

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ И ПРОИЗВОДСТВО ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

DESIGN, CONSTRUCTION AND PRODUCTION OF AIRCRAFT

УДК 621.452.3

doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-11

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЛОПАТКИ ВЕНТИЛЯТОРА ПРИ ИМИТАЦИИ УДАРА С ПТИЦЕЙ

А. Р. Лепешкин¹, К. М. Аунг²

^{1,2} Московский авиационный институт, Москва, Россия

¹ lepushkin.ar@gmail.com, ² aungkhinemyint22@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Повреждения элементов авиационной техники при столкновениях с птицами существенно снижают уровень безопасности полетов в гражданской авиации. Наиболее опасным является попадание птицы в двигатель самолета, поэтому исследование соударения птицы с деталями двигателя является актуальной проблемой. *Материалы и методы.* Предлагается расчетно-экспериментальный метод исследования напряженно-деформированного состояния лопатки вентилятора при имитации удара с птицей. Разработанный метод позволяет исследовать ударные процессы и явления в лопатках вентилятора двигателя при имитации соударения с птицей с помощью устройства со специальным ударником и системы регистрации на специальной установке. *Результаты и выводы.* С помощью разработанного метода зарегистрирована временная последовательность событий (картин интерферограмм, перемещений и напряжений) в любой момент времени после начала удара с помощью имитатора птицы (специального ударника) и, соответственно, получены результаты напряженно-деформированного состояния лопатки и параметров ударного процесса. Анализ результатов исследований с использованием разработанного метода позволяет получить изменение напряжений и перемещений в процессе соударения с имитатором птицы и определить участки лопатки, в которых наблюдаются максимальные напряжения и перемещения. Разработанный расчетно-экспериментальный метод и полученные рекомендации можно использовать для исследований нестационарного напряженно-деформированного состояния лопаток вентиляторов и других деталей двигателя и элементов летательных аппаратов при имитации удара с птицей.

Ключевые слова: расчетно-экспериментальный метод, расчетное моделирование, имитатор птицы, лопатка вентилятора, напряжения, перемещения, удар

Для цитирования: Лепешкин А. Р., Аунг К. М. Расчетно-экспериментальный метод исследования напряженно-деформированного состояния лопатки вентилятора при имитации удара с птицей // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 3. С. 110–118. doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-11

CALCULATION AND EXPERIMENTAL METHOD OF STUDYING THE STRESS-STRAIN STATE OF A FAN BLADE WHEN SIMULATING AN IMPACT WITH A BIRD

A.R. Lepeshkin¹, K.M. Aung²

^{1,2} Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

¹ lepushkin.ar@gmail.com, ² aungkhinemyint22@gmail.com

Abstract. *Background.* Damage to aircraft components due to bird strikes significantly reduces the level of flight safety in civil aviation. The most dangerous is when a bird hits an aircraft engine, so the study of bird strikes on engine parts is a pressing issue. *Materials and methods.* A computational and experimental method for studying the stress-strain state of a fan blade during a simulated impact with a bird is proposed. The developed method allows one to study impact processes and phenomena in engine fan blades during a simulated impact with a bird using a device with a special striker and registration systems on a special installation. *Results and conclusions.* The developed method allowed us to record the time sequence of events (interferogram patterns, displacements and stresses) at any time after the start of the impact using a bird simulator (special striker) and, accordingly, to obtain the results of the stress-strain state of the blade and the parameters of the impact process. Analysis of the research results using the developed method allows us to obtain a change in stresses and displacements during the impact with the bird simulator and to determine the blade sections in which maximum stresses and displacements are observed. The developed calculation and experimental method and the obtained recommendations can be used to study the non-stationary stress-strain state of fan blades and other engine parts and aircraft elements during the imitation of an impact with a bird.

Keywords: computational-experimental method, computational modeling, bird simulator, fan blade, stresses, displacements, impact

For citation: Lepeshkin A.R., Aung K.M. Calculation and experimental method of studying the stress-strain state of a fan blade when simulating an impact with a bird. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2025;(3):110–118. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-11

Введение

Анализ повреждений авиационной техники и авиационных газотурбинных двигателей в условиях эксплуатации рассматривается во многих работах [1–7]. Следует также учитывать и повреждения элементов авиационной техники при столкновениях с птицами, которые существенно снижают уровень безопасности полетов в гражданской авиации. Требования к прочностной надежности двигателей летательных аппаратов при столкновении с птицами или обрыве лопатки вентилятора должны быть подтверждены при специальных испытаниях деталей двигателя [1, 7–10]. Наиболее распространенным способом подтверждения птицестойкости двигателя является проведение испытаний с забросом в работающий двигатель птиц, соответствующих по числу и массе. Однако при всей наглядности испытаний с забросом птиц невозможно дать исчерпывающую оценку действительной стойкости двигателя столкновению с птицами. Кроме того, такие испытания характеризуются высокой стоимостью экспериментов в натурном исполнении. Расчетный анализ позволяет расширить знания и представления об ударном процессе взаимодействия птицы с лопаткой вентилятора двигателя и позволяет сократить количество экспериментов и, соответственно, снизить стоимость испытаний. Имеется достаточное количество аналитических и численных моделей [10–16], описывающих поведение лопатки вентилятора при попадании в нее посторонних предметов – птиц. Однако расчетный анализ используется для некоторого косвенного сравнения с экспериментом и не используется для обработки результатов экспериментов.

В связи с этим в данной работе предлагается к рассмотрению расчетно-экспериментальный метод исследования напряженно-деформированного состояния лопатки вентилятора при имитации удара с птицей на специальной установке. Предлагаемый разработанный расчетно-экспериментальный метод имеет научную новизну, теоретическую и практическую значимость и позволяет исследовать ударные процессы и явления и напряженно-деформированное состояние в лопатках вентилятора СУ при имитации соударения с птицей с использованием специального оборудования, системы регистрации с ПЗС-камерой и расчетно-программного обеспечения. ПЗС-камеры успешно используются и в других научных областях [17].

Методика и результаты исследований

Известно, что при исследовании ударных явлений необходимо осуществить запуск регистрирующей аппаратуры до того, как ударник (имитатор птицы) войдет в соприкосновение с исследуемой лопаткой или ее моделью. Это необходимо для того, чтобы регистрация процесса началась в момент контакта или в любое заданное время после начала события. Таким образом, при использовании голографической интерферометрии [18, 19] появляется широкая возможность получить временную последовательность событий (картин интерферограмм и перемещений) в любой момент времени после начала удара с помощью ударника, получающего импульс энергии от электромагнитной катушки. Регистрация развертки исследуемого процесса производилась с использованием цифровой камеры с ПЗС-матрицей на специальной голографической установке. Таким образом была получена последовательность интерферограмм лопатки, соответствующих каждому моменту времени (рис. 1), т.е. с учетом времени задержки после начала удара.

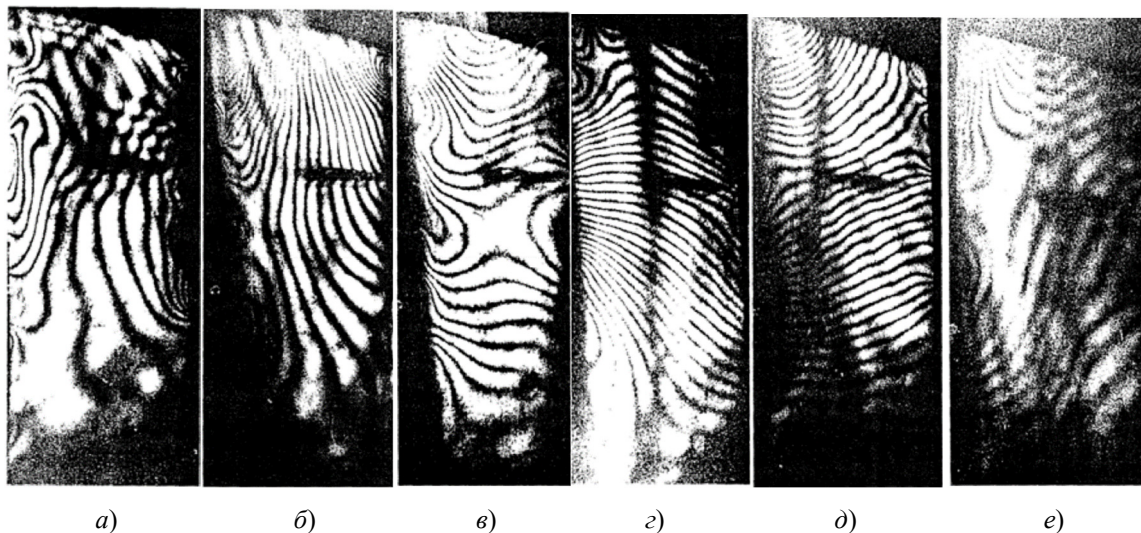


Рис. 1. Последовательность интерферограмм лопатки вентилятора при имитации соударения с птицей:
 $a - \tau = 0,5$ мс; $b - \tau = 1,5$ мс; $в - \tau = 2,5$ мс; $г - \tau = 5$ мс; $д - \tau = 10$ мс; $e - \tau = 25$ мс

Далее начинается расчетная часть разработанного расчетно-экспериментального метода. На первом этапе расчета каждая интерферограмма (соответствующая своему моменту времени) обрабатывается по специальному алгоритму для получения картины перемещений по поверхности лопатки вентилятора. На втором этапе расчета исходные данные в виде картины перемещений и геометрии, а также механические свойства титановой лопатки вентилятора вводятся в конечно-элементную программу Lar Shell. Специализированная программа Lar Shell предназначена для расчета напряженно-деформированного состояния НДС деталей и лопаток в форме оболочек с использованием треугольных элементов. Подготовка исходных данных и более простое формирование конечно-элементной сетки модели лопатки вентилятора в форме оболочки значительно упрощает работу с программой Lar Shell и снижает время получения результатов расчета по сравнению, например, с пакетом программ ANSYS. С использованием Lar Shell (на основе экспериментальных данных по перемещениям) были рассчитаны и получены картины напряженного и деформированного состояния лопатки вентилятора в разные моменты времени ударного процесса. Для проведения расчетных исследований на рис. 2 представлена геометрия лопатки вентилятора с указанием нумерации узлов по периметру лопатки.

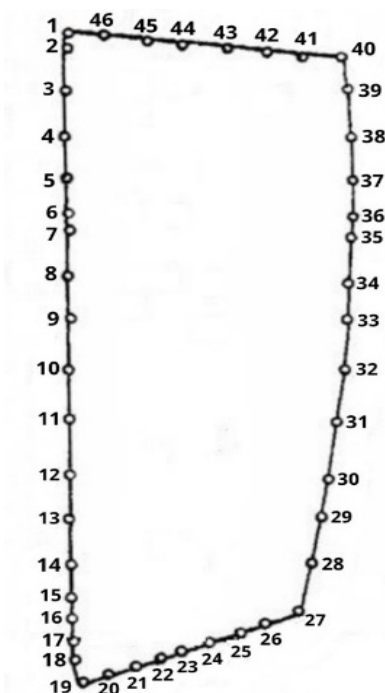


Рис. 2. Геометрия лопатки вентилятора

Для примера одного из проведенных расчетов на рис. 3 представлены интерферограмма (рис. 3,а – время задержки 10 мс) и соответствующие ей картина перемещений (рис. 3,б) и результаты расчета напряжений σ_1 (рис. 3,в) и σ_2 (рис. 3,г).

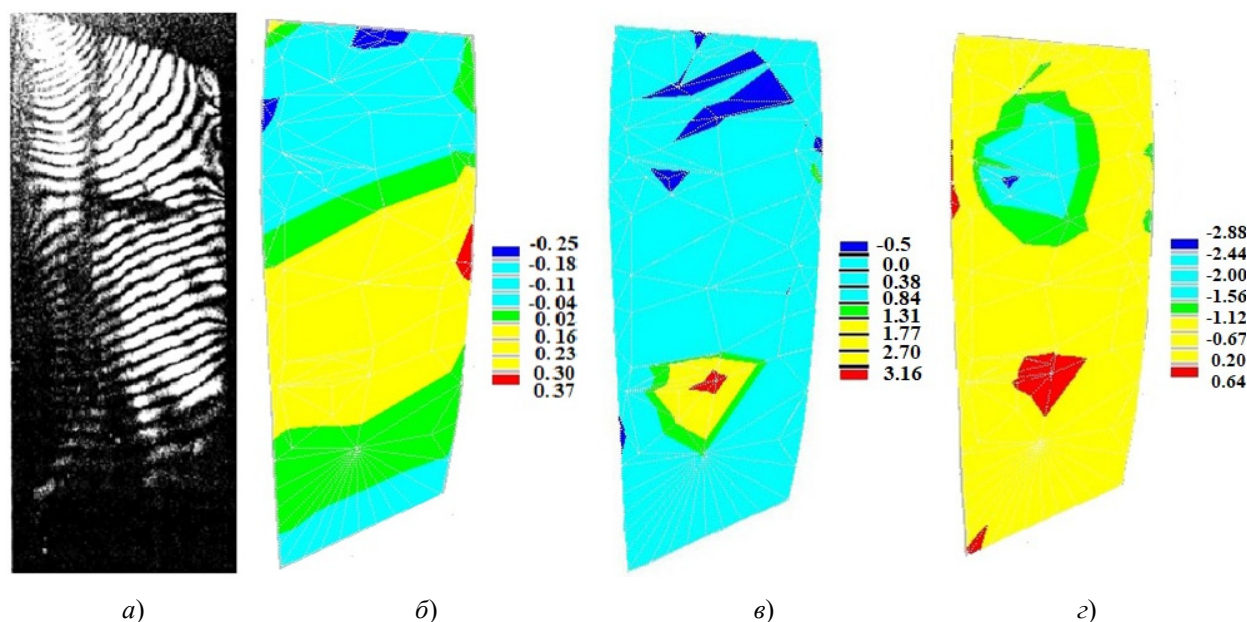


Рис. 3. Интерферограмма (а), картины перемещений (б) и напряжений σ_1 и σ_2 (в, г)

В результате проведенной работы с использованием расчетно-экспериментального метода для лопатки первой ступени вентилятора СУ были получены голографические интерферограммы с различными временами задержки относительно начала удара имитатором птицы (рис. 1), зависимости максимальных перемещений (рис. 4) и напряжений σ_1 (рис. 5) от времени в зоне удара (узел 4) и зависимости напряжений σ_1 во всех узлах периферии (рис. 2) лопатки вентилятора от времени ударного динамического процесса, показанного на рис. 6–9. Несмотря на снижение напряжений после 3 мс в зоне удара (рис. 5), далее можно увидеть, что повышенные напряжения на разных участках лопатки вентилятора будут наблюдаться в последующие моменты времени (рис. 6–9), что характеризуется сложным ударным динамическим и колебательным процессом.

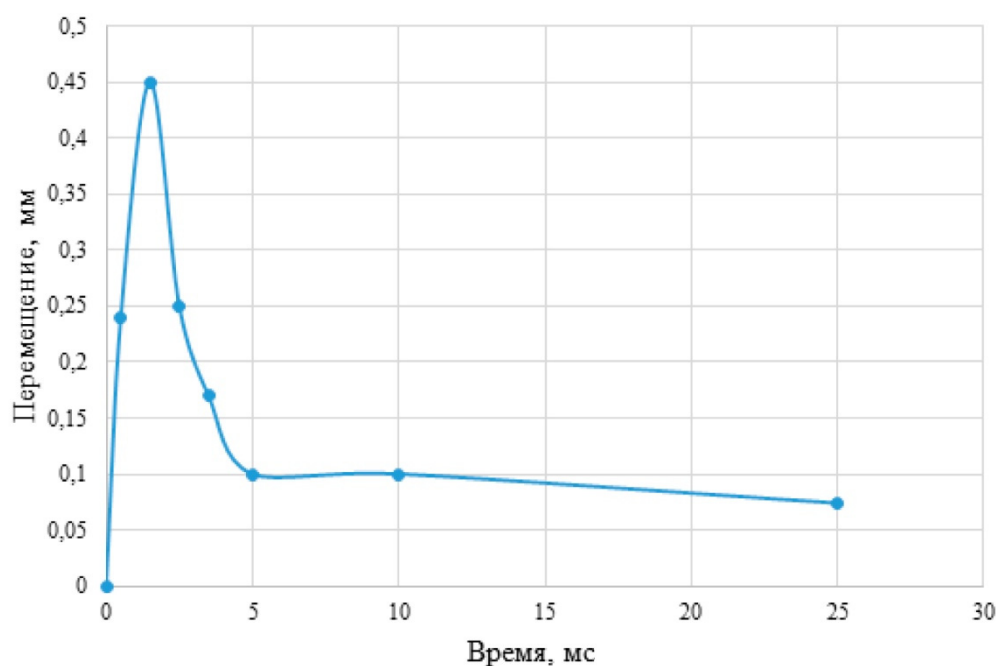


Рис. 4. Зависимость перемещений в зависимости от времени ударного динамического процесса

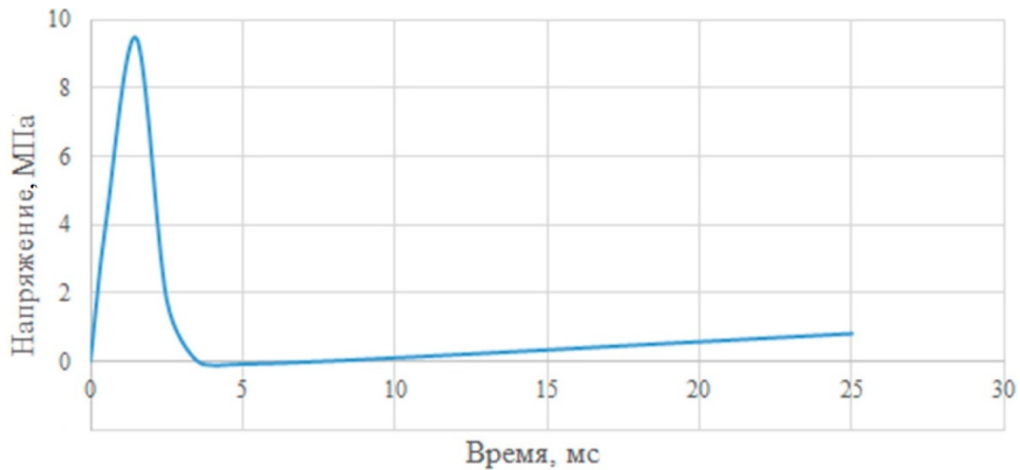


Рис. 5. Зависимость напряжений в зависимости от времени ударного динамического процесса

Полученные результаты позволяют наглядно представить механизм развития ударного динамического процесса. Анализ исследований напряженно-деформированного состояния лопатки вентилятора при имитации соударения с птицей с использованием разработанного расчетно-экспериментального метода показал, что по входной кромке, по которой производится удар, относительно большие напряжения возникают в узле 4 на отрезке времени 0,5...2,5 мс (см. рис. 5), а также в узлах 4, 7 в момент времени 2,5 мс и в узле 8 в момент времени 5 мс не только в этой кромке (см. рис. 6), но и на выходной кромке (узлы 28, 30, 27 на рис. 8) вблизи корневой части лопатки в момент времени 2,5 мс и в корневой части в моменты времени: 2,5 мс (узел 26, 25 на рис. 7), 5 мс (узлы 25, 24, 26 на рис. 7), 25 мс (узлы 22, 21, 23 на рис. 7) и в нижней половине (на середине) лопатки на рис. 3,в.

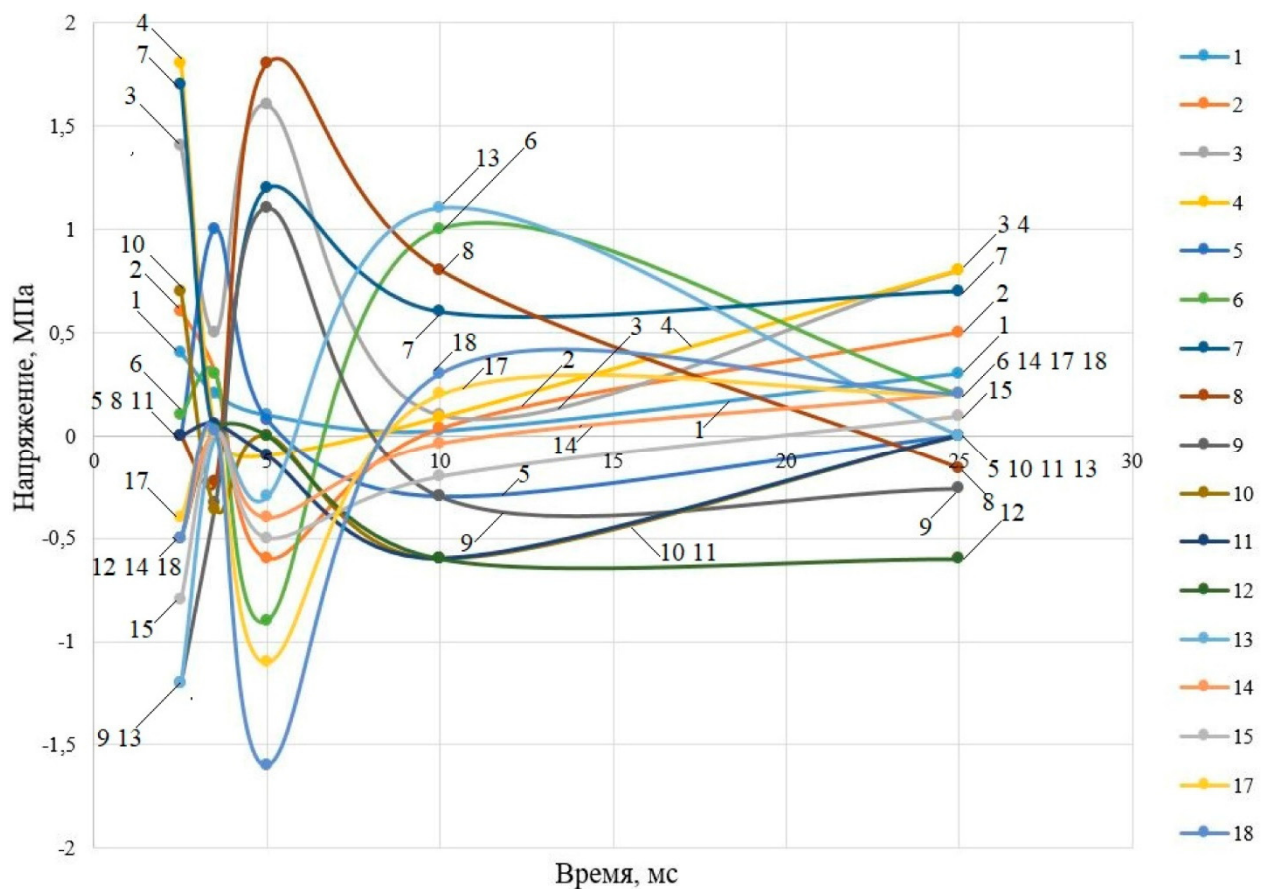
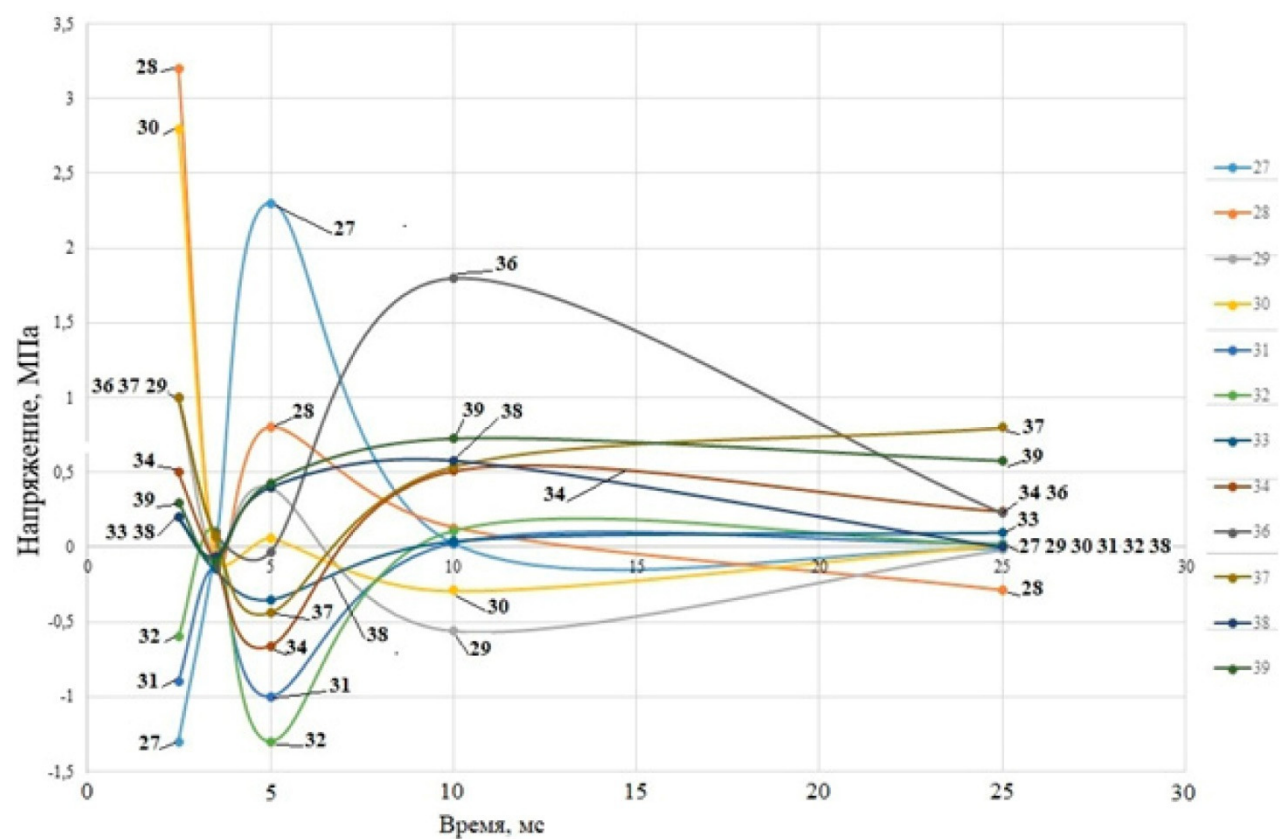
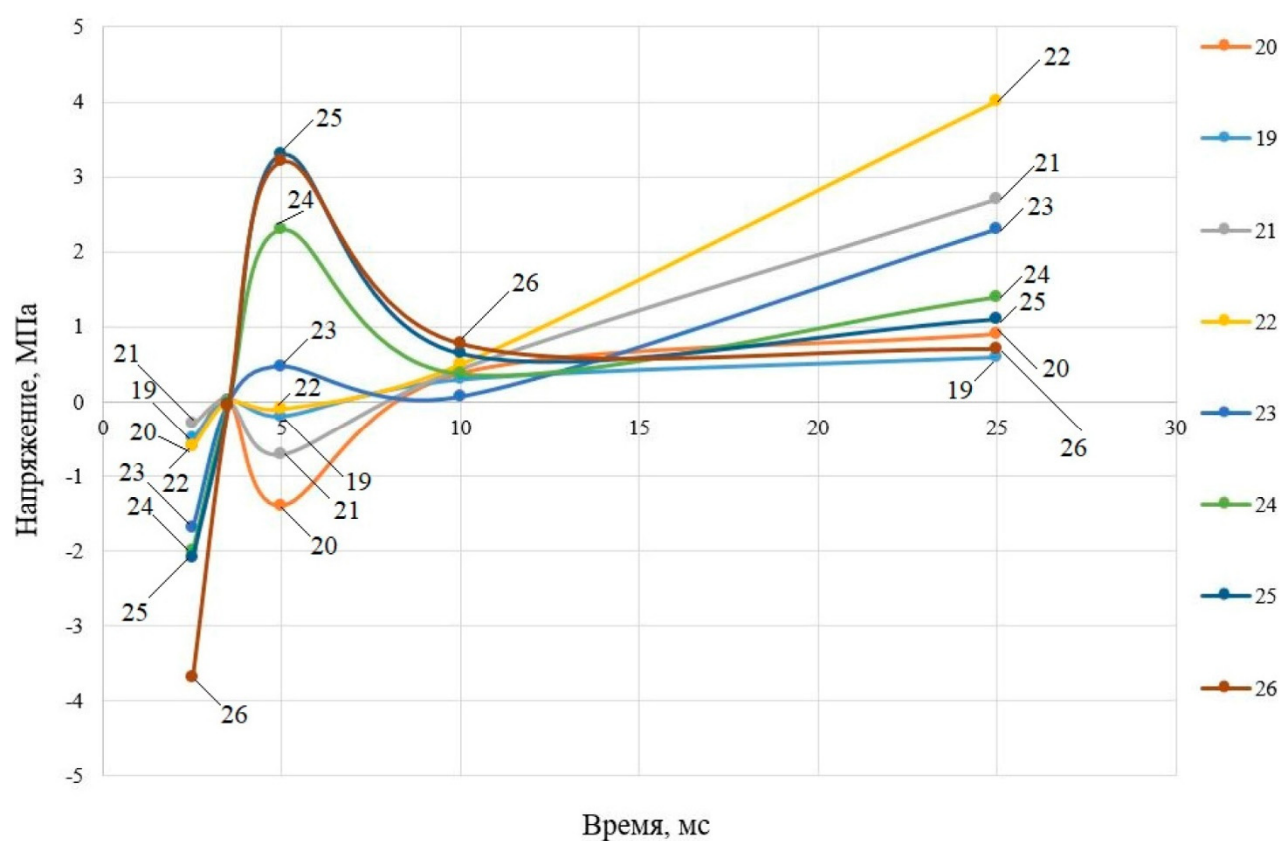


Рис. 6. Зависимости напряжений в узлах 1–18 периферии лопатки вентилятора от времени ударного динамического процесса



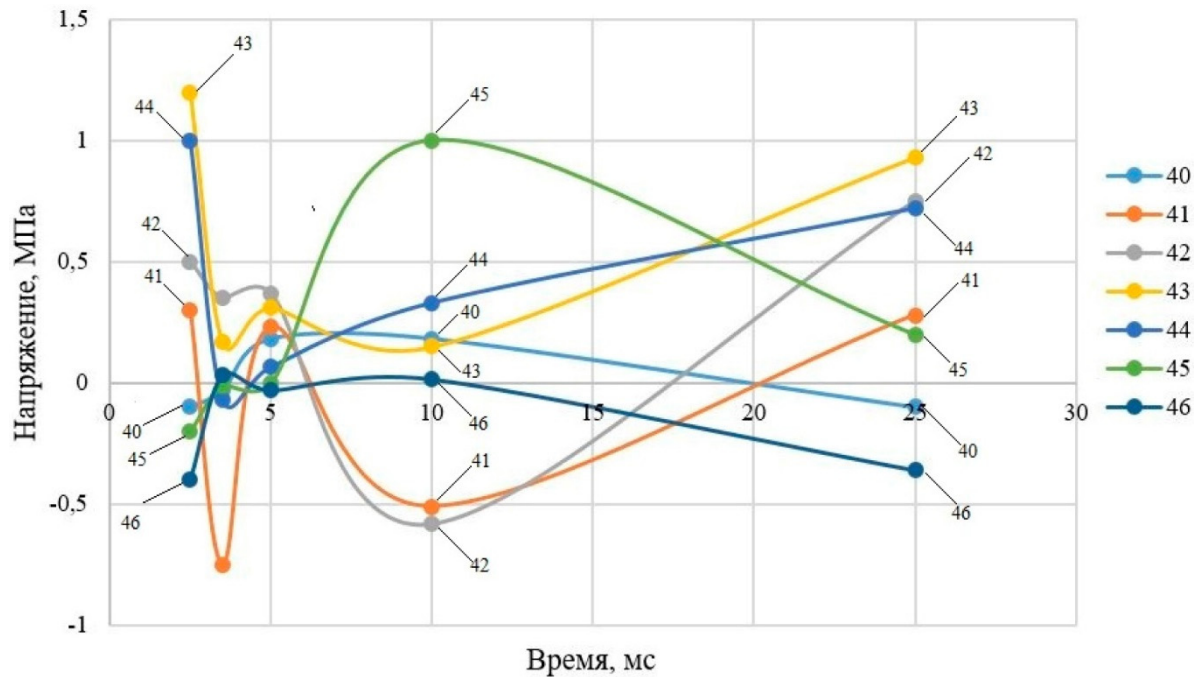


Рис. 9. Зависимости напряжений в узлах 40–46 периферии лопатки вентилятора от времени ударного динамического процесса

Заключение

Разработан расчетно-экспериментальный метод исследования напряженно-деформированного состояния лопатки вентилятора при имитации удара с птицей на основе экспериментальных данных. Предложенный метод позволяет исследовать ударные процессы и явления в лопатках вентилятора силовой установки при имитации соударения с птицей. С помощью данного метода зарегистрирована временная последовательность событий (картин интерферограмм, перемещений и напряжений) в каждый момент времени после начала удара с помощью имитатора птицы (специального ударника). Анализ результатов исследований с использованием разработанного метода показал, что можно получить изменение напряжений и перемещений в процессе соударения с имитатором птицы и определить участки лопатки, в которых наблюдаются максимальные напряжения и перемещения. Разработанный расчетно-экспериментальный метод и полученные рекомендации можно использовать для исследований нестационарного напряженно-деформированного состояния лопаток вентиляторов и других деталей и элементов летательных аппаратов при имитации удара с птицей.

Список литературы

1. Лепешкин А. Р., Ильинская О. И., Маликов С. Б. Динамика и прочность авиационных газотурбинных двигателей : учеб. пособие. М. : Изд-во МАИ, 2020. 100 с.
2. Дмитриев С. А., Симонова Е. С. Анализ отказов и повреждений авиационных двигателей за период 2007–2020 годы // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 81–90. doi: 10.21685/2307-4205-2023-1-10
3. Болотнев В. В., Застела М. Ю., Мирсаитов Ф. Н. К проблеме функциональной диагностики газотурбинного двигателя по спектрам 3D-вибраций // Надежность и качество сложных систем. 2016. № 1. С. 79–85.
4. Барзов А. А., Григорьев А. С., Сеина Я. Д. [и др.]. Модель прогнозирования ресурсных параметров изделий путем мезодиагностирования их функциональной поврежденности при эксплуатации // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 1. С. 109–116. doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-14
5. Садыхов Г. С., Кудрявцева С. С. Нижняя доверительная граница среднего остаточного ресурса невосстанавливаемых объектов // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 38–45. doi: 10.21685/2307-4205-2023-1-5
6. Северцев Н. А., Дарьина А. Н. Применение критериев подобия при ресурсной отработке сложных технических систем и изделий // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 4. С. 5–14. doi: 10.21685/2307-4205-2020-4-1
7. Лепешкин А. Р., Аунг К. М. Методика специальных испытаний элементов летательного аппарата // Научные чтения по авиации, посвященные памяти профессора Н. Е. Жуковского : сб. тр. XXI Всерос. науч.-техн. конф. М. : Экспериментальная мастерская НаукаСофт, 2024. Вып. 12. С. 35–50.

8. Лепешкин А. Р. Поперечный С. С., Ильинская О. И. Испытания элементов ЛА и узлов ГТД на птицестойкость // V отраслевая конференция по измерительной технике и метрологии для исследований летательных аппаратов – КИМИЛА : сб. тр. Жуковский : ЦАГИ, 2023. С. 313–323.
9. Моргачев К. В. Стендовые испытания авиационной техники на столкновение с посторонними предметами (птицестойкость) // Автоматизация в промышленности. 2015. № 10. С. 32–35.
10. Шорр Б. Ф., Гладкий И. Л., Мельникова Г. В. [и др.]. Стендовые испытания по забросу птиц на невращающуюся лопатку вентилятора // Авиационные двигатели. 2020. № 1 (16). С. 31–38. doi: 10.54349/26586061-2020-1-31
11. Badshah S., Naeem A., Rafique A. F. [et al.]. Numerical study on the critical frequency response of jet engine rotors for blade of conditions against bird strike // Applied Sciences. 2019. Vol. 9, № 24. P. 5568. doi: 10.3390/app9245568
12. Wu B., Hedayati R., Li Z. [et al.]. Effect of impact and bearing parameters on bird strike with aero-engine fan blades // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. P. 7. doi:10.3390/app12010007
13. Yella G., Jadhav P., Lande C. Bird-strike analysis on hybrid composite fan blade: blade-level validation // Aerospace. 2023. Vol. 10. P. 435. doi: 10.3390/aerospace10050435
14. Jadhav P. Wavy trailing Edge Feasibility for Aircraft Engine Composite Fan Blade // Materials Science Forum. 2022. Vol. 1060. P. 51–56. doi: 10.4028/p-4ubl99
15. Sharis-Shazzali S., Azam A. N., Meftah H. [et al.]. Numerical modelling of bird strike on rotating engine blades based on variation of porosity density // IJUM Engineering Journal. 2022. Vol. 23, № 1. P. 412–423. doi: 10.31436/ijumej.v23i1.2146
16. Shorr B. F., Serebriakov N. N., Melnikova G. V. [et al.]. Computational and experimental study of bird failure at different speeds of collision with a flexible plate // The International Conference on Aviation Motors (ICAM 2020). Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1891. 012050. doi: 10.1088/1742-6596/1891/1/012050
17. Жабин В. С., Муртазов А. К. Надежность регистрации быстролетящих объектов ПЗС-системой в метеорологической астрономии // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 1. С. 103–108. doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-13
18. Petrov V., Pogoda A., Sementin V. [et al.]. Advances in digital holographic interferometry // Journal of Imaging. 2022. Vol. 8, № 7. P. 196. doi: 10.3390/jimaging8070196
19. Селезнев В. Г., Головченко И. Ю., Ильинская О. И. Определение декремента колебаний компрессорных и турбинных лопаток методом голографической интерферометрии // Авиационная промышленность. 2016. № 4. С. 17–20.

References

1. Lepeshkin A.R., Il'inskaya O.I., Malikov S.B. *Dinamika i prochnost' aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigateley: ucheb. posobiye* = Dynamics and strength of aviation gas turbine engines : a textbook. Moscow: Izd-vo MAI, 2020:100. (In Russ.)
2. Dmitriyev S.A., Simonova E.S. Analysis of failures and damages of aircraft engines for the period 2007–2020. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* = Reliability and quality of complex systems. 2023;(1):81–90. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-1-10
3. Boloznev V.V., Zastela M.Yu., Mirsaitov F.N. On the problem of functional diagnostics of a gas turbine engine based on 3D vibration spectra. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* = Reliability and quality of complex systems. 2016;(1):79–85. (In Russ.)
4. Barzov A.A., Grigor'yev A.S., Seina Ya.D. et al. A model for predicting the resource parameters of products by mesodiagnosing their functional damage during operation. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* = Reliability and quality of complex systems. 2025;(1):109–116. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-14
5. Sadykhov G.S., Kudryavtseva S.S. The lower confidence limit of the average residual resource of non-recoverable objects. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* = Reliability and quality of complex systems. 2023;(1):38–45. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-1-5
6. Severtsev N.A., Dar'ina A.N. Application of similarity criteria in resource testing of complex technical systems and products. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* = Reliability and quality of complex systems. 2020;(4): 5–14. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2020-4-1
7. Lepeshkin A.R., Aung K.M. Methodology of special tests of aircraft elements. *Nauchnyye chteniya po aviatsii, posvyashchennyye pamyati professora N.E. Zhukovskogo: sb. tr. XXI Vseros. nauch.-tekhn. konf. = Scientific readings on aviation dedicated to the memory of Professor N. E. Zhukovsky : proceedings of the XXI All-Russian scientific and technical conference*. Moscow: Eksperimental'naya masterskaya NaukaSoft, 2024;(12):35–50. (In Russ.)
8. Lepeshkin A.R. Poperechnyy S.S., Il'inskaya O.I. Testing of aircraft elements and GTD assemblies for bird resistance. *V otraslevaya konferentsiya po izmeritel'noy tekhnike i metrologii dlya issledovaniy letatel'nykh apparatov – KIMILA: sb. tr. = V Branch Conference on Measuring technology and Metrology for aircraft research – KIMILA : proceedings*. Zhukovskiy: TSAGI, 2023:313–323. (In Russ.)

9. Morgachev K.V. Bench tests of aviation equipment for collision with foreign objects (bird resistance). *Avtomatizatsiya v promyshlennosti = Automation in industry*. 2015;(10):32–35. (In Russ.)
10. Shorr B.F., Gladkiy I.L., Mel'nikova G.V. et al. Bench tests for casting birds onto a non-rotating fan blade. *Aviatsionnyye dvigateli = Aircraft engines*. 2020;(1):31–38. (In Russ.). doi: 10.54349/26586061-2020-1-31
11. Badshah S., Naeem A., Rafique A. F. et al. Numerical study on the critical frequency response of jet engine rotors for blade of conditions against bird strike. *Applied Sciences*. 2019;9(24):5568. doi: 10.3390/app9245568
12. Wu B., Hedayati R., Li Z. et al. Effect of impact and bearing parameters on bird strike with aero-engine fan blades. *Applied Sciences*. 2022;12:7. doi:10.3390/app12010007
13. Yella G., Jadhav P., Lande C. Bird-strike analysis on hybrid composite fan blade: blade-level validation. *Aerospace*. 2023;10:435. doi: 10.3390/aerospace10050435
14. Jadhav P. Wavy trailing Edge Feasibility for Aircraft Engine Composite Fan Blade. *Materials Science Forum*. 2022;1060:51–56. doi: 10.4028/p-4ubl99
15. Sharis-Shazzali S., Azam A.N., Meftah H. et al. Numerical modelling of bird strike on rotating engine blades based on variation of porosity density. *IJUM Engineering Journal*. 2022;23(1):412–423. doi: 10.31436/ijumej.v23i1.2146
16. Shorr B.F., Serebriakov N.N., Melnikova G.V. et al. Computational and experimental study of bird failure at different speeds of collision with a flexible plate. *The International Conference on Aviation Motors (ICAM 2020). Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1891:012050. doi: 10.1088/1742-6596/1891/1/012050
17. Zhabin V.S., Murtazov A.K. Reliability of registration of fast-flying objects by the CCD system in meteoric astronomy. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2025;(1): 103–108. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-13
18. Petrov V., Pogoda A., Sementin V. et al. Advances in digital holographic interferometry. *Journal of Imaging*. 2022;8(7):196. doi: 10.3390/jimaging8070196
19. Seleznev V.G., Golovchenko I.Yu., Il'inskaya O.I. Determination of oscillation decrement compressor and turbine blades by holographic interferometry. *Aviatsionnaya promyshlennost' = Aviation Industry*. 2016;(4):17–20. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Роальдович Лепешкин

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры проектирования
и сертификации авиационной техники,
Московский авиационный институт
(Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4)
E-mail: lepeshkin.ar@gmail.com

Aleksandr R. Lepeshkin

Doctor of technical sciences, associate professor,
professor of the sub-department
of aviation equipment design and certification,
Moscow Aviation Institute
(4 Volokolamskoe highway, Moscow, Russia)

Кхайн Мьинт Аунг

аспирант,
Московский авиационный институт
(Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4)
E-mail: aungkhinemyint22@gmail.com

Khain Myint Aung

Postgraduate student,
Moscow Aviation Institute
(4 Volokolamskoe highway, Moscow, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 04.05.2025

Поступила после рецензирования/Revised 20.05.2025

Принята к публикации/Accepted 15.06.2025