

УДК 621.78

DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-5-24-33

Математическая модель процесса диагностирования дефектов элементов конструкции воздушных судов, выполненных из композиционных материалов

И.А. Давыдов¹

¹*Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени
Главного маршала авиации А.А. Новикова, г. Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация. Научная статья является результатом исследования, направленного на создание математической модели для диагностики дефектов элементов конструкции воздушных судов, изготовленных из композиционных материалов. Исследование отличается новаторским подходом к оценке вероятности возникновения дефектов и их характеристик на основе анализа материальных свойств и технических параметров конструкции. Разработанная модель объединяет в себе методы статистики, математического моделирования и анализа данных, что позволяет получить более точные и надежные результаты. Полученные в ходе исследования выводы могут быть весьма ценными для улучшения методов диагностики и контроля качества в процессе производства и эксплуатации воздушных судов. Повышение уровня безопасности и надежности воздушных судов является одним из главных приоритетов авиационной отрасли, и разработанная математическая модель способствует достижению этой цели. Применение математического моделирования может значительно повысить эффективность диагностики и контроля качества, что в свою очередь положительно влияет на техническую эксплуатацию авиационной техники в целом. Обсуждаются методы анализа и моделирования, направленные на обнаружение и классификацию дефектов, а также их влияние на безопасность и надежность воздушных судов. Рассматриваются современные подходы к контролю качества и техническому обслуживанию, а также предлагаются рекомендации по улучшению процессов диагностики и превентивного обслуживания воздушных судов для обеспечения их безопасной эксплуатации. Стандартизация процессов диагностики и внедрение новых технологий с целью обнаружения дефектов важны для дальнейших исследований. Однако необходимо также учитывать факторы, влияющие на экономическую эффективность и практическую применимость разработанных моделей и методов.

Ключевые слова: композиционные материалы, авиация, диагностирование дефектов, эксплуатация воздушного транспорта, техническое обслуживание, математическая модель.

Для цитирования: Давыдов И.А. Математическая модель процесса диагностирования дефектов элементов конструкции воздушных судов, выполненных из композиционных материалов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2024. Т. 27, № 5. С. 24–33. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-5-24-33

Mathematical model of the process for diagnosing defects in aircraft structure elements made of composite materials

I.A. Davydov¹

¹*Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation
A.A. Novikov, Saint Petersburg, Russia*

Abstract: The scientific article is the result of a study aimed at creating a mathematical model for diagnosing defects in aircraft structural elements made of composite materials. Its feature is an innovative approach to assessing the probability of defects and their characteristics, based on the analysis of the material properties and technical parameters of the structure. The developed model combines methods of statistics, mathematical modeling and data analysis, which provides more accurate and reliable results. The findings obtained from the study may be of great value in improving diagnostic and quality control methods in aircraft manufacturing and operation. This in turn helps to improve the safety and reliability of aircraft, which is one of the main priorities of the aviation industry. The use of mathematical modeling can significantly increase the efficiency of diagnostics and quality control, which in turn has a positive effect on the technical operation of aircraft as a whole. Comprehensive analysis of defects in aircraft composite structures is effective in improving detection accuracy and optimizing maintenance. In modern aviation, where

safety and reliability are crucial, the use of mathematical modeling provides the opportunity not only to identify defects, but also to predict their further development, providing preventative measures. This approach also improves aircraft productivity by reducing maintenance and repair time, which can ultimately increase airline revenues. Standardization of diagnostic processes and the introduction of new technologies in the field of defect detection represent important directions for future research. However, it is also necessary to consider the cost-effectiveness and practical applicability of the developed models and methods.

Key words: composite materials, aviation, defect diagnosis, operation of air transport, maintenance, mathematical model.

For citation: Davydov, I.A. (2024). Mathematical model of the process for diagnosing defects in aircraft structure elements made of composite materials. Civil Aviation High Technologies, vol. 27, no. 5, pp. 24–33. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-5-24-33

Введение

В современной авиации композиционные материалы играют ключевую роль в создании легких, прочных и эффективных конструкций воздушных судов [1]. Однако важным аспектом их использования является обеспечение высокого уровня технической надежности и безопасности. В этом контексте диагностика дефектов элементов конструкции из композитов приобретает особое значение. Настоящая научная статья посвящена разработке математической модели для диагностирования дефектов таких элементов воздушных судов [2, 3].

Целью данной работы является создание универсального инструмента, способного предсказывать вероятность возникновения дефектов и оценивать их характеристики на основе анализа материальных свойств и технических параметров конструкции. Для ее достижения предлагается новый подход, основанный на комплексном использовании методов статистики, математического моделирования и анализа данных.

Ожидается, что результаты данного исследования окажут существенное влияние на развитие методов диагностики и контроля качества в производстве и эксплуатации воздушных судов. Повышение надежности и безопасности воздушного транспорта является важной задачей, и разработка эффективных инструментов диагностики дефектов в композитных конструкциях воздушных судов будет способствовать достижению этой цели.

Методы исследования

Процесс диагностирования дефектов элементов конструкции воздушных судов, выполненных из композиционных материалов, стал-

кивается с несколькими проблемами (рис. 1). Сложность обнаружения дефектов связана с их невидимостью или незначительным воздействием на внешний вид конструкции, включая внутренние дефекты, такие как пузыри, делимитации. Кроме того, неоднородность материала создает трудности при точном определении распространения дефектов и их влияния на прочность и надежность конструкции.

Ограничения методов диагностики, таких как визуальный осмотр, ультразвуковой контроль, рентгенография, также влияют на эффективность обнаружения дефектов из-за особенностей композитных материалов. Дорогостоящее и специализированное оборудование, а также необходимость стандартизации процессов и протоколов делают процесс диагностики более сложным и затратным. Таким образом, эффективное диагностирование дефектов в композиционных материалах требует разработки новых подходов, методов и моделей, а также более широкого принятия стандартов в индустрии.

С учетом комплексного подхода к процессу диагностирования дефектов на композиционных конструкциях воздушных судов необходимо описать математическую модель.

Результат научно-исследовательской работы

Комплексный подход к диагностированию дефектов, включающий различные методы, с помощью математического моделирования можно описать следующим образом: для каждого метода диагностирования j существует функция обнаружения дефекта $F_j(D_i)$, которая определяет вероятность обнаружения дефекта элемента E_i с использованием этого метода [4–8].

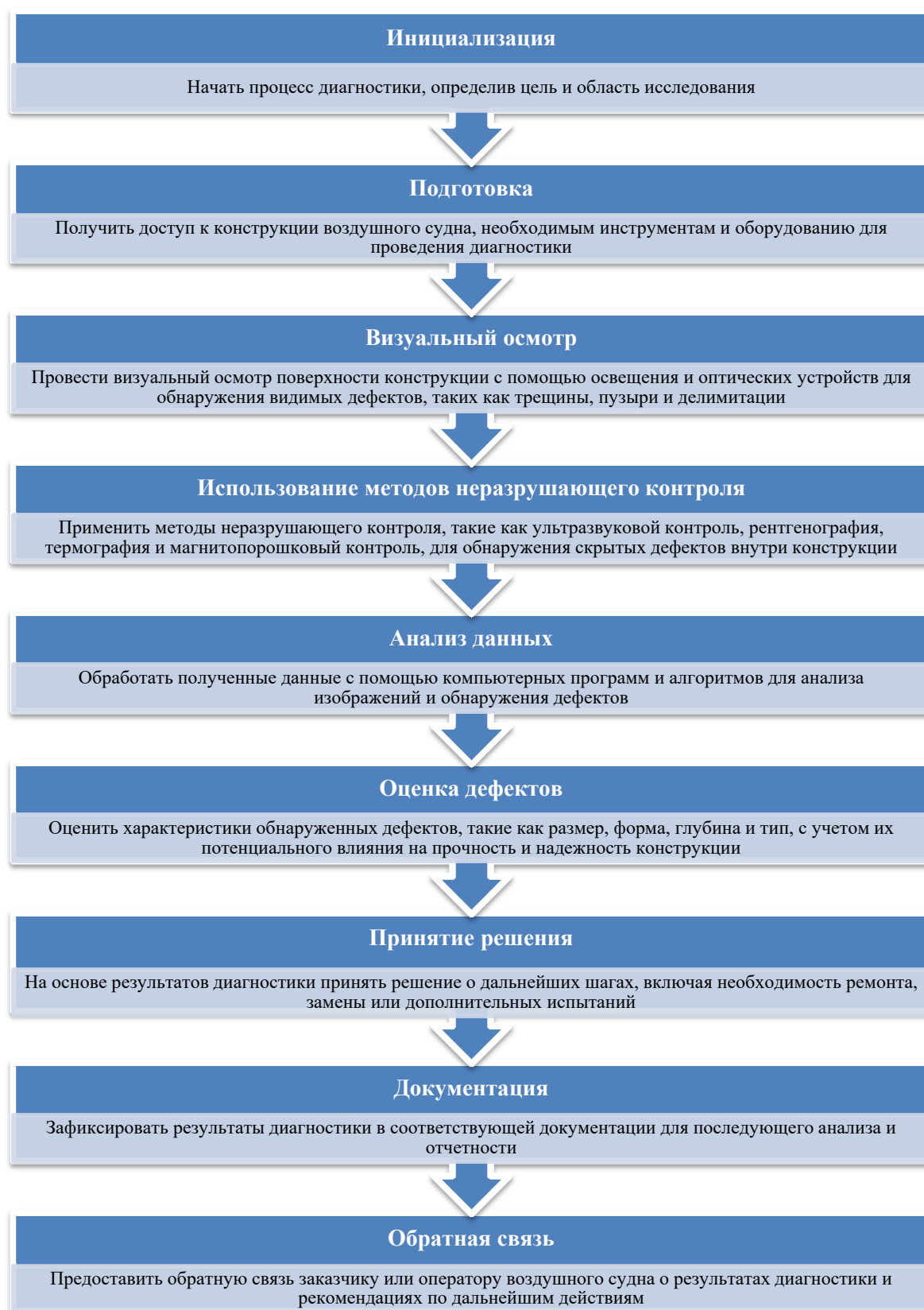


Рис. 1. Алгоритм общего подхода к процессу диагностики дефектов композиционных конструкций воздушных судов

Fig. 1. Algorithm for a general approach to the process of diagnosing defects in composite aircraft structures

Тогда вероятность обнаружения дефекта на участке S конструкции воздушного судна при использовании всех доступных методов диагностики может быть определена как сумма вероятностей обнаружения дефекта с использованием каждого метода, учитывая их веса или эффективность:

$$P(D_s) = \sum_{j=1}^m w_j \cdot F_j(D_i), \quad (1)$$

где m – количество различных методов диагностики, w_j – вес или эффективность j -го метода диагностики. Таким образом, данная модель учитывает комплексный характер диагностики и позволяет оценить вероятность обнаружения дефектов на участке конструкции воздушного судна с использованием различных методов диагностики. Практическая значимость математической модели – это способность учитывать различные методы диагностики (визуальный осмотр, ультразвуковой контроль, рентгенография и т. д.), оценивая вероятность обнаружения дефектов каждым методом. На основе этих оценок можно улучшить процессы обнаружения дефектов в композитных материалах, которые сложно визуально идентифицировать. Вероятность обнаружения дефекта определяется функцией обнаружения дефекта $F_j(D_i)$, которая интегрирует данные всех используемых методов. Эта функция позволяет проводить комплексный анализ и повысить точность диагностики.

Для построения математической модели процесса диагностирования дефектов композиционных конструкций воздушных судов на основе статистических данных о вероятности дефектов отдельных элементов необходимо воспользоваться рядом показателей. Пусть дана конструкция воздушного судна, состоящая из композитных элементов, обозначенных как E_i , где i – индекс элемента. Пусть D_i представляет собой вектор параметров дефектов элемента E_i , который может включать в себя такие характеристики, как размер, форма, глубина и тип дефекта.

Тогда для каждого элемента E_i можно определить вероятность $P(D_i)$ возникновения дефекта на основе статистических данных, а также вероятность $\overline{P(D_i)}$ отсутствия дефекта.

С учетом всех элементов конструкции вероятность обнаружения дефекта на конкрет-

ном участке судна определяется как произведение вероятностей дефектов всех элементов на этом участке.

Таким образом, математическая модель для оценки вероятности обнаружения дефекта на участке S конструкции воздушного судна может быть записана следующим образом:

$$P(D_i) = 1 - \prod_{i=1}^n \overline{P(D_i)}, \quad (2)$$

где n – количество элементов конструкции на участке S .

Данная модель позволяет оценить вероятность наличия дефектов на участке конструкции воздушного судна на основе статистических данных о вероятности дефектов отдельных элементов, учитывающих материальные свойства и технические параметры конструкции. Это помогает предсказывать вероятность дефектов и проводить превентивные меры.

Математическая модель на основе метода конечных элементов для диагностирования дефектов элементов конструкции воздушных судов, выполненных из композиционных материалов:

Пусть u – вектор узловых смещений, f – вектор внешних сил, K – матрица жесткости, d – вектор дефектов, а r – вектор реакций.

Тогда уравнение динамики элемента конструкции в линейной форме записывается как

$$Ku - f - d = r, \quad (3)$$

где Ku – сумма внутренних узловых сил, r – вектор реакций, компенсирующих внешние воздействия.

Решение уравнения для индивидуальных конечных элементов, последующее их объединение в рамках всей конструкции позволяет оценить распределение напряжений, деформаций и реакций, что обеспечивает возможность обнаружения и анализа дефектов, а также оценку технического состояния элементов воздушных судов [7–10].

Применение нечетких множеств в математическом алгоритме для диагностики дефектов композитных конструкций воздушных судов [11, 12]. Предположим, что каждый шаг алгоритма (рис. 1) представлен нечетким множеством W_i , где i – порядковый номер этапа. Это нечеткое множество может быть описано функцией принадлежности

Таблица 1
Table 1

Весовой коэффициент на основе экспертных оценок и статистических данных авиакомпании «Россия»

Weighting coefficient based on expert assessments and statistical data from Rossiya Airlines

Этап диагностики	Весовой коэф-т 1	Весовой коэф-т 2	Весовой коэф-т 3	Весовой коэф-т 4	Весовой коэф-т 5	Весовой коэф-т 6	Весовой коэф-т 7
Инициализация	0,12	0,15	0,18	0,1	0,14	0,1	0,11
Подготовка	0,1	0,17	0,12	0,15	0,11	0,14	0,21
Визуальный осмотр	0,25	0,21	0,18	0,27	0,23	0,22	0,19
Неразрушающий контроль	0,18	0,2	0,22	0,19	0,16	0,21	0,25
Анализ данных	0,15	0,14	0,16	0,12	0,19	0,17	0,15
Оценка дефектов	0,1	0,11	0,13	0,11	0,1	0,13	0,1
Принятие решения	0,1	0,08	0,1	0,07	0,1	0,08	0,1
Документация	0,1	0,14	0,11	0,09	0,08	0,15	0,08

$F_{w_i}(x)$, которая характеризует степень принадлежности элемента x к множеству W_i . Пусть x обозначает вектор данных или параметров, полученных на данном этапе процесса диагностики [12–15]. На каждом этапе i алгоритма, где $i = 1, 2, \dots, n$, мы можем оценить степень принадлежности каждого элемента x множеству K_i с использованием функции принадлежности $F_{w_i}(x)$. Этот подход учитывает неопределенность и различные аспекты информации на каждом этапе процесса диагностики. Далее, для каждого этапа диагностики можно определить весовой коэффициент K_i , который отражает его важность или вес в общем процессе диагностики. Весовые коэффициенты устанавливаются экспертно и вычисляются на основе статистических данных. Для объединения выводов различных фаз алгоритма, использующего нечеткие множества и весовые коэффициенты, возможно использовать агрегационные операции, такие как среднее арифметическое или взвешенное среднее [16, 17]. К примеру, для оценки общей степени принадлежности элемента x к множеству дефектов [18] мы можем применить следующее уравнение:

$$F_{\text{дефект}}(x) = \sum_{i=1}^n K_i \cdot F_{w_i}(x). \quad (4)$$

Следовательно, мы можем совместить результаты всех этапов диагностики, учитывая их весовые коэффициенты, для вычисления общей степени принадлежности элемента [19]. Весовые коэффициенты (табл. 1) определены на основе анализа статистических данных, собранных в процессе диагностики воздушных судов в авиакомпании «Россия». Определение весовых коэффициентов включает экспертные оценки, где специалисты оценивают важность каждого этапа диагностики на основе своего опыта и знаний. Использование методов статистического анализа позволяет объективно определить весовые коэффициенты, учитывая частоту и важность обнаружения дефектов на каждом этапе диагностики.

При осуществлении научного исследования производился сбор данных о важности каждого этапа диагностики, таких как количество выявленных дефектов, частота использования метода, точность метода и затраты на его выполнение. Получены экспертные оценки значимости каждого этапа диагностики. На основе собранных данных и экспертных оценок каждому этапу присваивалась оценка значимости S_j . Преобразовывались оценки значимости в весовые коэффициенты w_j с помощью нормализации:

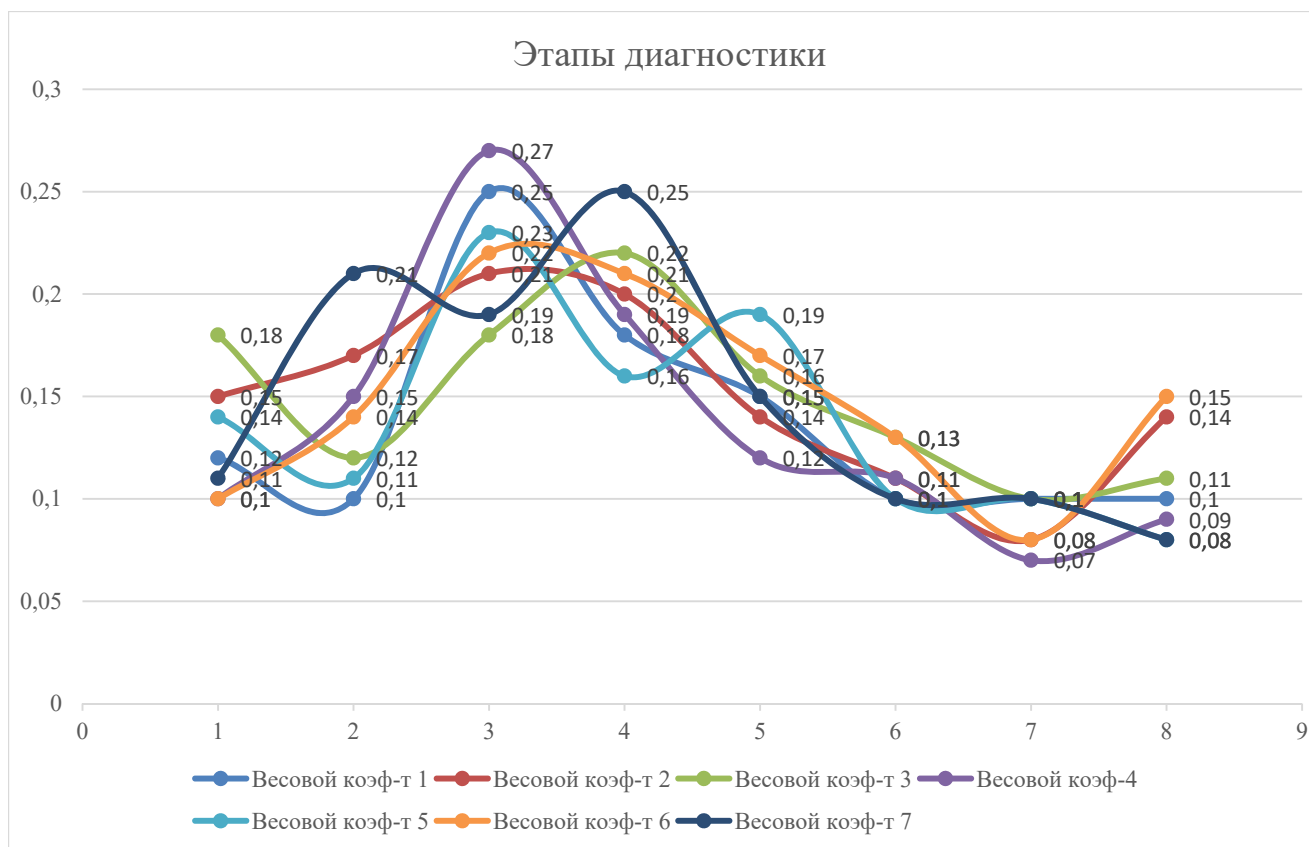


Рис. 2. График этапов диагностики с весовым коэффициентом на основе статистических данных авиакомпании «Россия»

Fig. 2. Diagram of diagnostic stages with a weighting coefficient based on statistical data from Rossiya Airlines

$$w_j = \frac{S_j}{\sum_{k=1}^m S_k}, \quad (5)$$

где S_j – оценка значимости каждого j -го этапа диагностики, m – общее количество этапов диагностики. Эти весовые коэффициенты w_j затем используются в общей функции вероятности обнаружения дефекта. Этот подход позволяет объективно оценить вклад каждого метода диагностики и оптимизировать процессы диагностики и обслуживания.

Изучение таблицы весовых коэффициентов для каждого этапа диагностики дефектов композиционных конструкций воздушных судов выделяет несколько важных аспектов [20–23]. Этапы визуального осмотра (ВО) и неразрушающего контроля (НК) приобретают наивысший вес, что подчеркивает их важность в общем процессе диагностики. Значительные весовые коэффициенты для этапов визуального осмотра и неразрушающего контроля (среднее значение по всем весовым ко-

эффициентам соответственно 0,22 и 0,2) свидетельствуют о ключевой значимости этих этапов в выявлении и оценке дефектов. Этапы анализа данных (АД) и оценки дефектов (ОД) также значимы, об этом свидетельствуют их весовые коэффициенты (среднее значение) 0,15 и 0,11 соответственно, подчеркивающие важность тщательного анализа информации и объективной оценки дефектов. Этапы подготовки (ПД) и документации (ДО) обладают менее высокими, но все еще существенными весовыми коэффициентами (среднее значение 0,14 и 0,11 соответственно), что подтверждает их значимость для организации и документирования процесса диагностики. Этот анализ (рис. 2) подтверждает необходимость глобального подхода к диагностике дефектов композиционных конструкций воздушных судов с целью обеспечения их безопасности и надежности.

В данном случае каждый этап обладает своим весовым коэффициентом по отноше-

нию к различным аспектам, которые могут учитываться при диагностике дефектов композиционных конструкций воздушных судов. Данная таблица способствует учету разнообразных факторов и их значимости на каждом этапе процесса диагностики. Использование комплексного подхода и математического моделирования при обнаружении дефектов в конструкциях из композиционных материалов приносит значительные экономические преимущества. Данный метод обеспечивает прецизионное и более эффективное выявление дефектов, что сокращает вероятность возникновения инцидентов и уменьшает потребность в дорогостоящих ремонтных мерах. При применении комплексного подхода оперативное обнаружение дефектов на ранних этапах и предварительное планирование ремонтных работ позволяют сократить время простоя и уменьшить издержки на обслуживание воздушного парка. Это способствует повышению безопасности полетов и сокращению операционных издержек авиакомпаний, что в итоге увеличивает общую экономическую эффективность воздушного транспорта. Для оценки экономической эффективности комплексного подхода к диагностике можно применить следующее уравнение:

$$\text{ЭЭ} = \sum_{i=1}^n K_i \cdot E_i, \quad (6)$$

где ЭЭ – экономическая эффективность, n – количество методов диагностики, K_i – весовой коэффициент для i -го метода, E_i – показатель эффективности для i -го метода.

Естественно, совокупный подход к обнаружению дефектов композитных структур воздушных судов не только улучшает точность обнаружения дефектов, но и способствует оптимизации затрат на техническое обслуживание и восстановительные работы. Это особенно критично в современной авиационной отрасли, где безопасность и надежность занимают ведущее положение. Применение математического моделирования дает возможность не только эффективнее обнаруживать дефекты, но и прогнозировать их развитие, что позволяет принимать профилактические меры для предотвращения аварийных ситуаций. Этот метод также способствует

увеличению эффективности воздушных судов путем сокращения времени, требуемого на техническое обслуживание и ремонт, что в результате может привести к увеличению прибыли авиакомпаний.

Заключение

Созданная математическая модель для обнаружения дефектов в структурных элементах воздушных судов, изготовленных из композиционных материалов, представляет собой значительный прогресс в улучшении надежности и безопасности авиационного транспорта. Применение комплексного подхода, который включает разнообразные методы диагностики, улучшает точность и эффективность обнаружения дефектов, что в конечном итоге снижает вероятность возникновения нештатных ситуаций. Полученные выводы могут послужить основой для создания более эффективных стратегий контроля качества и обслуживания воздушных судов, что в результате повысит безопасность авиации. Стандартизация процессов диагностики и внедрение новых технологий в области выявления дефектов представляют собой ключевые направления последующих исследований. Однако необходимо также учитывать факторы, влияющие на экономическую эффективность и практическую применимость разработанных моделей и методов. В целом разработка математической модели для диагностики дефектов композиционных конструкций воздушных судов открывает перспективы для улучшения технического обслуживания и обеспечения безопасности авиации.

Список литературы

1. Гамзаев В.Р. Анализ надежности визуального осмотра композиционных конструкций самолетов и пошаговая его реализация / В.Р. Гамзаев, И.А. Давыдов, Д.А. Иванов, Т.В. Петрова, И.А. Давыдов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2020. № 4 (29). С. 121–136.
2. Давыдов И.А. Повышение достоверности визуального контроля поврежденных

элементов конструкции воздушных судов, выполненных из композиционных материалов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2022. Т. 25, № 4. С. 44–55. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-4-44-55

3. **Давыдов И.А.** Анализ влияния цвета поверхности элементов конструкции воздушных судов, выполненных из композиционных материалов, на надежность визуального контроля // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2022. № 2 (35). С. 102–116.

4. **Коваль А.П., Бобарика И.О.** Элементы алгоритма оптимизации технологического процесса вакуумной инфузии при изготовлении крупногабаритных изделий из полимерных композиционных материалов // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2024. № 1. С. 192–196.

5. **Нургалеев А.** Rolls-Royce начала испытания композитно-титановых лопаток вентилятора [Электронный ресурс] // Деловой авиационный портал. (АТО). 2014. URL: <http://www.ato.ru/content/rolls-royce-nachala-ispytaniya-kompozitno-titanovyh-lopatok-ventilyatora> (дата обращения: 07.11.2023).

6. **Палкин В.А., Солонин В.И., Скибин В.А.** Работы ведущих авиадвигательных компаний в обеспечение создания перспективных авиационных двигателей (аналитический обзор) / Под ред. В.А. Скибина, В.И. Солонина. М.: ЦИАМ, 2010. 678 с.

7. **Давыдов И.А., Петрова Т.В., Давыдов И.А.** Ударные испытания на образцах из углепластика и анализ надежности визуального осмотра композиционных конструкций самолетов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2021. № 3 (32). С. 86–98.

8. **Norris G.** HondaJet engine wins certification // Aviation Week & Space Technology. 2013. Vol. 175. P. 50.

9. **Jansson N.E.** Testing and analysis of a highly loaded composite flange / N.E. Jansson, A. Lutz, M. Wolfahrt, A. Sjunnesson [Электронный ресурс] // 13th European Conference on Composite Materials (ECCM13). Sweden, Stockholm, 2008. URL: <http://extra.ivf.se-leccm>

13-programme/abstracts/2620.pdf (дата обращения: 26.11.2023).

10. **Koff B.L.** Gas turbine technology evolution: a designer's perspective // Journal of Propulsion and Power. 2004. Vol. 20, no. 4. Pp. 577–595. DOI: 10.2514/1.4361

11. **Stilin N.D.** Structural composite fan exit guide vane for a turbomachine. Patent US no. 2013/0052004 A1: опублик. 28.02.2013. 7 p.

12. **Раскутин А.Е.** Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367

13. **Раскутин А.Е.** Термостойкие углепластики для конструкций авиационной техники, эксплуатирующихся при температурах до 400 °С: дис. ... канд. техн. наук. М., 2007. 166 с.

14. **Семин М.И., Стреляев Д.В.** Расчеты соединений элементов конструкций из КМ на прочность и долговечность. М.: ЛАТМЭС, 1996. 103 с.

15. **Старцев В.О.** Климатическая стойкость полимерных композиционных материалов и защитных покрытий в умеренно теплом климате: дис. ... докт. техн. наук. М.: ВИАМ, 2018. 308 с.

16. **Старцев О.В., Сортыяков Е.Д., Исапов В.В. и др.** Акустическая спектроскопия полимерных композитных материалов, экспонированных в открытом космосе // Экспериментальные методы в физике структурно-неоднородных сред: труды Всероссийской научно-технической конференции. Барнаул, 12–14 сентября 1996 г. Барнаул: Изд-во АГУ, 1997. С. 32–39.

17. **Старцев В.О., Лебедев М.П., Фролов А.С.** Измерение показателей рельефа поверхности при изучении старения и коррозии материалов. 1. Российские и зарубежные стандарты // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2018. № 6. С. 32–38.

18. **Тарнапольский Ю.М., Кинцис Т.Я.** Методы статических испытаний армированных пластиков. 3-е изд. М.: Химия, 1981. 272 с.

19. **Abdallah E.A.** Experimental analysis of damage creation and permanent indentation on highly oriented plates / E.A. Abdallah, C. Bouvet, S. Rivallant, B. Broll, J. Barrau // *Composites Science and Technology*. 2009. Vol. 69, iss. 7-8. Pp. 1238–1245. DOI: 10.1016/j.compsitech.2009.02.029

20. **Davies G.A.O., Zhang X.** Impact damage prediction in carbon composite structures // *International Journal of Impact Engineering*. 1995. Vol. 16, iss. 1. Pp. 149–170. DOI: 10.1016/0734-743X(94)00039-Y

21. **Kingdom F.A.** Perceiving light versus material // *Vision research*. 2008. Vol. 48, iss. 20. Pp. 2090–2105. DOI: 10.1016/j.visres.2008.03.020

22. **Mitreviski T.** Low-velocity impacts on preloaded GFRP specimens with various impactor shapes / T. Mitrevski, I.H. Marshall, R.S. Thomson, R. Jones // *Composite Structures*. 2006. Vol. 76, iss. 3. Pp. 209–217. DOI: 10.1016/j.compstruct.2006.06.033

23. **Psymouli A., Harris D., Irving P.** The inspection of composite aircraft structures: A signal detection approach // *Human Factors and Aerospace Safety*. 2005. Vol. 5, no. 2. Pp. 89–106.

References

1. **Gamzaev, V.R., Davydov, I.A., Ivanov, D.A., Petrova, T.V., Davydov, I.A.** (2020). Analysis of maintenance of composite materials on the Boeing-787 aircraft (Dreamliner), introduction of the concept “quick repair of the composite (QCR)” and step-by-step implementation of it. *Vestnik SPbGU GA*, no. 4 (29), pp. 121–136 (in Russian)

2. **Davydov, I.A.** (2022). Improving the reliability of a visual inspection of damaged aircraft structural components made of composite materials. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 25, no. 4, pp. 44–55. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-4-44-55 (in Russian)

3. **Davydov, I.A.** (2022). Analysis of the effect of the surface color of aircraft structural elements made of composite materials on the reliability of visual inspection. *Vestnik SPbGU GA*, no. 2 (35), pp. 102–116. (in Russian)

4. **Koval, A.P., Bobarika, I.O.** (2024). Elements of the optimizing algorithm for the vacuum infusion technological process in the manufacture of large-sized products made of polymer composite materials. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Aviatсионnaya Tekhnika*, no. 1, pp. 192–196. (in Russian)

5. **Nurgaleev, A.** (2014). Rolls-Royce begins testing composite-titanium fan blades. *Business aviation portal. (ATO)*. Available at: <http://www.ato.ru/content/rolls-royce-nachala-ispytaniya-kompozitno-titanovyh-lopatok-ventilyatora> (accessed: 07.11.2023). (in Russian)

6. **Palkin, V.A., Solonin, V.I., Skibin, V.A.** (2010). Works of leading aircraft engine manufacturing companies to ensure the creation of perspective aircraft engines (analytical review), in Skibin V.A., Solonin V.I. (Ed.). Moscow: TsIAM, 678 p. (in Russian)

7. **Davydov, I.A., Petrova, T.V., Davydov, I.A.** (2021). Impact tests on carbon fiber samples and analysis of the reliability of visual inspection of composite aircraft structures. *Vestnik SPbGU GA*, no. 3 (32), pp. 86–98.

8. **Norris, G.** (2013). HondaJet engine wins certification. *Aviation Week & Space Technology*, vol. 175, p. 50.

9. **Jansson, N.E., Lutz, A., Wolfahrt, M., Sjunnesson, A.** (2008). Testing and analysis of a highly loaded composite flange. In: *13th European Conference on Composite Materials (ECCM13)*. Sweden, Stockholm. Available at: <http://extra.ivf.se-leccm13-programme/abstracts/2620.pdf> (accessed: 26.11.2023).

10. **Koff, B.L.** (2004). Gas turbine technology evolution: a designer's perspective. *Journal of Propulsion and Power*, vol. 20, no. 4, pp. 577–595. DOI: 10.2514/1.4361

11. **Stilin, N.D.** (2013). Structural composite fan exit guide vane for a turbomachine. Patent US no. 2013/0052004 A1, Date publ. February 28, 7 p.

12. **Raskutin, A.E.** (2017). Russian polymer composite materials of new generation, their exploitation and implementation in advanced developed constructions. *Aviation materials and technologies*, no. S, pp. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367 (in Russian)

13. Raskutin, A.E. (2007). Heat-resistant carbon fiber reinforced plastics for aircraft structures operating at temperatures up to 400 °C: Cand. tech. Sc. Thesis. Moscow, 166 p. (in Russian)
14. Semin, M.I., Strelyaev, D.V. (1996). Strength and durability calculations of composite structural elements. Moscow: LATMES, 103 p. (in Russian)
15. Startsev, V.O. (2018). Climate resistance of polymer composite materials and protective coatings in moderately warm climates: D. Tech. Sc Thesis. Moscow: VIAM, 308 p. (in Russian)
16. Startsev, O.V., Sortyyakov, E.D., Isupov, V.V. et al. (1997). Acoustic spectroscopy of polymer composite materials exposed in outer space. In: *Eksperimentalnyye metody v fizike strukturno-neodnorodnykh sred: trudy Vserossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii*. Barnaul: Izdatelstvo AGU, pp. 32–39. (in Russian)
17. Startsev, V.O., Lebedev, M.P., Frolov, A.S. (2018). Measuring surface topography in the study of aging and corrosion of materials. 1. Russian and foreign standards. *All Materials. Encyclopaedic Reference Manual*, no. 6, pp. 32–38. (in Russian)
18. Tarnapolsky, Yu.M., Kintsis, T.Ya. (1981). Methods of static testing of reinforced plastics. 3rd ed. Moscow: Khimiya, 272 p. (in Russian)
19. Abdallah, E.A., Bouvet, C., Rivalant, S., Broll, B., Barrau, J. (2009). Experimental analysis of damage creation and permanent indentation on highly oriented plates. *Composites Science and Technology*, vol. 69, issue 7-8, pp. 1238–1245. DOI: 10.1016/j.compscitech.2009.02.029
20. Davies, G.A.O., Zhang, X. (2019). Impact damage prediction in carbon composite structures. *International Journal of Impact Engineering*, vol. 16, issue 1, pp. 149–170. DOI: 10.1016/0734-743X(94)00039-Y
21. Kingdom, F.A. (2008). Perceiving light versus material. *Vision research*, vol. 48, issue 20, pp. 2090–2105. DOI: 10.1016/j.visres.2008.03.020
22. Mitrevski, T., Marshall, I.H., Thomson, R.S., Jones, R. (2006). Low-velocity impacts on preloaded GFRP specimens with various impactor shapes. *Composite Structures*, vol. 76, issue 3, pp. 209–217. DOI: 10.1016/j.compstruct.2006.06.033
23. Psymouli, A., Harris, D., Irving, P. (2005). The inspection of composite aircraft structures: A signal detection approach. *Human Factors and Aerospace Safety*, vol. 5, no. 2, pp. 89–106.

Сведения об авторе

Давыдов Искандар Ахтамович, старший преподаватель кафедры № 24 авиационной техники и диагностики, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А. Новикова», iskander_bek@mail.ru.

Information about the author

Iskandar A. Davydov, Senior Lecturer of the Department of Aviation Engineering and Diagnostics, St. Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A.A. Novikov, iskander_bek@mail.ru.

Поступила в редакцию	26.04.2024	Received	26.04.2024
Одобрена после рецензирования	11.07.2024	Approved after reviewing	11.07.2024
Принята в печать	26.09.2024	Accepted for publication	26.09.2024