

**Механика материалов:
прочность, ресурс, безопасность****Materials mechanics:
strength, durability, safety**

*К 80-летию Института
машиноведения им. А. А. Благонравова
Российской академии наук*

*On the 80th anniversary of the A. A. Blagonravov
Mechanical Engineering Research Institute
of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAN)*

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-10-41-52

**РАЗВИТИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
В ОБЛАСТИ МАШИНОВЕДЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КРИТЕРИЕВ
ПРОЧНОСТИ, РЕСУРСА, ЖИВУЧЕСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ**

© **Николай Андреевич Махутов, Михаил Матвеевич Гаденин**

Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук. Москва. Россия; e-mail: safety@imash.ru

Статья поступила 28 мая 2018 г.

Рассмотрены этапы и результаты фундаментальных и прикладных исследований проблем прочности, ресурса, живучести и техногенной безопасности, выполняемых в Институте машиноведения имени А. А. Благонравова Российской академии наук на протяжении его 80-летней истории. Разработаны уравнения состояния и критериальные выражения в областях статической и динамической нагруженности, сопротивления многоциклового и малоциклового усталости, высокотемпературной и низкотемпературной статической и циклической прочности, анализа напряженно-деформированных состояний при упругом и упругопластическом деформировании, линейной и нелинейной механики разрушения. Последние десятилетия отмечены развитием фундаментальных исследований по механике катастроф, живучести и техногенной безопасности машин и конструкций, включающих в себя результаты комплексных разработок по всем перечисленным направлениям прочности и ресурса. Результаты исследований прочности, ресурса и живучести являются базовой составляющей для механики катастроф и рисков в техногенной сфере, а также новых принципов и технологий для объектов техносферы, обеспечивающих их безопасную эксплуатацию и позволяющих научно обоснованно предотвращать возникновение аварийных и катастрофических ситуаций и минимизировать возможные ущербы при их возникновении. При этом инструментом обеспечения условий безопасной работы является диагностика текущих параметров состояния материала и определение характеристик напряженно-деформированных состояний в наиболее нагруженных зонах анализируемой технической системы. Решение задачи оценки прочности и ресурса в подобных условиях включает в себя создание обобщенных математических и физических моделей сложных технологических, рабочих и аварийных процессов в технических системах для анализа условий их перехода от штатных состояний к аварийным и катастрофическим. Показано, что по мере перехода анализируемой конструкции через допускаемые состояния к предельным, обуславливающим возникновение отказов и последующих аварийных и катастрофических ситуаций, в нормативные расчеты таких состояний необходимо вводить дополнительный набор определяющих уравнений и их параметров, характеризующих эти предельные состояния. Причем такие расчеты базируются на системах критериальных уравнений, включающих параметры риска, безопасности и защищенности объектов техносферы.

Ключевые слова: машиноведение; прочность; ресурс; напряженно-деформированные состояния; предельные состояния; механика разрушения; механические свойства материалов; уравнения состояния; критерии; безопасность; риск; защищенность.

**DEVELOPMENT OF FUNDAMENTAL AND APPLIED RESEARCHES
IN THE FIELD OF MACHINE SCIENCES USING STRENGTH, SAFE LIFE,
SURVIVABILITY AND SAFETY CRITERIA**

© **Nikolay A. Makhutov, Mikhail M. Gadenin**

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; e-mail: safety@imash.ru

Submitted May 28, 2018.

The stages and results of fundamental and applied research regarding the problems of strength, resource, survivability and technogenic safety carried out at the A. A. Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences throughout a 80-year history are considered. Equations of state and criterion expressions regarding static and dynamic loading, high-cycle and a low-cycle fatigue resistance, high-temperature and low-temperature static and cyclic strength, stress-strain states analysis upon elastic and elastoplastic strain, problems of linear and non-linear fracture mechanics are derived. The last decades have been marked by the development of basic research on the mechanics of catastrophes, survivability and man-made safety of machines and structures, including the results of complex developments in all the listed areas of strength and resource. The results of studying strength, resource and survivability are the basic components for the mechanics of catastrophes and risks in the technogenic sphere, as well as the new principles and technologies for technogenic objects ensuring their safe operation and prevention on a reasonable scientific basis emergency and catastrophic situations and minimize possible damages attributed to them. Diagnostics of the current parameters of the material state and determination of the characteristics of stress-strain states in the most loaded zones of the analyzed technical system is thus a tool for ensuring safe operation conditions. The solution to the problem of assessing the strength and resource in such conditions includes creation of generalized mathematical and physical models of complicated technological, operation and emergency processes in technical systems to analyze conditions of their transition from normal state to emergency or catastrophic states. It is shown that as the analyzed structure passes through admissible to limiting states thus causing the occurrence of failures and subsequent emergency and catastrophic situations, it is necessary to introduce into the regulatory calculations of such states an additional set of defining equations and their parameters characterizing these limiting states. Those calculations are based on the systems of criterion equations, including the parameters of risk, safety and security of the technosphere objects.

Keywords: machine sciences; strength; life time; stress-strain states; limiting states; fracture mechanics; mechanical properties of materials; state equations; criteria; safety; risk; security.

Институт машиноведения имени А. А. Благонравова (ИМАШ) Российской академии наук — головной академический институт по проблемам машиноведения. В его стенах создавались и продолжают разрабатываться новые научные направления и научные школы, получившие мировое признание. ИМАШ — общепризнанное в стране и за рубежом учреждение, решающее фундаментальные научные и прикладные задачи, которое было и остается главным центром машиноведения в комплексе с другими техническими науками России [1, 2]. Решения, полученные учеными института, положены в основу развития множества отраслей промышленности: станкостроения, энергетического, авиационного, ракетно-космического, атомного, робототехнического, оборонного, нефтегазохимического, сельскохозяйственного, металлургического, автомобильного, строительно-дорожного машиностроения [2 – 8].

На протяжении своего 80-летнего существования ИМАШ всегда сверял курс проводимых в нем фундаментальных и прикладных исследований с государственными задачами, отвечавшими историческому периоду времени, на котором находилась страна, ее индустриализации, достижения Победы в Великой Отечественной войне, освоения совершенно новых образцов техники и технологий. Коллектив института продолжает с успехом проводить исследования и сегодня. Институту удавалось и удастся оставаться лидером в областях научных исследований фундамен-

тальных закономерностей развития техносферы, инженерной инфраструктуры и машиностроительного комплекса в целом как важнейшего компонента научно-технического прогресса нашей страны в ближайшей и отдаленной перспективе, обеспечения технологической независимости, обороноспособности страны и ее национальной безопасности [9 – 13].

Более 60 лет ведущие сотрудники ИМАШ РАН являются авторами, членами редколлегии и секции «Механика материалов: прочность, ресурс, безопасность» журнала «Заводская лаборатория. Диагностика материалов», определяющими основную проблематику раздела и публикующими в нем результаты своих исследований.

Научное направление фундаментальных и прикладных исследований ИМАШ РАН по проблемам прочности, ресурса, живучести, безопасности и защищенности машин и конструкций сформировалось на базе большого цикла работ, выполняющихся на протяжении всей его 80-летней истории. Основы этого направления по статической и динамической прочности были заложены в предвоенные и военные годы. В послевоенные и 50-е годы прошлого столетия получили развитие исследования по проблемам долговечности и ресурса машин и конструкций на основе критериев усталости, длительной прочности и ползучести, низкотемпературной прочности, контактной выносливости [1, 2, 14]. Для интенсивно развивающихся в 60-е годы отраслей машиностроения были проведены систематические ис-

следования по малоцикловой усталости, ползучести, высокотемпературной прочности [4, 14 – 16]. В 1980 – 1990-е гг. исследования были сконцентрированы на проблемах анализа напряженно-деформированных состояний, механики разрушения и микро-, макромеханики деформирования и разрушения [4 – 8, 17, 18]. В 1990 – 2010-е годы были поставлены и развиты фундаментальные исследования по механике катастроф, живучести и безопасности машин и конструкций [12, 13, 15 – 19], включающие в себя комплексные исследования по всем вышеперечисленным направлениям прочности и ресурса с применением аналитических, численных и экспериментальных методов анализа напряженно-деформированных и предельных состояний [4, 19].

В 1990 г. Институт машиноведения АН СССР обратился в Совет Министров СССР, Государственную комиссию по чрезвычайным ситуациям и ГКНТ СССР с предложением, в котором обосновал необходимость разработки новой Государственной научно-технической программы (ГНТП) по решению проблем обеспечения безопасных условий эксплуатации объектов техносферы и связанной с ними окружающей среды. В 1991 г. на основе этого предложения была утверждена ГНТП «Безопасность населения и народно-хозяйственных объектов с учетом риска возникновения природных и техногенных катастроф» [4, 20]. В качестве научного руководителя программы в целом и ряда ее проектов был утвержден Институт машиноведения. К реализации этой ГНТП было привлечено около 70 научных, конструкторских, технологических организаций и вузов страны. Институт машиноведения стал ведущей организацией в части исследований безопасности и защищенности машиностроительных объектов по критериям прочности, ресурса и живучести с введением в рассмотрение в эти критерии параметров риска достижения предельных состояний в их элементах, приводящих к различного рода чрезвычайным ситуациям, повреждениям и разрушениям.

Результаты исследований прочности, ресурса и живучести являются базовой составляющей механики катастроф и рисков в техногенной сфере, новых принципов, технологий и технических комплексов, обеспечивающих их безопасную эксплуатацию и позволяющих научно обоснованно предотвращать возникновение аварийных и катастрофических ситуаций, а также минимизировать возможные ущербы при их возникновении [4, 19]. При этом инструментом обеспечения условий безопасной работы являются в первую очередь диагностика текущих параметров состояния материала и определение характеристик напряженно-деформированных состояний в наи-

более нагруженных зонах анализируемой технической системы [4, 21]. Решение задачи оценки прочности и ресурса в подобных условиях включает в себя создание обобщенных математических и физических моделей сложных технологических, рабочих и аварийных процессов в технических системах для анализа условий перехода от штатных состояний к условиям возникновения и развития аварий и катастроф. Такие модели характеризуются многоуровневой структурой, затрагивающей глобальные, локальные и объектовые аспекты безопасности. Эти разработки имеют междисциплинарный характер и лежат в основе нормирования безопасности и рисков [4, 12, 13, 17 – 19].

Исследование и формирование критериальной базы по прочности, ресурсу и живучести

В число базовых задач обоснования расчетных характеристик в рамках теоретической и экспериментальной механики, механики деформирования и разрушения входят три главные [4 – 8, 12, 13].

1. Расчетно-экспериментальный анализ напряженно-деформированных состояний (σ, e) с учетом механических (P^a), термических (Q_t^a), аэрогидродинамических Q_{ah}^a , внешних радиационных и коррозионных (Q_{rc}^a) воздействий. При этом локальные напряжения $\sigma_{\max}^a$ и деформации $e_{\max}^a$ оказываются зависящими от эксплуатационного числа циклов нагружения N^a , времени t^a и температуры t^a :

$$\{\sigma_{\max}^a, e_{\max}^a\} = F_a \{P^a, Q_t^a, Q_{ah}^a, Q_{rc}^a, N^a, t^a, t^a\}. \quad (1)$$

2. Анализ закономерностей статического, динамического, циклического длительного упругого и упругопластического деформирования для варьируемых в эксплуатации частот f_t^a , амплитуд напряжений σ_a^a и деформаций e_a^a , температур t^a и времени τ^a :

$$\{\sigma_a^a, e_a^a\} = F_{1a} \{f_t^a, (\sigma_a^a, e_a^a), t^a, \tau^a\}. \quad (2)$$

Анализ критериев и условий накопления повреждений d^a , а также циклической долговечности N_c^a для стадий образования и развития трещин:

$$\{d^a, N_c^a\} = F_{2a} \{f_t^a, (\sigma_a^a, e_a^a), t^a, \tau^a\}. \quad (3)$$

Результаты экспериментальных и расчетных исследований на образцах, моделях и натурных конструкциях дают возможность определить запасы по напряжениям n_σ , деформациям n_e , числу



Рис. 1. Структура анализа прочности, ресурса, живучести и безопасности объектов техносферы

циклов n_N , времени n_t , воздействию внешней среды n_Φ и размеру трещин n_l :

$$\{n_\sigma, n_e, n_N, n_t, n_\Phi, n_l\} = \left\{ \frac{\sigma_e}{\sigma_{\max}^e}, \frac{e_e}{e_{\max}^e}, \frac{N_e}{N^e}, \frac{\tau_e}{\tau^e}, \frac{\Phi_e}{\Phi^e}, \frac{l_e}{l^e} \right\}, \quad (4)$$

где индекс «с» относится к критической (предельной) величине соответствующей характеристики прочности, долговечности, трещиностойкости, а индекс «э» — к соответствующим величинам при эксплуатации.

В соответствии с выражениями (1) – (4) одной из важнейших задач при решении проблемы обоснования прочности, ресурса, живучести и безопасности работы функционирующих, строящихся и перспективных машин и конструкций является расчетно-экспериментальное определение реального напряженно-деформированного состояния (НДС) несущих элементов конструкций [4]. На рис. 1 показана комплексная блок-схема решения проблем прочности, ресурса, живучести и безопасности таких потенциально опасных объектов техносферы, как атомные (АЭС), гидравлические (ГЭС) и тепловые (ТЭС)

электростанции, ракетно-космические комплексы (РКК), летательные аппараты (ЛА), атомные подводные лодки (АПЛ), химические производства (ХП), магистральные трубопроводы (МТ). Эти проблемы охватывают все стадии их жизненного цикла: проектирование, изготовление, испытания, эксплуатацию и вывод из эксплуатации. При этом требования по безопасности, ресурсу и прочности закладываются на стадии проектирования, отслеживаются на стадии изготовления и испытаний, диагностируются, поддерживаются или повышаются на стадии эксплуатации и обеспечиваются при выводе из эксплуатации.

Проектирование включает в себя разработку и согласование технического задания (ТЗ) с введением базовых требований по прочности, ресурсу и безопасности. Сама разработка проекта состоит из ряда стадий (принципиальные схемы, предэскизный, технический и рабочий проекты). Итак, сначала разрабатываются физические и математические модели с применением быстро развивающихся алгоритмов, программ, компьютерной техники и систем традиционного автоматизированного и цифрового проектирования (САПР). На стадии проектирования проводится также анализ прочности на основании норматив-

ных и дополнительных уточняющих расчетов и обосновывается исходный ресурс. Основными критериями и характеристиками таких расчетов являются: эксплуатационные нагрузки P , температуры t , время τ , числа циклов N , частоты f , характеристики сопротивления материалов (σ_t , σ_b , $\sigma_{дп}$), деформации ϵ , дефекты l . В качестве допустимых с использованием соотношений (1) – (4) обосновываются характеристики $[N]$, $[P]$, $[l]$ с заданными величинами запасов n . По комплексу расчетных и эксплуатационных исследований составляется заключение о прочности, долговечности, ресурсе, живучести и безопасности рассматриваемых элементов машин и конструкций.

На стадии изготовления решаются вопросы выбора и обоснования материалов и средств контроля. Для изготовленных элементов устанавливаются характеристики исходного состояния: фактические механические свойства и их отклонения от технических требований, уровень реальной дефектности несущих узлов, геометрические формы и их отклонения. Уточненные данные контроля заносятся в соответствующие технические паспорта и банки данных. Все эти характеристики являются исходной информацией о параметрах прочности — σ_b , $S_{от}$, деформативности — удлинений δ и относительного поперечного сужения ψ , деформаций ϵ , температуры t , скорости роста трещин dl/dN (или $dl/d\tau$). На их основе проводится уточнение соответствующих проектных характеристик прочности, долговечности, ресурса, живучести и безопасности.

Стадия испытаний включает различные их виды и комбинации: автономные испытания узлов; стендовые испытания узлов, агрегатов и изделий; огневые и имитационные испытания. Завершающими являются штатные испытания головных образцов с воспроизведением реальных эксплуатационных и экстремальных режимов.

С использованием тех же критериев, что и для стадий проектирования и изготовления, проводится дополнительное уточнение допустимых предельных нагрузок $[P]$ и долговечности $[N]$, на основе чего составляется заключение о ресурсе, методах последующего контроля, назначаются уточненные режимы эксплуатации.

Для стадии ввода в эксплуатацию осуществляются предпусковые и пусковые испытания, физический пуск (с корректировкой всех систем поддержания эксплуатации) и собственно ввод в эксплуатацию. При этом назначается и уточняется система штатной диагностики основных параметров: нагрузок P , температур t , циклов N , частот f , дефектов l с использованием соответствующих систем диагностики и мониторинга состояния. Для объектов высокой потенциальной

опасности разрабатываются, создаются и применяются специальные методы и системы оперативной диагностики аварийных ситуаций — с использованием тензо-, термометрии, акустической эмиссии, термовидения, импульсной голографии и др. Получаемые при этом данные могут являться исходной информацией для включения систем автоматической защиты.

На начальной стадии эксплуатации должна быть получена важнейшая информация по подтверждению или корректировке проектных решений о прочности, долговечности, ресурсе, живучести и безопасности. По мере исчерпания уточненного проектного ресурса проводится оценка остаточного ресурса безопасной эксплуатации.

Применительно к стадии эксплуатации при исчерпании исходного и остаточного ресурса возникает важный научно-технический и экономический вопрос о безопасном выводе объектов из эксплуатации (особенно в случаях возможных воздействий на объекты, персонал и окружающую среду накопленных остаточных радиоактивных, химических и других факторов Φ в штатных и аварийных режимах). При этом вывод из эксплуатации должен сопровождаться таким же анализом безопасности и рисков, как и сама эксплуатация.

В целом условия обоснования техногенной безопасности в соответствии с обязательными требованиями государственного, отраслевого и объектового уровня должны основываться на принципах «безопасность закладывается в проекте, обеспечивается в изготовлении и поддерживается в эксплуатации», в том числе за счет возрастания значимости первых этапов разработки и реализации проектов.

В перспективе роль научного обоснования безопасности с применением современных методов проектирования, расчетов, испытаний, моделирования и прогнозирования состояния объектов и определения рисков их функционирования будет все более повышаться на всех рассмотренных выше стадиях изготовления, испытаний, доводки, эксплуатации и выводе из эксплуатации (см. рис. 1). При этом при проектировании новых объектов должны рассматриваться два взаимосвязанных и гармонически сочетающихся подхода:

возможность продления ресурса безопасного функционирования объектов и получения тем самым соответствующего экономического эффекта;

сокращение назначенного ресурса и обновление инфраструктуры объектами с новыми параметрами экономической эффективности и пониженными рисками.

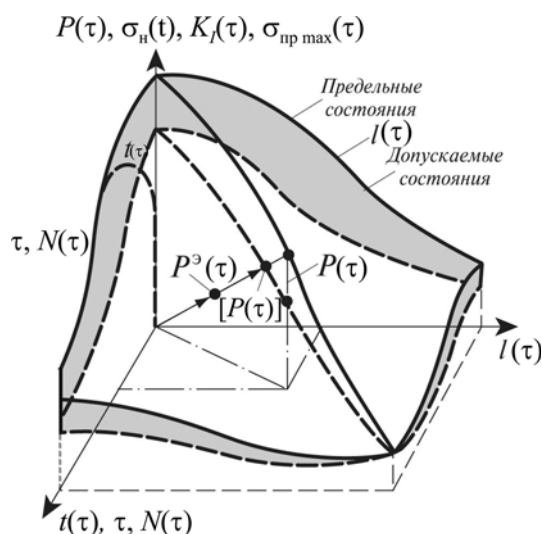


Рис. 2. Схема построения поверхностей предельных и допускаемых состояний при анализе прочности и ресурса

Для решения рассматриваемых задач наряду с современными расчетными методами успешно применяются эффективные методы экспериментальной механики, являющиеся основой функционирования систем диагностики и мониторинга состояния анализируемых объектов на всех основных этапах их создания и эксплуатации, что обеспечивает получение необходимой информации по напряженно-деформированным состояниям и условиям достижения предельных состояний, в том числе в зонах, недоступных для прямых измерений [21].

Построение поверхностей предельных состояний и включение в названные системы измерений универсальных и специальных компьютеризированных систем и соответствующих программных продуктов позволяет не только восстанавливать историю реального эксплуатационного нагружения $P(\tau_i)$, $\sigma(\tau_i)$, $e(\tau_i)$, но и оценивать степень накопления повреждений d_i , развития трещин l_i , истощения ресурса и уровень показателей надежности.

Наличие названной выше расчетно-экспериментальной информации об усилиях P , температурах t , напряжениях σ и деформациях e , а также о критериальных величинах сопротивления деформациям и разрушению соответствующих конструкционных материалов является основой для построения предельных кривых

$$P_c = \{(\sigma_{\text{пр}}, e_{\text{пр}})_{\text{max } k}, t, \tau, N\}, \quad (5)$$

где P_c — критическое (предельное) сочетание механических, температурных и других типов усилий для различных режимов нагружения по времени τ , числу циклов N , температуре t .

Величины P_c , как правило, устанавливаются по критериальным величинам местных (приведенных) напряжений $(\sigma_{\text{пр}})_{\text{max } k}$ или деформаций $(e_{\text{пр}})_{\text{max } k}$. Для этого используют уравнения:

кривых изотермической мало- или многоциклового усталости для соответствующих материалов

$$\{(\sigma_{\text{пр}})_{\text{max } k}, (e_{\text{пр}})_{\text{max } k}\}_c = f_N \left\{ \frac{N, \sigma_B, \Psi_K, S_K}{\sigma_T, m} \right\}, \quad (6)$$

где σ_B — предел прочности; σ_T — предел текучести, S_K — сопротивление отрыву; Ψ_K — относительное сужение в шейке образца при статическом разрыве; m — показатель упрочнения в упругопластической области;

кривых длительной изотермической прочности

$$\{(\sigma_{\text{пр}})_{\text{max } k}, (e_{\text{пр}})_{\text{max } k}\}_c = f_\tau \left\{ \frac{\tau, \sigma_B, \Psi_K, S_K}{\sigma_T, m} \right\}; \quad (7)$$

кривых статической прочности при варьировании температур t

$$\{(\sigma_{\text{пр}})_{\text{max } k}, (e_{\text{пр}})_{\text{max } k}\}_c = f_t \left\{ \frac{t, \sigma_B, \Psi_K, S_K}{\sigma_T, m} \right\}. \quad (8)$$

Кривые, описываемые выражениями (6) и (7) для металлических конструкционных материалов, как правило, имеют монотонный вид — при увеличении N и τ предельные значения разрушающих (критических) напряжений и деформаций уменьшаются. Температурные зависимости критических напряжений и деформаций по выражению (8) в области низких температур t иногда имеют немонотонный характер; для радиационно-охрупчиваемых или хладноломких состояний металла в этом случае прочность и пластичность могут снижаться.

По предельным кривым, построенным согласно выражениям (6) – (8) для заданного i -режима, определенного величинами $\{(\sigma_{\text{пр}})_{\text{max } k}, (e_{\text{пр}})_{\text{max } k}\}_i$, устанавливают предельные (критические) величины параметров N_{ci} , τ_{ci} , t_{ci} , Φ_c . Если для i -режима заданы значения N_i , τ_i , t_i , Φ_i , то с использованием кривых усталости, трещиностойкости, длительной прочности и стойкости к внешним воздействиям можно оценить величины накопленных повреждений.

В общем случае на основе изложенных положений для анализа условий образования критических повреждений могут быть построены пространственные трехмерные поверхности предельных и допускаемых состояний (рис. 2), координатными осями для которых являются:

ось показателей эксплуатационной нагруженности (усилий P , номинальных напряжений σ_n , коэффициентов интенсивности напряжений K_I , приведенных локальных максимальных напряжений $(\sigma_{пр})_{\max k}$ в зонах концентрации);

ось температурно-временных и циклических параметров эксплуатации (температура t , время τ , число циклов нагружения N);

ось состояния дефектности (размеры l дефектов с учетом их формы и пространственного расположения).

Образование разрушений, недопустимых пластических деформаций или трещин в анализируемом оборудовании соответствует достижению предельного состояния (поверхности предельных состояний по рис. 2). Предельная нагрузка P в этом случае является вектором, проходящим через начало координат с углами, соответствующими данному состоянию конструкции — по параметрам $l, t, \tau, N, \sigma_n, K_I, (\sigma_{пр})_{\max k}$. Если при этом ввести необходимые запасы n по указанным параметрам, то от поверхности предельных состояний можно перейти (через область между штриховой и сплошной кривыми на рис. 2) к поверхности допускаемых состояний и допускаемой нагрузке $[P]$. В этом случае заданные прочность, ресурс и живучесть можно считать обеспеченными, если значение вектора эксплуатационной нагрузки для тех или иных конкретных условий P^0 будет меньше или равно модулю вектора допускаемой для этих условий нагрузки $[P]$, т.е. $P^0 \leq [P]$.

Классические (традиционные) методы расчета прочности и ресурса развивались в предположении бездефектного конструкционного материала ($l = 0$). В этом случае от предельных и допускаемых поверхностей на рис. 2 можно перейти к предельным и допускаемым кривым (в плоскости $P, \sigma_n, K_I, (\sigma_{пр})_{\max k} - t, \tau, N$) статической (при заданной температуре t), длительной статической (по заданному времени τ) и циклической (по заданному числу циклов N) прочности.

Прочность и живучесть на первых этапах определяли по критериям линейной механики разрушения (статическая трещиностойкость) для плоскости $P, \sigma_n, K_I, (\sigma_{пр})_{\max k} - l$. Для современных расчетов прочности, ресурса и живучести с использованием предельных и допускаемых состояний важно принятие единых уравнений состояния, единых критериев разрушения и единых комплексов расчетных характеристик независимо от типа конструкции, свойств конструкционных материалов и условий эксплуатационного нагружения. При этом наиболее перспективным является поэтапный переход от расчетов в напряжениях (что принято в большинстве нормативных документов) к расчетам в деформациях [4, 13, 15].

Рассмотренные закономерности деформирования и разрушения конструкционных материалов с входящими в них характеристиками механических свойств материалов, учитываемые на стадии проектирования и составляющие вместе с данными диагностики и мониторинга состояния анализируемых объектов в процессе эксплуатации основу баз данных и баз знаний для оценки прочности, ресурса и живучести оборудования, являются фундаментом для проведения комплексных оценок техногенной безопасности и защищенности рассматриваемого оборудования в условиях сложных эксплуатационных воздействий по параметрам рисков [4, 17 – 19, 21].

Современные тенденции в проектировании и эксплуатации экстремально нагруженного оборудования в направлении повышения прочности и ресурса его несущих элементов в целях обеспечения эксплуатационной безопасности обуславливают необходимость проведения их расчетов с учетом условий номинального упругого деформирования, а также с анализом и обоснованием в таких расчетах сопротивления неупругим (упругопластическим и реологическим) деформациям и разрушению в нелинейной, упругопластической области деформирования. Допустимость возможности возникновения неупругих деформаций в рассматриваемых конструкциях и необходимость их надлежащего учета в расчетах прочности следуют из требований минимизации веса конструкций и совершенствования технологических возможностей при изготовлении крупногабаритных конструкций — литых и сварных элементов. Поскольку при эксплуатации рассматриваемых конструкций обычно имеет место циклическое нестационарное нагружение, то для наиболее нагруженных их зон становится характерным наличие как статических, так и циклических упругих и упругопластических деформаций. При таких условиях деформирования анализ условий образования предельных состояний в материале по возникновению трещин или по окончательному разрушению является необходимым этапом в процедурах обоснования безопасных параметров эксплуатации.

Выше отмечено, что повышение эксплуатационных нагрузок и снижение запасов прочности приводит к тому, что расчеты сопротивления статическому и циклическому разрушению должны осуществляться не в напряжениях, как это традиционно имело место, а в деформациях. Это связано с тем, что в неупругой области небольшим изменениям номинальных напряжений в перенапрягаемых зонах соответствуют существенные изменения местных деформаций. Поэтому для оценки прочности и ресурса в упругопластической области необходимо использование методов



Рис. 3. Структура анализа условий достижения предельных состояний

расчета величин и кинетики местных деформаций и соответствующих деформационных критериев разрушения, являющихся научным базисом анализа условий достижения в рассматриваемых несущих элементах и их критических зонах предельных состояний, обуславливающих возникновение в них как локальных (микро-), так макроразрушений, приводящих в конечном счете к авариям и катастрофам.

Анализ повреждаемости объектов техносферы в процессе эксплуатации и условий перехода их в критические предельные состояния в результате приложения многофакторных инициирующих воздействий основывается в целом на расчетно-экспериментальных методах определения прочности, ресурса, надежности, живучести и безопасности (рис. 3). При этом разработка предложений по расчетным схемам и расчетным случаям для всех стадий их жизненного цикла, включая стадии проектирования, изготовления, испытаний, эксплуатации и вывода из нее (см. рис. 1), построение системы уравнений для описания взаимосвязи текущих повреждений, внешних воздействий и реакций на них осуществляется на базе концепции учета изменения механических свойств материалов на всех названных выше стадиях жизненного цикла.

На стадии проектирования в расчеты прочности и ресурса закладываются исходные механические свойства материала. Текущее состояние рассматриваемых конструктивных элементов оценивается с учетом фактических механических свойств материала, полученных в результате проведения контрольных экспериментов. Расчеты остаточного ресурса по критериям достижения предельных состояний проводятся с использованием данных как о фактических на текущий момент механических свойствах материала, так и об их прогнозных характеристиках. При этом эксплуатационные воздействия на конструкционные материалы, обуславливающие реальные для данных этапов эксплуатации характеристики механических свойств этих материалов, определяются следующими основными параметрами: числами циклов N , временем нагружения τ , температурой t , дефектностью l , воздействием окружающей среды β . При этом параметры N и τ влияют на ресурс объекта в целом, а t — на его термостойкость.

Научное обоснование техногенной безопасности и защищенности

Условия достижения предельных состояний (разрушение, образование критических трещин,

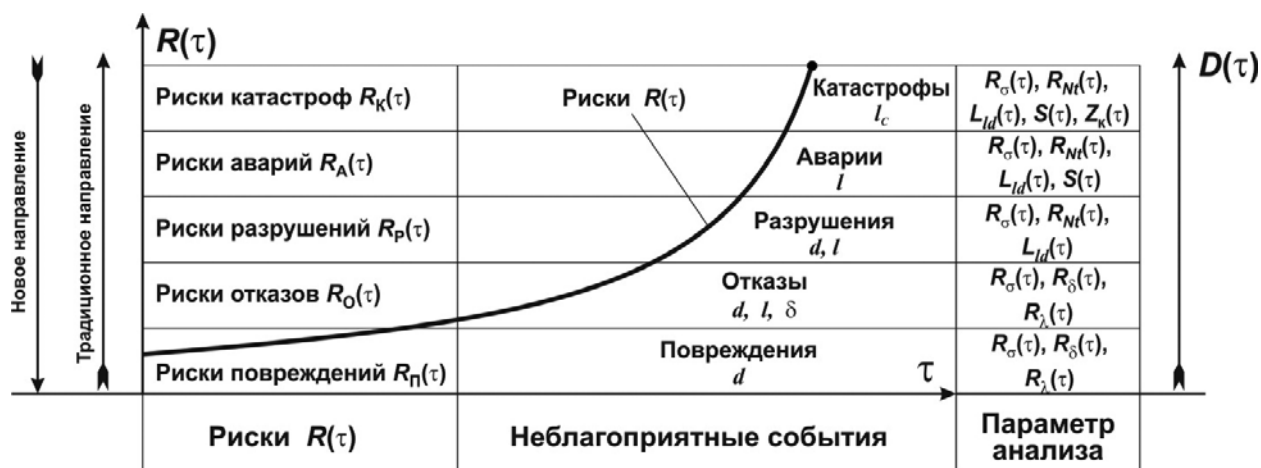


Рис. 4. Последовательность анализа опасных состояний объектов и соответствующих им рисков

потеря устойчивости, недопустимые пластические деформации) в широком диапазоне параметров нагружения можно охарактеризовать следующими группами ситуаций, возникающих при эксплуатации оборудования [4, 13, 19, 21]:

нормальные (штатные) ситуации, когда выполняются условия прочности, ресурса, надежности и живучести по заданным уровням запасов n и дефектности l^3 ; в этом случае эксплуатация продолжается по существующим нормам и правилам;

отклонения от нормальных условий (режимные аварийные ситуации) по параметрам эксплуатационных воздействий ($\sigma_{\max}^3$), механическим свойствам и уровню дефектности l^3 со снижением запасов n ; в данном случае в оборудовании возможно возникновение повреждений и отказов, требующих проведения диагностических и ремонтно-восстановительных работ;

проектные аварийные ситуации, когда наблюдаются существенное возрастание уровней эксплуатационных воздействий $\sigma_{\max}^3$, падение характеристик прочности (σ_t, σ_b) и пластичности, рост дефектов l^3 ; в этих случаях эксплуатация оборудования прекращается, проводятся анализ его состояния, ремонт и восстановление, а также оценка остаточной прочности и ресурса;

запроектные аварийные ситуации, когда запасы n и расчетные характеристики переходят в недопустимую область ($n \leq 1$); при этом имеет место регламентная или вынужденная остановка эксплуатации оборудования, реализуются объемы работ по его восстановлению и принимаются решения о возможности или невозможности дальнейшей эксплуатации;

гипотетические аварийные ситуации при реализации самых опасных, непредвиденных расчетами и испытаниями экстремальных воздействий $\sigma_{\max}^3$, сопровождающихся значительными

ми разрушениями ($l^3 \rightarrow l_c$) несущих элементов и невозможностью их восстановления; при этом запасы $n < 1$.

Каждому из названных типов чрезвычайных ситуаций соответствует определенное снижение уровня техногенной безопасности, которое может оцениваться через величины рисков $R^3(\tau)$ на заданном этапе t^3 эксплуатации, количественные значения которых могут быть получены через вероятности $P_i^3(\tau)$ возникновения каждой из указанных i ситуаций и величины возможных экономических ущербов $U_i^3(\tau)$ при их реализации [4, 19]:

$$R^3(\tau) = F_R \{P_i^3(\tau), U_i^3(\tau)\}. \quad (9)$$

Параметр обеспечения безопасности в этом случае может быть представлен в виде соответствующего запаса

$$n_R = R_k(\tau) / R_i^3(\tau), \quad (10)$$

где $R_k(\tau)$ — критический (недопустимый, неприемлемый) риск для конкретного объекта; $R_i^3(\tau)$ — расчетный риск для момента его эксплуатации τ в i -м режиме (ситуации); n_R — запас безопасности по риску.

Обозначенный выше переход от традиционных методов обеспечения заданных условий эксплуатации объектов техносферы к перспективным состоит в том, что при решении проблемы обеспечения условий их безопасной эксплуатации изначально необходимо решать задачи обеспечения заданного уровня рисков $R(\tau)$ от возможных аварий и катастроф и требовать применения таких норм расчетов и испытаний, которые обеспечивали бы приемлемый уровень этих допускаемых уровней рисков, определяющих безопасность и защищенность конструкции [4, 19]. Такой подход определяет все основные группы

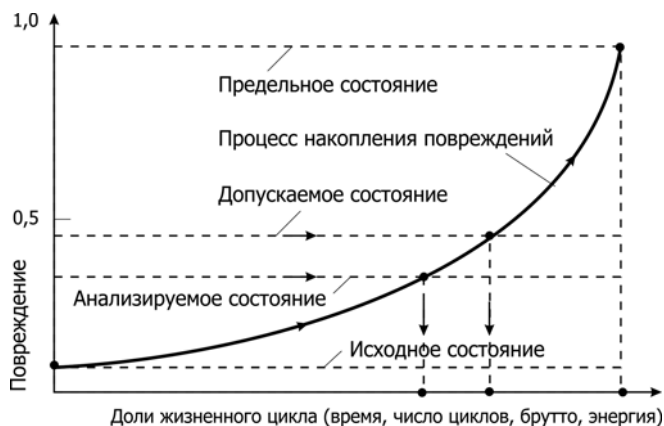


Рис. 5. Траектории повреждаемости объектов на различных стадиях жизненного цикла

расчетных характеристик (рис. 4): защищенности $Z_k(\tau)$, безопасности $S(\tau)$ и рисков $R(\tau)$; ресурса $R_{N\tau}(\tau)$, надежности $P_{PR}(\tau)$, живучести $L_{ld}(\tau)$; прочности $R_o(\tau)$, жесткости $R_8(\tau)$, устойчивости $R_\lambda(\tau)$.

При этом траектории развития неблагоприятных событий, приводящих к отказам оборудования, могут иметь различный вид (см. рис. 4), характеризуемый увеличением во времени t величин рисков $R(\tau)$, когда каждому значению рисков $R(\tau)$ отвечает свой уровень поврежденности объекта $D(\tau)$.

При построении алгоритма анализа и мониторинга рисков $R(\tau)$, сценариев развития неблагоприятных событий и определении базовых параметров объектов учитывается, что фаза иницирования повреждений, отказов, разрушений, аварий, катастроф и соответствующих им рисков $R(\tau)$ может представлять собой во времени t как краткосрочный, так и длительный процесс, включающий в себя различные этапы отклонений от заданных режимов эксплуатации, накопления механических повреждений в оборудовании, отказов, а также нарушение контроля за качеством и состоянием оборудования и обслуживающего его персонала.

Первая фаза накопления повреждений d , отказов и частичных разрушений с развитием локальных разрушений (трещин l) заканчивается возникновением на объекте аварийной ситуации, которая может быть связана с начавшимися каскадными разрушениями и необратимыми отклонениями от условий нормальной эксплуатации. Авария или катастрофа с достижением в элементах конструкции предельного состояния и образованием критических дефектов l_k является заключительной стадией развития неблагоприятных ситуаций и характеризуется самыми высокими, неприемлемыми (критическими) рисками $R(\tau) = R_k(\tau)$.



Рис. 6. Состояния, сценарии и факторы эксплуатации объектов с учетом возможности возникновения аварий и катастроф

Достижение предельного состояния объекта в процессе его эксплуатации в зависимости от условий, режимов и характера нагружения происходит различными темпами и по различным траекториям. При этом на определенных стадиях жизненного цикла (в том числе заданных регламентами) его текущие состояния подлежат диагностическому контролю с определением на каждой из них доли его поврежденности (рис. 5) и принятием решения о возможности и допустимых сроках его дальнейшей эксплуатации в зависимости от степени приближения накопленных повреждений к допускаемому уровню или о возможности продления проектного ресурса в случае его исчерпания относительно первоначально заданного значения.

Для комплекса параметров, определяющих степень повреждаемости анализируемых объектов и оцениваемых для стадии штатных условий эксплуатации, имеются, как правило, достаточно полно разработанная нормативная база и методология их расчета. Система расчетов параметров, характеризующих проектные, запроектные и гипотетические ситуации, основывается на анализе и учете условий возникновения отказов и поврежденных состояний, ведущих к аварийным и катастрофическим ситуациям. Это требует существенного совершенствования и уточнения подходов и методологий, обосновывающих соответствующие нормативные решения, принятые для штатных ситуаций. Следует отметить, что при переходе от анализа штатных ситуаций к анализу запроектных и возможных гипотетических ситуаций, характерных в большинстве случаев для тяжелых аварий и катастроф, область расчетов в настоящее время практически не охвачена соответствующей нормативной базой.

На рис. 6, иллюстрирующем рассматриваемые условия эксплуатации, по горизонтальной оси отложен уровень воздействия эксплуатаци-

онных факторов F_s (циклов нагружения, времени, температуры, коррозионной среды), а по вертикальной оси — факторы реакций анализируемых объектов на эти воздействия S^* . Нижняя область на рис. 6 до пунктирной линии, соответствующей допускаемым состояниям, включает в себя штатные ситуации с работой объекта в рамках параметров, назначенных в соответствии с нормами проектирования и эксплуатации. В этой области точка с параметрами $S^0 - F^0$ характеризует текущее эксплуатационное состояние.

Критически нагруженный элемент объекта из этой точки может перейти в опасные (предельные) состояния по различным, характеризующим углом α (параметром сценария) траекториям. Например, двигаясь вправо (при $\alpha = 0$) и оставаясь в условиях штатных ситуаций вплоть до перехода через предельное состояние (сплошная линия), можно получить предельный ресурс (по N или τ) или допускаемый ресурс (до пересечения с пунктирной линией). Поднимаясь от точки текущего состояния резко вверх (при $\alpha = 90^\circ$), объект может уже на текущей стадии эксплуатации достичь предельного состояния, за которым наступает катастрофа. В данном случае задача анализа безопасности объекта по такому сценарию должна решаться по совершенно отличающейся от принятой в действующих для штатных ситуаций нормах методологии. При этом действующие нормативные расчеты по напряжениям и характеристикам стандартных механических свойств с опорой на существующую опытно-экспериментальную базу недостаточны.

Для уточненных расчетов по деформационным характеристикам необходимо использование диаграмм статического, циклического и длительного деформирования материала с анализом напряженно-деформированных состояний в опасных, реализуемых при таком сценарии процессах деформирования и разрушения упругопластических областях (с учетом критических пластических деформаций), а также в наиболее нагруженных зонах анализируемых элементов конструкций. Такой подход требуется и при анализе форсированных режимов нагружения ($0 \leq \alpha \leq 90^\circ$).

Таким образом, по мере перехода конструкции через допускаемые состояния к предельным, которые обуславливают начало критического накопления повреждений, возникновение отказов и последующих аварийных и катастрофических ситуаций, в нормативные расчеты необходимо вводить дополнительный набор определяющих уравнений и их параметров, характеризующих предельные состояния. Это требует использования определенного набора характеристик механических свойств материала, кото-

рые должны быть получены при проведении не только стандартных, но и дополнительных испытаний для обоснования безопасности объектов, для которых в нормативных расчетах в настоящее время рассматриваемые подходы представлены в недостаточно развернутой степени. При этом может быть использован опыт расчетов и испытаний, накопленный в таких передовых областях техники, как атомная, авиационная, космическая.

Фундаментальные научные исследования условий эксплуатации высокорискового оборудования в штатных ситуациях и определение закономерностей их перехода в предельные по параметрам рисков возникновения чрезвычайных ситуаций позволяют сформулировать критерии прочности, ресурса, живучести и безопасности с анализом условий достижения предельных состояний в процессе эксплуатации на разных этапах и режимах жизненного цикла. В систему таких критериев механики деформирования и разрушения на разных стадиях разработки соответствующих расчетно-экспериментальных методов последовательно включаются анализ и определение базовых характеристик механических свойств конструкционных материалов, критерияльно определяющих условия достижения предельного состояния материала во все усложняющихся условиях эксплуатации. Перспективные в этом направлении методы базируются на системах критериальных уравнений, конечной целью использования которых и является количественное определение параметров безопасности, риска и защищенности [4, 19], характеризующих состояние и приоритеты развития отечественного машиностроения [9 – 11].

ЛИТЕРАТУРА

1. Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук / Кто есть кто в современном мире. Национальное достояние. Вып. VII. — М.: Международный объединенный биографический центр, 2009. С. 270 – 387.
2. Достижения и задачи машиноведения. К 70-летию академика К. В. Фролова. — М.: МГФ «Знание», 2006. — 416 с.
3. Прочность, ресурс, живучесть и безопасность машин. — М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2008. — 576 с.
4. **Махутов Н. А.** Прочность и безопасность: фундаментальные и прикладные исследования. — Новосибирск: Наука, 2008. — 528 с.
5. Прочность и ресурс ЖРД. Сер. Исследования напряжений и прочности ракетных двигателей. — М.: Наука, 2011. — 525 с.
6. Напряженно-деформированные состояния ЖРД. Сер. Исследования напряжений и прочности ракетных двигателей. — М.: Наука, 2013. — 646 с.
7. Локальные критерии прочности, ресурса и живучести авиационных конструкций. Сер. Исследования прочности, ресурса и безопасности летательных аппаратов. — Новосибирск: Наука, 2017. — 600 с.
8. Проблемы прочности и безопасности водо-водяных энергетических реакторов. Сер. Исследования напряжений и прочности ядерных реакторов. — М.: Наука, 2008. — 446 с.

9. **Фортов В. Е., Махутов Н. А.** Машиностроение России: состояние и развитие. — М.: РАН, 2010. — 71 с.
10. **Фортов В. Е., Махутов Н. А.** Машиностроение России: этапы и приоритеты развития. — М.: РАН, 2016. — 80 с.
11. **Махутов Н. А., Фортов В. Е.** Машиностроение России: перспективы и риски развития. — М.: Наука, 2017. — 104 с.
12. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Функционирование и развитие сложных народнохозяйственных, технических, энергетических, транспортных систем, систем связи и коммуникаций. Раздел 1. Теоретические основы безопасного функционирования сложных технических систем. — М.: МГФ «Знание», 1998. — 448 с.
13. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Функционирование и развитие сложных народнохозяйственных, технических, энергетических, транспортных систем, систем связи и коммуникаций. Раздел 2. Обеспечение безопасного функционирования сложных технических систем на разных этапах жизненного цикла. — М.: МГФ «Знание», 1998. — 416 с.
14. **Серенсен С. В.** Избранные труды в 3-х т. — Киев: Наукова думка, 1985. Т. 1. Прочность материалов и элементов конструкций при статическом нагружении. — 256 с.; Т. 2. Усталость материалов и элементов конструкций. — 256 с.; Т. 3. Квазистатическое и усталостное разрушение материалов и элементов конструкций. — 232 с.
15. Уравнения состояния при малоцикловом нагружении. — М.: Наука, 1981. — 245 с.
16. Научные основы повышения малоциклового прочностности. — М.: Наука, 2006. — 623 с.
17. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Фундаментальные и прикладные проблемы комплексной безопасности. — М.: МГОФ «Знание», 2017. — 992 с.
18. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Техногенная, технологическая и техносферная безопасность. — М.: МГОФ «Знание», 2018. — 1016 с.
19. **Махутов Н. А.** Безопасность и риски: системные исследования и разработки. — Новосибирск: Наука, 2017. — 724 с.
20. ГНТИ «Безопасность населения и народнохозяйственных объектов с учетом риска возникновения природных и техногенных катастроф». Концепция и итоги работы 1991–1992 гг. В 2-х т. — М.: ВИНТИ, 1993. Т. 1. — 350 с.; Т. 2. — 480 с.
21. **Махутов Н. А., Гаденин М. М.** Техническая диагностика остаточного ресурса и безопасности. Сер. Диагностика безопасности. — М.: Издательский дом «Спектр», 2011. — 187 с.
5. Strength and resource of liquid-fuel rocket engines. The series “Researches of rocket engines stresses and strength”. — Moscow: Nauka, 2011. — 525 p. [in Russian].
6. Stress-strain states of liquid-fuel rocket engines. The series “Researches of rocket engines stresses and strength”. — Moscow: Nauka, 2013. — 646 p. [in Russian].
7. Local criteria of strength, resource and survivability of aviation structures. The series “Researches of strength, resource and safety of aircrafts”. — Novosibirsk: Nauka, 2017. — 600 p. [in Russian].
8. Strength and safety problems of water-moderated power reactors. The series “Researches of stresses and strength of nuclear reactors”. — Moscow: Nauka, 2008. — 446 p. [in Russian].
9. **Fortov V. E., Makhutov N. A.** Machinery Manufacture of Russia: State and Evolution. — Moscow: The Russian Academy of Sciences, 2010. — 71 p. [in Russian].
10. **Fortov V. E., Makhutov N. A.** Machinery Manufacture of Russia: Stages and Priorities of Evolution. — Moscow: Russian Academy of Sciences, 2016. — 80 p. [in Russian].
11. **Makhutov N. A., Fortov V. E.** Machinery Manufacture of Russia: Prospects and Risks of Evolution. — Moscow: Nauka, 2017. — 104 p. [in Russian].
12. Safety of Russia. Legal, social-economic and scientifically-engineering aspects. Management of service resource for highly risks objects. Functioning and development of complex economic, technical, power, transport systems, communication systems and service lines. Part 1. Theoretical bases of safe functioning of complex technical systems. — Moscow: MGF “Znanie”, 1998. — 448 p. [in Russian].
13. Safety of Russia. Legal, social-economic and scientifically-engineering aspects. Management of service resource for highly risks objects. Functioning and development of complex economic, technical, power, transport systems, communication systems and service lines. Part 2. Maintenance of safe functioning of complex technical systems at different stages of life cycle. — Moscow: MGF “Znanie”, 1998. — 416 p. [in Russian].
14. **Serensen S. V.** The selected transactions. In 3 volumes. — Kiev: Naukova Dumka, 1985. Vol. 1. Strength of materials and structures parts at static loading. — 256 p. Vol. 2. Fatigue of materials and structures parts. — 256 p. Vol. 3. Quasistatic and fatigue fracture of materials and structures parts. — 232 p. [in Russian].
15. The state equations at a low-cycle loading. — Moscow: Nauka, 1981. — 245 p. [in Russian].
16. Scientific bases of low cycle strength improvement. — Moscow: Nauka, 2006. — 623 p. [in Russian].
17. Safety of Russia. Legal, social-economic and scientifically-engineering aspects. Fundamental and application problems of complex safety. — Moscow: MGOF “Znanie”, 2017. — 992 p. [in Russian].
18. Safety of Russia. Legal, social-economic and scientifically-engineering aspects. Engineering, technological and technogenic sphere safety. — Moscow: MGF “Znanie”, 2018. — 1016 p. [in Russian].
19. **Makhutov N. A.** Safety and risks: system researches and developments. — Novosibirsk: Nauka, 2017. — 724 p. [in Russian].
20. The State Scientific-Technical Program “Safety of the population and national objects with the account of risk of initiation of natural and technogenic disasters”. The concept and results of implementation. 1991–1992. In 2 volumes. — Moscow: VINITI, 1993. Vol. 1. — 350 p. Vol. 2. — 480 p. [in Russian].
21. **Makhutov N. A., Gadenin M. M.** Engineering diagnostics of the remaining resource and safety. The series “Safety Diagnostics”. — Moscow: Izdatelskiy dom “Spektr”, 2011. — 187 p. [in Russian].

REFERENCES

1. The A. A. Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences. Who is who in the up-to-date world. National property. Issue VII. — Moscow: International joint biographic centre, 2009. P. 270–387 [in Russian].
2. Reachings and machine sciences problems. To the 70 anniversary of academician K. V. Frolov. — Moscow: MGF “Znanie”, 2006. — 416 p. [in Russian].
3. Strength, safe life, survivability and safety of machines. — Moscow: Knizhniy dom “LIBROKOM”, 2008. — 576 p. [in Russian].
4. **Makhutov N. A.** Strength and safety: fundamental and applied researches. — Novosibirsk: Nauka, 2008. — 528 p. [in Russian].