

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

DIAGNOSTIC METHODS FOR ENSURING RELIABILITY AND QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

УДК 519.718.2

doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-14

МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕСУРСНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИЗДЕЛИЙ ПУТЕМ МЕЗОДИАГНОСТИРОВАНИЯ ИХ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ПОВРЕЖДЕННОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

А. А. Барзов¹, А. С. Григорьев², Я. Д. Сеина³,
В. С. Пузаков⁴, А. Ж. Касенов⁵, Н. Н. Сафронова⁶

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

² Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

³ Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия

⁴ Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

⁴ ООО «Бюро Энергетика», Раменское, Россия

⁵ Торайгыров университет, Павлодар, Республика Казахстан

⁶ Ассоциация организаций строительного комплекса атомной отрасли, Москва, Россия

¹ a.a.barzov@gmail.com, ² Grigoriev_AS@nrcki.ru, ³ yaseina@yandex.ru,

⁴ PuzakovVS@mail.ru, ⁵ asylbek_kasenov@mail.ru, ⁶ safronova_nn@accni.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Показано, что аппарат мезодиагностики позволяет решать задачи не только экспресс-оценки состояния материала и изделий с учетом их текущей поврежденности, но и осуществлять ресурсно-эксплуатационное прогнозирование изменений данного состояния. *Материалы и методы.* Предложена модель, связывающая в единый функциональный комплекс результаты мезодиагностирования поврежденности материала изделий с остаточным ресурсом их надежной эксплуатации. Основным информационно-физическим параметром модели является время осуществления операции мезодиагностирования, в течение которого диагностируемый материал достигает критического уровня поврежденности. В частности, аналитическим путем установлено, что проведение двух операций мезодиагностирования в различное время функционирования изделий позволяет однозначно судить о величине его остаточного ресурса. Отличительная особенность предлагаемой модели прогнозирования заключается в отсутствии в ее структуре абсолютных значений поврежденности изделий, например, материала их поверхностного слоя. Это обстоятельство подчеркивает общность и прикладное значение модели при решении соответствующих задач предиктивного анализа функционального качества различных материалов и изделий из них. Отмечено, что основной проблемой практической реализации предлагаемого подхода к эксплуатационно-ресурсному моделированию является выбор наиболее физически информативного метода мезодиагностирования поврежденности материала изделий. В качестве такого метода предложено использовать аппарат энергоэкстремальной гидроструйной диагностики, которая обладает широкими физико-технологическими возможностями идентификации параметров состояния, в том числе поврежденности материала поверхностного слоя различных изделий. *Результаты и выводы.* Намечены перспективы дальнейшего использования предлагаемого мезодиагностического подхода и полученной на его основе модели, а также других ее функциональных модификаций. В частности, отмечена реалистичность ускоренного определения эксплуатационно-технологических характеристик новых материалов путем разработки соответствующих инженерных методик.

Ключевые слова: прогнозирование, остаточный ресурс, мезодиагностика, гидроструйная диагностика, функциональная поверхность, эксплуатация

Для цитирования: Барзов А. А., Григорьев А. С., Сеина Я. Д., Пузаков В. С., Касенов А. Ж., Сафронова Н. Н. 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

A MODEL FOR PREDICTING THE RESOURCE PARAMETERS OF PRODUCTS BY MESO-DIAGNOSING THEIR FUNCTIONAL DAMAGE DURING OPERATION

A.A. Barzov¹, A.S. Grigoriev², Ya.D. Seina³, V.S. Puzakov⁴, A.Zh. Kasenov⁵, N.N. Safronova⁶

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

² National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

³ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

⁴ National Research University "MEI", Moscow, Russia

⁴ LLC "Bureau Energetika", Ramenskoye, Russia

⁵ Toraighyrov University, Pavlodar, Republic of Kazakhstan

⁶ Association of Nuclear Industry Construction Organizations, Moscow, Russia

¹ a.a.barzov@gmail.com, ² Grigoriev_AS@nrcki.ru, ³ yaseina@yandex.ru,

⁴ PuzakovVS@mail.ru, ⁵ asylbek_kasenov@mail.ru, ⁶ safronova_nn@accni.ru

Abstract. Background. It is shown that the mesodiagnostic apparatus allows solving problems not only of express assessment of the condition of materials and products, taking into account their current damage, but also to carry out resource and operational forecasting of changes in this condition. *Materials and methods.* A model is proposed that combines the results of mesodiagnosis of damage to the material of products with the residual resource of their reliable operation into a single functional complex. The main information and physical parameter of the model is the time of the mesodiagnostic operation, during which the diagnosed material reaches a critical level of damage. In particular, it has been analytically established that carrying out two mesodiagnostic operations at different times of operation of products makes it possible to unambiguously judge the value of its residual life. A distinctive feature of the proposed forecasting model is the absence in its structure of absolute values of damage to products, for example, the material of their surface layer. This circumstance emphasizes the generality and practical importance of the model in solving the corresponding tasks of predictive analysis of the functional quality of various materials and products made from them. It is noted that the main problem of the practical implementation of the proposed approach to operational and resource modeling is the choice of the most physically informative method of mesodiagnosis of damage to the material of products. As such a method, it is proposed to use an apparatus for energy-extreme hydrojet diagnostics, which has wide physical and technological capabilities for identifying condition parameters, including damage to the material of the surface layer of various products. *Results and conclusions.* The prospects for further use of the proposed mesodiagnostic approach and the model obtained on its basis, as well as its other functional modifications, are outlined. In particular, the realism of accelerated determination of the operational and technological characteristics of new materials through the development of appropriate engineering techniques was noted.

Keywords: forecasting, residual resource, meso diagnostics, hydrojet diagnostics, functional surface, operation

For citation: Barzov A.A., Grigoriev A.S., Seina Ya.D., Puzakov V.S., Kasenov A.Zh., Safronova N.N. A model for predicting the resource parameters of products by meso-diagnosing their functional damage during operation. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2025;(1):109–116. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-1-14

Введение

Задача прогнозирования остаточного ресурса надежной эксплуатации изделий ответственного назначения является весьма актуальной во многих отраслях современного промышленного производства. Существующие подходы к ее решению могут быть дополнены путем использования аппарата мезодиагностирования [1], занимающего промежуточное положение между методами неразрушающего контроля дефектности материалов [2–3] и их разрушающими испытаниями [4]. В связи с этим под мезодиагностикой будем понимать совокупность методов и средств получения исчерпывающей информации об исследуемом объекте анализа (АО) при координатно-локальном физико-энергетическом воздействии на него, которое обеспечивает критический уровень поврежденности изучаемого материала. Однако при этом происходит функционально значимое изменение параметров состояния изделия или его частей.

Таким образом, технологии мезодиагностирования (ТМД) основаны на технически допустимом локально-критическом воздействии на ОА и использовании полученной при этом информации для оценки и прогнозирования его состояния. Классификационно к ТМД относятся большое число методов контроля качества изделий: измерение микротвердости поверхности, оценка ее фрикционной износостойкости и т.д. Фактически эти методы реализуют процессы ускоренного доведения материала в исследуемой локальной зоне материала изделия до критического уровня поврежденности, например пластической деформации, и по результатам этого воздействия судят о качестве изделия в целом. Поэтому реализация физико-энергетической сущности ТМД для построения моделей оценки не только текущего состояния ОА, но и прогнозирования его эксплуатационных характеристик, в частности остаточного ресурса функционирования, имеет большое, в том числе междисциплинарное, научно-прикладное значение.

Материалы и методы

Основываясь на классическом понятии поврежденности материала-изделия [5] как обобщенного параметра рассредоточенной дефектности, определяющего его эксплуатационно-технологическое состояние на ключевых, наиболее длительных этапах жизненного цикла, рассмотрим возможность построения модели прогнозирования остаточного ресурса ОА. При этом будем учитывать, что необходимую для этого информацию будем получать путем периодического мезодиагностирования, например, локальной зоны материала поверхностного слоя МПС в процессе эксплуатации изделия, тогда базовая структурная схема или своеобразная кинетическая диаграмма, иллюстрирующая изменение поврежденности материала ОА в процессе его функционирования и непосредственно при мезодиагностировании в линейной постановке проблемы прогнозирования эксплуатационного ресурса, будет иметь вид, представленный на рис. 1.

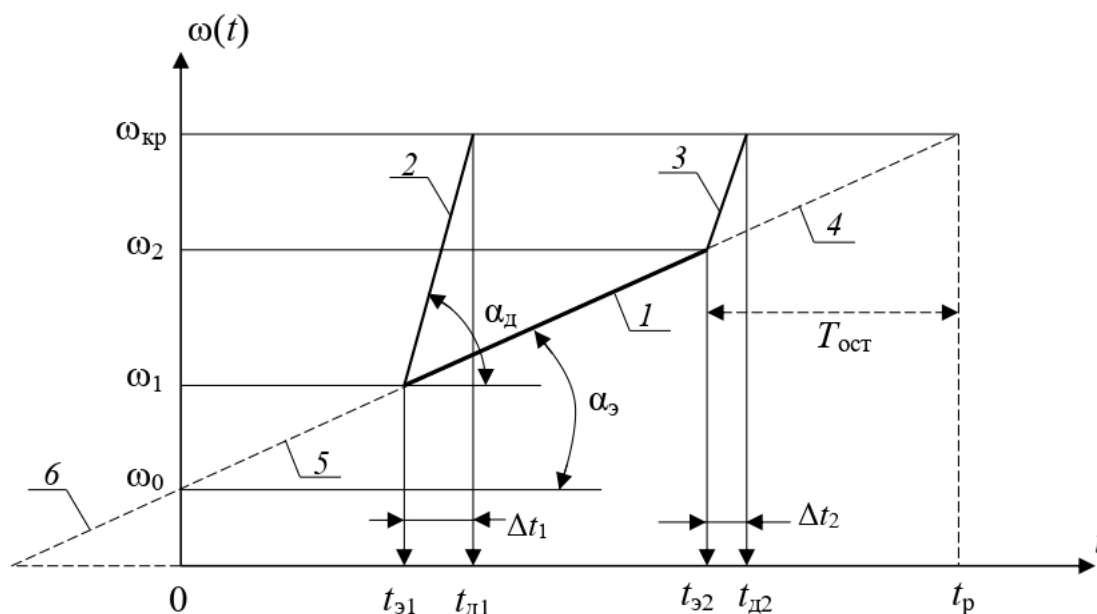


Рис. 1. Диаграмма, иллюстрирующая изменение поврежденности $\omega(t)$ объекта анализа (ОА) в течение времени его функционирования t :

1 – характер изменения $\omega(t)$ в интервале времени t между операциями по мезодиагностированию состояния ОА; 2, 3 – соответственно изменение $\omega(t)$ в процессе мезодиагностирования ОА в момент времени $t_{э1}$ и $t_{э2}$; 4 – прогнозируемое изменение $\omega(t)$ после завершения операции мезодиагностирования, позволяющее определить остаточный ресурс эксплуатации ОА $T_{ост}$; 5 – экстраполяция реального изменения $\omega(t)$ на время начала эксплуатации ОА ($t = 0$), позволяющая оценить исходную (технологическую) поврежденность ω_0 материала изделия; 6 – экстраполяция функции $\omega(t)$ на гипотетическое значение «нулевой» поврежденности $\omega = 0$

Задача состоит в том, что, используя только известные значения времени функционирования изделия между операциями мезодиагностирования и длительностью их проведения, требуется получить аналитическое выражение для оценки остаточного ресурса его надежной эксплуатации. В первом приближении, основываясь на линейном изменении поврежденности ОА при стабильных

режимах эксплуатации и мезодиагностирования, а также исходя из геометрических соображений подобия, исходные соотношения, отражающие искомую функциональную зависимость, будут иметь вид

$$\frac{l_2}{l_1 + l_4} = \frac{l_3}{l_4}, \quad (1)$$

где l_1, l_2, l_3 и l_4 – соответственно длина отрезков с этими номерами позиций, как показано на рис. 1.

Или, учитывая очевидную связь длины данных отрезков с соответствующими кинетическими (временными) параметрами, представленными на рис. 1, из уравнения (1) получим

$$\frac{\Delta t_1}{\Delta t_3} = \frac{\Delta t_2}{T_{\text{ост}}}, \quad (2)$$

где, исходя из обозначений, показанных на рис. 1, следуют соотношения

$$\Delta t_1 = t_{д1} - t_{с1}; \quad \Delta t_2 = t_{д2} - t_{с2}; \quad (3)$$

$$\Delta t_3 = t_{с2} - t_{с1}; \quad T_{\text{ост}} = t_p - t_{с2}.$$

Причем в соотношениях (2) и (3) под $T_{\text{ост}}$ и t_p понимается остаточный ресурс эксплуатации изделий и общая продолжительность его функционирования соответственно, например время до разрушения ОА в критическом состоянии.

После преобразования (2) с учетом соотношений (3) окончательно получим следующее выражение:

$$T_{\text{ост}} = \frac{1}{\overline{\Delta t_d} - 1} \Delta t_3, \quad (4)$$

где $\overline{\Delta t_d} = \Delta t_{д1} / \Delta t_{д2}$ – относительное время изменения продолжительности операции мезодиагностирования.

Соотношение (4) представляет собой модель, позволяющую по результатам как минимум двух операций мезодиагностирования состояния материала ОА, проведенных в разное время его функционирования, аналитическим путем определить расчетные значения ожидаемой величины остаточного ресурса его надежной эксплуатации. Отличительная особенность (4) состоит в том, что оно не содержит в явном виде абсолютных значений поврежденности материала ОА. Это обеспечивает не только количественную конкретику процедуры прогнозирования, но и не является ограничением на априори неизвестный режим эксплуатации изделия, т.е. его переход из состояния, характеризуемого поврежденностью ω (1) в состояние с поврежденностью ω (см. рис. 1). Данное обстоятельство подчеркивает практическую полезность модели (4) при технически необходимых предиктивных оценках остаточного ресурса эксплуатации изделия ответственного назначения путем его периодического мезодиагностирования.

Дальнейшая детализация модели (4) может быть проведена с учетом наличия функциональной связи между промежутком времени между операциями мезодиагностирования Δt_s и их длительностью, определяемой в предлагаемой ресурсной модели относительным параметром $\overline{\Delta t_d}$. Эта связь является очевидным следствием базового уравнения «баланса» эксплуатационных и мезодиагностических поврежденностей материала ОА, который имеет вид

$$\omega_{кр} = \omega_{si} + \omega_{di} = \omega_{sj} + \omega_{dj}, \quad (5)$$

где $\omega_{кр}$ – критическая, предельно допустимая величина поврежденности материала ОА, при достижении которой изделие перестает удовлетворять предъявляемым эксплуатационно-техническим требованиям; $\omega_{si}, \omega_{di}, \omega_{sj}, \omega_{dj}$ – соответственно значения эксплуатационной и мезодиагностической поврежденности, например, материала поверхностного слоя МПС анализируемого изделия в различные i -е и j -е времени его эксплуатации, причем $i \neq j$.

Основываясь на соотношении (5), с учетом его геометрической интерпретации, представленной на рис. 1, получим следующую зависимость между кинетическими (временными) параметрами модели (4):

$$\Delta t_3 = k_{эд} (\Delta t_{д1} - \Delta t_{д2}), \quad (6)$$

где $k_{эд} = \operatorname{tg} \alpha_{д} / \operatorname{tg} \alpha_3$ – коэффициент, по сути, характеризующий информационно необходимое прева-лирование интенсивности изменения поврежденности ОА при мезодиагностировании, например, его МПС над интенсивностью изменений эксплуатационной поврежденности.

Подстановка выражения (6) в (4) обеспечивает формирование прогностической модели остаточного ресурса $T_{ост}$ в следующем виде:

$$T_{ост} = k_{эд} \overline{\Delta t_{д}}, \quad (7)$$

где, как и ранее, $\Delta t_{д2}$ – продолжительность выполнения соответствующей операции мезодиагностирования. Заметим, что выражение (7) позволяет определить $T_{ост}$ при известном из результатов предварительных экспериментов значении параметра $k_{эд}$, характеризующего соотношение интенсивностей изменений пораженности при эксплуатации и мезодиагностировании (ОА), например, его МПС.

Таким образом, в рамках принятых допущений базовая модель расчета остаточного ресурса ОА (4) и ее модификация (7) позволяют решить поставленную задачу его прогнозирования. В первом случае необходимо проведение двух операций мезодиагностирования, а во втором – только одной, но с использованием результатов предварительного мезодиагностического анализа материала ОА, например, дефектности МПС рассматриваемого изделия.

Результаты и обсуждения

Полученная модель прогнозирования остаточного ресурса изделий позволяет провести в дальнейшем целенаправленные экспериментально-прикладные исследования, обобщение которых позволит разработать инженерную методику предиктивной оценки функционального качества ОА, в первую очередь – его МПС. При этом должна быть решена ключевая проблема ТМД – выбор и обоснование наиболее информативного метода, обеспечивающие оперативно-локальное формирование критического значения поврежденности, в частности в анализируемой зоне МПС. Выполненные в этом направлении исследования, например [1], подчеркивают значимость решения этой задачи, в том числе путем экспертно-критериального оценивания [1, 5–7], функционально-диагностических возможностей различных способов локального изменения поврежденности МПС, также характеризующейся вариациями профиля его микрорельефа. Так, например, было отмечено, что энергоэкстремальный процесс гидроструйной эрозии [1] обладает необходимым информационно-диагностическим потенциалом.

В перспективе рациональное применение инструментария ТМД в сочетании с развитием аппарата моделирования, пример построения которого представлен выше, позволяет решить кроме прогностических следующие основные задачи:

- 1) определить расчетно-необходимые константы в более реалистичных моделях разрушения материала, в частности термофлуктуационных в моделях их длительной прочности [8];
- 2) оценить значение исходной, в том числе технологической поврежденности материала ОА, в первую очередь, МПС детали ответственного назначения;
- 3) предложить принципы разработки методики экспресс-определения усталостных характеристик материалов, особенно значимую при освоении их новых видов [1, 9, 10]. Таким образом, основным результатом выполненного исследования является расчетно-аналитическая формализация связей между текущим состоянием материала изделия и остаточным ресурсом его функционирования, детализирования в виде моделей, построенных путем целенаправленного использования соответствующих операций мезодиагностирования. Причем на данном этапе анализа реализация аппарата мезодиагностирования может составить предмет изучения в рамках соответствующих научно-квалификационных работ, диссертательность которых определяется экспертно-критериальным оцениванием [11–14].

Заключение

По результатам выполненной работы можно сделать следующие выводы и сформулировать предварительные обобщения.

Мезодиагностическое воздействие на ОА, в частности на его МПС, является, по сути, безальтернативной физико-энергетической технологией, реализующей процесс ускоренной трансформации

исходной функционально-локальной поврежденности материала в его поврежденность критического уровня. Причем информационно-диагностические признаки этого процесса позволяют не только эффективно определять текущее значение поврежденности, но и предложить модель оценки остаточного ресурса ОА в целом.

Модель остаточного ресурса ОА, использующая результаты его периодического мезодиагностирования, способна обеспечить научно-методическую целенаправленность экспериментальным исследованием, связанным с более эффективным изучением эксплуатационно-технологических параметров состояния конструкционных материалов, в первую очередь на этапе производственного освоения их новых видов.

Таким образом, основная перспектива совершенствования разрабатываемого подхода к предиктивному моделированию ресурсно-эксплуатационных характеристик различных ОА состоит в расширении сферы его научно-прикладного использования, в первую очередь при решении задач оценки и/или прогнозирования функциональной поврежденности изучаемых материалов путем развития и рационального применения технологий информационно-физического мезодиагностирования.

Список литературы

1. Барзов А. А., Пузаков В. С., Кузнецов А. В. Вероятностная модель процесса эрозии материалов при энергоэкстремальном гидроструйном воздействии // Наука и техника Казахстана. 2022. № 3. С. 9–21. doi: 10.48081/ZFSP1647
2. Неразрушающий контроль : справочник : в 7 т. Т. 3. Ультразвуковой контроль / под общ. ред. В. В. Ключева ; Ермолов И. Н., Ланге Ю. В. М. : Машиностроение, 2004. 864 с.
3. Неразрушающий контроль : справочник : в 7 т. / под общ. ред. В. В. Ключева. Т. 7 : в 2 кн. Кн. 1: Иванов В. И., Власов И. Э. Метод акустической эмиссии ; кн. 2: Балицкий Ф. Я., Барков А. В., Баркова Н. А. [и др.]. Вибродиагностика. М. : Машиностроение, 2005.
4. Муравьев В. И. Разрушающие методы контроля : учеб. пособие. Комсомольск-на-Амуре : Комсом.-на-Амуре гос. техн. ун-т, 2001. 67 с.
5. Работнов Ю. Н. Введение в механику разрушения. М. : Наука, 1987. 97 с.
6. Konson G. R. Non-criteria expertise of research projects: Typed examples // Scientific editor and publisher. 2022. Vol. 7, № 1. P. 34–39. doi: 10.24069/SEP-22-32
7. Цапенко М. В. Многокритериальное оценивание значимости показателей эффективности инновационных проектов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах : тр. XVIII Междунар. конф. (г. Самара, 20–25 сентябрь 2016 г.). Самара, 2016. С. 72–84.
8. Тутнов А. А., Тутнов И. А. Математическая модель разрушения гетерогенного твердого тела // Трещиностойкость материалов и элементов конструкций ЯЭУ : сб. науч. тр. М. : Энергоатомиздат, 1990. С. 7–18.
9. Арзамасов Б. Н., Соловьева Т. В. [и др.]. Справочник по конструкционным материалам : справочник. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. 640 с.
10. Ковалева А. А. Новые процессы и сплавы в машиностроении : учеб. пособие. Красноярск : ГАЦМиЗ, 2003. 120 с.
11. Барзов А. А., Сеина Я. Д., Муканов Р. Б. [и др.]. Определение потенциала результативности научно-квалификационного исследования технологического профиля на этапе его планирования // Наука и техника Казахстана. 2024. № 2. С. 49–58. doi: 10.48081/XICF8407
12. 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.
13. Садыхов Г. С., Кудрявцева С. С. Нижняя доверительная граница среднего остаточного ресурса невосстанавливаемых объектов // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 38–45.
14. 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.

References

1. Barzov A.A., Puzakov V.S., Kuznetsov A.V. Probabilistic model of the process of erosion of materials under energy-extreme hydrojet action. *Nauka i tekhnika Kazakhstana = Science and Technology of Kazakhstan*. 2022;(3):9–21. (In Russ.). doi: 10.48081/ZFSP1647
2. *Nerazrushayushchiy kontrol': spravochnik: v 7 t. T. 3. Ul'trazvukovoy kontrol' / pod obshch. red. V.V. Klyueva; Ermolov I.N., Lange Yu.V. = Non-destructive testing : handbook : in 7 volumes. Vol. 3. Ultrasonic control / under the general editorship of V. V. Klyuev ; Ermolov I. N., Lange Yu. V. Moscow: Mashinostroenie, 2004:864. (In Russ.)*
3. *Nerazrushayushchiy kontrol': spravochnik: v 7 t. / pod obshch. red. V.V. Klyueva. T. 7: v 2 kn. Kn. 1: Ivanov V.I., Vlasov I.E. Metod akusticheskoy emissii; kn. 2: Balitskiy F.Ya., Barkov A.V., Barkova N.A. [i dr.]. Vibrodiagnostika = Non-destructive testing : handbook : in 7 volumes / under the general editorship of V. V. Klyuev. Vol. 7 :*

- in 2 books. Book 1: Ivanov V. I., Vlasov I. E. *Acoustic emission method*; book. 2: Balitsky F. Ya., Barkov A. V., Barkova N. A. [and others]. *Vibration diagnostics*. Moscow: Mashinostroenie, 2005. (In Russ.)
4. Murav'ev V.I. *Razrushayushchie metody kontrolya: ucheb. posobie = Destructive control methods : textbook*. Komsomol'sk-na-Amure: Komsom.-na-Amure gos. tekhn. un-t, 2001:67. (In Russ.)
 5. Rabotnov Yu.N. *Vvedenie v mekhaniku razrusheniya = Introduction to the mechanics of destruction*. Moscow: Nauka, 1987:97. (In Russ.)
 6. Konson G.R. Non-criteria expertise of research projects: Typed examples. *Scientific editor and publisher*. 2022;7(1):34–39. doi: 10.24069/SEP-22-32
 7. Tsapenko M.V. Multicriteria assessment of the significance of indicators of the effectiveness of innovative projects. *Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh: tr. XVIII Mezhdunar. konf. (g. Samara, 20–25 sentyabr' 2016 g.) = Problems of management and modeling in complex systems : proceedings of the XVIII International Conference (Samara, September 20-25, 2016)*. Samara, 2016:72–84. (In Russ.)
 8. Tutnov A.A., Tutnov I.A. Mathematical model of destruction of a heterogeneous solid body. *Treshchinostoykost' materialov i elementov konstruktsiy YaEU: sb. nauch. tr. = Crack resistance of materials and structural elements of nuclear power plants : collection of scientific papers*. Moscow: Energoatomizdat, 1990:7–18. (In Russ.)
 9. Arzamasov B.N., Solov'eva T.V. et al. *Spravochnik po konstruktsionnym materialam: spravochnik = Handbook of structural materials : handbook*. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2006:640. (In Russ.)
 10. Kovaleva A.A. *Novye protsessy i splavy v mashinostroenii: ucheb. posobie = New processes and alloys in mechanical engineering : textbook*. Krasnoyarsk: GATsMiZ, 2003:120. (In Russ.)
 11. Barzov A.A., Seina Ya.D., Mukanov R.B. et al. Determination of the effectiveness potential of scientific and qualification research of a technological profile at the planning stage. *Nauka i tekhnika Kazakhstana = Science and Technology of Kazakhstan*. 2024;(2):49–58. (In Russ.). doi: 10.48081/XICF8407
 12. Dmitriev 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.)
 13. 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.)
 14. 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.)

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Александрович Барзов

доктор технических наук, профессор кафедры
технологии ракетно-космического машиностроения,
ведущий научный сотрудник,
Московский государственный университет
имени М. В. Ломоносова
(Россия, г. Москва, Ленинские горы, 1)
E-mail: a.a.barzov@gmail.com

Александр Сергеевич Григорьев

кандидат технических наук,
начальник отдела,
Национальный исследовательский центр
«Курчатовский институт»
(Россия, г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1)
E-mail: Grigoriev_AS@nrcki.ru

Яна Дмитриевна Сеина

магистр,
Московский государственный технический
университет имени Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 4)
E-mail: yaseina@yandex.ru

Aleksandr A. Borzov

Doctor of technical sciences, professor
of the sub-department of rocket
and space engineering technology,
leading researcher,
Lomonosov Moscow State University
(1 Leninskie gory, Moscow, Russia)

Aleksandr S. Grigoriev

Candidate of technical sciences, head of department,
National Research Center "Kurchatov Institute"
(1 Akademik Kurchatov square, Moscow, Russia)

Yana D. Seina

Master degree student,
Bauman Moscow State Technical University
(build. 4, 5 2nd Baumanskaya street, Moscow, Russia)

Вячеслав Сергеевич Пузаков

кандидат технических наук, доцент кафедры
промышленных теплоэнергетических систем,
Национальный исследовательский университет «МЭИ»
(Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14, стр. 1);
генеральный директор,
ООО «Бюро Энергетика»
(Россия, г. Раменское, ул. Воровского, 5)
E-mail: PuzakovVS@mail.ru

Асылбек Жумабекович Касенов

кандидат технических наук, профессор
кафедры машиностроения и стандартизации,
Торайгыров университет
(Республика Казахстан, г. Павлодар, ул. Ломова, 64)
E-mail: asylbek_kasenov@mail.ru

Наталья Николаевна Сафронова

кандидат экономических наук,
заместитель генерального директора,
Ассоциация организаций строительного комплекса
атомной отрасли
(Россия, г. Москва, ул. Обручева, 30/1 стр. 1)
E-mail: safronova_nn@accni.ru

Vyacheslav S. Puzakov

Candidate of technical sciences,
associate professor of the sub-department
of industrial thermal power systems,
National Research University "MEI"
(build. 1, 14 Krasnokazarmennaya street,
Moscow, Russia);
General director,
LLC "Bureau Energetika"
(5 Vorovskiy street, Ramenskoye, Russia)

Assylbek Zh. Kasenov

Candidate of technical sciences,
professor of the sub-department
of mechanical engineering and standardization,
Toraihyrov University
(64 Lomova street, Pavlodar, Republic of Kazakhstan)

Nataliya N. Safronova

Candidate of economical sciences,
deputy general director,
Association of Nuclear Industry Construction
Organizations
(build. 1, 30/1 Obrucheva street, Moscow, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 18.10.2024

Поступила после рецензирования/Revised 08.11.2024

Принята к публикации/Accepted 10.12.2024