, pp. 22–27. (in Russian)
2. Sizikov, D.O. (2024). Method of time series analysis and its mathematical model in software. *International Research Journal*, no. 3 (141). DOI: 10.23670/IRJ.2024.141.5 (accessed: 02.04.2025).
3. Itskovich, A.A., Faynburg, I.A., Aleksanyan, A.R. (2015). Methodological aspects of software processes management of the airworthiness of aircraft. *Nauchnyy vestnik MGTU GA*, no. 219, pp. 12–19. (in Russian)
4. Kuznetsov, S.V. (2015). Processes and systems of avionics technical operation as Markov and Semimarkov processes mathematical

models. *Nauchnyy vestnik MGTU GA*, no. 213, pp. 28–33. (in Russian)

5. **Kuznetsov, S.V.** (2017). Avionics technical operation system and scientific basis for its formation. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 20, no. 6, pp. 15–24. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-6-15-24 (in Russian)

6. **Bukirev, A.S., Savchenko, A.Y., Yatsecenko, M.I., Malyshev, V.A.** (2020). Diagnostic system for the technical condition of the aircraft avionics complex based on intelligent information technologies. *Modeling, Optimization and Information Technology*, vol. 8, no. 1 (28). DOI: 10.26102/2310-6018/2020.28.1.010 (accessed: 02.04.2025). (in Russian)

7. **Bühlmann, P., Van De Geer, S.** (2011). Statistics for high-dimensional data: methods, theory and applications. Springer Science & Business Media, 558 p.

8. **Zasukhin, A.S., Budaev, V.D., Sizikov, D.O., Sadegzade, S.H.** (2021). Evaluating two navigation systems error deviation algorithm. *Vestnik of Russian new university. Series: complex systems: models, analysis, management*, no. 4/1, pp. 3–13. DOI: 10.18137/RNU.V9187.21.04/1.P. 003 (in Russian)

9. **Kuznetsov, S.V.** (2023). Characteristics of operational control reliability of aircraft functional systems and avionics suites. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 26, no. 6, pp. 58–74. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-6-58-74 (in Russian)

10. **Ying, X.** (2019). An overview of overfitting and its solutions. *Journal of physics: Conference series*, vol. 1168, issue 2, ID: 022022. DOI: 10.1088/1742-6596/1168/2/022022 (accessed: 02.04.2025).

11. **Montesinos López, O.A., Montesinos López, A., Crossa, J.** (2022). Overfitting, model tuning, and evaluation of prediction performance. In book: *Multivariate Statistical Machine Learning Methods for Genomic*. Cham: Springer International Publishing, pp. 109–139. DOI: 10.1007/978-3-030-89010-0_4

12. **Muñoz-Pichardo, J.M., Pino-Mejías, R., García-Heras, J., Ruiz-Muñoz, F., González-Regalado, M.L.** (2021). A multivariate Poisson regression model for count data. *Journal*

of Applied Statistics, vol. 48, no. 13–15, pp. 2525–2541. DOI: 10.1080/02664763.2021.1877637

13. **Heaton, J.** (2016). An empirical analysis of feature engineering for predictive modeling. In: *SoutheastCon 2016*. Norfolk, VA, USA, 6 p. DOI: 10.1109/SECON.2016.7506650 (accessed: 02.04.2025).

14. **Fourar, H.E., Ogunvoul, B.D., Budaev, V.D., Lachi, F.** (2020). Risk assessment in ensuring aircraft on-board systems safety. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 23, no. 4, pp. 84–95. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-4-84-95 (in Russian)

15. **Budaev, V.D.** (2024). Methods of optimization of aircraft fleet maintenance planning. *International Research Journal*, no. 7 (145). DOI: 10.60797/IRJ.2024.145.6 (accessed: 02.04.2025).

Список литературы

1. **Алексанян А.Р., Ицкович А.А., Файнбург И.А.** Интегрированная логистическая поддержка формирования процедур поддержания летной годности воздушных судов // Научный вестник МГТУ ГА. 2014. № 205. С. 22–27.

2. **Сизиков Д.О.** Метод анализа временных рядов и его математическая модель в программном обеспечении [Электронный ресурс] // Международный научно-исследовательский журнал. 2024. № 3 (141). DOI: 10.23670/IRJ.2024.141.5 (дата обращения: 02.04.2025).

3. **Ицкович А.А., Файнбург И.А., Алексанян А.Р.** Методологические аспекты программного управления процессами поддержания летной годности воздушных судов // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 219. С. 12–19.

4. **Кузнецов С.В.** Математические модели процессов и систем технической эксплуатации авионики как марковские и полумарковские процессы // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 213 (3). С. 28–33.

5. **Кузнецов С.В.** Система технической эксплуатации авионики и научные основы ее формирования // Научный вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 6. С. 15–24. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-6-15-24

6. Букирев А.С. Система диагностики технического состояния комплекса бортового оборудования воздушного судна на основе интеллектуальных информационных технологий / А.С. Букирев, А.Ю. Савченко, М.И. Яцечко, В.А. Малышев [Электронный ресурс] // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2020. Т. 8, № 1 (28). DOI: 10.26102/2310-6018/2020.28.1.010 (дата обращения: 02.04.2025).

7. Bühlmann P., Van De Geer S. Statistics for high-dimensional data: methods, theory and applications. Springer Science & Business Media, 2011. 558 p.

8. Засухин А.С. Исследование алгоритма оценки погрешности отклонения двух навигационных систем / А.С. Засухин, В.Д. Будаев, Д.О. Сизиков, С.Х. Садегзаде // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2021. № 4/1. С. 3–13. DOI: 10.18137/RNU.V9187.21.04/1.P. 003

9. Кузнецов С.В. Характеристики достоверности эксплуатационного контроля функциональных систем и комплексов бортового оборудования воздушных судов // Научный вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 6. С. 58–74. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-6-58-74

10. Ying X. An overview of overfitting and its solutions [Электронный ресурс] // Journal of physics: Conference series. 2019. Vol. 1168, iss. 2. ID: 022022. DOI: 10.1088/1742-6596/1168/2/022022 (дата обращения: 02.04.2025).

11. Montesinos López O.A., Montesinos López A., Crossa J. Overfitting, model tuning, and evaluation of prediction performance // Multivariate Statistical Machine Learning Methods for Genomic. Cham: Springer International Publishing, 2022. Pp. 109–139. DOI: 10.1007/978-3-030-89010-0_4

12. Muñoz-Pichardo J.M. A multivariate Poisson regression model for count data / J.M. Muñoz-Pichardo, R. Pino-Mejías, J. García-Heras, F. Ruiz-Muñoz, M.L. González-Regalado // Journal of Applied Statistics. 2021. Vol. 48, no. 13–15. Pp. 2525–2541. DOI: 10.1080/02664763.2021.1877637

13. Heaton J. An empirical analysis of feature engineering for predictive modeling [Электронный ресурс] // SoutheastCon 2016. Norfolk, VA, USA, 2016. 6 p. DOI: 10.1109/SECON.2016.7506650 (дата обращения: 02.04.2025).

14. Фурар Х.Э. Оценка рисков при обеспечении безопасности бортовых систем воздушного судна / Х.Э. Фурар, Б.Д. Огунвоул, В.Д. Будаев, Ф. Лаши // Научный вестник МГТУ ГА. 2020. Т. 23, № 4. С. 84–95. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-4-84-95

15. Будаев В.Д. Методы оптимизации планирования технического обслуживания авиационного парка [Электронный ресурс] // Международный научно-исследовательский журнал. 2024. № 7 (145). DOI: 10.60797/IRJ.2024.145.6 (дата обращения: 02.04.2025).

Information about the authors

Blessing I. Ogunvoul, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Flight and Life Safety Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, ogunvouluni@yandex.ru.

Vladislav D. Budaev, Senior Lecturer, the Chair of Aircraft Engine Engineering, Moscow State Technical University of Civil Aviation, vlad_budaev@mail.ru.

Daniil O. Sizikov, Senior Lecturer, Electrical Systems and Flight Navigation Complexes Maintenance Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, d.sizikov@mstuca.ru.

Nikita V. Gorbakon, Senior Lecturer, the Chair of Aircraft Engine Engineering, Moscow State Technical University of Civil Aviation, n.gorbakon@mstuca.ru.

Arusya V. Vlasova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Transportation Organization on Air Transport Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, a.vlasova@mstuca.ru.

Сведения об авторах

Огунвоул Блессинг Израилевич, кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности полетов и жизнедеятельности МГТУ ГА, ogunvouluni@yandex.ru.

Будаев Владислав Дмитриевич, старший преподаватель кафедры двигателей летательных аппаратов МГТУ ГА, Vlad_budaev@mail.ru.

Сизиков Даниил Олегович, старший преподаватель кафедры технической эксплуатации авиационных электросистем и пилотажно-навигационных комплексов МГТУ ГА, d.sizikov@mstuca.ru.

Горбаконь Никита Вадимович, старший преподаватель кафедры двигателей летательных аппаратов МГТУ ГА, n.gorbakon@mstuca.ru.

Власова Аруся Витальевна, кандидат технических наук, доцент кафедры организации перевозок на воздушном транспорте МГТУ ГА, a.vlasova@mstuca.ru

Поступила в редакцию	30.06.2024	Received	30.06.2024
Одобрена после рецензирования	05.01.2025	Approved after reviewing	05.01.2025
Принята в печать	25.03.2025	Accepted for publication	25.03.2025

НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ

УДК: 656.7.025

DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-2-51-70

Транспортная связанность и авиационная подвижность населения в развивающихся странах с горным рельефом: опыт Кыргызской Республики

У.Э. Курманов¹, Р.Б. Салморбекова¹, Ж.К. Исмаилова¹, И.О. Полешкина²

¹*Кыргызский авиационный институт им. И. Абдраимова, г. Бишкек, Кыргызская Республика*

²*Московский государственный технический университет гражданской авиации, г. Москва, Россия*

Аннотация: В статье на примере Кыргызской Республики анализируется состояние транспортной системы страны с развивающейся экономикой, расположенной в горной местности с большими перепадами высот и не имеющей выхода к морю. Цель исследования – выявить потенциальные возможности воздушного транспорта (ВТ) в странах с горным рельефом для обеспечения связанности во внутреннем и международном сообщении. Основу исследования составляет метод анализа топологии транспортной сети, позволяющий выявить дефекты, сдерживающие обеспечение достаточного уровня пространственной связанности территории. Оценка спроса на пассажирские перевозки проведена с помощью статистического анализа пассажиропотока по видам транспорта за период с 1991 по 2023 год и расчета показателя количества совершенных перелетов на одного местного жителя в год. С целью выявления потенциального спроса на пассажирские перевозки воздушным транспортом проведен опрос местных жителей. Результаты исследования показали, что более 80 % пассажирских перевозок республики в междугородном сообщении осуществляются автомобильным транспортом, при этом 12 % населенных пунктов не соединены автобусным сообщением. Во многих высокогорных населенных пунктах автомобильное сообщение прекращается в определенные месяцы из-за обледенения, схода лавин и оползней, что приводит к транспортной изоляции. Начиная с 1985 года наблюдается изменение периода повторяемости оползней и смещение сезонных сроков с марта – мая на январь – июнь. Установлено, что ВТ является востребованной альтернативой выполнения пассажирских перевозок в указанные месяцы. За период с 2013 по 2023 год пассажиропоток в международных аэропортах Манас и Ош увеличился более чем в 2 раза, а в реконструированных аэропортах Иссык-Куль и Джалал-Абад – в 27 и 7 раз соответственно. В качестве основных факторов, сдерживающих рост авиационной подвижности населения, выявлены недостаточность внутренней маршрутной сети, низкая регулярность рейсов, отсутствие прямых рейсов в страны Европы и США. Открытие новых международных рейсов позволит реализовать туристический потенциал республики.

Ключевые слова: транспортная связанность, транспортная дискриминация, воздушный транспорт, авиационная подвижность населения, топология транспортной сети, горные поселения.

Для цитирования: Курманов У.Э. Транспортная связанность и авиационная подвижность населения в развивающихся странах с горным рельефом: опыт Кыргызской Республики / У.Э. Курманов, Р.Б. Салморбекова, Ж.К. Исмаилова, И.О. Полешкина // Научный вестник МГТУ ГА. 2025. Т. 28, № 2. С. 51–70. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-2-51-70

Transport connectivity and aviation mobility of the population in developing countries with mountainous terrain: Experience of the Kyrgyz Republic

U.E. Kurmanov¹, R.B. Salmorbekova¹, Zh.K. Ismailova¹, I.O. Poleshkina²

¹*Kyrgyz Aviation Institute named after I. Abdaimova, Bishkek, the Kyrgyz Republic*

²*Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

Abstract: The article analyses the state of the transport system of the Kyrgyz Republic as an example of landlocked country with a developing economy located in a mountainous area with a large altitude range. The aim of the study is to identify the potential of air transport (AT) in countries with mountainous terrain to ensure connectivity in domestic and international traffic. The study is based on the method of analyzing the topology of the transport network, which allows identifying defects that hinder the provision of a sufficient level of spatial connectivity of the territory. The demand for passenger traffic was assessed by means of statistical analysis of passenger traffic by type of transport for the period from 1991 to 2023 and calculation of indicator of the number of flights per local resident per year. In order to identify the potential demand for passenger carrying operations, a survey of local residents was conducted. The results of the study showed that more than 80 percent of intercity passenger traffic in the republic is carried out by road transport, while 12 percent of settlements are not connected by buses. In many high-mountainous settlements, road traffic is interrupted during certain months due to icing, avalanches and landslides, resulting in transport isolation. Since 1985, there has been a change in the recurrence period of landslides and a shift in seasonal timing from March-May to January-June. It was found that air transport is a popular alternative for passenger traffic during these months. Over the period from 2013 to 2023, passenger traffic at the international airports of Manas and Osh increased more than doubled, and at the reconstructed airports of Issyk-Kul and Jalal-Abad – 27 and 7 times respectively. Insufficient domestic route network, low flight regularity, lack of direct flights to Europe and the USA were identified as the main factors constraining the growth of aviation mobility of the population. The opening of new international flights will make it possible to reach the tourism potential of the republic.

Key words: transport connectivity, transport discrimination, air transport, aviation mobility of the population, topology of the transport network, mountainous settlements.

For citation: Kurmanov, U.E., Salmorbekova, R.B., Ismailova, Zh.K., Poleshkina, I.O. (2025). Transport connectivity and aviation mobility of the population in developing countries with mountainous terrain: Experience of the Kyrgyz Republic. Civil Aviation High Technologies, vol. 28, no. 2, pp. 51–70. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-2-51-70

Введение

Основу транспортной системы развивающихся стран, расположенных в горных местностях и не имеющих выхода к морю, таких как Кыргызская Республика, Армения, Таджикистан, Непал, составляет разветвленная сеть автомобильных дорог. Однако сложности рельефа и климатические особенности накладывают ограничения на надежность их круглогодичного использования в связи с распространением лавинных и оползневых явлений. Сезонные сбои использования автомобильных дорог, мостов, туннелей приводят к возникновению транспортной дискриминации населения, проживающего в горной местности. Транспортная дискриминация выражается в невозможности получить доступ к социально значимым услугам в условиях отсутствия сообщения с крупными городами [1–6]. Опыт развитых стран показывает, что решением проблемы сезонной транспортной дискриминации населения горных поселений может стать развитие внутренней авиационной связанности страны, что в свою очередь способствует

развитию как внутреннего, так и главным образом международного туризма [7].

Данное исследование проведено на примере Кыргызской Республики, страны с развивающейся экономикой, расположенной в Центральной Азии. Горы занимают 94 % территории Кыргызстана, в их состав входит западная и центральная часть горной системы Тянь-Шань, на юго-западе горная система Памиро-Алай. По площади территории, равной 199,9 тыс. кв. км, Кыргызстан занимает 85-е место в мире. Основу транспортной системы республики составляет разветвленная сеть автомобильных магистралей. Более 80 % внутренних грузовых перевозок осуществляется автомобильным транспортом. Благодаря выгодному географическому положению на транзитных путях сообщения между Европой и Китаем реализация проектов по строительству и реконструкции автомобильных и железных дорог, входящих в международные транспортные коридоры (МТК), привлекает зарубежных инвесторов.

Исследованию вопросов развития автомобильных и железнодорожных магистралей на территории Кыргызстана, в особенности их

участков, входящих в состав международных транспортных коридоров, посвящено большое количество научных трудов [2, 8, 9]. Результаты этих исследований показывают, что развитие автотранспортной и железнодорожной сети республики осложняется высокогорным рельефом, удорожающим строительство, а также увеличивающим риски их использования в связи с высокой вероятностью схода оползней и снежных лавин. В результате часть населенных пунктов Кыргызстана, расположенных в высокогорных районах, в отдалении от основных транспортных коридоров, в зимнее время оказывается полностью изолированной в транспортном отношении [2, 10]. В этих условиях авиасообщение приобретает особое значение в обеспечении внутренней связанности и решении проблем транспортной дискриминации населения. Положение транспортной дискриминации приводит к исключению сельских поселений из производственной системы страны и оттоку местных жителей в крупные города. Исследование вопросов развития внутренней сети воздушного транспорта для обеспечения связанности горных поселений развивающихся стран в сезонные периоды ограниченной возможности использования автомобильного сообщения имеет большое социально-экономическое значение и представляет определенный пробел в научном отношении, так как требует исследования специфических факторов, характерных для каждого региона. Обзор исследований показал, что за последние 20 лет был опубликован ряд работ, посвященных общему прогнозированию спроса на авиаперевозки в развивающихся странах, в том числе в Кыргызской Республике [11–15].

Удаленность большинства развивающихся стран, расположенных в горных регионах, от мировых промышленных и инвестиционных центров, увеличение экономической и торговой активности, возрастающие миграционные потоки, возможности раскрытия туристического потенциала увеличивают спрос на использование воздушного транспорта не только во внешнем, но и во внутреннем сообщении.

Целью данного исследования является определение потенциальных возможностей системы воздушного транспорта Кыргызской Республики для обеспечения транспортной связанности во внутреннем и международном сообщении при условии удовлетворения текущего спроса на перевозки. Гипотеза исследования заключается в предположении, что развитие внутренней сети воздушного транспорта позволит увеличить авиационную подвижность населения, проживающего в горных районах, за счет устранения сезонных ограничений использования автомобильного транспорта, а также способствует увеличению спроса на международные авиаперевозки.

Материалы и методы проведения исследования

В основу исследования положен метод анализа топологии транспортной сети, позволяющий выявить узкие места, сдерживающие обеспечение достаточного уровня пространственной связанности территории и пассажирской транспортной доступности. Согласно данному подходу основными свойствами транспортной сети являются пространственная связанность и изолированность. Топология определяет «пространственное отношение связанности и соседства векторных объектов (точек, линий и полигонов)» [16]. Таким образом, пространственная связанность определяется наличием транспортных полигонов между экономическими центрами страны и остальными населенными пунктами. При этом важное значение имеет наличие альтернативных полигонов, позволяющих перестраивать маршруты движения в случае выхода из строя каких-то участков сети (моста, туннеля и т. д.). Анализ топологии транспортной сети проводился с учетом влияния сезонных факторов, выключающих некоторые участки сети из единого графа в течение определенного периода года под воздействием лавинных и оползневых явлений в горных районах. Для анализа были использованы данные об оползневых и лавинных явлениях

Министерства чрезвычайных ситуаций Республики Кыргызстан и материалы опубликованных научных работ.

Оценка спроса на пассажирские перевозки проведена на основе статистического анализа пассажиропотока по видам транспорта за период с 1991 по 2023 год, опубликованного Национальным статистическим комитетом Кыргызской Республики. Также рассчитан коэффициент корреляции между размером пассажиропотока воздушного транспорта, автомобильного транспорта и объемом валового внутреннего продукта (ВВП) республики.

Для оценки интенсивности работы воздушного транспорта проанализирована динамика пассажиропотока и рассчитан коэффициент авиационной подвижности населения во внутреннем и международном сообщении за период с 2000 по 2023 год. Авиационная подвижность населения во внутреннем и международном сообщении рассчитана как общая сумма совершенных вылетов из всех аэропортов Кыргызской Республики на одного жителя. Анализ коэффициента авиационной подвижности населения позволяет оценить уровень доступности авиаперевозок в физическом и экономическом отношении. На основании данных АОА «Международный аэропорт Манас» проанализировано распределение пассажиропотоков между международными и основными региональными аэропортами республики.

С целью более детального выявления причин, сдерживающих авиационную подвижность населения во внутреннем и международном сообщении, проведен опрос населения Республики Кыргызстан, в котором приняли участие 354 респондента в возрасте старше 18 лет. Опрос ориентирован на исследование частоты полетов, совершенных респондентами за период с 2019 по 2023 год. На основании опроса также установлены основные цели совершения перелетов и главные факторы, влияющие на принятие решения о перелете. Опрос проводился в онлайн-формате с использованием инструмента Google Forms методом «снежного кома».

Топология транспортной системы Кыргызской Республики

Географическое расположение Кыргызской Республики между границами Казахстана, Китая, Таджикистана и Узбекистана определило ориентацию транспортной системы на обслуживание транзитных потоков, экспорта и импорта. Этому способствовало создание в 1994 году единого экономического пространства с Казахстаном и Узбекистаном, а в 2015 году создание Евразийского экономического союза (ЕАЭС). Общая протяженность автомобильных дорог Кыргызстана составляет более 34 тыс. км, из которых только 18,8 тыс. км (55,3 %) относятся к дорогам общего пользования, находящимся в ведении Министерства транспорта и коммуникаций. В систему международных транспортных коридоров входят несколько участков общей протяженностью 4,2 тыс. км. Ключевую роль в международных перевозках играют участки Бишкек – Нарын – Торугарт – Кашгар и Ош – Сары – Таш – Иркештам – Кашгар. Важное национальное значение имеет автомагистраль Бишкек – Джалал-Абад – Ош, так как она не только обеспечивает транспортную связанность двух крупнейших районов в направлении север – юг, но и является частью транзитного коридора между Россией и Таджикистаном через территории Кыргызстана и Казахстана (рис. 1).

В состав Кыргызстана входит два города республиканского значения (Бишкек и Ош) и семь областей: Чуйская, Иссык-Кульская, Таласская, Нарынская, Джалал-Абадская, Ошская, Баткенская. По данным 2021 года, в республике насчитывается 1883 населенных пункта, из которых автобусным сообщением соединено только 1660 населенных пунктов (88,1 %). Общая протяженность местных дорог в республике составляет около 24,2 тыс. км, из которых только 9 тыс. км (37,2 %) находятся в ведении Министерства транспорта. Не все участки автомобильной сети функционируют круглогодично из-за большого количества горных перевалов. Во многих высокогорных населенных пунк-

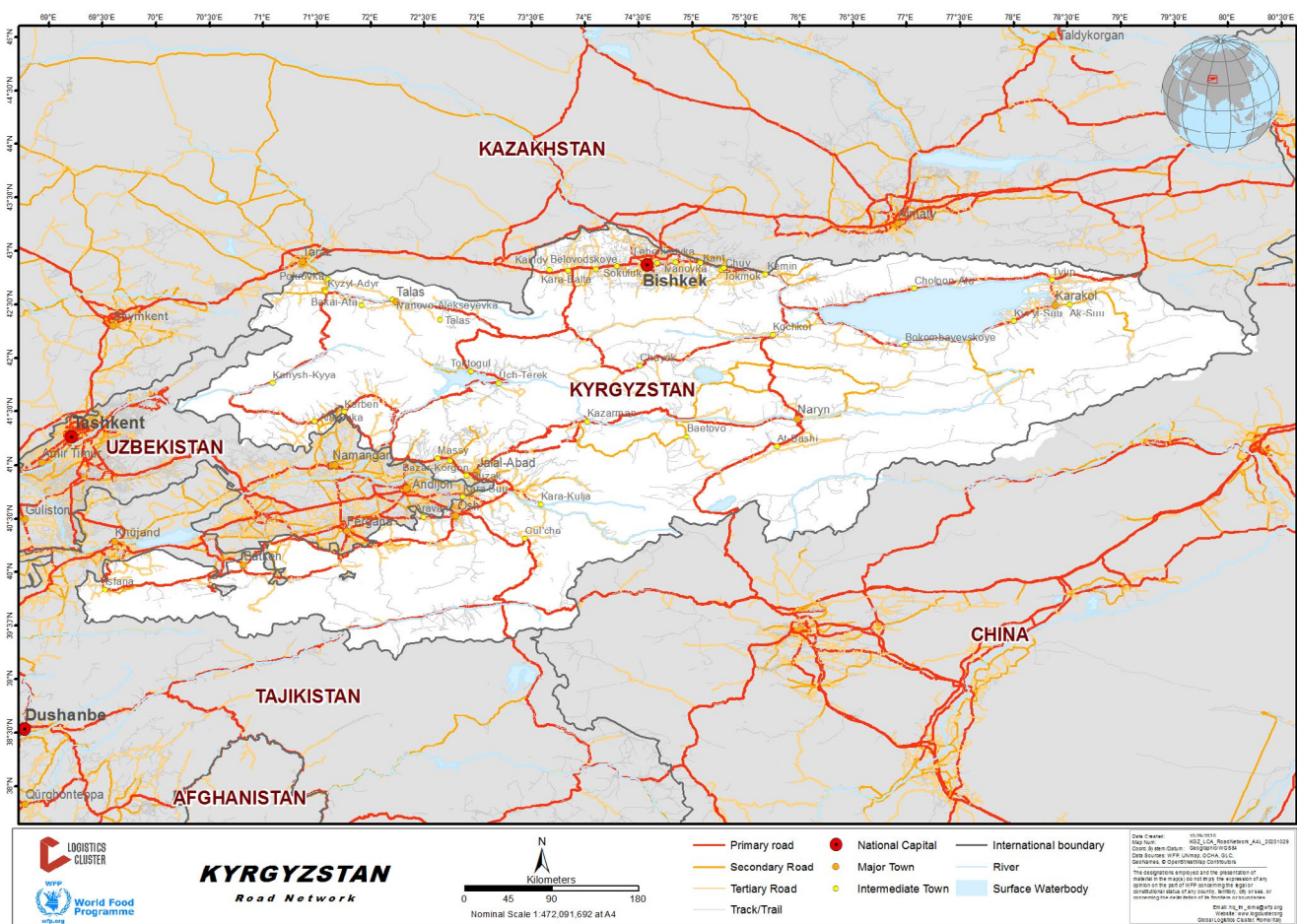


Рис. 1. Сеть автомобильного транспорта Кыргызской Республики в системе МТК1

Fig. 1. Road network of Kyrgyzstan in the system of international transport corridors

ктах автомобильное сообщение зимой прекращается, что приводит к транспортной изоляции. Затруднения, связанные с обледенением дорожного полотна, образованием тумана, сходом лавин и оползней, отмечаются с конца октября по конец апреля (более полугода), что усугубляется низким качеством дорог второстепенного значения. Наибольший уровень лавинной опасности наблюдается на дорогах местного значения южной части республики и на перевалах между северо-восточной и южной частями. В результате происходит сезонное прекращение транспортного сообщения с большим количеством населенных пунктов

на юге Кыргызстана, а также возникает сезонный разрыв транспортной сети на участке Бишкек – Джалал-Абад – Ош (рис. 2).

В период с 1991 по 2022 год в республике было зарегистрировано 593 оползневых стихийных бедствия. В стране насчитывается более 4 500 оползневых склонов, из которых примерно 1 200 являются активными и угрожают более 540 населенным пунктам и 300 объектам инфраструктуры (дорогам, энергетическим объектам, больницам и школам) [17]. В 2003 году было повреждено 55 км дорог, полностью или частично разрушен 21 мост [18], в 2011 году поврежден участок дороги Бишкек – Ош, в 2019 году был перекрыт участок дороги Бишкек – Нарын – Торугарт [17]. Места оползней, произошедших в республике с 2003 по 2016 год представлены на рис. 3. Главным

¹ Kyrgyzstan Road Network [Электронный ресурс] // Logistics Cluster. URL: <https://lca.logcluster.org/ru/node/5567> (дата обращения: 24.12.2024).

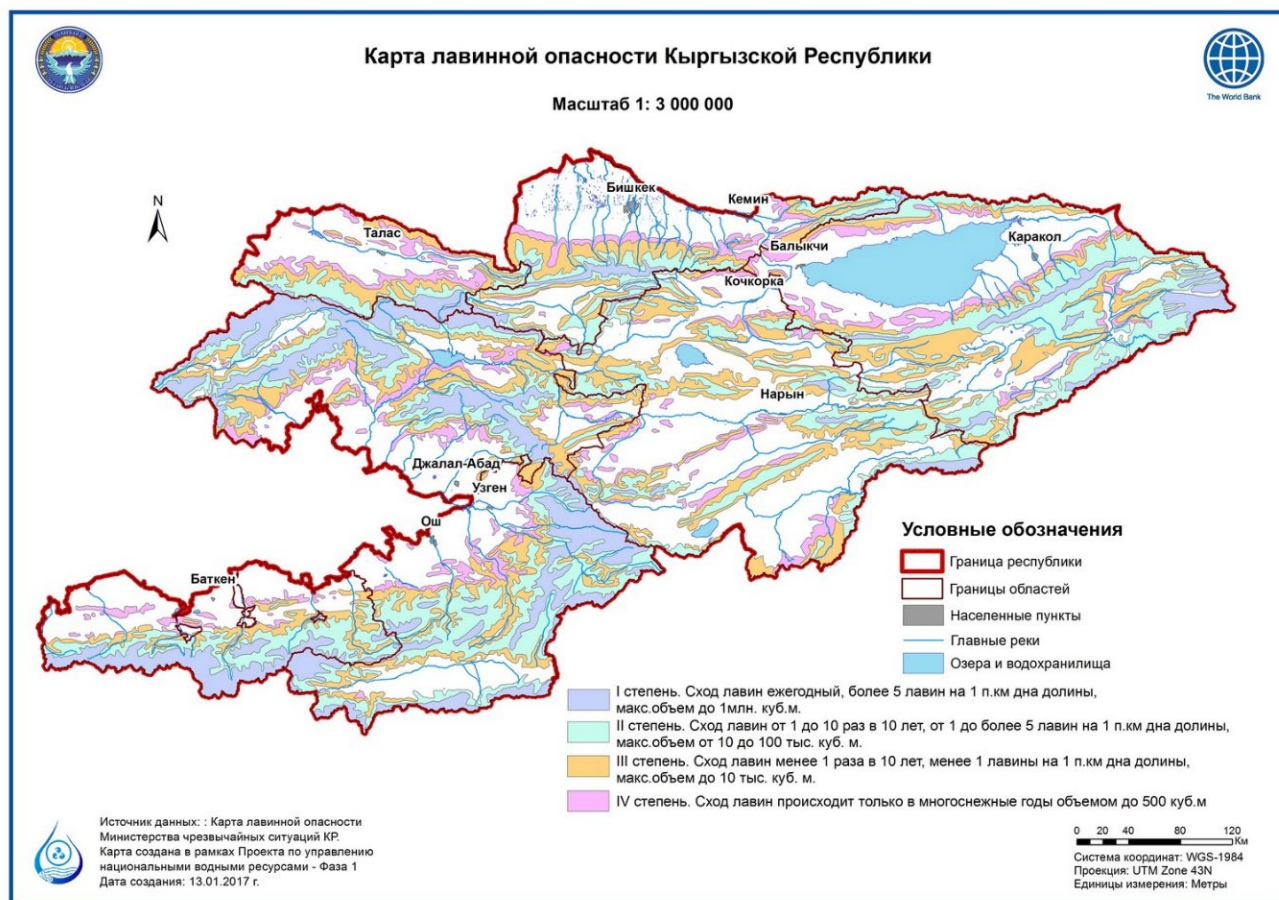


Рис. 2. Карта лавинной опасности Кыргызской Республики²

Fig. 2. Avalanche Hazard Map of the Kyrgyz Republic

образом оползни затрагивают южную часть, в особенности Ошскую и Джалал-Абадскую области. Начиная с 1985 года наблюдается изменение периода повторяемости оползней [19, 20] и смещение сезонных сроков с марта – мая на январь – июнь, что повышает дефектность существующей транспортной системы за счет возникновения сезонной разорванности или изолированности.

Расстояние автомобильного сообщения между городами Бишкеком и Ошем составляет 760 км, примерное время в пути – 15 ч, расстояние между городами Ошем и Баткеном – 287 км, время в пути – 5,5 ч. Расстояние между

городами Бишкеком и Нарыном – 316 км, примерное время – 4 ч 45 мин. Из-за возникновения оползней маршруты объезда горных районов в Ошской и Джалал-Абадской областях проходят по территории Узбекистана. Таким образом, внутреннее авиасообщение между областными центрами республики имеет большое значение для местного населения.

На рис. 4 представлена подверженность автомобильных дорог республики оползневым явлениям [17]. Видно, что сход лавин наиболее часто приводит к остановке автомобильного сообщения между городами Бишкеком, Ошем и Баткеном, а также горными населенными пунктами, расположенными в этих областях.

Роль железнодорожного транспорта в обеспечении внутренней связанности отдаленных и горных населенных пунктов Кыргызстана

² Тематические карты [Электронный ресурс] // Служба водных ресурсов при Министерстве сельского хозяйства Кыргызской Республики. URL: https://nwrmp.water.gov.kg/?page_id=1165&lang=ru_RU (дата обращения: 24.12.2024).

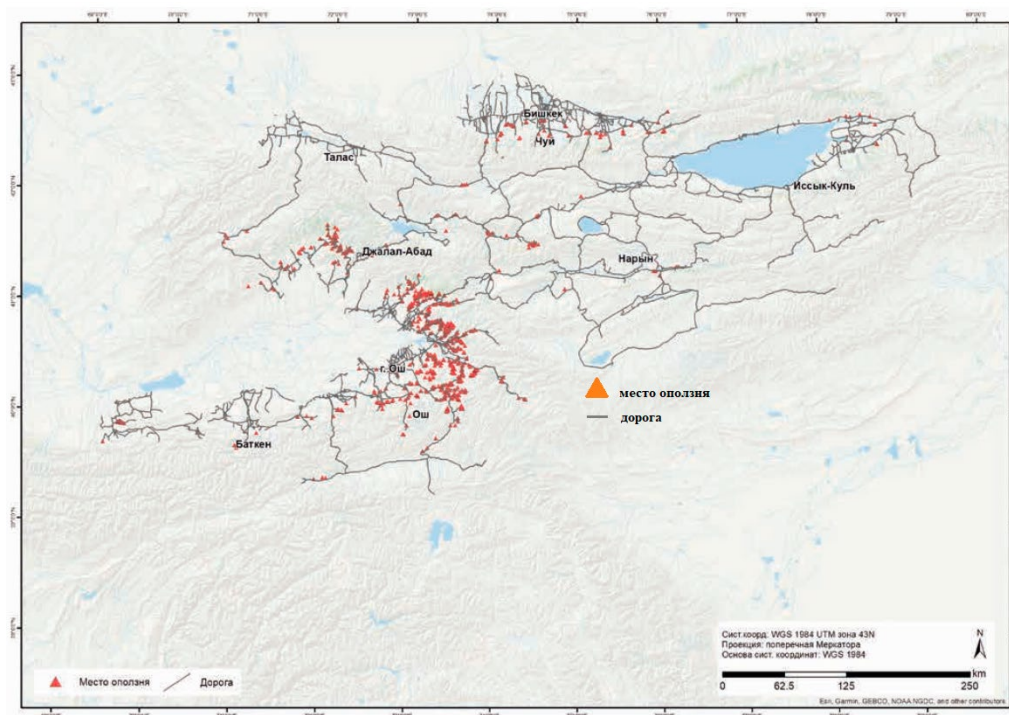


Рис. 3. Места оползней в Кыргызской Республике, произошедших за 2003–2016 годы [17]

Fig. 3. Locations of landslides in the Kyrgyz Republic that occurred during 2003–2016 [17]

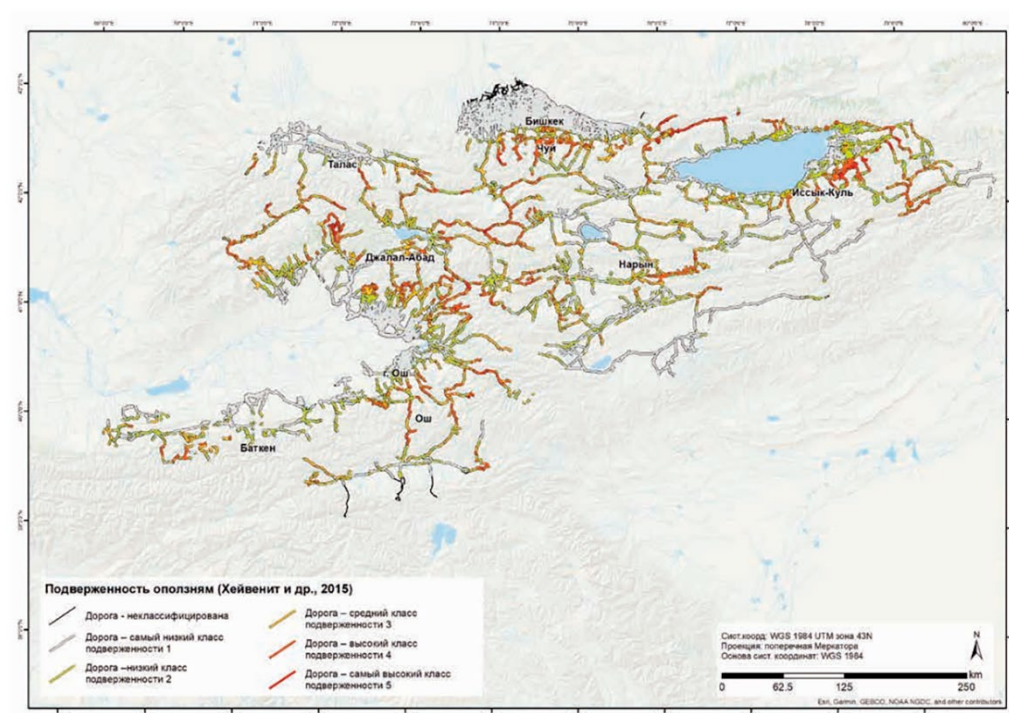


Рис. 4. Подверженность автомобильных дорог Республики Кыргызстан оползневым явлениям [17]

Fig. 4. Exposure of roads in the Kyrgyz Republic to landslide events [17]

невелика. На его долю, по данным 2023 года, приходится менее 1 % внутренних пассажирских перевозок. Протяженность железнодорожных путей составляет 424,6 км. Они разделены на два участка, проходящих по северу страны из Луговой через Бишкек в Бакыкчи, соединяя Рыбачье с Турксибом в Казахстане (323,4 км), и по южной части через Ош, выходя на железную дорогу Узбекистана (101,2 км). Железнодорожное сообщение с Китаем и Таджикистаном отсутствует. Подверженность железной дороги лавинным и оползневым явлениям невысокая.

На основании анализа топологии транспортной системы Кыргызской Республики с учетом особенностей горного рельефа целесообразно предположить, что в период образования оползней и лавин воздушный транспорт должен стать ключевым в обеспечении внутренней транспортной связанности между крупнейшими городами и отдаленными горными населенными пунктами, автомобильные полигоны которых подвержены рискам разрушений.

Авиационная связанность населенных пунктов Кыргызской Республики и спрос на пассажирские перевозки

За период с 1991 года сеть авиасообщений Кыргызстана существенно сократилась, что выражается в сокращении количества действующих внутренних и международных аэропортов, сокращении количества маршрутов, снижении частоты выполняемых рейсов, уменьшении парка используемых воздушных судов на территории страны.

До 1991 года в республике действовало в общей сложности 86 аэропортов, взлетно-посадочных полос, мелких аэродромов. По данным Государственного агентства гражданской авиации, в 2024 году на территории республики действует 11 сертифицированных аэропортов, пять из которых являются международными: Манас (г. Бишкек), Ош (г. Ош), Иссык-Куль (с. Тамчи), Каракол (г. Каракол, открыт после модернизации 11 декабря 2024 года), Баткен (г. Баткен). Аэропорты внутренних воздушных

линий (ВВЛ): Талас, Нарын (закрит на реконструкцию), Казарман, Джалал-Абад, Караван (г. Кербен), Раззаков. Все аэропорты республики принадлежат открытому акционерному обществу «Международный аэропорт Манас»³ (рис. 5). Основная часть аэропортов сосредоточена в северной части страны. В настоящее время международные рейсы выполняются только в два аэропорта – Манас и Ош, внутренние рейсы выполняются во все международные аэропорты, а также аэропорт Джалал-Абад и Раззаков.

За период с 1991 года в республике произошло существенное сокращение аэропортовой сети и сети посадочных площадок. В результате резко снизилось количество выполняемых маршрутов внутренних воздушных линий.

Численность населения Кыргызской Республики с 1990 года имеет постоянную тенденцию к увеличению, однако пассажиропоток воздушного транспорта за период с 1990 по 2001 год сокращается. Рост пассажиропотока воздушного транспорта наблюдается только в период с 2001 по 2023 год, что обусловлено изменением ситуации в отрасли, стабилизацией экономических показателей и открытием новых направлений перелетов (рис. 6).

В 2017 году был достигнут самый большой пассажиропоток на воздушном транспорте с 1990 года, который составил 1 484,5 тыс. человек. Дальнейший спад обусловлен экономической ситуацией 2018 года и введением ограничений на полеты с конца 2019 года в связи с распространением COVID-19. После снятия ограничений ситуация стабилизировалась. В 2023 году воздушным транспортом перевезено 1 290 тыс. человек, из которых на международные перевозки приходится около 71 %, на внутренние – 29 %. При этом доля сельского населения в республике составляет 65 %. В расчете на одного жителя республики в 2023 году пришлось суммарно 0,18 перелета во внутреннем и международном сообще-

³ Гражданские аэродромы Кыргызской Республики [Электронный ресурс] // Государственное Агентство гражданской авиации Кыргызской республики. URL: <https://caa.kg/ru/grazhdanskije-aerodromy-kyrgyzskoy-republiki> (дата обращения: 24.12.2024).

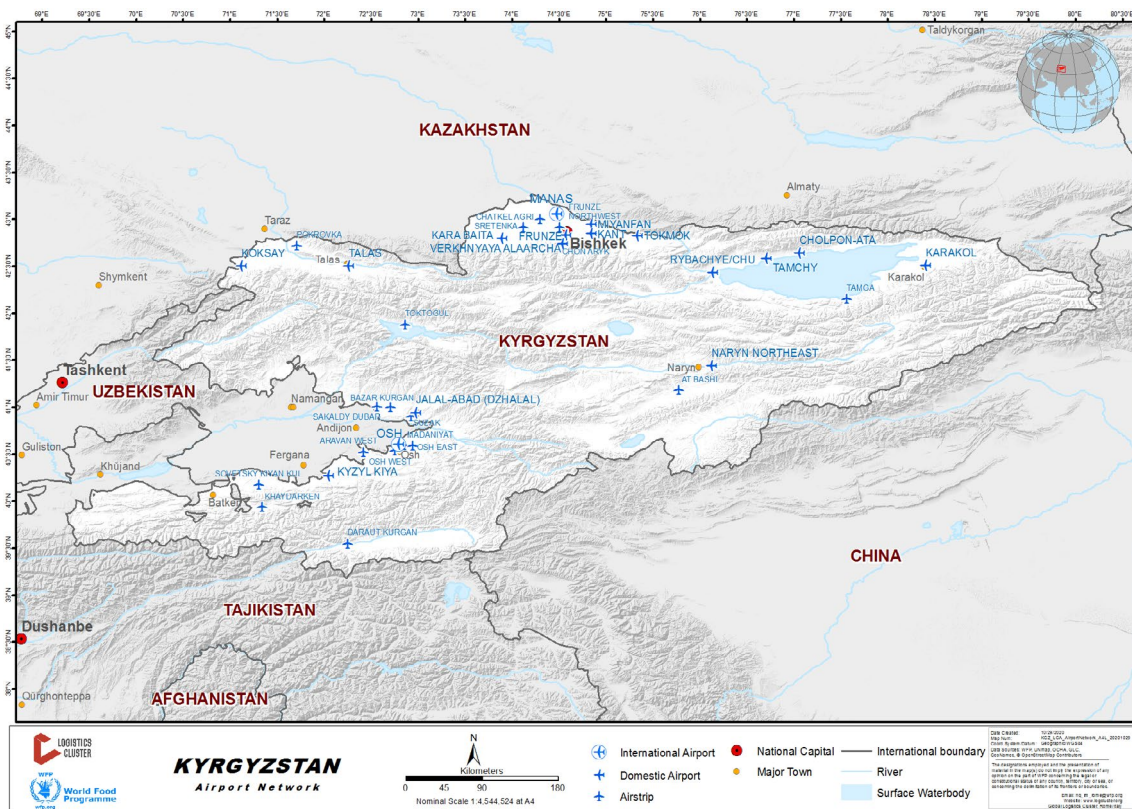


Рис. 5. Аэропортовая сеть Кыргызской Республики

Fig. 5. Airport network of the Kyrgyz Republic

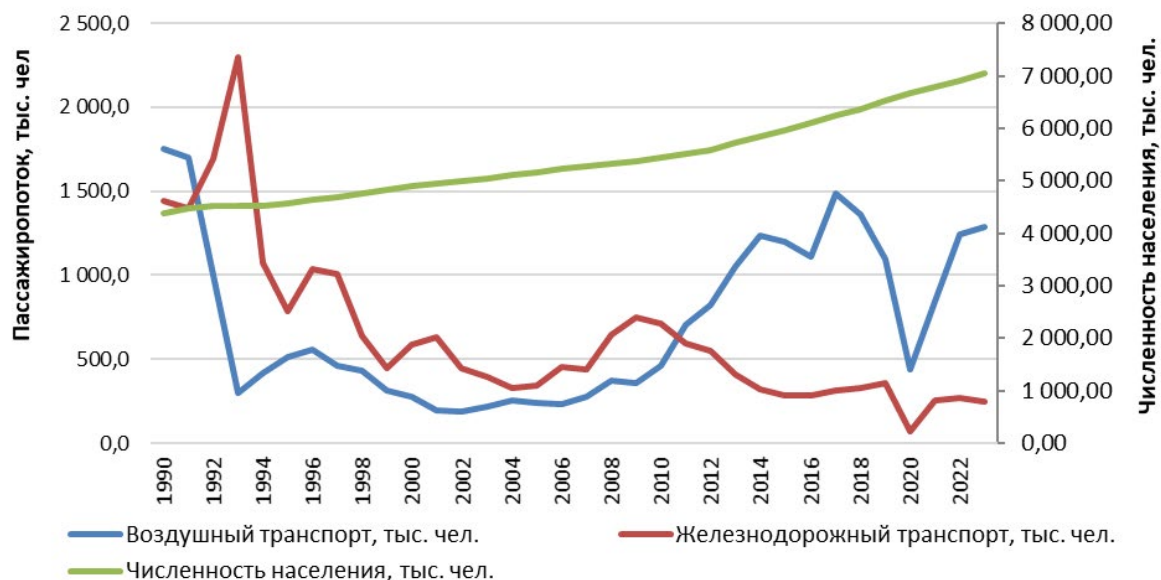


Рис. 6. Численность населения, пассажиропоток воздушного и железнодорожного транспорта Кыргызской Республики*

Fig. 6. Population, passenger traffic by air and railway transport of the Kyrgyz Republic

* Рассчитано авторами на основании данных о размере пассажиропотока Национального статистического комитета Кыргызской Республики и данных о численности населения Всемирного банка.

нии, в то время как в 1990 году приходилось 0,40 перелета. По сравнению с 1994 годом доля пассажиров, совершающих внутренние перелеты, в общем пассажиропотоке воздушного транспорта (ВТ) сократилась в 2 раза [15], что связано с сокращением количества выполняемых внутренних рейсов. Пассажиропоток железнодорожного транспорта с 1993 года имеет постоянную тенденцию к сокращению, что обусловлено ростом конкурентоспособности автомобильного транспорта (рис. 6). Размер пассажиропотока автомобильного транспорта представлен на рис. 7. Коэффициент корреляции между количеством перевезенных пассажиров автомобильным транспортом и ВВП составляет 0,91, что говорит о наибольшем влиянии на спрос экономических факторов. В настоящее время на долю автомобильного транспорта приходится более 80 % всех междугородних перевозок в республике. Результаты исследования показывают, что автомобильный транспорт не может удовлетворить полностью потребности в пассажирских перевозках во время сезонов лавин и оползней, что

приводит к ситуации временной транспортной дискриминации сельских горных поселений.

При формировании спроса на воздушные перевозки влияние размера ВВП снижается. Соотношение изменения размера ВВП и общего пассажиропотока ВТ в период с 1990 по 2023 год в Кыргызстане представлено на рис. 8. Коэффициент корреляции между этими показателями составил 0,60, что подтверждает наличие влияния других факторов.

Анализ показателей количества совершенных поездок одним жителем Кыргызской Республики по видам транспорта представлен на рис. 9. Из рисунка видно, что основная часть поездок совершается местными жителями с использованием автомобильного транспорта. Авиаационная подвижность населения за рассматриваемый период сократилась в 2 раза.

Анализ результатов научных исследований формирования спроса на авиационные пассажирские перевозки в развивающихся странах позволяет выделить следующие факторы, влияющие на размер пассажиропотока: размер внутреннего валового продукта, уро-

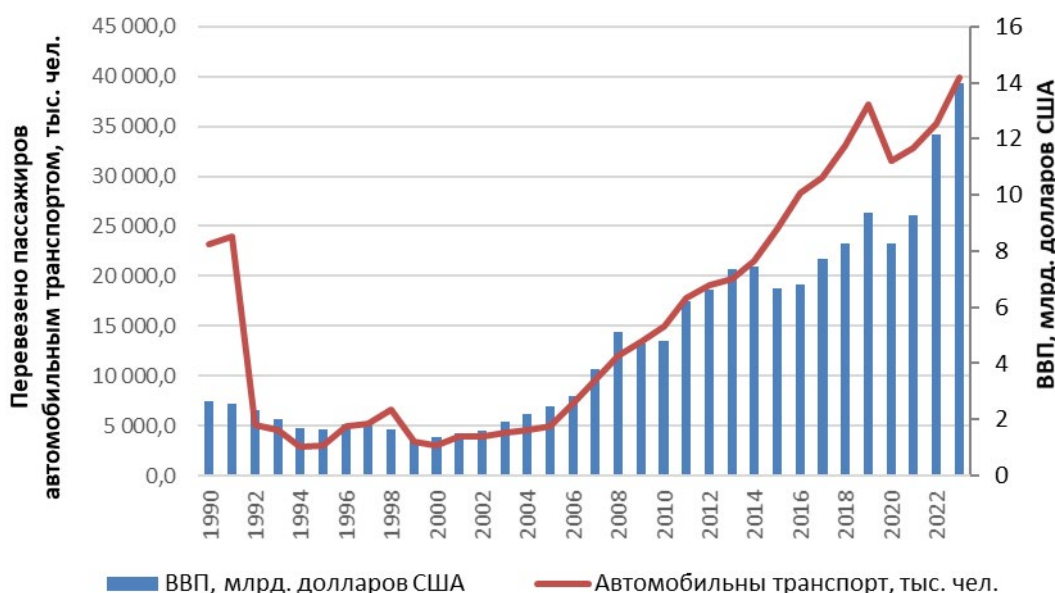


Рис. 7. Пассажиропоток автомобильного транспорта и размер ВВП Кыргызской Республики*

Fig. 7. Road transport passenger traffic and GDP of the Kyrgyz Republic

*Рассчитано авторами на основании данных пассажиропотока Национального статистического комитета Кыргызской Республики и данных о размере ВВП Всемирного Банка.

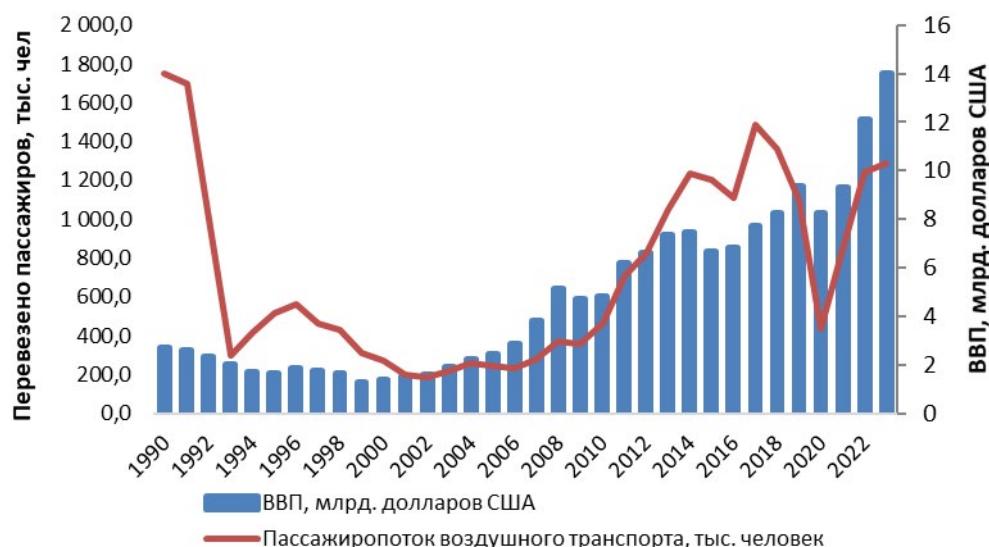


Рис. 8. Динамика изменения ВВП и пассажиропотока ВТ в Кыргызской Республике*

Fig. 8. Dynamics of changes in GDP and air transport passenger traffic in the Kyrgyz Republic

*Рассчитано авторами на основании данных о пассажиропотоке Национального статистического комитета Кыргызской Республики и данных о размере ВВП Всемирного Банка.

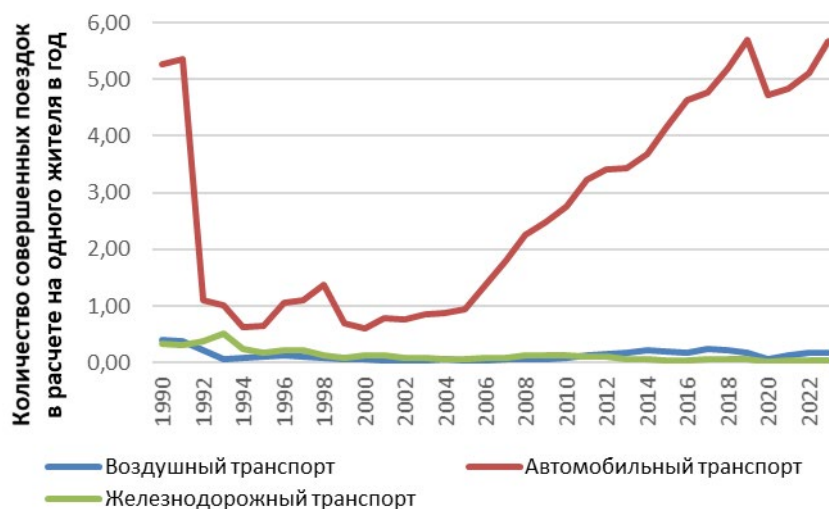


Рис. 9. Количество совершенных поездок различными видами транспорта одним жителем Кыргызской Республики в год*

Fig. 9. Number of trips made by different modes of transport by one resident of the Kyrgyz Republic per year

*Рассчитано авторами на основании данных о пассажиропотоке и численности населения Национального статистического комитета Кыргызской Республики.

вень доходов населения, стоимость перелетов, количество международных соглашений на открытие маршрутов, структуру внутренней маршрутной сети, расстояние перелета, часто-

ту выполняемых рейсов, привлекательность туристических объектов [13–15, 21–23].

После распада СССР внешние связи Кыргызской Республики с зарубежными странами

были разрушены, что привело к резкому спаду пассажиропотока с 1990 по 1994 год. Постепенное восстановление международных соглашений в сфере гражданской авиации началось с 1994 года. Однако развитие международной авиационной маршрутной сети остановилось в связи с попаданием Кыргызстана в 2006 г. в черный список Европейского союза (ЕС) из-за несоответствия стандартам безопасности и низким уровнем надзора за авиаперевозчиками. Запрет на полеты был наложен на все национальные авиакомпании Кыргызстана. В результате кыргызские авиакомпании перестали выполнять полеты в страны ЕС, Великобританию и США. Подобная ситуация наблюдалась с безопасностью полетов в Непале, когда в 2013 году странами ЕС также был наложен запрет на выполнение полетов национальными авиакомпаниями [6]. В настоящее время правительством республики совместно с руководством национальных авиакомпаний реализуется комплекс мер, направленный на достижение требований стандартов ИКАО и Европейского агентства безопасности полетов. В 2023 году авиакомпании успешно прошли аудит ИКАО по программе USOAP (Универсальная программа проверок организации контроля за обеспечением безопасности полетов), что свидетельствует о достижении поставленных целей [24].

По состоянию на конец 2024 года международная маршрутная сеть Кыргызской Республики включает следующие направления: Россия, Кувейт, Объединенные Арабские Эмираты, Турция, Индия, Китай, Пакистан, Саудовская Аравия, Узбекистан, Таджикистан, Казахстан, Азербайджан, Монголия, Египет. Основным объемом внешнего пассажиропотока формируется за счет трудовых мигрантов, летающих на заработки в города России [25]. Сравнительно низкая стоимость авиаперелетов из Кыргызстана в Россию привлекает в международные аэропорты республики большое количество трудовых мигрантов из Таджикистана и Узбекистана, использующих аэропорты городов Бишкека, Оша и Баткена. Стоимость перелета из Бишкека в Москву обходится в 2 раза дешевле, чем перелет из столицы Таджикистана

Душанбе. Увеличение международного пассажиропотока ВТ кыргызских авиакомпаний за счет трудовых мигрантов позволяет повысить количество выполняемых рейсов по востребованным направлениям, что также оказывает положительное влияние на увеличение пассажиропотока местного населения.

Внутренние регулярные рейсы в Кыргызской Республике выполняются между семью аэропортами. Ограниченность внутренней маршрутной сети объясняется высокой стоимостью организации полетов при низком пассажиропотоке. Внутренние перелеты становятся экономически нерентабельными и требуют субсидирования. Аналогичная ситуация наблюдается во внутреннем авиасообщении северных регионов России. Результаты исследований показывают, что оптимизация затрат на внутренние авиаперевозки достигается за счет повышения точности прогнозирования пассажиропотоков, рационального планирования парка ВС и частоты выполнения рейсов. В условиях сезонной ограниченности наземной транспортной связанности наиболее часто используемые гравитационные и регрессионные модели для планирования пассажиропотока воздушного транспорта являются недостаточно точными [26]. Повышение точности прогнозов может быть достигнуто за счет проведения полевых исследований, опросов населения, анализа существующей социальной инфраструктуры крупных населенных пунктов (областных центров) и туристической привлекательности природных объектов [27].

Динамика пассажиропотока, обслуживаемого в международных аэропортах республики и в двух крупнейших региональных аэропортах с 2013 по 2022 год, представлена в табл. 1.

Из данных таблицы видно, что во всех аэропортах наблюдается рост пассажиропотока за рассматриваемый период. Особенно следует отметить направления Иссык-Куль и Джалал-Абад, в которых увеличение пассажиропотока за рассматриваемый период составило 27,4 и 7,3 раза соответственно. В случае аэропорта Иссык-Куль ситуация объясняется увеличением туристического потока благодаря

Таблица 1
Table 1

Динамика обслуженного пассажиропотока (прилет/вылет) в международных аэропортах и двух крупнейших региональных аэропортах Кыргызской Республики, пассажиров

Dynamics of passenger traffic served (arrivals/departures) at international airports and the two largest regional airports of the Kyrgyz Republic, passengers

Год	Манас	Ош	Каракол	Иссык-Куль	Баткен	Джалал-Абад	Раззаков	Всего пассажиров
2013	1 372 462	997 050	121	3 333	30 343	8 733	8 211	2 420 253
2014	1 697 800	1 253 914	95	5 556	24 036	5 099	3 465	2 989 965
2015	1 778 603	1 217 427	86	10 329	23 083	105	12 759	3 042 392
2016	1 834 277	1 210 572	91	9 101	22 431	5 662	797	3 082 931
2017	2 164 858	1 258 937	41	11 670	22 283	22 158	6 390	3 486 337
2018	2 084 738	1 346 471	10	11 535	24 597	23 859	8 695	3 499 905
2019	2 167 759	1 446 906	0	16 027	24 992	26 439	1 224	3 683 347
2020	874 655	627 009	0	824	7 301	8 135	0	1 517 924
2021	2 126 354	1 700 670	0	111 403	14 266	17 715	18 087	3 988 495
2022	2 695 883	2 271 788	0	90 541	6 024	45 432	16 195	5 125 863
2023	3 061 066	2 364 084	0	91 175	9 707	63 227	19 447	5 608 706

реконструкции аэропорта. Увеличение пассажиропотока аэропорта Джалал-Абад в свою очередь подтверждает наличие спроса на внутренние пассажирские перевозки в горных районах республики. По данным правительства Республики Кыргызстан, в Джалал-Абаде в 2025 году запланировано начало строительства международного аэропорта. Расстояние автомобильного сообщения между Джалал-Абадом и Ошем составляет 127 км, среднее время в пути – 3 ч 20 мин. При этом спрос на авиaperевозки постоянен. Рост пассажиропотока в международных аэропортах Манас и Ош составил 2,2 и 2,4 раза соответственно. Сокращение в 3 раза пассажиропотока в аэропорту Баткен, находящемся на границе с Республикой Узбекистан и в относительной близости к Республике Таджикистан, обусловлено изменением ситуации на пограничных пунктах пропуска, что привело к сокращению пассажиров из этих стран, летящих по международным направлениям через аэропорт Кыргызстана. Кроме того, в 2022 году в связи с проведением работы по ремонту и восстановлению искусственного покрытия взлетно-посадочной по-

лосы и рулежных дорожек аэропорт временно был закрыт.

Анализ среднего расстояния перевозок по видам транспорта показал, что в автомобильных и железнодорожных перевозках за рассматриваемый период с 1990 по 2023 год происходило незначительное изменение, а среднее расстояние перелетов снижалось. Это объясняется сокращением количества международных маршрутов, особенно со странами, находящимися на большом расстоянии от республики, после 1991 года. Относительное развитие как внутренних, так и международных маршрутов началось с 2010 года, о чем свидетельствует увеличение среднего расстояния перевозок (рис. 10). По данным Агентства воздушного транспорта Кыргызстана, за этот период было подписано 17 соглашений с иностранными государствами в сфере гражданской авиации.

В рамках данного исследования был проведен опрос местных жителей в отношении наличия потенциального спроса на внутренние авиaperевозки. Опрос случайно выбранных респондентов из генеральной совокупности производился с использованием методов

случайного подбора и снежного кома. Метод основывается на принципе сетевого распространения информации и рекомендаций от одного респондента к другому. Начав с некоторых первоначальных участников, называемых снежинками, исследователь просит рекомендовать других потенциальных участников для опроса. Таким образом, выборка расширяется в форме цепочки или снежного кома. Анкета включала вопросы, касающиеся

частоты совершения перелетов респондентами; предпочитаемых направлений перелета; целей поездки (выбирается из ограниченного списка); факторов, влияющих на принятие решения о перелете (выбираются из ограниченного списка). Далее было рассчитано распределение ответов респондентов в соответствии с их долей в общем количестве ответов. В соответствии с полученными результатами

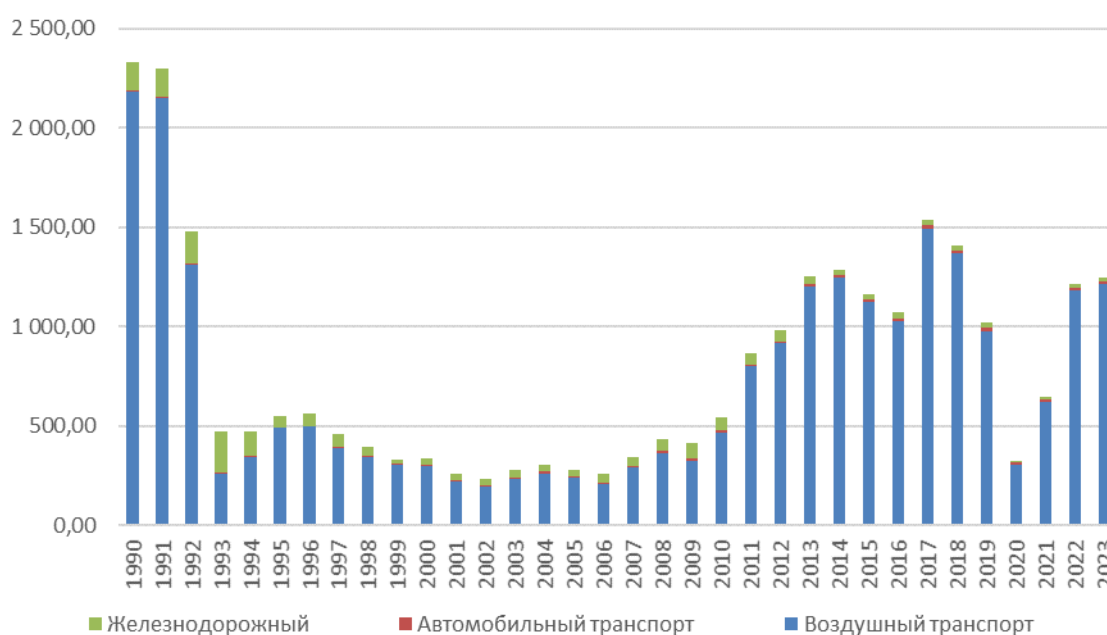


Рис. 10. Среднее расстояние перевозки по видам транспорта в Кыргызской Республике, км*

Fig. 10. Average haul by mode of transport in the Kyrgyz Republic, km

*Рассчитано авторами на основании данных Национального статистического комитета Кыргызской Республики.

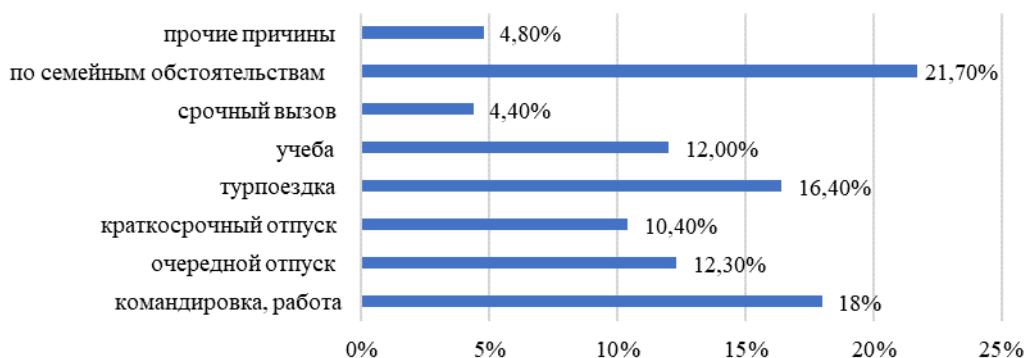


Рис. 11. Основные цели совершения перелетов местными жителями Кыргызской Республики

Fig. 11. The main purposes of flights by local residents of the Kyrgyz Republic

распределение целей совершения перелетов представлено на рис. 11.

Данные опроса показывают, что 21,7 % перелетов совершаются по семейным обстоятельствам (посещение родственников, семейные торжества, похороны и т. д.), 18 % перелетов осуществляются в рабочих целях, 16,4 % перелетов совершаются с целью отпуска (непонятно, чем отличается отпуск и туристические поездки), 12 % перелетов совершаются с целью обучения. Следовательно, можно сделать вывод, что внутренние перелеты с целью социального

взаимодействия и поддержания семейных контактов являются наиболее востребованными.

Распределение ответов респондентов на вопрос о влиянии стоимости перелета на принятие решение о совершении полета представлено на рис. 12. Более 59 % пассажиров принимают решение о совершении перелета на основании стоимости билета, что характерно для стран с развивающейся экономикой. Поэтому конкурентоспособное ценообразование является приоритетной задачей местных авиакомпаний.

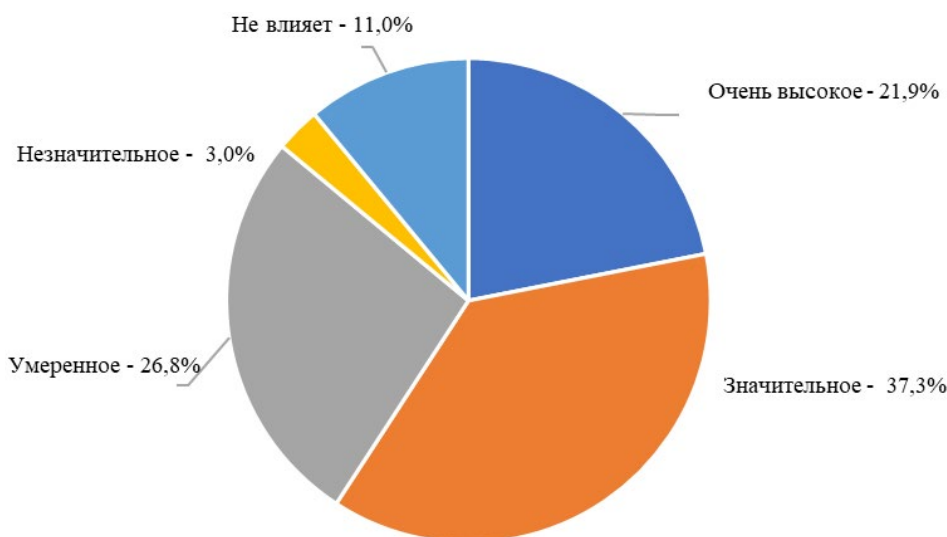


Рис. 12. Влияние стоимости перелета на принятие решения местных жителей Кыргызской Республики о совершении полета

Fig. 12. The impact of flight cost on the decision of local residents of the Kyrgyz Republic to take a flight



Рис. 13. Факторы, влияющие на принятие решений о совершении перелета местными жителями Кыргызской Республики

Fig. 13. Factors affecting flight decision of local residents of the Kyrgyz Republic

На рис. 13 представлены результаты оценки влияния наиболее значимых факторов на принятие решения о совершении перелета жителями Кыргызской Республики.

Из данных рисунка видно, что финансовые факторы выделили 42,6 % респондентов. Фактор частоты полетов и наличия маршрута выделили 22 % респондентов, что говорит о наличии неудовлетворенного спроса в отношении частоты выполнения рейсов и недостаточной доступности некоторых точек назначения. Факторы безопасности и надежности авиакомпаний выделили 28 % респондентов.

Таким образом, результаты проведенных исследований подтверждают гипотезу о том, что развитие внутренней сети воздушного транспорта позволит увеличить авиационную подвижность населения, проживающего в горных районах, за счет устранения сезонных ограничений использования автомобильного транспорта, а также способствует увеличению спроса на международные авиаперевозки.

Заключение

Результаты проведенного исследования показали, что увеличение внутренней авиационной связанности населенных пунктов Кыргызской Республики является востребованным со стороны местного населения, так как существующая транспортная система с преобладающей долей автомобильного транспорта имеет сезонные ограничения использования в связи с особенностью эксплуатации дорог в высокогорных районах. Достаточно большая площадь территории, сложность рельефа, высокие риски схода лавин и оползней делают воздушный транспорт более удобным для перемещения между административными центрами республики. Это также подтверждается существующим спросом на внутренние авиаперевозки в 1990 году и структурой аэропортовой сети и сети посадочных площадок. За период с 1991 года наблюдается резкое сокращение авиационной подвижности населения во внутреннем сообщении. Доля внутреннего пассажиропотока в общем объеме пассажиропотока воздушного транспорта республики сократи-

лась в 2 раза и составила одну треть, а уровень общей авиационной подвижности населения сократился на 55 %, составив 0,18 поездки в расчете на одного жителя в год. В качестве основных причин видится общая деградация системы ВТ республики, которая наблюдалась до 2006 года, однако за последние 18 лет наметились положительные тенденции, которые позволяют говорить о возможном восстановлении внутреннего авиасообщения.

Международный опыт показывает, что развитие внутренней системы воздушного транспорта тесно связано с состоянием внешнего авиасообщения государства с мировыми экономическими, политическими и торговыми центрами. Международное авиасообщение определяет не только возможности экономического взаимодействия, но и создает предпосылки развития туризма. Географическое положение Республики Кыргызстан с точки зрения туристического потенциала можно сравнить с Республикой Непал, на территории которой расположена высочайшая вершина – г. Эверест (8 848 м). В северо-восточной части Республики Кыргызстан находится озеро Иссык-Куль, входящее в 30 крупнейших по площади озер мира и занимающее седьмое место по глубине. Оно расположено между живописными хребтами Тянь-Шаня: Кюнгёй-Ала-Тоо и Терской Ала-Тоо на высоте 1 608 м над уровнем моря. На юго-востоке республики в горной системе Памира находится одна из самых высоких вершин Центральной Азии – Пик Ленина (7 134 м). Эти географические объекты становятся местом притяжения путешественников со всего мира, о чем свидетельствует большое количество европейских и американских туристов, посещающих страну даже в условиях отсутствия прямого авиасообщения с Кыргызстаном, а также резкий рост пассажиропотока в аэропортах Иссык-Куль, Джалал-Абад и Раззаков. Таким образом, можно сделать вывод, что открытие международных маршрутов позволит существенно нарастить туристический пассажиропоток, что подтверждается опытом зарубежных стран по всему миру со схожим в географическом отношении рельефом. К таким странам можно отнести Республику

Непал, Новую Зеландию, Норвегию, Канаду. Для сравнения, доля европейских туристов в прилетающем в Республику Непал пассажиропотоке составляет около 40 % и имеет тенденцию к ежегодному увеличению.

Доступность туристических объектов внутри страны определяется наличием инфраструктуры и транспортной связанностью, которую в настоящее время обеспечивают коммерческие вертолетные перевозки в небольших объемах. Рост доходов от развития международных направлений может быть использован кыргызскими авиакомпаниями для развития внутренней авиационной связанности, так как внутренние маршруты являются менее прибыльными, а иногда и убыточными до момента их «раскатки».

Для дальнейшего исследования вопросов развития авиационной связанности горных поселений Кыргызской Республики необходимо провести многофакторный анализ формирования спроса на внутренние авиаперевозки с учетом исследования точек притяжения пассажиропотока не только местного населения, но и международных туристов.

Список литературы

1. Курманов У.Э. Перевозка крупногабаритных и специфических грузов по сложным участкам горных автомобильных дорог Кыргызской Республики // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. 2020. № 2 (50). С. 122–127.
2. Салморбекова Р.Б., Курманов У.Э. Транспортно-логистическая система автомобильного транспорта Кыргызской Республики // Бюллетень науки и практики. 2024. Т. 10, № 9. С. 325–331. DOI: 10.33619/2414-2948/106/34
3. Ghambaryan G.G. Settlement pattern features in mountainous countries (on the Example of the Republic of Armenia) / G.G. Ghambaryan, A.H. Potosyan, V.G. Mkhitarian, V.A. Potosyan, A.A. Ayriyants // Population and Economics. 2024. Vol. 8, no. 3. Pp. 130–155. DOI: 10.3897/popcon.8.e118381
4. Ghambaryan G.G. Problems of economic development of RA in the context of concept «Growth Poles and Centers». Yerevan: YSU Publishing House, 2020. 270 p. DOI: 10.46991/YSUPH/9785808424487 (in Armenian)
5. Kreutzmann H. Pamirian crossroads and beyond: Human geography and geopolitics. Leiden: Brill, 2024. 764 p.
6. Maharjan U. Aviation sector requires drastic reforms [Электронный ресурс] // The Rising Nepal, 21.11.2023. URL: <https://risingnepaldaily.com/news/35198> (дата обращения: 15.12.2024).
7. Bernier X. Regional airports and the accessibility of mountain areas: Networks, importance and contribution to development // International Journal of Sustainable Development and Planning. 2010. Vol. 5, iss. 2. Pp. 130–140. DOI: 10.2495/SDP-V5-N2-130-140
8. Рахимов Б.А. Реализация международных транспортных проектов в Кыргызстане: перспектива строительства железной дороги Китай – Кыргызстан – Узбекистан // Вестник Московского университета. Серия 12. Политические науки. 2020. № 2. С. 80–90.
9. Барыкин С.Е., Бойко И.А., Островская Н.В. Анализ развитости транспортной инфраструктуры Кыргызстана в целях международной интеграции // GLOBUS. 2020. № 6 (52). С. 55–58.
10. Суянтбеков И.Э., Кененбаев А.Т., Байгубатова Н.М. Характеристика транспортной системы Кыргызской Республики и роли в ней автомобильного транспорта [Электронный ресурс] // Техника и технология транспорта. 2023. № 1 (28). ID: 12. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_50427871_27385537.pdf (дата обращения: 15.12.2024).
11. Курманов У.Э. Состояние и перспективы развития воздушного транспорта в Кыргызской Республике // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. 2018. № 5. С. 19–21.
12. Турдугулова Г., Исмаилова Ж.К. Современное состояние и перспективы развития рынка пассажирских авиаперевозок в Кыргызстане // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению: материалы Международной научно-практической конференции. Комсомольск-на-Амуре, 07–11 февраля

2022 г. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. С. 452–455.

13. Valdes V. Determinants of air travel demand in middle income countries // *Journal of Air Transport Management*. 2015. Vol. 42. Pp. 75–84. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2014.09.002

14. Adler N., Hashai N. Effect of open skies in the Middle East region // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2005. Vol. 39, iss. 10. Pp. 878–894. DOI: 10.1016/j.tra.2005.04.001

15. Cline R.C. Air transportation demand forecasts in emerging market economies: a case study of the Kyrgyz Republic in the former Soviet Union / R.C. Cline, T.A. Ruhl, G.D. Gosling, D. Gillen // *Journal of Air Transport Management*. 1998. Vol. 4, iss. 1. Pp. 11–23. DOI: 10.1016/S0969-6997(97)00012-4

16. Тархов С.А. Эволюционная морфология транспортных сетей. Смоленск: Универсум, 2005. 386 с.

17. Кулье М., Тамбурины А. Атлас оползней на территории Кыргызской Республики. Азиатский банк развития, 2023. 76 с. DOI: 10.22617/TCS240020-3

18. Шимомура Н. Проекты реабилитации дороги Бишкек-Ош (I) (II): Отчет о полевом обследовании [Электронный ресурс] // Японское Агентство международного сотрудничества (JICA). Бишкек, 2008. URL: chrome-extension://efaidnbmninnibpcapcglcfindmkaj/https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/12111498_02.pdf (дата обращения: 15.12.2024).

19. Peres D.J., Cancelliere A. Estimating return period of landslide triggering by Monte Carlo simulation // *Journal of Hydrology*. 2016. Vol. 541, iss. 9. Pp. 256–271. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.03.036

20. Torgoev I., Aleshin Yu., Ashirov G. Environmental effects of possible landslide catastrophes in the areas of radioactive waste warehousing in Kyrgyzstan (Central Asia) [Электронный ресурс] // *Semantic Scholar*. 2009. URL: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:197411983 (дата обращения: 15.12.2024).

21. Grosche T., Rothlauf F., Heinzl A. Gravity models for airline passenger volume es-

timation // *Journal of Air Transport Management*. 2007. Vol. 13, iss. 4. Pp. 175–183. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2007.02.001

22. Colin C.H.L. Dynamic relationship between air transport, economic growth and inbound tourism in Cambodia, Laos, Myanmar and Vietnam / C.H.L. Colin, Ya. Zhang, J. Gow, Vu. Xuan-Binh [Электронный ресурс] // *Journal of Air Transport Management*. 2022. Vol. 98. ID: 102161. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2021.102161 (дата обращения: 15.12.2024).

23. Hakim M.M., Merkert R. Econometric evidence on the determinants of air transport in South Asian countries // *Transport Policy*. 2019. Vol. 83. Pp. 120–126. DOI: 10.1016/j.tranpol.2017.12.003

24. Исмаилова Ж.К., Сатыбеков А.Н. Анализ системы управления безопасностью полетов на практике международных аэропортов // *Известия национальной академии наук Кыргызской Республики*. 2023. № 5. С. 227–231.

25. Гусева В.И., Айдарова К.Р. Конкуренция на рынке услуг пассажирских авиаперевозок в Кыргызской Республике на современном этапе // *Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета*. 2020. Т. 20, № 7. С. 16–20.

26. Полешкина И.О. Прогнозирование пассажиропотоков социально значимых авиационных маршрутов внутри арктического региона // *Экономика региона*. 2024. Т. 20, № 2. С. 591–607. DOI: 10.17059/ekon.reg.2024-2-16

27. Назгуль Ж. Туристическая отрасль в Кыргызстане: тенденции и вызовы // *Университет Центральной Азии*. 2017. Доклад № 42. 54 с.

References

1. Kurmanov, U.E. (2020). Transportation of bulky and specific cargo on complex sections of mountain roads of Kyrgyz Republic. *Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Studies*, no. 2 (50), pp. 122–127. (in Russian)

2. Salmorbekova, R., Kurmanov, U. (2024). Transport and logistics system of automobile transport of the Kyrgyz Republic. *Bulletin of Science and Practice*, vol. 10, issue 9, pp. 325–331. DOI: 10.33619/2414-2948/106/34 (in Russian)

3. Ghambaryan, G.G., Potosyan, A.H., Mkhitarian, V.G., Potosyan, V.A., Ayriyants, A.A. (2024). Settlement pattern features in mountainous countries (on the Example of the Republic of Armenia). *Population and Economics*, vol. 8, no. 3, pp. 130–155. DOI: 10.3897/popecon.8.e118381
4. Ghambaryan, G.G. (2020) Problems of economic development of RA in the context of concept “Growth Poles and Centers”. YSU Publishing House, Yerevan, 270 p. DOI: 10.46991/YSUPH/9785808424487 (in Armenian)
5. Kreutzmann, H. (2024). Pamirian cross-roads and beyond: Human geography and geopolitics, Leiden: Brill, 764 p.
6. Maharjan, U. (2023). Aviation sector requires drastic reforms. *The Rising Nepal*, 21.11.2023. Available at: <https://risingnepaldaily.com/news/35198> (accessed: 15.12.2024).
7. Bernier, X. (2010). Regional airports and the accessibility of mountain areas: Networks, importance and contribution to development. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, vol. 5, issue 2, pp. 130–140. DOI: 10.2495/SDP-V5-N2-130-140
8. Rakhimov, B.A. (2020). Implementation of international transport projects in Kyrgyzstan: Prospects of construction of the China-Kyrgyzstan-Uzbekistan Railroad. *Moscow University Bulletin. Series 12. Political Science*, no. 2, pp. 80–90.
9. Byrkin, S.E., Boyko, I.A., Ostrovskaya, N.V. (2020). Analyzing the development of transport infrastructure in Kyrgyzstan for international integration purposes. *Globus*, no. 6 (52), pp. 55–58. (in Russian)
10. Suyuntbekov, I.E., Kenenbaev, A.T., Baigubatova, N.M. (2023). Characteristics of the transport system of the Kyrgyz Republic and the role of road transport in it. *Tekhnika i Tekhnologiya Transporta*, no. 1 (28), ID: 12. Available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_50427871_27385537.pdf (accessed: 15.12.2024). (in Russian)
11. Kurmanov, U.E. (2018). Status and development prospects of air transport in the Kyrgyz Republic. *Nauka, Novyye Tekhnologii i Innovatsii Kyrgyzstana*, no. 5, pp. 19–21. (in Russian)
12. Turdugulova, G., Ismailova, Zh.K. (2022). Current state and prospects of development of the passenger air transportation market in Kyrgyzstan. In: *Nauka, innovatsii i tekhnologii: ot idey k vnedreniyu: Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*, pp. 452–455. (in Russian)
13. Valdes, V. (2015). Determinants of air travel demand in middle income countries. *Journal of Air Transport Management*, vol. 42, pp. 75–84. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2014.09.002
14. Adler, N., Hashai, N. (2005). Effect of open skies in the Middle East region. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 39, issue 10, pp. 878–894. DOI: 10.1016/j.tra.2005.04.001
15. Cline, R.C., Ruhl, T.A., Gosling, G.D., Gillen, D. (1998). Air transportation demand forecasts in emerging market economies: a case study of the Kyrgyz Republic in the former Soviet Union. *Journal of Air Transport Management*, vol. 4, issue 1, pp. 11–23. DOI: 10.1016/S0969-6997(97)00012-4
16. Tarchov, S.A. (2005). Evolutionary morphology of transport networks. Smolensk: Univerzum, 386 p. (in Russian)
17. Coulier, M., Tamburini, A. (2023). Landslides atlas of the Kyrgyz Republic. Aziatskiy bank razvitiya, 76 p. DOI: 10.22617/TCS240020-3 (in Russian)
18. Shimomura, N. (2008). Bishkek-Osh Road Rehabilitation Projects (I) (II): Field Survey Report. *Japan International Cooperation Agency (JICA)*. Available at: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/12111498_02.pdf (accessed: 15.12.2024).
19. Peres, D.J., Cancelliere, A. (2016). Estimating return period of landslide triggering by Monte Carlo simulation. *Journal of Hydrology*, vol. 541, issue 9, pp. 256–271. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.03.036
20. Torgoev, I., Aleshin, Yu., Ashirov, G. (2009). Environmental effects of possible landslide catastrophes in the areas of radioactive waste warehousing in Kyrgyzstan (Central Asia). Semantic Scholar. Available at: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:197411983> (accessed: 15.12.2024).

21. Grosche, T., Rothlauf, F., Heinzl, A. (2007). Gravity models for airline passenger volume estimation. *Journal of Air Transport Management*, vol. 13, issue 4, pp. 175–183. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2007.02.001

22. Colin, C.H.L., Zhang, Ya., Gow, J., Xuan-Binh, Vu. (2022). Dynamic relationship between air transport, economic growth and inbound tourism in Cambodia, Laos, Myanmar and Vietnam. *Journal of Air Transport Management*, vol. 98, ID: 102161. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2021.102161 (accessed: 15.12.2024).

23. Hakim, M.M., Merkert, R. (2019). Econometric evidence on the determinants of air transport in South Asian countries. *Transport Policy*, vol. 83, pp. 120–126. DOI: 10.1016/j.tranpol.2017.12.003

24. Ismailova, Zh.K., Satybekov, A.N. (2023). Analysis of the flight safety management system in the practice of international airports. *News of The National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic*, no. 5, pp. 227–231. (in Russian)

25. Guseva, V.I., Aidarova, K.R. (2020). Competition in the market of the passenger air transportation services in the Kyrgyz Republic at the modern stage. *Herald of KRSU*, vol. 20, no. 7, pp. 16–20. (in Russian)

26. Poleshkina, I.O. (2024). Forecasting passenger traffic of socially significant air routes within the arctic region. *Economy of Regions*, vol. 20, no. 2, pp. 591–607. DOI: 10.17059/ekon.reg.2024-2-16

27. Nazgul, J. (2017). Tourism industry in Kyrgyzstan: Trends and challenges. *Universitet Tsentralnoy Azii. Doklad no. 42, 49 p.* (in Russian)

Сведения об авторах

Курманов Улан Эсембекович, кандидат технических наук, профессор, директор Кыргызского авиационного института им. И. Абдраимова, Ulan.kurmanov@bk.ru.

Салморбекова Рита Бобуевна, доктор социологических наук, профессор кафедры естественно-научных дисциплин Кыргызского авиационного института им. И. Абдраимова, r.salmorbekova@mail.ru.

Исмаилова Жыргал Кусейиновна, кандидат философских наук, доцент, заместитель директора по научной работе Кыргызского авиационного института им. И. Абдраимова, zhyismailova@gmail.com.

Полешкина Ирина Олеговна, доктор технических наук, доцент, старший научный сотрудник отдела научных исследований МГТУ ГА, ipoleshkina@mail.ru.

Information about the authors

Ulan E. Kurmanov, Candidate of Technical Sciences, Professor, Director of the Kyrgyz Aviation Institute named after I. Abdraimov, ulan.kurmanov@bk.ru.

Rita B. Salmorbekova, Doctor of Sociological Sciences, Professor of the Department of Natural Science Disciplines of the Kyrgyz Aviation Institute named after I. Abdraimov, r.salmorbekova@mail.ru.

Zhyrgal K. Ismailova, Candidate of Philosophical Sciences, Associate Professor, Deputy Director for Scientific Work of the Kyrgyz Aviation Institute named after I. Abdraimov, zhyismailova@gmail.com.

Irina O. Poleshkina, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher in the Research Department of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, ipoleshkina@mail.ru.

Поступила в редакцию

22.01.2025

Received

22.01.2025

Одобрена после рецензирования

25.02.2025

Approved after reviewing

25.02.2025

Принята в печать

25.03.2025

Accepted for publication

25.03.2025

МАШИНОСТРОЕНИЕ

- 2.5.12 – Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов;
2.5.13 – Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов;
2.5.14 – Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов;
2.5.15 – Тепловые электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов;
2.5.16 – Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов

УДК 621.396.96

DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-2-71-80

**Динамическое поведение упругой оболочки вращения
параболической формы с жесткой носовой вставкой
под действием подвижной нагрузки**

И.К. Туркин¹, Д.А. Рогов², В.А. Грачев²

¹Московский авиационный институт, г. Москва, Россия

²АО «ОНИП “Технология”» им. А.Г. Ромашина ГНЦ РФ, г. Обнинск, Россия

Аннотация: Материалы статьи содержат результаты оценки напряженно-деформированного состояния, внутренних эквивалентных сил и моментов упругой оболочки вращения параболической формы при ее динамическом нагружении подвижным фронтом избыточного давления, распространяющегося вдоль оси симметрии. Носовая часть оболочки подкреплена изнутри жесткой параболической вставкой. Наличие массивного объекта (носовой вставки) в динамической системе вносит дополнительные возмущения в процесс нестационарного распространения возмущений в тонкостенной оболочке. Параметры взаимодействия ударной волны с поверхностью конструкции сильно локализованы, так как характерное время течения процесса не превышает 20 миллисекунд. Величина действующей подвижной нагрузки на оболочку определяется функцией величины суммарного давления, скорректированной с помощью функции Хевисайда. Приведены результаты расчета для варианта заделки (жесткого закрепления) торца оболочки на неподвижной ответной части. Значения внутренних силовых факторов для оболочек с тремя вариантами исполнения – толщиной 3, 5 и 7 мм, представлены в безразмерном виде. В качестве иллюстраций показаны зависимости от времени, прошедшего с начала взаимодействия с ударной волной носовой части, для внутренних усилий и изгибающих моментов. Характер распространения упругих возмущений в стенке определяется их наложением и переотражением, характер и амплитуда волн которых зависят от конфигурации самой стенки, условий закрепления и параметров действия внешнего избыточного давления. Также даны результаты расчета распределения силовых факторов по длине тонкостенной оболочки в моменты времени достижения ими максимальных значений в абсолютных величинах. Характер общего формоизменения конструкции может быть получен при анализе завершающего графика, на котором показаны изменения по времени значений перемещений жесткой носовой части в продольном направлении.

Ключевые слова: оболочка, жесткая носовая часть, ударная волна, напряженно-деформированное состояние, перемещения.

Для цитирования: Туркин И.К., Рогов Д.А., Грачев В.А. Динамическое поведение упругой оболочки вращения параболической формы с жесткой носовой вставкой под действием подвижной нагрузки // Научный вестник МГТУ ГА. 2025. Т. 28, № 2. С. 71–80. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-2-71-80

**Reaction of the loaded shell of rotation with the rigid nose
of the apparatus to a shock wave in a liquid**

I.K. Turkin¹, D.A. Rogov², V.A. Grachev²

¹Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

²JSC ORPE “Technologiya” named after A.G. Romashin, Obninsk, Russia

Abstract: The materials of the article contain the results of an assessment of the stress-strain state, internal equivalent forces and moments of an elastic shell of rotation of a parabolic shape under its dynamic loading by a moving excess pressure front propagating along the axis of symmetry. The nasal part of the shell is reinforced from the inside by a rigid parabolic insert. The presence of a massive object (nose insert) in a dynamic system introduces additional disturbances into the process of unsteady propagation of disturbances in a thin-walled shell. The parameters of the interaction of the shock wave with the surface of the structure are highly localized, as typical time of the process does not exceed 20 milliseconds. The magnitude of the acting moving load on the shell is determined by the function of the total pressure, adjusted using the Heaviside function. The calculation results are given for the option of sealing (rigid fastening) the end of the shell on a fixed mating part. The values of the internal force factors for shells with three versions – 3, 5 and 7 mm thick – are presented in a dimensionless form. The illustrations show the dependences on the time elapsed since the beginning of interaction with the shock wave of the bow for internal forces and bending moments. The nature of the propagation of elastic perturbations in the wall is determined by their superposition and re-reflection, the nature and amplitude of the waves of which depend on the configuration of the wall itself, the conditions of fixation and the parameters of the action of external overpressure. The results of calculating the distribution of force factors along the length of a thin-walled shell at the time when they reach their maximum values in absolute terms are also given. The nature of the overall design change can be obtained by analyzing the final graph, which shows the time changes in the values of the movements of the rigid nose in the longitudinal direction.

Key words: shell, rigid nose, shock wave, stress-strain state, displacement.

For citation: Turkin, I.K., Rogov, D.A., Grachev, V.A. (2025). Reaction of the loaded shell of rotation with the rigid nose of the apparatus to a shock wave in a liquid. Civil Aviation High Technologies, vol. 28, no. 2, pp. 71–80. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-2-71-80

Введение

Динамическое или импульсное нагружение конструкций вызывает распространение волн деформирования, образующих области возмущений, каждая точка которых характеризуется сильной неоднородностью полей напряженно-деформированного состояния (НДС) материала. При высокоинтенсивном и быстро-текущем нагружении в элементах конструкции могут возникать локализованные зоны напряжений, величина которых может вызвать разрушение данной части, независимо от того, как нагружена остальная часть конструкции. Точная оценка взаимодействия ударной волны и вызванное этим взаимодействием НДС всей упругой оболочки вращения, включающее в себя нестационарные колебания жесткой носовой части, имеет важное значение при разработке эффективных и надежных высокоскоростных летательных аппаратов, эксплуатирующихся в жидкости и газе, что неоднократно подчеркивалось в работах [1–7].

Оценка зависимостей напряжений, деформаций и общего формоизменения – перемещений стенки оболочки от времени в представленной ниже постановке позволяет определять

работоспособность и функционирование конструкции упругого параболоида вращения (оболочки), включающего в носовой части жесткую вставку, при указанном нагружении. Полученные результаты позволяют улучшить алгоритмы проектирования элементов перспективных аппаратов, функционирующих в условиях аэрогидродинамического нагружения и ударного воздействия от внешней среды.

Постановка задачи, метод решения

В представленной работе рассматривается модель взаимодействия плоской ударной волны (подвижной нагрузки) с носовой частью летательного аппарата, представляющая собой тонкостенную оболочку вращения, первоначально находящуюся в свободном, ненагруженном состоянии. Конструкция рассматриваемого элемента, включающая в себя жесткую подкрепляющую вставку, находящуюся в жестком параболическом экране, показана на рис. 1. Принятые в расчете обозначения: f – фокальный параметр, α_0 – угол между нормалью к поверхности и осью симметрии в сечении начала тонкостенной части конструкции, x_0 – длина жесткой носовой вставки по

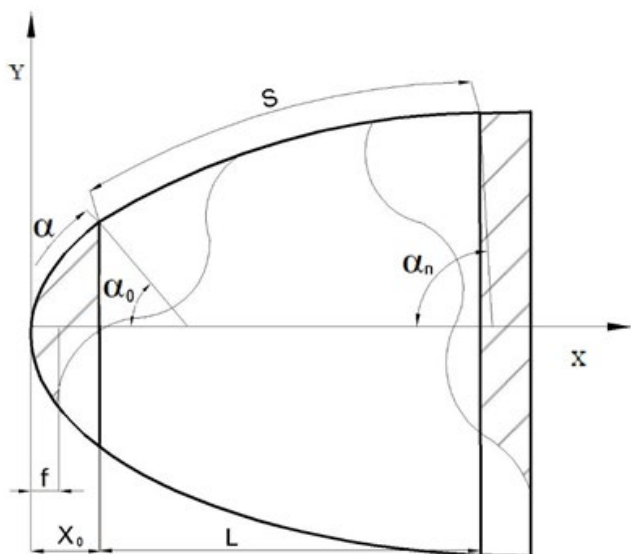


Рис. 1. Параболическая оболочка с жесткой носовой частью

Fig. 1. A parabolic shell with a rigid nose

продольной координате, x_n – длина тонкостенной части конструкции по продольной координате, α_n – угол между нормалью к поверхности и осью симметрии в сечении окончания тонкостенной части конструкции, L – осевая длина оболочки, S – координата по образующей криволинейной поверхности тонкостенной части. В области от α_0 до α_n основные результаты оценки НДС получены для задач о движении в газообразной среде тел произвольной формы под действием движущегося фронта давления волны. Исходные положения и теоретическая проработка представлены в работах [8–18].

Уравнения внешнего обвода оболочки, перемещения, деформации и напряжения, возникающих в ее стенке, определяются зависимостями, представленными следующим образом.

Уравнение образующей внешней поверхности оболочки в прямоугольной системе координат описывается выражением

$$y^2 = 2fx. \quad (1)$$

В качестве основных параметров, определяющих геометрию срединной поверхности параболической оболочки, принимаются фокальный параметр f , углы между нормалью к поверхности и осью симметрии в носовой и торцевой частях оболочки – α_0 и α_n . Текущие

радиусы кривизны оболочки R_1 , R_2 и параметры Ламе A и B с учетом f удовлетворяют следующим соотношениям:

$$R_1 = \frac{f}{\alpha}; R_2 = \frac{f}{\cos \alpha}; k_\alpha = \alpha; k_\beta = \cos \alpha; A = \frac{f}{\alpha}; B = f \tan \alpha, \quad (2)$$

где α – безразмерная координата по меридиональному направлению, k_α и k_β – безразмерные кривизны координатных линий на срединной поверхности. Здесь и далее за характерный размер оболочки принят фокальный параметр параболы (1), равный радиусу кривизны оболочки в вершине.

Безразмерные компоненты деформаций срединной поверхности оболочки с учетом геометрических параметров (2) имеют вид

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= \alpha(U' + W) + \frac{\theta^2}{2}; \quad \epsilon_2 = U + k_\beta W; \\ \epsilon_{1z} &= \alpha(W' + U) - \Phi; \\ \alpha_1 &= \Phi' \alpha; \quad \alpha_2 = \frac{\alpha}{\sin \alpha} \Phi, \end{aligned} \quad (3)$$

где U , W – продольные и поперечные перемещения, θ – угол поворота нормали срединной поверхности при деформации, Φ – угол наклона прямолинейного волокна относительно нормали срединной поверхности оболочки до деформации (характеристика депланации).

Соотношения для продольных усилий в срединной поверхности оболочки $N_{1,2}$ изгибающих моментов $M_{1,2}$ и перерезывающей силы Q , выраженные в безразмерных величинах, представляются в форме

$$\begin{aligned} N_1 &= (\epsilon_1 + \mu \epsilon_2); \quad N_2 = (\mu \epsilon_1 + \epsilon_2); \\ M_1 &= -\alpha_1 - \mu \alpha_2; \quad M_2 = -\mu \alpha_1 - \alpha_2; \\ Q &= \frac{\pi^2}{24} (1 - \mu) \epsilon_{1z}. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь соотношения между безразмерными и размерными силовыми факторами следующие:

$$\begin{aligned} N_i &= \frac{N_i}{D_0}; \quad M_i = \frac{f M_i}{D} (i = 1, 2); \quad Q = \frac{Q}{D_0}; \\ D_0 &= \frac{Eh}{1 - \mu^2}; \quad D = \frac{Eh^3}{12(1 - \mu^2)^2}, \end{aligned} \quad (5)$$

где E – модуль упругости первого рода (модуль Юнга) и μ – коэффициент Пуассона материала оболочки, h – толщина оболочки.

Величина действующей подвижной нагрузки на оболочку определяется согласно

$$P(x, t) = \Phi(bt - x) \cdot H(bt - x), \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \ddot{U} &= k_1 \left[\alpha(N_1 - \theta Q)' + \frac{\alpha}{\sin \sin \alpha} (N_1 - N_2 - \theta Q) + \alpha(\theta N_1 + Q) + \frac{\theta P}{k_0} \right]; \\ \ddot{W} &= k_1 \left[\alpha(Q - \theta N_1)' + \frac{\alpha}{\sin \sin \alpha} (Q + \theta N_1) - \alpha(N_1 - \theta Q) - N_2 \cos \cos \alpha - \frac{P}{k_0} \right]; \\ \ddot{\Phi} &= k_1 \left[-\alpha(M_1)' - \frac{\alpha}{\sin \sin \alpha} (M_1 - M_2) + \cos \cos \alpha \theta M_2 + \frac{12Q}{k_0} \right], \end{aligned} \quad (7)$$

где $k_0 = \frac{h}{R}$; $k_1 = \frac{a^2}{c^2}$; $a = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\mu^2)}}$ – значение

скорости распространения продольных возмущений в оболочке при известных величинах c – скорость распространения звуковых волн и ρ – плотность материала оболочки соответственно.

В начальный момент времени оболочка является неподвижной и ненагруженной, то есть для всех ее точек справедливы условия

$$U = W = \Phi = 0, \quad \dot{U} = \dot{W} = \dot{\Phi} = 0 \text{ при } t = 0. \quad (8)$$

При этом граничные условия на закрепленном торце имеют вид

$$U = W = \Phi = 0 \text{ при } \alpha = \alpha_n. \quad (9)$$

Условия в носовой части, связанной с жесткой параболической вставкой, при $\alpha = \alpha_0$ следуют из равенства ее перемещения вдоль оси симметрии срединной поверхности оболочки. Они определяются соотношениями

$$U = \Delta \sin \alpha_0, \quad W = -\Delta \cos \alpha_0, \quad \Phi = 0 \text{ при } \alpha = \alpha_0. \quad (10)$$

Перемещения жесткой вставки по продольной оси Ox определяется уравнением движения носовой части, записанным в безразмерной форме:

$$\ddot{\Delta}(\tau) = \frac{f}{Mc^2} q(\tau) + G; \quad G = \frac{2\pi f^2 D_0 G_0}{Mc^2}, \quad (11)$$

где функция $\Phi(bt - x)$ характеризует величину суммарного давления; $H(bt - x)$ – функция Хевисайда, x – координата вдоль оси симметрии оболочки, t – время.

Осесимметричное движение оболочки при нагружении (6) можно записать относительно безразмерных величин в следующей форме:

где M – масса жесткой носовой части, $\tau = \frac{ct}{R}$ – безразмерное время.

Безразмерная реакция оболочки G_0 на смещение жесткой носовой части, отнесенная к единице длины окружности торца, имеет вид

$$G_0 = (N_1 - \theta Q) \sin \alpha_0 - (Q + \theta N_1) \sin \alpha_0. \quad (12)$$

Уравнение движения жесткой носовой части можно преобразовать к виду

$$\ddot{\Delta}(\tau) = k_1 [k_2 P_0 q^*(\tau) + k_3 G_0], \quad (13)$$

где решение Δ удовлетворяет нулевым начальным условиям $\Delta = \dot{\Delta} = 0$ при $\tau = 0$, функция $q^*(\tau)$ имеет вид

$$\begin{aligned} q^*(\tau) &= \{1 - e^{-\eta\tau} \\ \text{при } \tau \leq \frac{1}{2} tg^2 \alpha_0 &\left(e^{-\frac{\eta}{2} tg^2 \alpha_0} - 1 \right) e^{-\eta\tau} \\ \text{при } \tau > \frac{1}{2} tg^2 \alpha_0, & \end{aligned} \quad (14)$$

а безразмерные параметры k_2 и k_3 определяются по формулам

$$k_2 = \frac{2\pi r f^3}{M\eta}; \quad k_3 = \frac{2\pi r f^3}{M} tg \alpha_0, \quad (15)$$

где η – коэффициент, характеризующий изменение нагрузки за фронтом ударной волны.

Решение задачи определения параметров НДС оболочки и движения жесткой носовой части в результате действия подвижной на-

грузки может быть представлено решением уравнений движения оболочки (7) и носовой части (14) с учетом начальных (8) и граничных (9), (10) условий.

Система уравнений интегрируется методом конечных разностей по координате и методом Курта – Ларсона по времени.

Результаты расчета динамического отклика оболочки

Результаты численного решения рассматриваемой задачи получены для параболической оболочки (рис. 1) из алюминиево-магниевого сплава АМг6 со следующими геометрическими параметрами: $f = 164$ мм, $\alpha_0 = 54,3^\circ$, $\alpha_n = 74,2^\circ$, $h = 3$ (5, 7) мм, коэффициент скорости распространения динамических возмущений $k_1 = 287,9$, $\rho/\rho^* = 1$ для ρ^* – значение плотности жесткой носовой части.

Действующая на поверхность оболочки нагрузка, представляющая собой подвижный фронт ударной волны, описывается следующим уравнением:

$$p = p_0 e^{-\eta \left(\frac{b}{c} \tau - \frac{1}{2} t g^2 \alpha \right)} \cdot H \left(\frac{b}{c} \tau - \frac{1}{2} t g^2 \alpha \right), \quad (16)$$

с параметрами $p_0 = 1$ МПа – максимальное значение давления во фронте, $\eta = 3$ и $b = c = 330$ м/с.

Зависимости основных параметров, определяющих НДС оболочки, от времени τ и меридиональной криволинейной координаты S представлены на рис. 2–5. Показаны графики изменений изгибающих моментов $M_{1,2}$, продольных усилий $N_{1,2}$ и продольных перемещений носовой части U .

Сравнение величины силовых факторов, воздействующих на оболочку толщиной $h = 3$ мм, может быть сделано из рис. 2 и 3, на которых даны временные зависимости $M_{1,2}$ и $N_{1,2}$ для корневого (α_n) и носового (α_0) сечений оболочки.

В качестве примера распределения нагружающих силовых факторов по продольной безразмерной координате S в сечениях от α_0 до α_n на рис. 4 показаны графики зависимостей $M_2(S)$ в моменты времени (1,63; 2,63; 3,24; 4,05 и 6,1 мс), на которых значения изгибающего момента достигают своих максимумов.

Рассмотрено нагружение оболочки толщиной $h = 3$ мм.

На рис. 5 для определения влияния толщины оболочки на ее НДС представлены сравнительные графики распределения по координате S максимальных изгибающих моментов M_2 с тремя вышеуказанными толщинами 3, 5 и 7 мм в моменты времени, на которых значения изгибающего момента достигают своих максимумов.

Значения перемещений в продольном направлении ($U_{\text{нос}}$) носовой жесткой вставки оболочки в зависимости от времени для вариантов с разной толщиной стенки представлены на графике рис. 6.

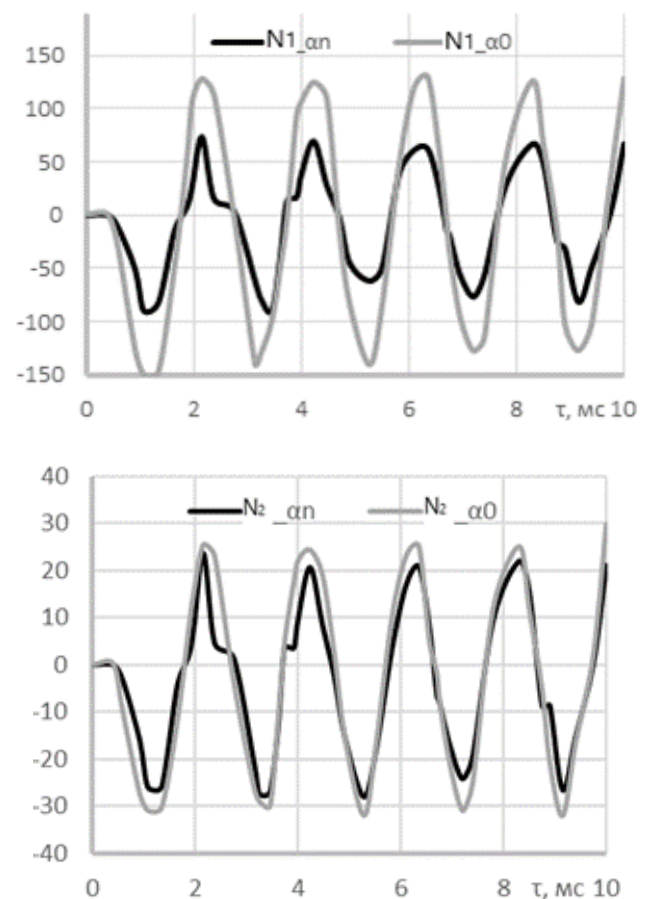


Рис. 2. Зависимость силовых факторов от времени. Продольные и поперечные усилия в срединной поверхности для носового и корневого сечений

Fig. 2. The dependence of force factors on time. Longitudinal and lateral forces in the median surface for nasal and root sections

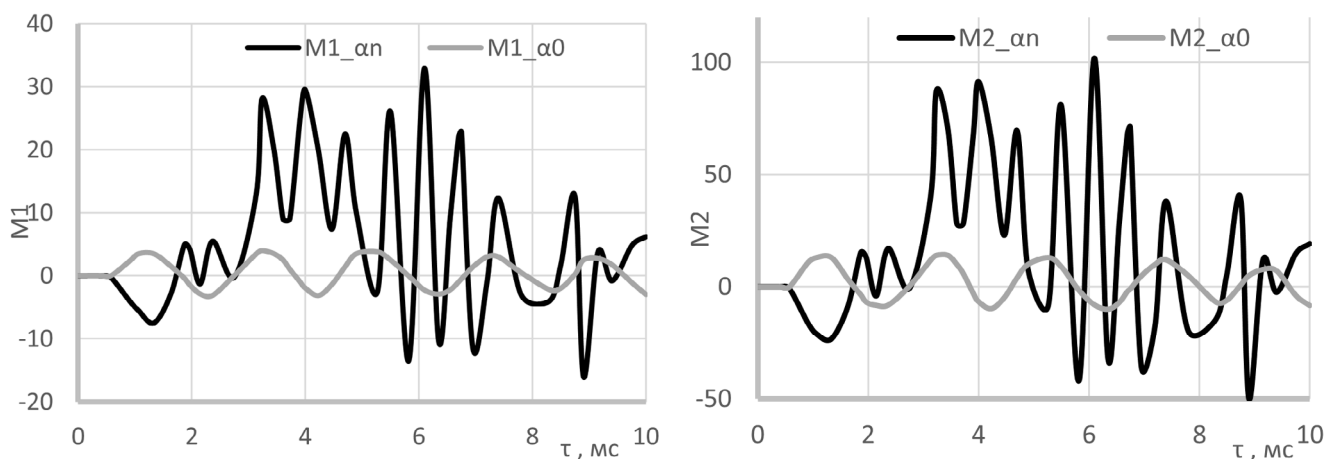


Рис. 3. Зависимость силовых факторов от времени. Изгибающие моменты для носового и корневого сечений

Fig. 3. The dependence of force factors on time. Bending moments for nasal and root sections

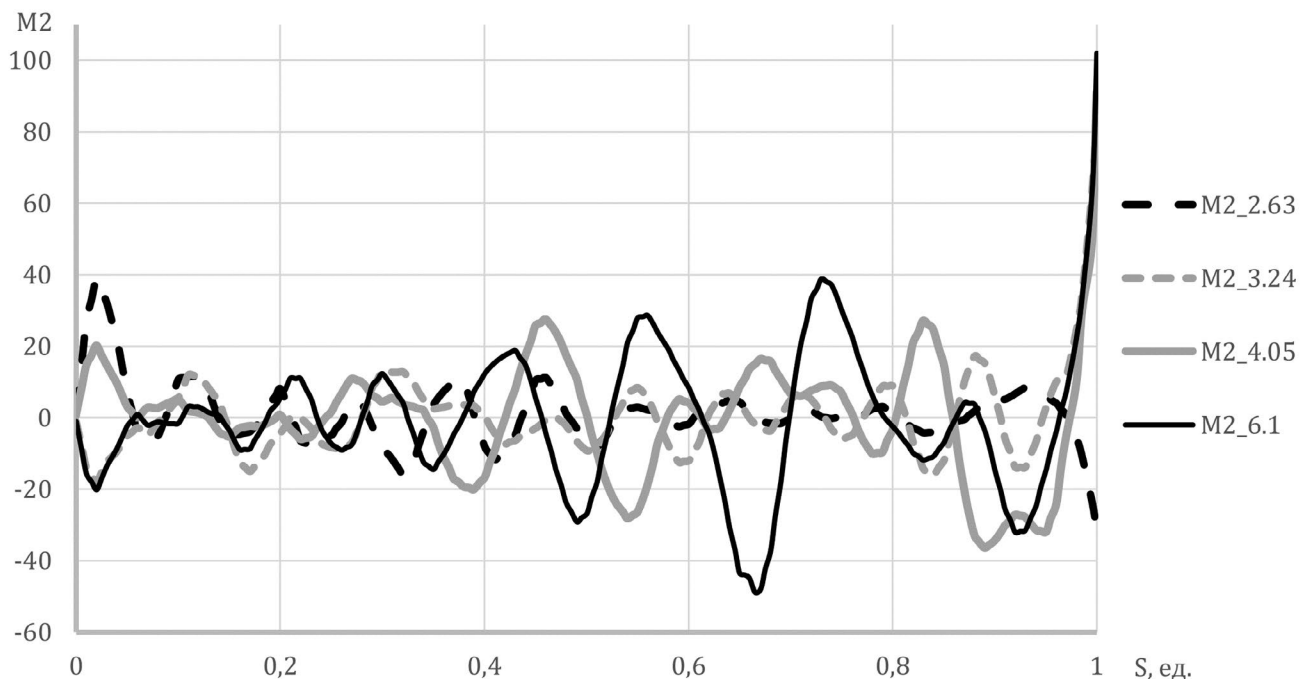


Рис. 4. Значения изгибающего момента M_2 в различные моменты времени по длине

Fig. 4. Values of bending moment M_2 at different time points along the length

Закключение

Представлены результаты оценки напряженно-деформированного состояния и внутренних эквивалентных сил и моментов упругой оболочки вращения параболической формы при ее динамическом нагружении подвижным фронтом избыточного давления, распространяющегося вдоль оси симметрии.

В ходе численного расчета определено напряженно-деформированное состояние стенки оболочки при продвижении вдоль оси симметрии ударной волны и кинематические параметры движения жесткой носовой части и самой оболочки в нескольких характерных точках. Вычислены экстремальные значения растягивающих, сжимающих напряжений, величина которых определяется значениями

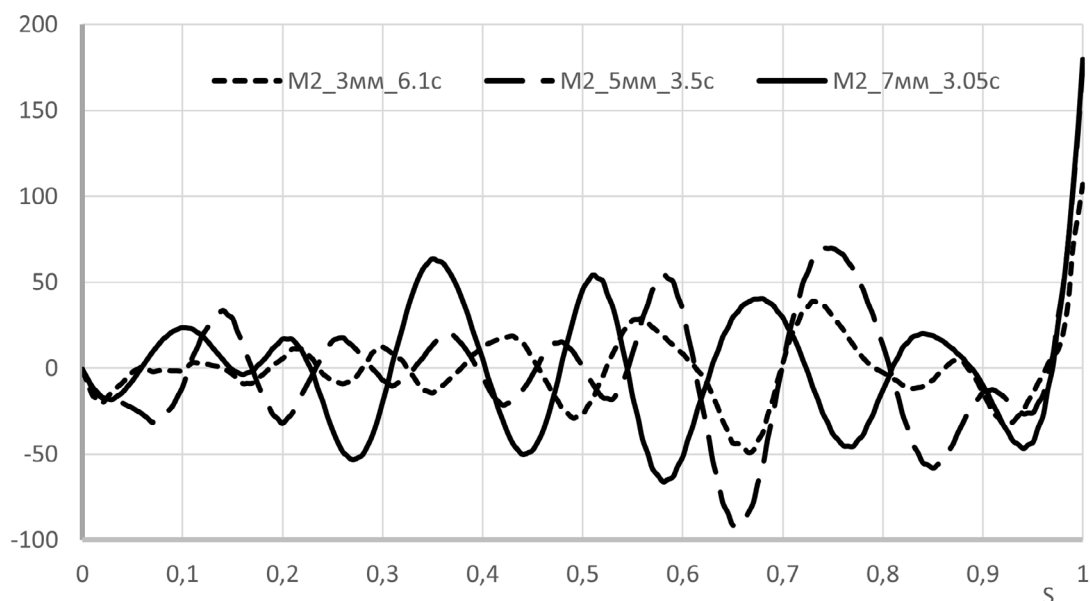


Рис. 5. Распределение по длине максимальных значений изгибающего момента M_2 для нескольких толщин стенки

Fig. 5. Length distribution of maximum bending moment values M_2 for several wall thicknesses

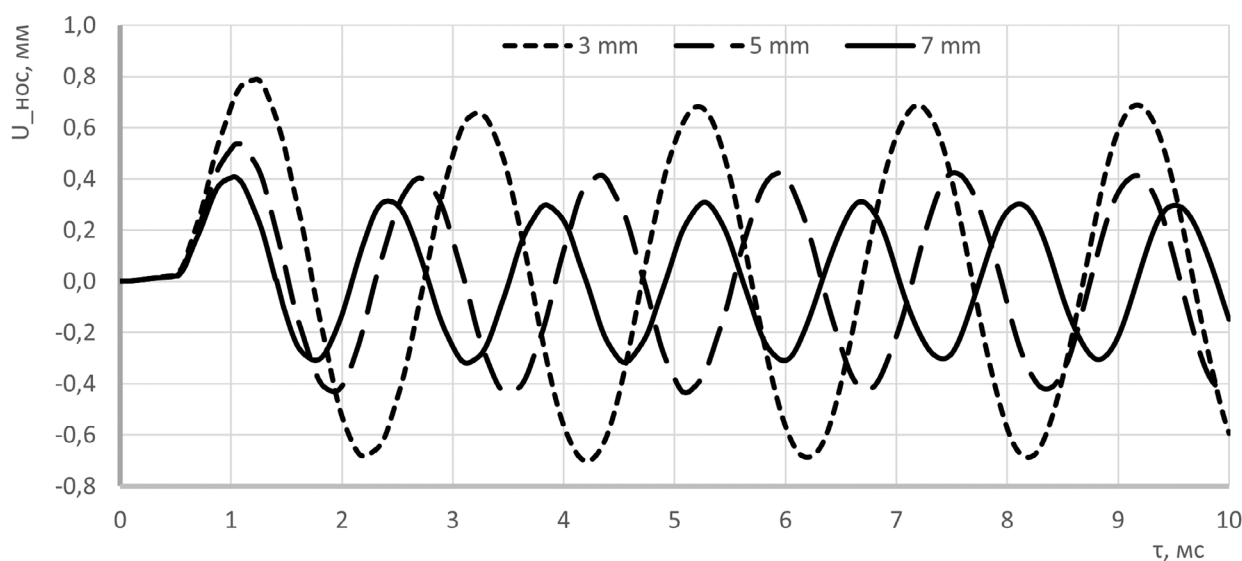


Рис. 6. Продольные перемещения U жесткой носовой вставки по времени

Fig. 6. Longitudinal movements of the U rigid nasal insert over time

продольных усилий в срединной поверхности оболочки $N_{1,2}$, изгибающих моментов $M_{1,2}$ и перерезывающей силы Q .

Список литературы

1. Ионов В.Н., Огибалов П.М. Напряжения в телах при импульсном нагружении. М.: Высшая школа, 1975. 463 с.

2. Соломенко Н.С., Абрамян К.Г., Со рокин В.В. Прочность и устойчивость пластин и оболочек судового корпуса. Л.: Судостроение, 1967. 488 с.

3. Вольмир А.С. Оболочки в потоке жидкости и газа. Задачи аэроупругости. М.: Наука, 1975. 416 с.

4. Глушко С.К., Немировский Ю.В. Прямые и обратные задачи механики упругих

композиционных пластин и оболочек вращения. М.: Физматлит, 2008. 432 с.

5. Ляхов В.Н., Подлубный В.В., Титаренко В.В. Воздействие ударных волн и струй на элементы конструкций: Математическое моделирование в нестационарной газодинамике. М.: Машиностроение, 1989. 392 с.

6. Гостев А.Н. Исследование ударного взаимодействия оболочек вращения с идеальной жидкостью // Научный вестник МГТУ ГА. 2009. № 138. С. 245–247.

7. Глушак Б.Л., Куропатенко В.Ф., Новиков С.А. Исследование прочности материалов при динамических нагрузках. Новосибирск: Наука, 1992. 294 с.

8. Григолюк Э.И., Кузнецов Е.Б. Колическая оболочка под воздействием слабой ударной волны // Доклады АН СССР. 1976. Т. 230, № 2. С. 300–301.

9. Замышляев Б.В., Яковлев Ю.С. Динамические нагрузки при подводном взрыве. Л.: Судостроение, 1967. 387 с.

10. Новожилов В.В. О перемещении твердого тела под действием акустической волны давления // Прикладная математика и механика. 1959. Т. 23, вып. 4. С. 794–796.

11. Григолюк Э.И., Горшков А.Г. Взаимодействие слабых ударных волн с упругими конструкциями // Научные труды ИМ МГУ. 1971. № 13. С. 180.

12. Гузь А.Н., Кубенко В.А. Дифракция упругих волн. Киев: Наукова думка, 1978. 307 с.

13. Григолюк Э.И., Горшков А.Г. Определение гидродинамических нагрузок при взаимодействии слабых нестационарных волн давления с упругими оболочками // Колебания, излучение и демпфирование упругих структур: сборник докладов. М.: Наука, 1973. С. 3–11.

14. Туркин И.К. Исследование взаимодействия упругой оболочки вращения аппарата с ударной волной в жидкости // Системный анализ, управление и навигация: тезисы докладов XXIII Международной научной конференции. Евпатория 01–08 июля 2018 г. М.: МАИ, 2018. С. 95–96.

15. Туркин И.К. Исследование реакции оболочки вращения аппарата с конструктивным элементом в носовой части на ударную волну в жидкости // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: сборник трудов XXVI Международного симпозиума им. А.Г. Горшкова. Вятчи, 16–20 марта 2020 г. М.: ООО ТРП, 2020. Т. 1. С. 223–224.

16. Чернова Н.Д. Реакция параболоида вращения с жесткой носовой частью на действие ударной волны // Научные труды ИМ МГУ, 1984. С. 43–50.

17. Туркин И.К. Взаимодействие предварительно нагруженной оболочки вращения с ударной волной в жидкости // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2022. № 1. С. 137–144.

18. Туркин И.К. Исследование динамического поведения параболической оболочки ЛА с конструктивной массой внутри при термосиловом нагружении // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: материалы XXIX Международного симпозиума им. А.Г. Горшкова. Кременки, 15–19 мая 2023 г. М.: ООО ТРП, 2023. Т. 1. С. 206–207.

References

1. Ionov, V.N., Ogibalov, P.M. (1975). Stresses in bodies under impulse loading. Moscow: Vyshaya shkola, 463 p. (in Russian)

2. Solomenko, N.S., Abramyan, K.G., Sorokin, V.V. (1967). Strength and stability of plates and shells of ship hull. Leningrad: Sudostroyeniye, 488 p. (in Russian)

3. Volmir, A.S. (1975). Shells in liquid and gas flow. Aeroelasticity problems. Moscow: Nauka, 416 p. (in Russian)

4. Glushko, S.K., Nemirovsky, Yu.V. (2008). Direct and inverse problems of elastic composite plates and revolution shells mechanics. Moscow: Fizmatlit, 432 p. (in Russian)

5. Lyakhov, V.N., Podlubnyy, V.V., Titarenko, V.V. (1989). Impact of shock waves and jets on structural elements: Mathematical model-

ing in unsteady gas dynamics. Moscow: Mashinostroyeniye, 392 p. (in Russian)

6. **Gostev, A.N.** (2009). Research of shock interaction of covers of rotation with the ideal liquid. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA*, no. 138, pp. 245–247. (in Russian)

7. **Glushak, B.L., Kuropatenko, V.F., Novikov, S.A.** (1992). Study of material strength under dynamic loads. Novosibirsk: Nauka, 294 p. (in Russian)

8. **Grigolyuk, E.I., Kuznetsov, E.B.** (1976). Conical shell under the action of a weak shock wave. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, vol. 230, no. 2, pp. 300–301. (in Russian)

9. **Zamyshlyayev, B.V., Yakovlev, Yu.S.** (1967). Dynamic loads at underwater explosion. Leningrad: Sudostroyeniye, 387 p. (in Russian)

10. **Novozhilov, V.V.** (1959). On the movement of rigid body under acoustic pressure wave. *Prikladnaya matematika i mekhanika*, vol. 23, issue 4, pp. 794–796. (in Russian)

11. **Grigolyuk, E.I., Gorshkov, A.G.** (1971). Interaction of weak shock waves with elastic structures. *Nauchnyye Trudy IM MGU*, no. 13, p. 180. (in Russian)

12. **Guz, A.N., Kubenko, V.A.** (1978). Diffraction of elastic waves. Kiev: Naukova dumka, 307 p. (in Russian)

13. **Grigolyuk, E.I., Gorshkov, A.G.** (1973). Determination of hydrodynamic loads caused by interaction between pressure's faint non-stationary waves and elastic structures. In: *Kolebaniya, izlucheniye i dempfirovaniye uprugikh struktur: sbornik dokladov*. Moscow: Nauka, pp. 3–11. (in Russian)

sbornik dokladov. Moscow: Nauka, pp. 3–11. (in Russian)

14. **Turkin, I.K.** (2018). Research of interaction between an elastic shell of a device rotation and a shock wave in a liquid. In: *Sistemnyy analiz, upravleniye i navigatsiya: tezisy dokladov XXIII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii*. Moscow: MAI, pp. 95–96. (in Russian)

15. **Turkin, I.K.** (2020). Research of the reaction of the apparatus rotation shell with the structural element in the nose part to the shock wave in the liquid. In: *Dinamicheskiye i tekhnologicheskiye problemy mekhaniki konstruktiv i sploshnykh sred: sbornik trudov XXVI Mezhdunarodnogo simpoziuma im. A.G. Gorshkova*. Moscow: OOO TRP, vol. 1, pp. 223–224. (in Russian)

16. **Chernova, N.D.** (1984). Rotation paraboloid reaction with a rigid nose part to the shock wave action. *Nauchnyye Trudy IM MGU*, pp. 43–50. (in Russian)

17. **Turkin, I.K.** (2022). Interaction of a preloaded elastic shell of revolution with a shock wave in a liquid. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Aviatsionnaya Tekhnika*, no. 1, pp. 137–144. (in Russian)

18. **Turkin, I.K.** (2023). Research of the dynamic response of a shell of an aircraft with the structural inner mass under thermal and force loading. In: *Dinamicheskiye i tekhnologicheskiye problemy mekhaniki konstruktiv i sploshnykh sred: materialy XXIX Mezhdunarodnogo simpoziuma im. A.G. Gorshkova*. Moscow: OOO TRP, vol. 1, pp. 206–207. (in Russian)

Сведения об авторах

Туркин Игорь Константинович, доктор технических наук, профессор кафедры проектирования и прочности авиационно-ракетных и космических изделий Московского авиационного института (национального исследовательского университета), kafedra_602@mail.ru.

Рогов Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, начальник сектора расчетов прочности и надежности АО «ОНПП «Технология»» им. А.Г. Ромашина, rogov.dmitry.76@yandex.ru.

Грачев Виктор Александрович, инженер 2 категории сектора расчетов прочности и надежности АО «ОНПП «Технология»» им. А.Г. Ромашина, viktoralexandrovich.g@gmail.com.

Information about the authors

Igor K. Turkin, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Chair of Design and Strength of Aviation, Rocket and Space Products, Moscow Aviation Institute (National Research University), kafedra_602@mail.ru.

Dmitry A. Rogov, Candidate of Technical Sciences, The Head of the Sector of Strength and Reliability Calculations of JSC ORPE “Technologiya” named after A.G. Romashin, rogov.dmitry.76@yandex.ru.

Viktor A. Grachev, engineer of the 2nd category Sectors of Strength and Reliability Calculations of JSC ORPE “Technologiya” named after A.G. Romashin, viktoralexandrovich.g@gmail.com.

Поступила в редакцию	02.12.2024	Received	02.12.2024
Одобрена после рецензирования	11.02.2025	Approved after reviewing	11.02.2025
Принята в печать	25.03.2025	Accepted for publication	25.03.2025

УДК 629.7.015.4

DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-2-81-92

Методика оценки долговечности шарнирных подшипников

В.К. Харина¹, О.А. Ратенко¹, Г.Б. Варданян¹

¹Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия

Аннотация: В статье представлена усовершенствованная методика оценки долговечности шарнирных подшипников, работающих в условиях колебательных движений, основанная на обработке массива экспериментальных данных, полученных в лабораторных условиях, а также в процессе эксплуатации изделия. Был применен один из вариантов математического моделирования, который использует методы регрессии для аппроксимации функции одной переменной. В качестве объекта исследований рассматриваются шарнирные подшипники, установленные в системах управления самолетом (двигателем) и работающие при циклическом качательном движении. Шарнирные подшипники являются подшипниками скольжения, а амплитуда их качательных движений может изменяться в широком диапазоне от ± 20 до $\pm 60^\circ$. Проблемы расчета долговечности подшипников скольжения достаточно хорошо изучены и задокументированы в соответствующих стандартах: ГОСТ 1144-75 «Подшипники качения. Методы расчета долговечности»; ГОСТ 15084-78 «Подшипники скольжения. Методы расчета долговечности». Шарнирные подшипники являются подшипниками скольжения, но в то же время существует множество технических решений, в которых подшипники работают в условиях колебательных движений, например в узлах приводов закрылков, в системах управления самолетом и т. д. Особенности условий эксплуатации обуславливают специфические виды дефектов, выявленные при экспериментальных исследованиях. Показано, что известные методы расчета долговечности подшипников скольжения не позволяют получать приемлемые практические результаты при оценке долговечности подшипников, работающих при циклическом качательном движении.

Ключевые слова: шарнирные подшипники, методы расчета долговечности, оценка работоспособности, экспериментальные исследования, усталостные разрушения.

Для цитирования: Харина В.К., Ратенко О.А., Варданян Г.Б. Методика оценки долговечности шарнирных подшипников // Научный вестник МГТУ ГА. 2025. Т. 28, № 2. С. 81–92. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-2-81-92

Methodology for assessing the spherical plain bearings durability

V.K. Harina¹, O.A. Ratenko¹, G.B. Vardanyan¹

¹Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

Abstract: The article presents an improved method for assessing the durability of spherical plain bearings, operating under the conditions of oscillatory motion, based on the processing of an array of experimental data obtained in laboratory conditions as well as during operation of the product. One of the options of mathematical modeling was applied, which uses regression methods to approximate the function of one variable. As an object of research, spherical plain bearings installed in aircraft (engine) control systems and operating in cyclic rocking motion are considered. Spherical bearings are plain bearings, and the amplitude of their rocking movements can vary over a wide range from $\pm 20^\circ$ to $\pm 60^\circ$. The problems of calculating the service life of plain bearings are well studied and documented in the relevant standards GOST 1144-75 “Rolling bearings. Methods for calculating durability”, GOST 15084-78 “Plain bearings. Methods for calculating durability”. Spherical bearings are plain bearings, but at the same time, there are many technical applications in which bearings operate under conditions of oscillatory motion, for example, in flap drive units, in aircraft control systems, etc. Features of operating conditions determine the specific types of defects identified in experimental studies. It is shown that the known methods for calculating the durability of plain bearings do not allow obtaining acceptable practical results in assessing the service life of bearings operating in cyclic rocking motion.

Key words: spherical bearings, methods for calculating durability, assessment of working efficiency, experimental research, fatigue damage.

For citation: Harina, V.K., Ratenko, O.A., Vardanyan, G.B. (2025). Methodology for assessing the spherical plain bearings durability. Civil Aviation High Technologies, vol. 28, no. 2, pp. 81–92. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-2-81-92

Введение

Подшипники скольжения находят широкое применение в различных областях техники, в том числе в авиационной технике [1]. Они относятся к категории особо ответственных узлов, долговечность которых в значительной степени определяет долговечность изделия в целом [2]. Вопросы долговечности подшипников скольжения достаточно хорошо изучены и задокументированы в соответствующих стандартах [3]. Однако большинство проведенных исследований относятся к подшипникам, работающим в условиях непрерывного вращения. В ряде конструкций, например в системах управления самолетом и двигателем, подшипники работают в условиях колебательного движения. Известные методы расчета долговечности таких подшипников не позволяют получать приемлемые практические результаты.

В настоящей работе на основании обработки и анализа результатов экспериментальных исследований шарнирных подшипников в лабораторных условиях, а также в составе изделий в процессе эксплуатации была разработана методика оценки долговечности подшипников скольжения, работающих при качательном движении. Подвижное соединение реализуется при взаимном колебательном перемещении одного кольца подшипника относительно другого. Угол смещения одного кольца подшипника относительно другого является наибольшим допустимым углом между осями колец подшипника. С учетом действия внешней нагрузки и условий работы подшипников приводятся формулы для предварительного расчета количественных показателей долговечности подшипников, совершающих качательные движения при разных углах качания (от ± 20 до $\pm 60^\circ$) [3].

Объект испытаний и методология исследований

Теоретической основой расчета подшипников на усталостную прочность является теория Герца [4]. При расчете подшипников на долговечность также учитываются характеристики усталостной прочности материалов, которые определяются экспериментальным путем. Долговечность имеет большее рассеяние, чем многих других агрегатов. Это связано в основном с локальным характером распределения напряжений и использованием в подшипнике значительного числа взаимодействующих между собой деталей.

Расчет подшипников на долговечность базируется на вероятностно-статистических методах [5]. Долговечность можно определить как время работы в часах, в течение которого не менее 90 % определенной группы подшипников, эксплуатируемых в одинаковых условиях, должны проработать без проявления признаков усталости металла [6]. Статистическое распределение долговечности согласуется с концепцией усталостного разрушения металла, базирующейся на дислокационной теории А.И. Спришевского.

Необходимо обратить внимание на то, что на долговечность подшипников также оказывают влияние такие факторы, как смазка, шероховатость контактных поверхностей, точность изготовления деталей и т. д. В подшипниках качения [7–10] при достаточной смазке и правильном монтаже износ не обнаруживается даже при продолжительной работе, но по истечении определенной наработки подшипника, зависящей от значений нагрузки и числа оборотов или качаний, на рабочих поверхностях возникают усталостные повреждения – сначала в виде рисок, затем появляется шелушение и выкрашивание. Начальные риски чаще всего вызываются неоднородностью материала.

В качестве объекта исследований рассматриваются шарнирные подшипники Ш6, Ш15, Ш20, Ш25 и их модификации (рис. 1). Испытания проводились в эксплуатационных условиях и на испытательных стендах с целью установления фактической долговечности подшипников данного вида. Обычно испытания в эксплуатационных условиях достаточно затруднительны, в связи с тем что необходимо учитывать монтаж, количество масла, конструктивные особенности и т. д. Испытательные стенды дают возможность проводить испытания в широких диапазонах режимов, моделирующих эксплуатационные. Методика

исследования определяет предварительные действия, условия проведения испытаний, обработку и анализ результатов испытаний.

Методика предполагает испытания трех видов.

Полные испытания на долговечность, в результате которых уточняется соответствие параметров и коэффициентов работоспособности подшипников данных типоразмеров. Были отобраны шарнирные подшипники, изготовленные в соответствии с ЕТУ 100 или ГОСТ 3635-78 [11].

Контрольные замеры для оценки соответствия качества продукции подшипниковых заводов. Для контрольных замеров использовались подшипники со сборки, часть подшипников разбирали, проводили металлографический анализ, проверяли отсутствие ожогов и трещин.

Испытания для проверки материалов и технологических особенностей.

Результаты исследований

В процессе работы проводились экспериментальные исследования шарнирных подшипников в лабораторных условиях, на испытательных стендах и в составе изделий авиационной техники. В частности, подшипники Ш6 работали в узлах стопор-ограничителя в поводке управления двигателя, а подшипники Ш15 были установлены в узлах навески двигателя.

На первом этапе проводился анализ повреждений элементов конструкции подшипников в процессе их испытаний [11, 12]. Так, сферические поверхности колец подшипников Ш6 при наработке 2 087–2 291 ч в зоне нагружения имеют оплавление и выработку металла (рис. 2, 3).

Рабочие поверхности внутренних и наружных колец подшипников имеют пригар смазки и выработку металла в виде глубоких раковин глубиной до 0,2 мм. На внутренних кольцах имеется износ в виде смятия металла глубиной до 0,3 мм. До 50 % поверхности колец всех подшипников покрыты слоем коррозии глубиной до 0,5 мм (рис. 4, 5).

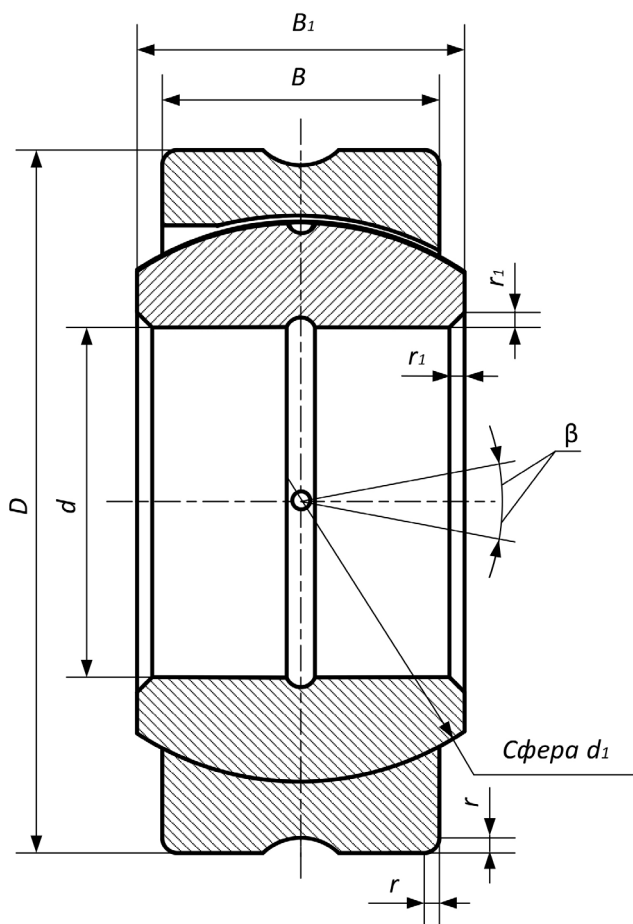


Рис. 1. Шарнирный подшипник:
 $D, d, B_1, B, r, r_1, r_2, d_1$ – соответствующие геометрические размеры; β – угол качания подшипника

Fig. 1. Spherical plain bearing:
 $D, d, B_1, B, r, r_1, r_2, d_1$ are the corresponding geometric dimensions; β is the swing angle of the bearing

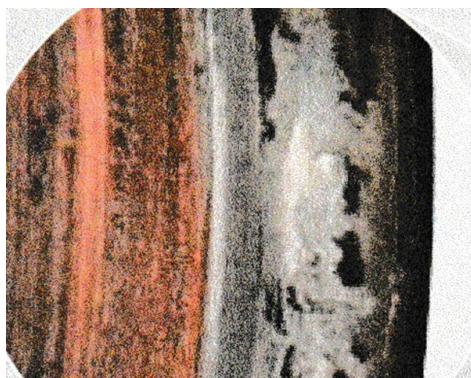


Рис. 2. Оплавленная поверхность подшипника
в зоне нагружения

Fig. 2. The melted surface of the bearing
in the loading zone

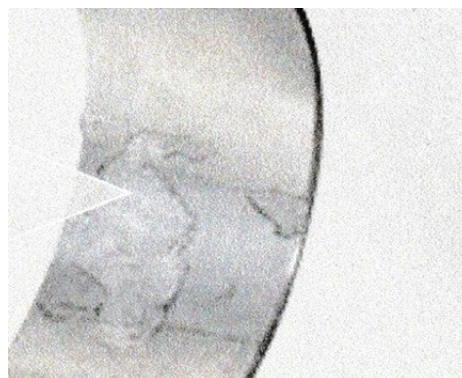


Рис. 3. Выработка металла кольца подшипника
в зоне нагружения

Fig. 3. Metal wear of the bearing ring
in the loading zone

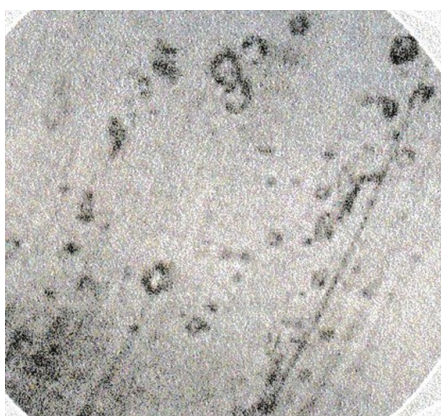


Рис. 4. Раковины глубиной до 0,2 мм

Fig. 4. Cavities up to 0.2 mm deep

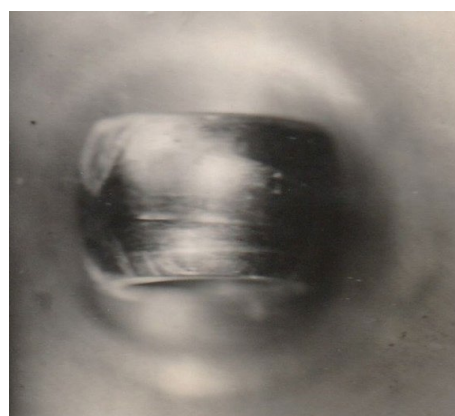


Рис. 5. Смятие металла глубиной до 0,3 мм

Fig. 5. Metal crumpling, up to 0.3mm deep

Подшипники типа Ш15 были установлены в узлах навески двигателя (расчетная нагрузка 40 кН). В ходе исследования было установлено следующее. Сферические поверхности колец подшипников в зоне нагружения имеют износ в виде полосовой выработки металла глубиной до 0,1 мм, смещенной от центра (рис. 6). До 40 % поверхности колец подшипников покрыты слоем коррозии глубиной до 0,2 мм (рис. 7).

Осевая игра подшипников равна 0,08–0,14 мм. По ГОСТ для новых подшипников она составляет 0,93–0,1 мм (табл. 1). Смазка в подшипниках отсутствовала. Осевая игра представляет собой смещение одного кольца

подшипника относительно другого. Величина осевой игры зависит от конструкции подшипников, способа установки и радиального зазора. Измерение радиального зазора и осевой игры необходимо для определения эксплуатационных качеств подшипника. Осевая игра существенно влияет на сроки службы подшипников и является одним из критериев работоспособности. В ГОСТ 3635-78¹ даны допустимые значения осевой игры для шарнирных подшипников.

¹ ГОСТ 3635-78 Подшипники шарнирные. Технические условия. М.: Стандартиформ, 1991. 25 с.

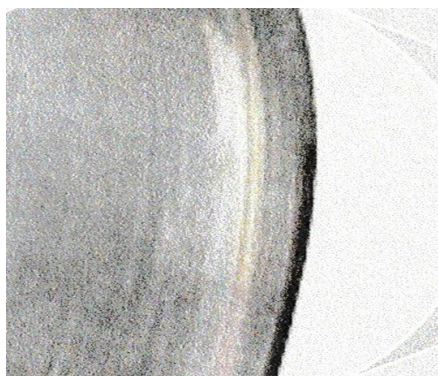


Рис. 6. Выработка металла глубиной до 0,1 мм, смещенная от центра

Fig. 6. Metal wear, up to 0.1 mm deep, offset from the center

Подшипники Ш20 были смонтированы в объекте (узлы навески двигателя), демонтированы после наработки 2 283 ч и исследованы (расчетная нагрузка 80 кН). При исследовании подшипника установлено, что сферические поверхности колец подшипников в зоне нагружения имеют износ [13] в виде полосовой выработки металла глубиной до 0,1 мм (рис. 8).

До 30 % поверхности всех деталей покрыты слоем коррозии вплоть до образования глубоких раковин глубиной до 0,1 мм. Осевая игра в подшипниках составляет от 0,1 до 0,12 мм. Смазка в подшипниках отсутствовала. Результаты испытаний представлены в табл. 1–3.

На втором этапе обработки результатов испытаний и исследований была установлена долговечность подшипников при указанной расчетной нагрузке, определенной разработчиком, и сравнение ее с допускаемой по ГОСТ 3635-78. Результаты сведены в табл. 4.

На третьем этапе были проведены визуальные осмотры подшипников, прошедших испытания на испытательных стендах и в процессе эксплуатации².

² IMS bearings dataset (2014) [Электронный ресурс] // NASA. URL: <https://paperswithcode.com/dataset/ims-bearing-dataset> (дата обращения: 21.10.2024).

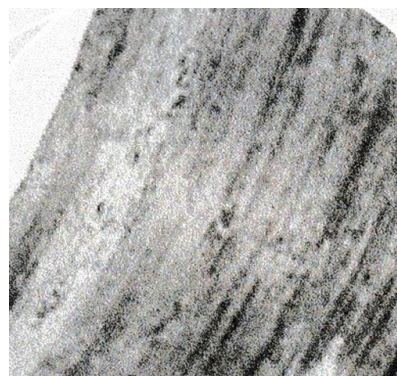


Рис. 7. Коррозия металла глубиной до 0,2 мм

Fig. 7. Metal corrosion, up to 0.2 mm deep

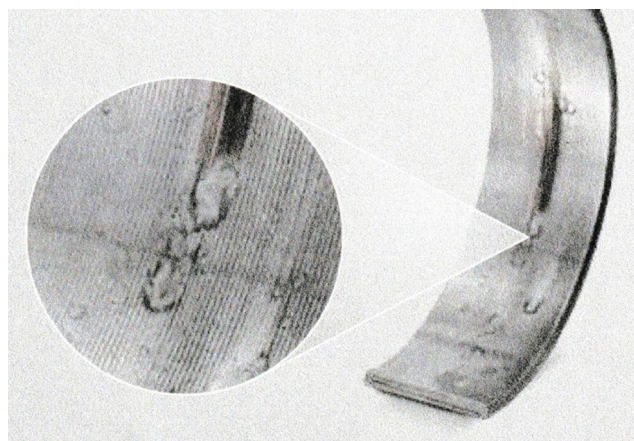


Рис. 8. Образование глубоких раковин глубиной до 0,1 мм

Fig. 8. Formation of deep cavities up to 0.1 mm deep

Неправильная работа подшипников в составе изделия выражалась в том, что паз на наружном кольце и лыска на внутреннем кольце находились в зоне нагружения [14]. Такая ситуация могла возникнуть по двум причинам: 1) проворачивание колец в составе изделия во время эксплуатации; 2) неправильный монтаж подшипника.

В ведомости согласования применения подшипников проставлены расчетные нагрузки, предположительно действующие на подшипник в постоянном режиме качения, а также максимальные, действующие на подшипник кратковременно. Допускаемые нагрузки по ГОСТ 3635-78 при числе повторных нагрузок не более 5 000.

Таблица 1
Table 1

Результаты испытаний подшипников Ш6
Ш6 bearing test results

Номер подшипников Ш6	Нагрузка, Н	Наработка, ч	Осевая игра, мм	
			По ГОСТ	Фактическая
1	1 000	2 291	0,03–0,1	0,1
2	1 000	2 260	0,03–0,1	0,14
3	2 000	2 087	0,03–0,1	0,13
4	2 000	2 115	0,03–0,1	0,6
5	3 000	2 163	0,03–0,1	0,75
6	3 000	2 084	0,03–0,1	1,2
7	3 000	2 090	0,03–0,1	0,96

Таблица 2
Table 2

Результаты испытаний подшипников Ш15
Ш15 bearing test results

Номер подшипников Ш15	Нагрузка, Н	Наработка, ч	Осевая игра, мм	
			По ГОСТ	Фактическая
1	40 000	2 283	0,93–0,1	0,14
2	40 000	2 283	0,93–0,1	0,08
3	40 000	2 283	0,93–0,1	0,08
4	40 000	2 283	0,93–0,1	0,09
5	40 000	2 283	0,93–0,1	0,12
6	40 000	2 283	0,93–0,1	0,10
7	40 000	2 283	0,93–0,1	0,09

Таблица 3
Table 3

Результаты испытаний подшипников Ш20
Ш20 bearing test results

Номер подшипников Ш20	Нагрузка, Н	Наработка, ч	Осевая игра, мм	
			По ГОСТ	Фактическая
1	80 000	2 283	0,03–0,1	0,1
2	80 000	2 283	0,03–0,1	0,14
3	80 000	2 283	0,03–0,1	0,13
4	80 000	2 012	0,03–0,1	0,6
5	80 000	1 560	0,03–0,1	0,17
6	80 000	3 001	0,03–0,1	0,1
7	80 000	3 001	0,03–0,1	0,12
8	80 000	3 001	0,03–0,1	0,11

Таблица 4
Table 4

Сравнение расчетной нагрузки с допустимой
Comparison of design load with permissible load

Обозначение подшипника	Расчетная нагрузка, Н	Допускаемая нагрузка по ГОСТ 3635-78, Н
Ш6	1 000–3 000	10 000
Ш15	40 000	51 750
Ш20	87 000	87 000
Ш25	148 000	140 000

Для подшипников, работающих в составе изделия, эксплуатационные нагрузки в 2–3 раза меньше [15]. Для предварительной оценки работоспособности подшипников и на основании проведенных исследований после испытаний была получена формула для теоретического расчета долговечности шарнирных подшипников.

В современной литературе отсутствуют методы расчета долговечности шарнирных подшипников и используются хорошо известные методы расчета долговечности для подшипников качения [3]. Рассмотрим расчет долговечности подшипника на примере ШН8ЮТ.

В концевике узла электропривода закрылков системы управления самолетом устанавливаются шарнирные подшипники марки ШН8ЮТ, изготовленные на ЗГПЗ в соответствии с едиными техническими условиями для самолетостроения. В соответствии с условиями эксплуатации данные подшипники имеют следующие характеристики и условия работы в составе изделия, сведенные в табл. 5.

Максимальная рабочая температура $t = +60$ °С. В методе, описанном в пособии ОАО «ВНИПП» «Рекомендации по выбору, расчету и согласованию подшипников», долговечность подшипников рассчитывается по формуле

$$L = a \left(\frac{C}{P} \right)^k \left(\frac{10^6}{60n} \right), \quad (1)$$

где a – коэффициент, характеризующий совместное влияние качества металла деталей и условий эксплуатации на долговечность подшипника;

C – динамическая грузоподъемность;

K – показатель степени ($K = 1$);

n – частота вращения (принята $n = 10$ об/мин);

P – эквивалентная динамическая нагрузка.

В методе расчета долговечности на базе зависимостей фирмы INA долговечность определяется по формуле

$$L = f_2 f_v \frac{sf}{v}, \quad (2)$$

где f_2 – температурный коэффициент;

f_v – коэффициент скорости скольжения.

Таблица 5
Table 5

Характеристики и условия эксплуатации подшипника ШН8ЮТ в составе изделия.
Characteristics and the operating conditions of the ШН8ЮТ bearing as part of the product

Обозначение подшипника	Размеры	Материал	Радиальная нагрузка, Fr	Угол качения, β	Динамическая грузоподъемность	Статическая грузоподъемность, C_0
ШН8ЮТ	8×17×5/8 d сферы 13	95X18Ш	2050 Н	±60°	6100 Н	15240 Н

Оценка работоспособности подшипника выполняется по эквивалентной нагрузке.

При данном методе расчета долговечность L подшипника в числе качаний определяется в зависимости от допускаемого значения пути трения S .

На основании многочисленных испытаний и проведенных исследований работоспособности на различных режимах в данной статье предлагается определять долговечность шарнирных подшипников [16], работающих при качательном движении, по расчетному удельному давлению, так как интенсивность изнашивания узлов определяется давлением на поверхности [17, 18].

Можно применить один из вариантов математического моделирования, который исполь-

зует методы регрессии для аппроксимации функции одной переменной [19]. Результаты можно сравнить по корреляции и наглядно на графике (рис. 9).

$$P = n^{14,03-0,21x}. \quad (3)$$

5 000 кач. = 25 кг/мм²
25 000 кач. = 20 кг/мм²
50 000 кач. = 15 кг/мм²
100 000 кач. = 10 кг/мм²
500 000 кач. = 4 кг/мм²
1 000 000 кач. = 2 кг/мм²

$$P_{уд.} = \frac{R}{bd_{сф}}, \quad (4)$$

где R – нагрузка, действующая на подшипник, = 2050 Н, или ≈ 205 кг;

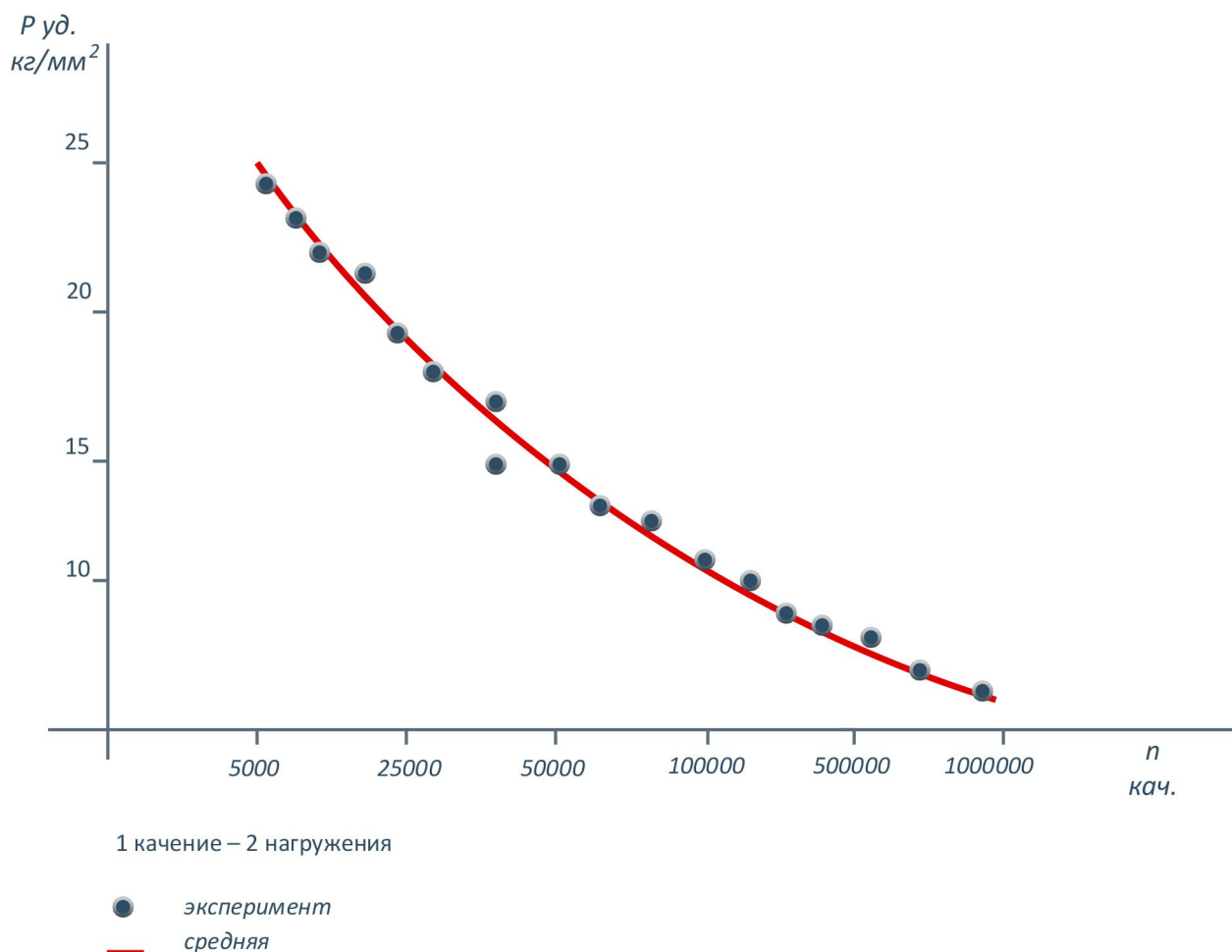


Рис. 9. Зависимость удельного давления от количества качаний

Fig. 9. Dependence of specific pressure on the number of swings

$b, d_{\text{сф}}$ – размеры подшипника.

$b = 5, d_{\text{сф}} = 13$ – размеры по ГОСТ 3635-78.

Полученный результат $3,15 \text{ кг/мм}^2$, в соответствии с графиком зависимости удельного давления и количества совершенных подшипником качаний и табл. 6, дает возможность гарантировать долговечность подшипника при заданных эксплуатационных режимах при работе более чем 500 000 качаний. Так, например, при ресурсе 60 000 летных часов подшипник совершает 100 000 качаний.

Методика оценки долговечности подшипников основана на сравнительном анализе результатов расчетов.

1-й способ – долговечность 4247912,77 ч –

расчет ведется $L = a \left(\frac{C}{P} \right)^k \left(\frac{10^6}{60n} \right)$;

2-й способ – долговечность 4 113 907,456 ч –

расчет ведется $L = f_2 f_v \frac{sf}{v}$;

3-й способ – долговечность 750 000 кач. –

расчет ведется $P_{\text{уд.}} = \frac{R}{bd_{\text{сф}}}$.

Расчеты дают возможность говорить о том, что подшипник соответствует режимам

работы и имеет большой запас по долговечности при правильном монтаже и эксплуатации.

Заключение

Методика оценки проведенных исследований и анализ состояния подшипников в механизмах управления показали, что подшипники имеют идентичное состояние, которое зависит от условий эксплуатации и правильной установки подшипников [20, 21].

1. Подшипники работали продолжительное время с недостаточным количеством смазки, о чем свидетельствует то, что на поверхности колец имеется наличие коррозии, вплоть до образования раковин.

2. На рабочих поверхностях имеются срезы металла, поперечные полосы и другие дефекты.

3. При визуальном осмотре обнаружена выработка металла, коррозия и другие дефекты. Смазка была загрязнена механическими примесями.

4. Проверка хода подшипников от руки показала, что подшипники имеют заедание.

Из изложенного можно сделать вывод, что в соответствии с методикой оценки долговеч-

Таблица 6
Table 6

Размеры некоторых шарнирных подшипников
Dimensions of some spherical plain bearings

Обозначение подшипника	b	$d_{\text{сф.}}$	Обозначение подшипника	b	$d_{\text{сф.}}$
Ш5	4	10	Ш40	22	53
Ш6	4	10	Ш45	25	60
Ш8	5	13	Ш50	28	66
Ш10	6	16	Ш55	32	74
Ш12	7	18	Ш60	36	80
Ш15	8	23	Ш70	40	92
Ш17	10	26	Ш80	45	105
Ш20	12	29	Ш90	50	115
Ш25	16	35	Ш100	55	136
Ш30	18	40	Ш110	55	140
Ш35	21	47	Ш120	70	160

ности подшипников работоспособность подшипников в механизмах управления зависит от условий эксплуатации и правильной установки подшипников, что и показывает состояние подшипников после испытаний.

Исследования показали, что подшипники работали без смазки, часть подшипников во время эксплуатации находилась в таком положении, когда паз наружного кольца и лыска внутреннего кольца находились в зоне нагружения.

Шарнирные подшипники играют важную роль в обеспечении надежности и безопасности авиационных систем. Долговечность напрямую зависит от эксплуатационных характеристик и влияет на сохранение летной годности авиационной техники. В данной работе рассмотрены основные факторы, влияющие на долговечность шарнирных подшипников, включая конструкцию, условия эксплуатации, используемые материалы, методы смазки. Даны рекомендации по расчету долговечности подшипников, работающих при качательном движении.

Список литературы

1. **Арепьев А.Н., Громов М.С., Шапкин В.С.** Вопросы эксплуатационной живучести авиаконструкций. М.: Воздушный транспорт, 2002. 424 с.
2. **Величко Е.И., Колесник И.А.** Материалы, применяемые для изготовления подшипников скольжения ГТУ // Наука. Новое поколение. Успех: сборник материалов III международной научно-практической конференции. Краснодар, 29 апреля 2022 г. Краснодар: Новация, 2022. С. 73–75.
3. **Бейзельман Р.Д., Цыпкин Б.В., Перель Л.Я.** Подшипники качения: справочник. М.: Машиностроение, 1975. 572 с.
4. **Спришевский А.И.** Подшипники качения. М.: Машиностроение, 1968. 631 с.
5. **Басов В.Н.** Влияние длительной эксплуатации самолетов на прочностные характеристики материалов / В.Н. Басов, Г.И. Нестеренко, Б.Г. Нестеренко, В.Г. Петрусенко // Научный вестник МГТУ ГА. 2009. № 141. С. 38–48.
6. **Стрижиус В.Е.** Некоторые аспекты теории и практики обеспечения усталостной прочности и ресурса конструкции современных самолетов транспортной категории // Научный вестник МГТУ ГА. 2009. № 141. С. 66–75.
7. **Harris T.A., Kotzalas M.N.** Rolling bearing analysis. 5th ed. CRC Press Taylor & Francis Group, 2006. 763 p. DOI: 10.1201/9781482275148
8. **Ebert F.J.** Fundamentals of design and technology of rolling element bearings // Chinese Journal of Aeronautics. 2010. Vol. 23, iss. 1. Pp. 123–136. DOI: 10.1016/S1000-9361(09)60196-5
9. **Yu A.** Reliability analysis of rolling bearings considering internal clearance / A. Yu, H.Z. Huang, H. Li, Ya.-F. Li, S. Bai // Journal of Mechanical Science and Technology. 2020. Iss. 34. Pp. 3963–3971. DOI: 10.1007/s12206-020-2206-9
10. **Harris T.A., Kotzalas M.N.** Advanced concepts of bearing technology: Rolling bearing analysis. 5th ed. CRC Press, 2006. 368 p. DOI: 10.1201/9781420006582
11. **Серенсен С.В., Когаев Б.П., Шнейдерович Р.М.** Несущая способность и расчет деталей машин на прочность: руководство и справочное пособие / Под ред. С.В. Серенсена. М.: Машиностроение, 1975. 488 с.
12. **Ли Р.И.** Метод ускоренных усталостных испытаний полимерных материалов / Р.И. Ли, Д.Н. Писарев, М.Р. Киба, А.Ю. Мельников // Наука в центральной России. 2022. № 3 (57). С. 92–102. DOI: 10.35887/2305-2538-2022-3-92-102
13. **Бутушин С.В., Семин А.В.** Целостность элементов конструкции планера при длительной эксплуатации воздушных судов // Научный вестник МГТУ ГА. 2009. № 141. С. 30–37.
14. **Mikic D.** Reliability analysis of rolling bearings considering the bearing radial clearance and operating temperature / D. Mikic, E. Desnica, I. Kiss, V. Mikic // Advanced Engineering Letters. 2022. Vol. 1, no. 1. Pp. 16–22. DOI: 10.46793/adeletters.2022.1.1.3
15. **Перфильева Е.В., Охрименко Н.В., Мозжерин К.В.** Повышение долговечности подшипников // Модели инновационных решений повышения конкурентоспособности

отечественной науки: сборник статей по итогам Всероссийской научно-практической конференции. Стерлитамак, 2021. С. 33–35.

16. **Kumar N., Satapathy R.K.** Bearings in aerospace, application, distress, and life: A review // *Failure Analysis and Prevention*. 2023. Vol. 23. Pp. 915–947. DOI: 10.1007/s 11668-023-01658-z

17. **Adams M.L.** Bearings. Basic concepts and design applications. 1st ed. CRC Press Taylor & Francis Group, 2018. 309 p. DOI: 10.1201/b22177

18. **Harris T.A., Kotzalas M.N.** Essential concepts of bearings technology. 5th ed. CRC Press Taylor & Francis, 2006. 392 p. DOI: 10.1201/9781420006599

19. **Doll G.** Rolling bearings tribology. Elsevier Science, 2023. 290 p. DOI: 10.1016/C2019-0-03591-1

20. **Прохоров В.Ю.** Способ изготовления подшипника скольжения / В.Ю. Прохоров, Быков В.В., Найман В.С., Синюков Н.В., Тащилов С.В. Патент на изобретение № RU 27419721 C2: опубл. 01.02.2021. 8 с.

21. **Luo Y.** Dynamic load distribution of a radially loaded rolling bearing / Y. Luo, K. Ge, Y. Huang, W. Tu [Электронный ресурс] // *Shock and Vibration*. 2025. Vol. 2025. ID: 9098049. DOI: 10.1155/vib/9098049 (дата обращения: 21.10.2024).

References

1. **Арепев, А.Н., Громов, М.С., Шапкин, В.С.** (2002). Issues of aircraft structures operational stability. Moscow: Vozdushnyy transport, 2002. 424 p. (in Russian)

2. **Velichko, E.I., Kolesnik, I.A.** (2022). Materials used for the manufacture of GTU plain bearings. In: *sbornik materialov III mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii Nauka. Novoye pokoleniye*. Krasnodar: Novatsiya, pp. 73–75. (in Russian)

3. **Beyzelman, R.D., Tsyppkin, B.V., Perel, L.Ya.** (1975). Rolling bearings: handbook. Moscow: Mashinostroyeniye, 572 p. (in Russian)

4. **Sprishevsky, A.I.** (1968). Rolling bearings. Moscow: Mashinostroyeniye, 631 p. (in Russian)

5. **Basov, V.N., Nesterenko, G.I., Nesterenko, B.G., Petrusenko, V.G.** (2009). Material property degradation study during aircraft operation. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA*, no. 141, pp. 38–48. (in Russian)

6. **Strijius, V.E.** (2009). Some aspects of the theory and practice of fatigue durability maintenance for transport category modern aircraft structure. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA*, no. 141, pp. 66–75. (in Russian)

7. **Harris, T.A., Kotzalas, M.N.** (2006). Rolling bearing analysis. 5th ed. CRC Press Taylor & Francis Group, 763 p. DOI: 10.1201/9781482275148

8. **Ebert, F.J.** (2010). Fundamentals of design and technology of rolling element bearings. *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 23, issue 1, pp. 123–136. DOI: 10.1016/S1000-9361(09)60196-5

9. **Yu, A., Huang, H.Z., Li, H., Li, Ya.-F., Bai, S.** (2020). Reliability analysis of rolling bearings considering internal clearance. *Journal of Mechanical Science and Technology*, issue 34, pp. 3963–3971. DOI: 10.1007/s12206-020-2206-9

10. **Harris, T.A., Kotzalas, M.N.** (2006). Advanced concepts of bearing technology: Rolling bearing analysis. 5th ed. CRC Press, 368 p. DOI: 10.1201/9781420006582

11. **Serensen, S.V., Kogaev, B.P., Shneyderovich, R.M.** (1975). Bearing capacity and strength calculation of machine parts: manual and reference guide, in Serensen S.V. (Ed.). Moscow: Mashinostroyeniye, 488 p. (in Russian)

12. **Li, R.I., Pisarev, D.N., Kiva, M., Melnikov, A.Yu.** (2022). Accelerated fatigue test method polymer materials. *Science in The Central Russia*, no. 3 (57), pp. 92–102. DOI: 10.35887/2305-2538-2022-3-92-102 (in Russian)

13. **Butushin, S.V., Semin, A.V.** (2009). Integrity of elements of a glider at continued airworthiness. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA*, no. 141, pp. 30–37. (in Russian)

14. **Mikic, D., Desnica, E., Kiss, I., Mikic, V.** (2022). Reliability analysis of rolling bearings considering the bearing radial clearance and operating temperature. *Advanced Engineering Letters*, vol. 1, no. 1, pp. 16–22. DOI: 10.46793/adeletters.2022.1.1.3

15. Perfilieva, E.V., Okhrimenko, N.V., Mozzherin, K.V. (2021). Increasing the durability of bearings. In: *Modeli innovatsionnykh resheniy povysheniya konkurentnosposobnosti otechestvennoy nauki: sbornik statey po itogam Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Sterlitamak, pp. 33–35. (in Russian)

16. Kumar, N., Satapathy, R.K. (2023). Bearings in aerospace, application, distress, and life: A review. *Failure Analysis and Prevention*, vol. 23, pp. 915–947. DOI: 10.1007/s 11668-023-01658-z

17. Adams, M.L. (2018). Bearings. Basic concepts and design applications. 1st ed. CRC Press Taylor & Francis Group, 309 p. DOI: 10.1201/b22177

18. Harris, T.A., Kotzalas, M.N. (2006). Essential concepts of bearings technology. 5th ed. CRC Press Taylor & Francis, 392 p. DOI: 10.1201/9781420006599

19. Doll, G. (2023). Rolling bearings tribology. Elsevier Science, 290 p. DOI: 10.1016/C2019-0-03591-1

20. Prokhorov, V.Yu., Bykov, V.V., Naiman, V.S., Sinyukov, N.V., Tashilov, S.V. (2021). Method of sliding bearing manufacturing. Patent RU 27419721 C2: publ. February 01, 8 p. (in Russian)

21. Luo, Y., Ge, K., Huang, Y., Tu, W. (2025). Dynamic load distribution of a radially loaded rolling bearing. *Shock and Vibration*, vol. 2025, ID: 9098049. DOI: 10.1155/vib/9098049 (accessed: 21.10.2024).

Сведения об авторах

Харина Вера Константиновна, кандидат технических наук, доцент кафедры технической механики и инженерной графики МГТУ ГА, h.vera@bk.ru.

Ратенко Олег Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры технической механики и инженерной графики МГТУ ГА, ratenko.oleg@yandex.ru.

Варданын Георгий Бенурович, кандидат технических наук, доцент кафедры технической механики и инженерной графики МГТУ ГА, g.vardanyan@mstuca.ru.

Information about the authors

Vera K. Harina, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Chair of Technical Mechanics and Engineering Graphics, Moscow State Technical University of Civil Aviation, h.vera@bk.ru.

Oleg A. Ratenco, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Chair of Technical Mechanics and Engineering Graphics, Moscow State Technical University of Civil Aviation, ratenko.oleg@yandex.ru.

Georgiy B. Vardanyan, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Chair of Technical Mechanics and Engineering Graphics, Moscow State Technical University of Civil Aviation, g.vardanyan@mstuca.ru.

Поступила в редакцию

16.11.2022

Received

16.11.2022

Одобрена после рецензирования

17.02.2025

Approved after reviewing

17.02.2025

Принята в печать

25.03.2025

Accepted for publication

25.03.2025

ББК 05
Н 34
Св. план 2025

Научный Вестник МГТУ ГА
Том 28, № 02, 2025
Civil Aviation High TECHNOLOGIES
Vol. 28, No. 02, 2025

Свидетельство о регистрации в Федеральной службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) ПИ № ФС77-47989
от 27 декабря 2011 г.

Оформить подписку на печатную версию журнала можно на сайте объединенного каталога «Пресса России»
www.pressa-rf.ru. Подписной индекс 84254.

Подписано в печать 29.04.2025.

Печать цифровая

Формат 60×90/8

11,75 усл. печ. л.

Заказ № 1089/67

Тираж 50 экз.

Московский государственный технический университет ГА
125993, Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20
Изготовлено в ИД Академии имени Н. Е. Жуковского
125167, Москва, 8-го Марта 4-я ул., дом 6А
Тел.: (495) 973-45-68
E-mail: artpress@mail.ru

© Московский государственный
технический университет ГА, 2025