

Механика материалов: прочность, ресурс, безопасность

УДК 620.19:531.781

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ, ДИАГНОСТИКИ И МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЙ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ¹

© Н. А. Махутов², М. М. Гаденин², В. В. Иванов³, П. В. Миодушевский³*Статья поступила 29 июля 2015 г.*

Рассмотрена методология обоснования безопасности, расчетов исходного и остаточного ресурсов, надежности и живучести несущих конструкций оборудования, основанная на оценке напряженно-деформированных состояний по результатам диагностики и мониторинга параметров их текущих и предельных состояний с учетом темпов накопления эксплуатационной повреждаемости. На основе анализа напряженно-деформированных состояний и изменений свойств конструкционных материалов и их дефектности исследована возможность определения израсходованной части ресурса, остаточного ресурса, живучести и надежности ответственных элементов машин и конструкций. Показано, что комплексная реализация контроля, дефектоскопии, дефектометрии, технической диагностики, фрактодиагностики и мониторинга элементов ответственного оборудования открывает новые возможности управления ресурсом и безопасностью объектов высокого риска.

Ключевые слова: диагностика; мониторинг; контроль состояния; прочность; ресурс; живучесть; накопление повреждений; предельные состояния; безопасность; риск; оборудование; конструкционные материалы.

Потенциально опасные объекты топливно-энергетического (ТЭК), нефтегазового (НГК), машиностроительного (МК), горно-добывающего (ГДК), транспортного (ТК), строительного (СК) комплексов во время эксплуатации t характеризуются высокими нагрузками $P^3(t)$, давлениями $p^3(t)$ и температурами $t^3(t)$ рабочего тела, наличием пожаро-, взрывоопасных и токсически вредных продуктов и сырья. Все это в совокупности с большой вероятностью отказов средств производственной автоматизации и управления объектами создает реальную опасность возникновения повреждений $d^3(t)$, ведущих к крупным техногенным авариям и катастрофам, остановке и выводу из строя самих объектов.

Согласно обобщающим Государственным докладам МЧС России и Ростехнадзора [1, 2] в нашей стране, в ее социально-природно-техногенной системе (С-П-Т системе), ежегодно происходят сотни тысяч отказов, тысячи объектовых аварий и сотни чрезвычайных ситуаций природного, природно-техногенного и природно-техноантропогенного характера. Наиболее крупные из этих чрезвычайных ситуаций в

2010 – 2015 гг. приводили к гибели десятков и сотен человек, нанесению увечий тысячам человек, а также ущерба объектам, населению и природной среде [3]. К опасным событиям относятся взрывы, пожары, выбросы опасных веществ, крушения, обрушения. Общий ежегодный прямой материальный ущерб от них составляет не менее 5 – 10 млрд руб. [1 – 7].

В гражданском комплексе на объектах ТЭК, НГК, МК, СК, ГДК, ТК, являющихся одними из главных компонентов С-П-Т системы, опасные процессы (повреждения, отказы, аварии, катастрофы) создаются за счет негативного проявления (рис. 1) основных групп повреждающих и поражающих факторов [4, 8 – 10]. К таким факторам относятся:

конструктивные (научно и нормативно необоснованный выбор материалов, конструктивных форм и неучет природных воздействий);

технологические (необоснованная механическая и термическая, физико-химическая обработка, сварка, пайка, отсутствие технологического контроля);

эксплуатационные (несоблюдение и нарушение режимов эксплуатации, нарушение норм контроля и диагностики, норм ремонтно-восстановительных работ);

человеческий (ошибки операторов и персонала, несанкционированные и террористические воздействия).

¹ Работа выполнена за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-00776).

² Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), Москва, Россия; e-mail: imash-ru@mail.ru

³ МП ОТК «Технокомплект», Москва, Россия.



Рис. 1. Относительное распределение источников и причин возникновения тяжелых аварий и катастроф в гражданском комплексе



Рис. 2. Распределение аварий по объектам технологического оборудования нефтегазового и топливно-энергетического комплексов

Распределение аварий для объектов НГК и ТЭК различного назначения по вызывающим их основным причинам показано на рис. 2, из которого следует, что более 30 % из них происходит на трубопроводах, около 20 % — на насосах, 15 % — на сосудах давления и емкостях.

В 2010 – 2015 гг. имели место отказы и промышленные аварийные ситуации на магистральных нефтегазовых трубопроводах, на Рязанском и Ачинском нефтеперерабатывающих заводах, на главных циркуляционных трубопроводах атомных электростанций,

на объектах железнодорожного и авиационного транспорта.

При оценке потенциальных угроз для С-П-Т системы необходимо учитывать, что интегральный показатель степени износа основных производственных фондов топливно-энергетического, нефтегазового и транспортного комплексов России составляет более 60 % (для промышленных установок ряда компаний — до 70 – 80 %). Более 10 % объектов эксплуатируются за пределами назначенного и расчетного ресурса.

Для решения все более усложняющихся научно-технических проблем безопасности по критериям прочности, ресурса, живучести и надежности используются как отдельные, так и совмещенные традиционные методы и системы расчетов, контроля, диагностики, дефектоскопии, дефектометрии и мониторинга состояния несущих элементов ТЭК, НГК, ТК, ГДК, СК.

Согласно концепциям, доктринам, стратегиям совершенствования государственной политики в области обеспечения комплексной безопасности с учетом необходимости стимулирования инновационной деятельности предприятий на период до 2020 – 2030 гг. одним из основных направлений ее реализации является повышение уровня научного обоснования и создание системы прогнозирования, выявления, анализа



Рис. 3. Направления развития исследований, нормирования, стандартизации и регулирования

и оценки рисков аварий на потенциально опасных объектах названных комплексов [4, 11 – 13].

Основы дефектоскопии, диагностики и мониторинга состояний

Эксплуатационная работоспособность объектов, оборудования, узлов и деталей, а следовательно, их безопасность реализуются через систему:

расчетов, испытаний, контроля, диагностики, мониторинга;

государственного надзора за безопасностью;

принятия решений о ресурсе безопасной эксплуатации.

Это нашло свое отражение в решениях Совета Безопасности (СБ) и Государственного совета (ГС) Российской Федерации, в федеральных законах (ФЗ) и распоряжениях Правительства РФ (РП) о промышленной безопасности (ПБ), техническом регулировании (ТР), безопасности гидротехнических сооружений (ГТС), ядерной и радиационной безопасности (ЯРБ), атомной энергетике (АЭ) и чрезвычайных ситуациях (ЧС).

Указанные выше решения и федеральные законы в развитие ранее существовавшей отечественной нормативной базы, включающей государственные (ГОСТ) и отраслевые (ОСТ) стандарты, строительные

нормы и правила (СНиП), потребовали разработки технических регламентов (ТР), национальных (НСТ), отраслевых (СТО) стандартов, сводов правил (СП), а также федеральных норм и правил (ФНиП) (рис. 3). Их научной основой были и остаются традиционные методы анализа прочности, ресурса и надежности. В последние три десятилетия к ним добавились новые методы оценки, живучести, безопасности, риска и защищенности [8, 9].

При анализе прочности, ресурса и безопасности сложных технических систем сформулированы основные виды штатных и аварийных (проектные, запроектные и гипотетические) ситуаций. В их основе лежат такие параметры, как локальные напряжения σ и деформации ϵ , числа циклов N , температура t и время τ эксплуатации [4, 8 – 10, 14]. В зависимости от типа потенциально опасных объектов эти параметры широко варьируются ($100 \leq N \leq 1012$, $270 \text{ }^\circ\text{C} \leq t \leq 2000 \text{ }^\circ\text{C}$, $100 \text{ с} \leq \tau \leq 80 \text{ лет}$), что приводит к тому, что проектные аварийные ситуации, как правило, охватывают области исследования накопления повреждений классическими теориями сопротивления материалов, теориями упругости, пластичности и ползучести. Для большинства объектов техники в соответствии с традиционными нормами и правилами расчетные и экспериментально определяемые номинальные

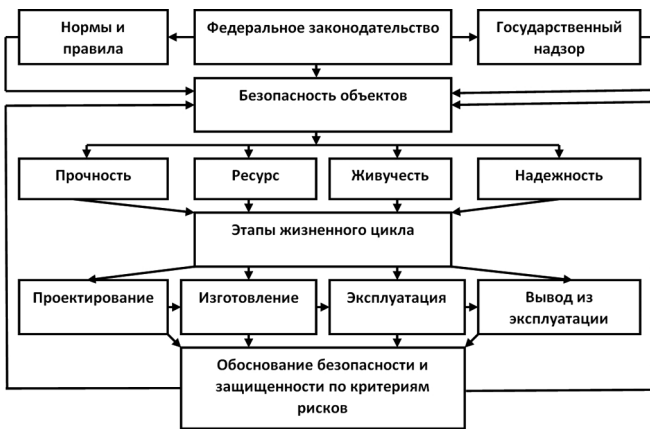


Рис. 4. Принципиальная схема решения проблем прочности, ресурса и безопасности

напряжения σ_n и деформации ε при этом остаются на уровне предела упругости и текучести σ_T ($\sigma_n \leq \sigma_T$).

При переходе к максимальным локальным напряжениям $\sigma_{\max} \geq \sigma_T$ и к аварийным ситуациям анализируются нелинейные закономерности деформирования и разрушения, при этом напряжения σ_{\max} становятся менее информативными параметрами, чем деформации ε_{\max} . Повреждения от вибраций и усталости переходят в повреждения от малоциклового усталости. Еще большее возрастание σ_{\max} и ε_{\max} обуславливает переход к запроектным и гипотетическим авариям и катастрофам. При этом теоретической основой анализа таких ситуаций является статическая и динамическая нелинейная механика разрушения.

Научные исследования по поддержанию и повышению уровня технического регулирования производственной сферы по критериям безопасности, прочности и ресурса призваны обеспечить приемлемый уровень защищенности объектов инфраструктуры и населения. Техническое регулирование с обеспечением безопасности должно осуществляться через определение рисков возникновения аварий и катастроф $R(\tau)$ в техногенной, природной и социальной сферах и управление ими по их заданным критическим $R_k(\tau)$ и допускаемым $[R(\tau)]$ параметрам. Используемые для этого обобщенные выражения имеют свое научное и методическое обоснование.

На рис. 3 по шкале τ с 30-х годов прошлого века и до настоящего времени показаны разделы научных исследований в области прочности R_σ , ресурса $R_{N,\tau}$, надежности $P_{P,R}$, живучести $L_{d,b}$, безопасности S , риска R и защищенности Z применительно к различным типам объектов техносферы. В историческом и научно-техническом плане за это время сложилась устойчивая традиционная последовательность решаемых проблем.

Каждому из приведенных на рис. 3 критериев отвечают свои задачи контроля, дефектоскопии, дефектометрии, диагностики, фрактодиагностики и мониторинга состояния. При этом степень их разра-

ботки, применения и развития на практике резко снижается, что отражено положением кривой на рис. 3.

В продолжение показанных на рис. 3 тенденций развития исследований, нормирования, стандартизации и регулирования на рис. 4 приведена структурная схема решения проблем прочности, ресурса, живучести, надежности и безопасности оборудования. При ее рассмотрении следует иметь в виду, что каждый последующий этап развития науки, техники и нормирования опирается на предыдущие и в обязательном порядке их использует [8, 9]. При этом в качестве базовых параметров эксплуатационных воздействий P° приняты эквивалентные эксплуатационные напряжения σ° , деформации ε° , числа циклов N° , время τ° , температура t° , внешняя среда Φ° (радиация, коррозия, электромагнитное поле), коэффициенты концентрации напряжений α_σ , интенсивности напряжений K_{I° и деформаций K_{Ie° :

$$P^\circ = \{\sigma^\circ, \varepsilon^\circ, N^\circ, \tau^\circ, t^\circ, \Phi^\circ, \alpha_\sigma, K_{I^\circ}, K_{Ie^\circ}\}. \quad (1)$$

Для расчетов прочности R_σ , характеризующей сопротивление разрушению, в качестве базовых используют параметры напряженно-деформированного состояния $\sigma^\circ - \varepsilon^\circ$ и характеристики механических свойств — пределы текучести σ_T , пределы порочности σ_B , пределы выносливости σ_{-1} , пределы длительной прочности $\sigma_{дл}$, сопротивление отрыву S_K , предельную пластичность ψ_K , критические коэффициенты интенсивности напряжений K_{Ic} и деформаций K_{Iec} :

$$R_\sigma = F \{\sigma_T, \sigma_B, \sigma_{-1}, \sigma_{дл}, S_K, \psi_K, \alpha_\sigma, K_{Ic}, K_{Iec}\}. \quad (2)$$

Производными механических свойств, конструктивных форм и условий нагружения являются такие характеристики материала, как длительная пластичность $\psi_{кт}$, эффективные коэффициенты концентрации напряжений K_σ , чувствительность к абсолютным размерам ε_σ и асимметрии цикла ψ_σ , коэффициент вариации v_σ , скорости роста трещин по числу циклов dl/dN и по времени dN/dt , чувствительность к внешней среде β_c . Тогда условия прочности можно представить в виде

$$P^\circ(\sigma^\circ, \varepsilon^\circ) \leq$$

$$\leq R_\sigma(\sigma_k, \varepsilon_k) \{\psi_{кт}, K_\sigma, \varepsilon_\sigma, \psi_\sigma, v_\sigma, dl/dN, dl/dt, \beta_c\}. \quad (3)$$

При этом характеристики напряженно-деформированного состояния $\sigma^\circ - \varepsilon^\circ$ сопоставляются с критерияльными характеристиками $\sigma_k - \varepsilon_k$ предельных состояний.

Для обеспечения ресурса (в поцикловом, во временном или в радиационном измерениях) необходимо выполнить условие

$$P_{N,\tau,p} \leq P_{N,\tau}^k = \{N^\circ/N_k; \tau^\circ/\tau_k; N_c; \Phi^\circ/\Phi_k\}, \quad (4)$$

где $P_{N,\tau}^k$ — критическое (предельное) значение ресурса, выражаемое через критические (разрушающие)

циклы N_k , время τ_k или воздействия среды Φ_k . Величины N^3 , τ^3 , N_k , τ_k зависят от параметров напряженно-деформированного ($\sigma^3 - \varepsilon^3$) и предельного ($\sigma_k - \varepsilon_k$) состояний.

Параметры надежности $P_{P,R}$ по критериям прочности P и ресурса $P_{N,\tau,P}$ определяют по выражениям (1) – (4), когда в них вводят вероятностные характеристики прочности, пластичности, эксплуатационной нагруженности с учетом коэффициентов вариации ν указанных характеристик:

$$P_{P,R} = F \{P^3, R_\sigma, P_{N,\tau,\Phi}, \nu\}. \quad (5)$$

В соответствии с (5) проводят механические испытания для определения параметров P^3 через напряженно-деформированные состояния $\sigma^3 - \varepsilon^3$ по выражениям (1), (3) и предельные состояния $\sigma_k - \varepsilon_k$ по (3) и (4). Оценка характеристик рассеяния (в том числе коэффициентов вариации ν) является чрезвычайно трудоемкой. В ряде случаев для установления кривых распределения базовых характеристик $\sigma_k - \varepsilon_k$ по механическим свойствам σ_b , ψ_k , σ_{-1} , $\sigma_{дп}$ проводят испытания от 10 до 2000 образцов при одном из режимов нагружения, а для определения $\sigma^3 - \varepsilon^3$ — статические испытания десятков моделей и натуральных конструкций.

При оценках живучести основное внимание уделяют нахождению уровня накопленных повреждений d , измеряемых указанными выше относительными параметрами N^3/N_k , τ^3/τ_k , Φ^3/Φ_k или ростом трещин от начальных размеров l_0 до текущих l^3 и критических l_k . Рост трещин определяют скоростями dl/dN , dl/dt , которые, в свою очередь, зависят от размахов коэффициентов интенсивности напряжений ΔK_I или деформаций ΔK_{Ie} . При достижении предельного состояния выполняются условия разрушения по критериям линейной (K_{Ic}) или нелинейной (K_{Iec}) механики разрушения. Тогда живучесть $L_{d,l}$ объектов с учетом повреждения d и роста трещин l будет оцениваться по условию

$$L_{d,l} = F \{P^3, R_\sigma, P_{N,\tau,\Phi}\} = F \{d; dl/dt; dl/dN\} \leq \\ \leq F \{N^3/N_k; \tau^3/\tau_k; \Phi^3/\Phi_k; K_I^3/K_{Ic}; K_{Ie}^3/K_{Iec}\}. \quad (6)$$

Если в выражение (6) ввести детерминированные статистические характеристики $\sigma^3 - \varepsilon^3$ и $\sigma_k - \varepsilon_k$, то живучесть $L_{d,l}$ приобретет соответствующий характер. Такая постановка задачи требует механических испытаний серий образцов, моделей и натуральных конструкций для контрольных и экспериментальных режимов нагружения при определении в первую очередь параметров трещиностойкости dl/dN , dl/dt , K_{Ic} , K_{Iec} .

Безопасность S объектов гражданского и оборонного назначения, технических систем, машин, конструкций, изделий и материалов становится в первые годы текущего столетия одним из определяющих параметров материального производства, экономики и

жизнедеятельности [4, 8]. На протяжении длительного времени τ (1920 – 2000 гг.) требования к безопасности $S(\tau)$ оставались преимущественно качественными или относились к технике безопасности на производстве. Однако после ряда крупнейших техногенных и природно-техногенных аварий и катастроф на объектах атомной и тепловой энергетики, на нефтехимических комплексах, ракетно-космических системах, атомных подводных лодках стало все более очевидным, что безопасность $S(\tau)$ должна быть количественно определяемым, контролируемым и регулируемым параметром. Для достижения этой цели было предложено [4, 8 – 13, 15, 16] использовать количественные характеристики рисков R . При этом для оценки безопасности $S(\tau)$ объектов техносферы под рисками $R(\tau)$ можно понимать функционал F_R , зависящий от вероятности $P(\tau)$ возникновения техногенных аварий или катастроф (по параметрам прочности и ресурса) и математического ожидания последствий [ущербов $U(\tau)$], порождаемых этими авариями и катастрофами. При таком подходе

$$S(\tau) = F \{R(\tau)\}, \quad R(\tau) = F_R \{P(\tau), U(\tau)\}. \quad (7)$$

В свою очередь, параметры $P(\tau)$ и $R(\tau)$ на стадии проектирования машин и конструкций (см. рис. 3 и 4) определяются по выражению (5) в виде функционала эксплуатационной нагруженности P^3 , сопротивления разрушению R_σ , ресурса $P_{N,\tau,\Phi}$ и характеристик их рассеяния ν .

Научно-технические, конструкторские, технологические и эксплуатационные вопросы безопасности решаются в рамках комплексного анализа потенциально опасных объектов (см. рис. 3, 4) и обеспечения их защищенности от аварий и катастроф. Согласно действующему федеральному законодательству в сфере безопасности разрабатываются соответствующие нормы и правила и осуществляется государственный надзор. Сама проблема безопасности объектов техносферы решается на основе традиционных и новых подходов к обеспечению прочности, ресурса, живучести и надежности. Нормативные требования к их обеспечению реализуются на всех этапах жизненного цикла (проектирование → изготовление → эксплуатация → вывод из эксплуатации). Подтверждение соответствия этим требованиям входит в обоснование безопасности и защищенности объектов от аварий и катастроф по критериям рисков.

Для стадии изготовления, испытаний и эксплуатации дополнительно к выражению (5) в анализ вероятности аварий или катастроф вводятся характеристики живучести $L_{d,l}$ по выражению (6). Ущерб $U(\tau)$, связанный с несоблюдением условий прочности и ресурса, зависит от типов напряженно-деформированного ($\sigma^3 - \varepsilon^3$) и предельного $\sigma_k - \varepsilon_k$ состояний, достигаемых объектом при эксплуатации. Наиболее значимыми (для жизни и здоровья операторов, персонала, населения, для поврежденного объекта и окружающей

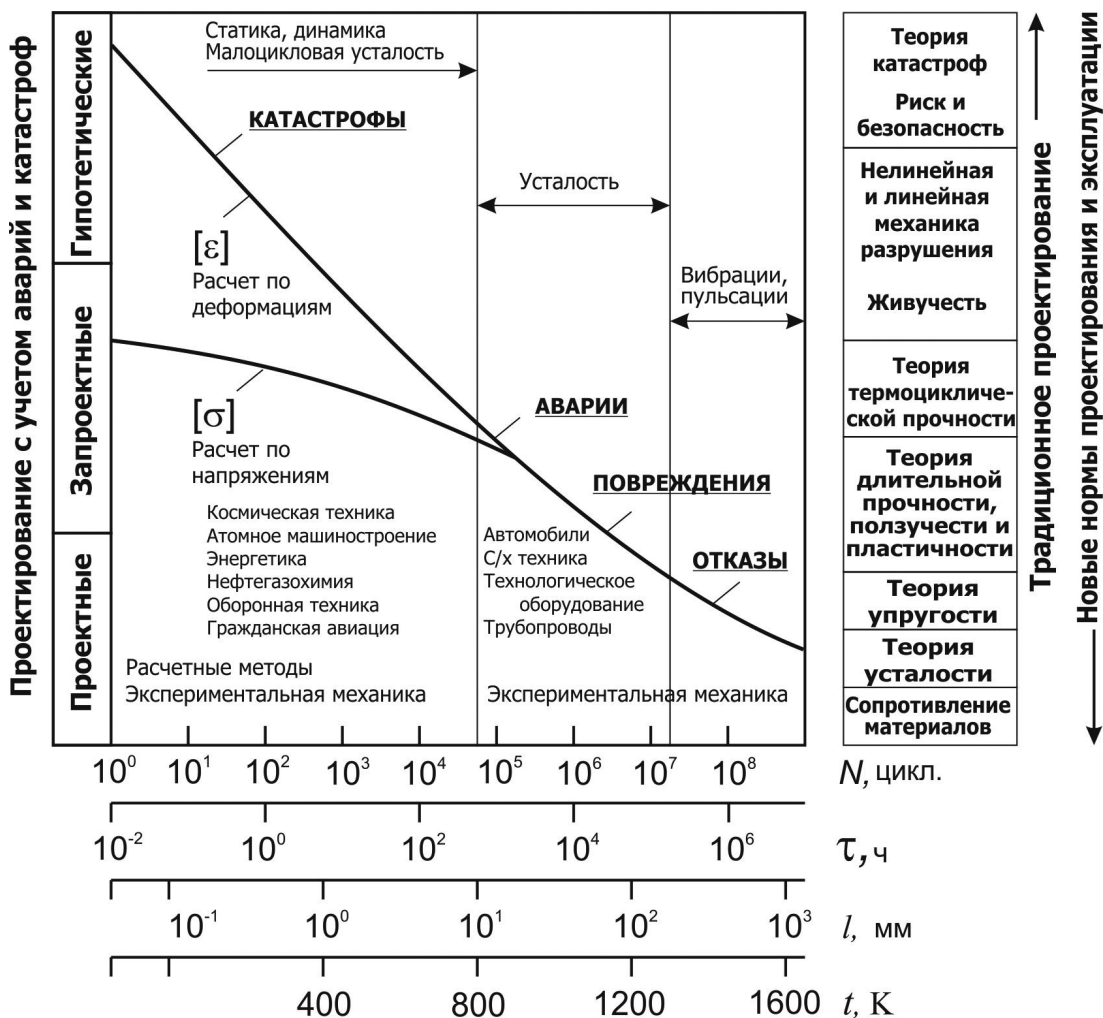


Рис. 5. Обобщенная диаграмма прочности, статического, циклического и временного ресурса, живучести и безопасности

среды) оказываются ущербы $U(\tau)$ в выражении (7) в тех случаях, когда возникают экстремальные напряженно-деформированные состояния $\sigma_{\max}^3 - \varepsilon_{\max}^3$, протяженные хрупкие разрушения, глобальная потеря устойчивости, вязкие разрушения после роста трещин при циклическом и длительном нагружении.

Из сказанного выше следует, что современное обоснование прочности, ресурса, надежности, живучести, безопасности и рисков [4, 5] с использованием выражений (4) – (7), должно опираться (см. рис. 3, 4) на результаты соответствующих расчетов и испытаний с соблюдением специальных и новых требований, устанавливаемых традиционными и новыми законами, государственными и отраслевыми стандартами, нормами и правилами.

Для комплексного анализа прочности и ресурса технических систем по результатам фундаментальных и прикладных исследований была предложена [4, 8, 9] (рис. 5) обобщенная диаграмма прочности, статического, циклического и временного ресурса, живучести и безопасности (с учетом коррозионной среды и радиации, вибраций, усталости, динамики, статики) для объектов высокой потенциальной опасности.

Анализ прочности, ресурса и безопасности на основе этой диаграммы выполняют с привлечением соответствующих положений сопротивления материалов, теорий упругости, усталости, пластичности, ползучести, линейной и нелинейной механики разрушения, механики катастроф и теории рисков. В соответствии с этим подходом для оборудования техносферы анализируют долговечность конструкций в пределах от 100 с до 80 – 100 лет в условиях температур от -270 до 1000 °С при числах циклов N от 10^0 до $10^9 - 10^{10}$, временном ресурсе τ от 10^{-2} до 10^6 ч, при размерах дефектов l от 10^{-2} до 10^3 мм [9, 17]. Для сооружений и оборудования энергетических и нефтегазовых установок время эксплуатации достигает 20 – 50 лет, а температура находится в пределах от -170 °С (в установках сжижения газа) до $+500 - 800$ °С.

Анализ опасных и предельных состояний проводят при штатных, аварийных и катастрофических ситуациях (проектных, запроектных и гипотетических). Научной основой такого анализа являются сопротивление материалов, теории упругости, усталости, пластичности, ползучести, термоциклической прочности,

линейная и нелинейная механика разрушения, теории катастроф, рисков и безопасности. При этом для штатных ситуаций достаточными оказываются традиционные нормы расчетов и проектирования:

$$\sigma_{\max}^3 \leq [\sigma]. \quad (8)$$

По мере перехода от штатных к аварийным и катастрофическим ситуациям расчеты по допускаемым напряжениям $[\sigma]$ оказываются недостаточно чувствительными к варьируемым параметрам (N, τ, l) в силу развития пластических деформаций и деформаций ползучести. Это обстоятельство требует перехода к расчетам в деформациях

$$\varepsilon_{\max}^3 \leq [\varepsilon]. \quad (9)$$

В процессе эксплуатации объекта во времени τ происходит накопление повреждений по некоторой траектории $d(N, \tau, \sigma)$, определяемой режимами (рис. 6) и историей эксплуатационного нагружения $\sigma^3(\tau) - \varepsilon^3(\tau)$ [8 – 10, 17]. Уровень поврежденности при этом оценивается относительным числом циклов нагружения (усталость) или относительной накопленной пластической деформацией (длительное статическое нагружение, ползучесть). Для обеспечения безопасности конструкций вместо критических повреждений d_k , соответствующих достижению предельных состояний $\sigma_k - \varepsilon_k$, с использованием системы коэффициентов запаса в расчет могут вводиться допустимые повреждения $[d]$:

$$d^3 = F \{ \sigma^3(\tau) - \varepsilon^3(\tau), \sigma_k - \varepsilon_k \} \leq [d]. \quad (10)$$

Уровни предельных d_k и допустимых $[d]$ повреждений разделяют области безопасной эксплуатации, ограниченной безопасностью и опасности (риска). Для расчета безопасного остаточного ресурса необходимо проведение комплекса исследований условий и режимов нагружения, характеристик механических свойств, особенностей напряженно-деформированного и предельного состояний, технологической дефектности и эксплуатационной поврежденности [8 – 10, 17 – 19].

Таким образом, в соответствии с выражениями (1) – (10) и рис. 3 – 6 наиболее значимыми и важными для расчетно-экспериментального обоснования всех базовых параметров работоспособности объектов (см. рис. 3, 4) могут считаться напряженно-деформированные $\sigma^3 - \varepsilon^3$ и предельные $\sigma_k - \varepsilon_k$ состояния — от них зависят такие характеристики, как прочность, ресурс, живучесть и безопасность.

Методы и средства дефектоскопии, диагностики и мониторинга

Традиционные и новые методы контроля, дефектоскопии, диагностики, фрактодиагностики и мониторинга состояний в своем развитии во времени τ по

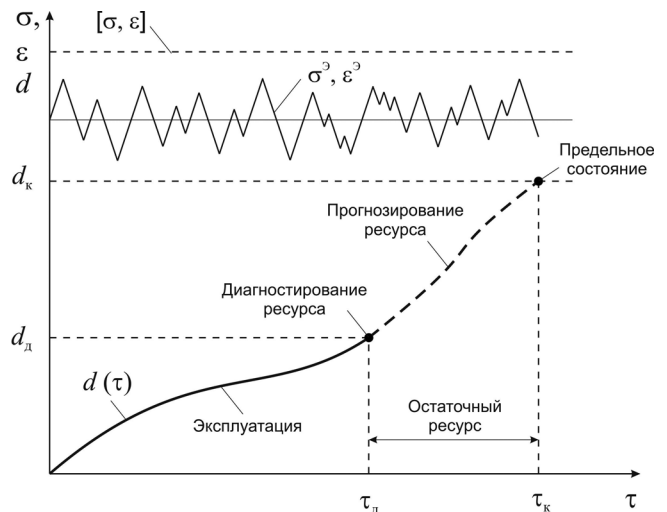


Рис. 6. Схема диагностики и прогнозирования эксплуатационного и безопасного остаточного ресурса

мере решения соответствующих проблем (см. рис. 3) имели как самостоятельные, так и взаимоувязанные цели [3, 4, 8, 12, 18 – 23]. Контроль, дефектоскопия и дефектометрия традиционно ориентировались на выявление и измерение параметров микро- и макродефектов в материалах и конструкциях на всех стадиях жизненного цикла. При контроле геометрических форм, размеров и отклонений от их заданных значений выявляются внешние дефекты.

В дефектоскопии и дефектометрии широко развиты и используются методы и системы, основанные на физических, химических и механических параметрах (ультразвук, рентгенография, акустическая эмиссия, красители, магнитные порошки, голография, термовидение, тензометрия). Образование и развитие дефектов $l(\tau)$ на микро- и макроуровне сказывается на изменении во времени τ напряженно-деформированных состояний $\sigma(\tau) - \varepsilon(\tau)$ (рис. 7).

Если распределенные по объему микродефекты и микроповреждения развиваются, то это приводит к повышению уровня деформаций $\varepsilon(\tau)$ при фиксированных $\sigma(\tau)$. Для области незначительных микродефектов ($l \leq d$, d — размер микроструктурных элементов) при измерениях $\sigma(\tau)$ и $\varepsilon(\tau)$ фиксируется относительно небольшое изменение вида кривой деформирования $\sigma(\tau) - \varepsilon(\tau)$ — уменьшение ее угла наклона (условного модуля упругости E в линейной области деформаций и модуля упрочнения E_T в неупругой области).

При образовании и развитии макродефектов $l(\tau) > d$, сопоставимых с размерами сечений несущих элементов, на кривой деформирования $\sigma - \varepsilon$ резко уменьшаются значения E и E_T и может исчезнуть участок линейного деформирования.

С учетом важности и широкого диапазона изменения параметров E и E_T , а также формы кривой деформирования $\sigma - \varepsilon$ предъявляются высокие требования к методам и средствам технической диаг-

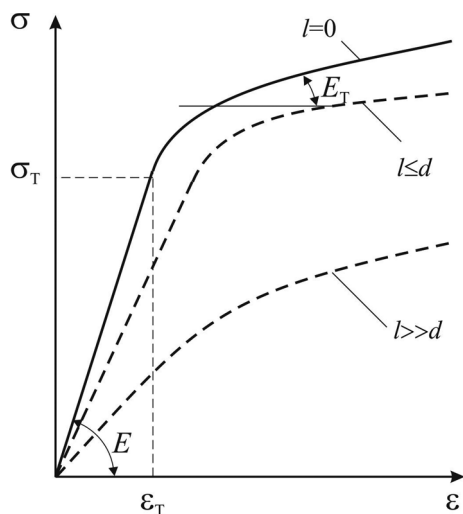


Рис. 7. Изменение формы кривой деформирования при увеличении размеров дефектов

ности, основанной на методах контроля, дефектоскопии и дефектометрии, по разрешающей способности при оценках дефектов $l(\tau)$, деформаций $\varepsilon(\tau)$ и напряжений $\sigma(\tau)$. В целом техническая диагностика в соответствии с выражениями (1) – (6) позволяет получить широкую и многопараметрическую оценку состояний нагруженных и повреждаемых зон несущих элементов, включая временную оценку всех базовых параметров в выражениях (1) – (10): $\sigma(\tau)$, $\varepsilon(\tau)$, $d(\tau)$, $K_1(\tau)$, $t(\tau)$, $N(\tau)$, $\Phi(\tau)$, $l(\tau)$, α_{σ} , $K_{\sigma}(\tau)$, $K_l(\tau)$. Вместе с тем в технической диагностике, являющейся основой для оценки параметров прочности, ресурса, надежности и живучести (см. рис. 3 – 5), ключевой целью остается установление кривых деформирования $\sigma - \varepsilon$ с учетом параметров $N(\tau)$, $\Phi(\tau)$, $t(\tau)$, $l(\tau)$.

В настоящее время разработано и находится в эксплуатации несколько систем мониторинга технического состояния оборудования тепловых и атомных электростанций (ТЭС, АЭС), трубопроводного транспорта (ТТ) и нефтегазохимического комплекса (НГХК). Эти системы являются развитием традиционных для нашей страны дефектоскопии и дефектометрии. Для реализации же более современных форм мониторинга необходимо развивать традиционные и создавать новые системы мониторинга для расчетно-экспериментального прогнозирования остаточного ресурса оборудования на базе комплексных эффективных методов неразрушающего контроля (НК), дефектоскопии, дефектометрии и технической диагностики (ТД). В тех случаях, когда проводится полноценный расчетно-экспериментальный анализ повреждений и разрушений реальных объектов на новые позиции выдвигается фрактодиагностика.

Такие новые требования закладываются в федеральные нормы и правила, в правила безопасности для опасных производственных энергетических, строительных, транспортных объектов, магистральных трубопроводов, сосудов давления. Для наи-

более опасных и критически важных элементов этих объектов должны быть предусмотрены специальные меры безопасности, снижающие риск аварии. При этом к первоочередным и основным мерам отнесено ведение мониторинга технического состояния всех определяющих параметров по выражениям (1) – (10) и рис. 1 – 7 с расчетно-экспериментальной оценкой прочности, ресурса, живучести, надежности и безопасности.

Методология обоснования безопасности, расчетов исходного и остаточного ресурса, надежности и живучести несущих конструкций для ответственного оборудования энергетического, нефтегазохимического, транспортного, строительного комплексов, основанная на оценке напряженно-деформированных состояний по результатам тензотермометрических измерений и на критериях деформирования и разрушения, позволяет с высокой степенью точности осуществлять диагностику и мониторинг технического состояния исследуемого объекта и проводить обоснованное планирование периодичности его контроля, освидетельствования, дефектоскопии и дефектометрии с учетом темпов накопления эксплуатационной повреждаемости. Это приводит к повышению эффективности эксплуатации, продлению срока службы объекта за пределы нормативного и повышению безопасности, как одного из важнейших параметров функционирования оборудования всех отраслей промышленности и технических систем, в целом.

На основе анализа напряжений, деформаций, перемещений от механических усилий, внутреннего давления, скоростного напора, температурных воздействий, а также изменений состояния конструкционных материалов и их дефектности в течение определенного промежутка времени расчетом может определяться израсходованная часть ресурса, остаточный ресурс, живучесть и надежность ответственных элементов машин и конструкций.

Комплексная реализация контроля, дефектоскопии, дефектометрии, технической диагностики, фрактодиагностики и мониторинга элементов ответственного оборудования открывает новые возможности управления ресурсом и безопасностью объектов высокого риска.

ЛИТЕРАТУРА

1. Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2014 г.». — М.: МЧС России. ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2015. — 350 с.
2. Доклад Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору «Об осуществлении государственного контроля (надзора) в 2013 году и об эффективности такого контроля (надзора)». — М.: Ростехнадзор, 2014. — 93 с.

3. **Махутов Н. А., Гаденин М. М.** Техническая диагностика и мониторинг рисков для оборудования ГЭС. Разрушение гидроагрегата № 2 Саяно-Шушенской ГЭС: причины и уроки: Сборник материалов в 3-х томах. Т. 1. — М.: РусГидро, 2013. С. 26 – 35.
4. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Многотомное издание. Научный руководитель чл.-корр. РАН Н. А. Махутов. — М.: МГОФ «Знание», 1998 – 2015. Т. 1 – 49.
5. **Гражданкин А. И., Кара-Мурза С. Г.** Белая книга России. — М.: Научный эксперт, 2015. — 728 с.
6. **Лебедева М. И., Богданов А. В., Колесников Ю. Ю.** Аналитический обзор статистики по опасным событиям на объектах нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности / Интернет-журнал «Технологии техно-сферной безопасности». 2013. № 4(50). URL: <http://academygps.ru/img/UNK/asit/ttb/2013-4/20-04-13.ttb.pdf>
7. Аварийность и травматизм на объектах нефтегазового комплекса. Информационный бюллетень Ростехнадзора. Спецвыпуск. — М.: НТЦ ПБ, 2015. — 110 с.
8. **Махутов Н. А.** Прочность и безопасность: фундаментальные и прикладные исследования. — Новосибирск: Наука, 2008. — 528 с.
9. **Махутов Н. А.** Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. Ч. 1. Критерии прочности и ресурса. — Новосибирск: Наука, 2005. — 493 с.; Ч. 2. Обоснование ресурса и безопасности. — Новосибирск: Наука, 2005. — 610 с.
10. **Гаденин М. М.** Многопараметрический анализ условий безопасной эксплуатации и защищенности машин и конструкций по критериям прочности, ресурса и живучести / Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2012. № 6. С. 50 – 56.
11. **Махутов Н. А., Гаденин М. М.** Научное обоснование промышленной безопасности на основе концепции риска: Федеральный справочник. Национальная безопасность России. Т. 1. — М.: НП «Центр стратегического партнерства», 2014. С. 323 – 332.
12. **Махутов Н. А., Гаденин М. М.** Техногенная безопасность: Диагностика и мониторинг состояния потенциально опасного оборудования и рисков его эксплуатации: Федеральный справочник. Информационно-аналитическое издание. Т. 26. — М.: НП «Центр стратегического партнерства», 2012. С. 307 – 314.
13. **Махутов Н. А., Гаденин М. М.** Комплексные расчетно-экспериментальные методы оценки штатных и предельных состояний высокорисковых объектов / Доклады Сессии Научного совета РАН по автоматизированным системам диагностики и испытаний. — М.: Издательский дом «Спектр», 2014. С. 34 – 57.
14. **Гаденин М. М.** Характеристики механических свойств материалов в анализе условий достижения предельных состояний / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 2. С. 58 – 63.
15. **Махутов Н. А., Гаденин М. М., Чернявский А. О., Шатов М. М.** Анализ рисков отказов при функционировании потенциально опасных объектов / Проблемы анализа риска. 2012. Т. 9. № 3. С. 8 – 21.
16. **Махутов Н. А., Ахметханов Р. С., Гаденин М. М., Юдина О. Н.** Построение общей структуры и алгоритмов комплексного анализа защищенности критически важных объектов / Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2012. № 2. С. 31 – 50.
17. **Гаденин М. М.** Оценка влияния режимов нагружения на условия достижения предельных состояний и назначение запасов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79. № 10. С. 65 – 70.
18. **Махутов Н. А., Гаденин М. М.** Техническая диагностика остаточного ресурса и безопасности: Учебное пособие / Под общ. ред. В. В. Клюева. — М.: Издательский дом «Спектр», 2011. — 187 с.
19. **Махутов Н. А., Гаденин М. М.** Техническая диагностика остаточного ресурса и безопасности промышленных объектов / Доклады сессии Научного совета РАН по автоматизированным системам диагностики и испытаний. — М.: РАН, 2013. С. 3 – 13.
20. **Клюев В. В.** Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник. — М.: Машиностроение, 2003. — 656 с.
21. **Гаденин М. М.** Структура многоуровневого мониторинга параметров безопасности техносферы и окружающей среды / Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2012. № 1. С. 93 – 102.
22. **Махутов Н. А., Гаденин М. М., Таранов Р. А.** Анализ информации комплексного мониторинга для оценки состояния потенциально опасных объектов / Известия РАН. Сер. географическая. 2010. № 6. С. 88 – 95.
23. **Melone G., Mioduskesky P., Rizzi L., Vasanelli L.** Miniaturized thin film temperature sensor for wide range of measurement. *Advances in Sensors and Interface*. IWASI, 2007. 26 – 27 June, Bari, Italy.

REFERENCES

1. Gosudarstvennyi doklad «O sostoyanii zashchity naseleniya i territorii ot chrezvychaynykh situatsii prirodno i tekhnogenno kharaktera v 2014 g.» [The state report “About a condition of the population and territories guard from emergency situations of natural and technogenic character in 2014”]. — Moscow: Izd. MChS Rossii, FGBU VMII GOCHS (FC), 2015. — 350 p. [in Russian].
2. Doklad Federal’noi sluzhby po ékologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru «Ob osushchestvlenii gosudarstvennogo kontrolya (nadzora) v 2013 godu i ob éffektivnosti takogo kontrolya (nadzora) [The report of Federal Agency of ecological, technological and nuclear supervision “About implementation of the state inspection (supervision) in 2013 and about efficiency of such inspection (supervision)”]. — Moscow: Izd. Rostekhnadzor, 2014. — 93 p. [in Russian].
3. **Makhtov N. A., Gadenin M. M.** Tekhnicheskaya diagnostika i monitoring riskov dlya oborudovaniya GÉS. Razrushenie gidroagregata № 2 Sayano-Shushenskoï GÉS: prichiny i uroki: Sbornik materialov [Engineering diagnostics and monitoring of risks for the hydroelectric power plant equipment. Collapse of the hydraulic turbo-alternator No. 2 of the Sayano-Shushenskaya hydroelectric power plant: the reasons and lessons.]. In 3 vols. Vol. 1. — Moscow: Izd. RusHydro, 2013. P. 26 – 35 [in Russian].
4. Bezopasnost’ Rossii. Pravovye, sotsial’no-ékonomicheskie i nauchno-tekhnicheskie aspekty [Safety of Russia. Legal, social and economic, and scientific-technical aspects]. The multivolume edition. The scientific supervisor — the corresponding member of the Russian Academy of Sciences N. A. Mahutov. — Moscow: MFOF “Znanie”, 1998 – 2015, Vols. 1 – 49 [in Russian].
5. **Grazhdankin A. I., Kara-Murza S. G.** Belaya kniga Rossii [The white book of Russia]. — Moscow: Nauchnyi ékspert, 2015. — 728 p. [in Russian].
6. **Lebedev M. I., Bogdanov A. V., Kolesnikov Yu. Yu.** Analiticheskii obzor statistiki po opasnym sobyitiyam na ob’ektakh neftepererabatyvayushchei i neftekhimicheskoi promyshlennosti [The analytical review of statistics about dangerous events on installations for oil refining and petrochemical industry] / Internet-Zh. Tekhnol. Tekhnosfer. Bezopasn. 2013. N 4(50). URL: <http://academygps.ru/img/UNK/asit/ttb/2013-4/20-04-13.ttb.pdf> [in Russian].
7. Avariinost’ i travmatizm na ob’ektakh neftegazovogo kompleksa [Accident rate and traumatism on installations of an oil and gas complex]. The Information Bulletin of the Rostekhnadzor. Special issue. — Moscow: Izd. NTTZ PB, 2015. — 110 p. [in Russian].

8. **Makhutov N. A.** Prochnost' i bezopasnost': fundamental'nye i prikladnye issledovaniya [Strength and safety: fundamental and applied researches]. — Novosibirsk: Nauka, 2008. — 528 p. [in Russian].
9. **Makhutov N. A.** Konstruktsionnaya prochnost', resurs i tekhnogennaya bezopasnost'. Ch. 1. Kriterii prochnosti i resursa [Structural strength, resource and technogenic safety. Part 1. Criteria of strength and resource]. — Novosibirsk: Nauka, 2005. — 493 p. [in Russian]; Ch. 2. Obosnovanie resursa i bezopasnosti [Part 2. Resource and safety justification.]. — Novosibirsk: Nauka, 2005. — 610 p. [in Russian].
10. **Gadenin M. M.** Mnogoparametricheskii analiz uslovii bezopasnoi éksploatatsii i zashchishchennosti mashin i konstruktssii po kriteriyam prochnosti, resursa i zhivuchesti [The multiparameter analysis of conditions for safety service and protectability of machines and structures by criteria of strength, resource, and liveness] / Probl. Bezopasn. Chrezvych. Sit. 2012. N 6. P. 50 – 56 [in Russian].
11. **Makhutov N. A., Gadenin M. M.** Nauchnoe obosnovanie promyshlennoi bezopasnosti na osnove kontseptsii riska: Federal'nyi spravochnik. Natsional'naya bezopasnost' Rossii [Scientific justification of industrial safety on the basis of the risk concept. The federal hand-book. National safety of Russia]. Vol. 1 — Moscow: Izd. NP Tsentra strategicheskogo partnerstva, 2014. P. 323 – 332 [in Russian].
12. **Makhutov N. A., Gadenin M. M.** Tekhnogennaya bezopasnost': Diagnostika i monitoring sostoyaniya potentsial'no opasnogo oborudovaniya i riskov ego éksploatatsii: Federal'nyi spravochnik. Informatsionno-analiticheskoe izdanie [Technogenic safety: Diagnostics and monitoring of potentially dangerous equipment state and risks of its service. The federal hand-book: the information-analytical edition]. Vol. 26. — Moscow: Izd. NP Tsentra strategicheskogo partnerstva, 2012. P. 307 – 314 [in Russian].
13. **Makhutov N. A., Gadenin M. M.** Kompleksnye raschetno-éksperimental'nye metody otsenki shtatnykh i predel'nykh sostoyanii vysokoriskovykh ob'ektov [Complex calculation-experimental methods for estimation of regular and limiting states of high-risk installations] / Reports of Session of Scientific council of the Russian Academy of Sciences on the automatized systems of diagnostics and tests. — Moscow: Spektr, 2014. P. 34 – 57 [in Russian].
14. **Gadenin M. M.** Kharakteristiki mekhanicheskikh svoystv materialov v analize uslovii dostizheniya predel'nykh sostoyanii [Characteristics of the mechanical properties of materials in analysis of achieving limiting state conditions] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2012. Vol. 78. N 2. P. 58 – 63 [in Russian].
15. **Makhutov N. A., Gadenin M. M., Thernjavsky A. O., Shatov M. M.** Analiz riskov otkazov pri funktsionirovani potentsial'no opasnykh ob'ektov [Analysis of faults risks at operation of potentially dangerous installations] / Probl. Analiza Riska. 2012. Vol. 9. N 3. P. 8 – 21 [in Russian].
16. **Makhutov N. A., Akhmetkhanov R. S., Gadenin M. M., Yudina O. N.** Postroenie obshchei struktury i algoritmov kompleksnogo analiza zashchishchennosti kriticheskikh vazhnykh ob'ektov [Build-up of general scheme and algorithms for comprehensive analysis of protectability of crucial important installations] / Probl. Bezopasn. Chrezvych. Sit. 2012. N 2. P. 31 – 50 [in Russian].
17. **Gadenin M. M.** Otsenka vliyaniya rezhimov nagruzeniya na usloviya dostizheniya predel'nykh sostoyanii i naznachenie zapasov [Assessing the Effect of Loading on the Terms of Attaining the Ultimate State of Stocks and the Assignment of the Reserves] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2013. Vol. 79. N 10. P. 65 – 70 [in Russian].
18. **Makhutov N. A., Gadenin M. M.** Tekhnicheskaya diagnostika ostatochnogo resursa i bezopasnosti: Uchebnoe posobie [Engineering diagnostics of the remaining resource and safety: The learning aid] / V. V. Kluev (ed.). — Moscow: Spektr, 2011. — 187 p. [in Russian].
19. **Makhutov N. A., Gadenin M. M.** Tekhnicheskaya diagnostika ostatochnogo resursa i bezopasnosti promyshlennykh ob'ektov [Engineering diagnostics of the remaining resource and safety of Industrial installations] / Reports of Session of Scientific council of the Russian Academy of Sciences on the automatized systems of diagnostics and tests. — Moscow: Izd. RAN, 2012. P. 3 – 13 [in Russian].
20. **Kluev V. V.** Nerazrushayushchii kontrol' i diagnostika: Spravochnik [Nondestructive examination and preliminary diagnostics: handbook]. — Moscow: Mashinostroenie, 2003. — 656 p. [in Russian].
21. **Gadenin M. M.** Struktura mnogourovnevnogo monitoringa parametrov bezopasnosti tekhnosfery i okruzhayushchei sredy [Structure of multilevel monitoring for parameters of technosphere and environment safety] / Probl. Bezopasn. Chrezvych. Sit. 2012. N 1. P. 93 – 102 [in Russian].
22. **Makhutov N. A., Gadenin M. M., Taranov R. A.** Analiz informatsii kompleksnogo monitoringa dlya otsenki sostoyaniya potentsial'no opasnykh ob'ektov [The analysis of integrated monitoring information for a state estimation of potentially dangerous installations] / Izv. RAN. Ser. Geogr. 2010. N 6. P. 88 – 95 [in Russian].
23. **Melone G., Miodushesky P., Rizzi L., Vasanelli L.** Miniaturized thin film temperature sensor for wide range of measurement. Advances in Sensors and Interface. IWASI, 2007. 26 – 27 June, Bari, Italy.