

Научные проблемы определения ресурса и управления сроком безопасной эксплуатации промышленных объектов



Н.А. Махутов,
чл.-кор. РАН, д-р техн. наук,
проф., гл. науч. сотрудник,
kei51@mail.ru

ИМАШ РАН, Москва, Россия



М.М. Гаденин,
канд. техн. наук, вед.
науч. сотрудник



А.С. Печёркин,
д-р техн. наук, проф., первый
зам. ген. директора

ЗАО НТЦ ПБ, Москва, Россия



Б.А. Красных,
канд. техн. наук,
председатель НТС

Ростехнадзор, Москва, Россия

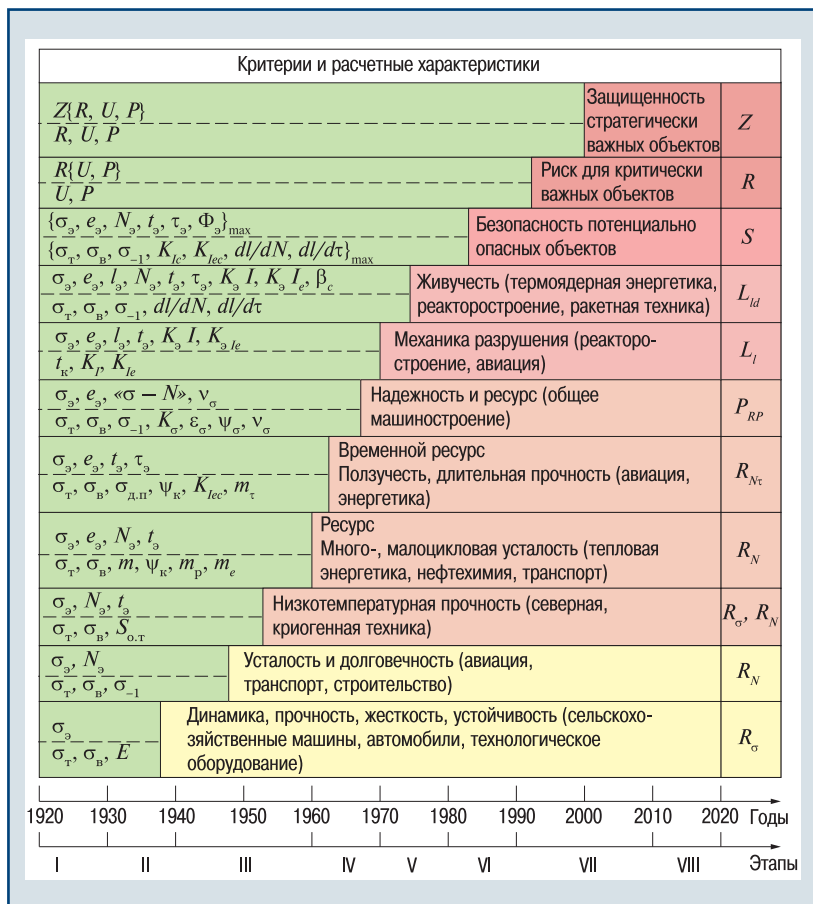
Для анализа условий эксплуатационной нагруженности и управления ресурсом безопасной эксплуатации высокорисковых промышленных объектов требуется углубленное рассмотрение всех стадий их жизненного цикла, включая стадии проектирования, изготовления, эксплуатации и безопасного вывода из эксплуатации на основе данных о расчетном и остаточном ресурсах. Первая и основная задача перехода от традиционных методов расчетов на стадии проектирования к перспективным состоит в том, что при решении проблемы обеспечения условий безопасной эксплуатации промышленного оборудования следует изначально решать задачи обеспечения заданного уровня рисков и уровня его защищенности от возможных аварий и катастроф и требовать применения таких норм расчетов прочности и ресурса, которые обеспечивали бы приемлемый уровень этих изначально заданных параметров защищенности и риска. Для дальнейшего развития методов и систем определения, нормирования и продления ресурса и сроков безопасной эксплуатации принципиальное значение имеет принятие основ государственной политики в области обеспечения промышленной безопасности, которые предполагают постановку новых систематических научных исследований и реализацию соответствующих практических разработок.

Ключевые слова: управление ресурсом, срок безопасной эксплуатации, промышленные объекты, техногенная безопасность, риск, защищенность, прочность, разрушение, напряжения, деформации, долговечность, конструкционные материалы.
DOI: 10.24000/0409-2961-2019-4-7-15

Постановка проблемы

При постановке в России задач обеспечения прочности и ресурса создаваемых машин, инженерных конструкций и промышленных объектов основными направлениями фундаментальных исследований и прикладных разработок являлись теория машин и механизмов, динамика и прочность, трение и износ, промышленные технологии и конструкционные материалы [1–4]. Каждое из этих направлений в предвоенные годы способствовало становлению отечественного автомобилестроения, технологического машиностроения, авиации, станкостроения, строительной индустрии, горнодобывающей техники. В военные годы основное внимание сосредоточено на объектах оборонной промышленности, когда долговечность и надежность техники и промышленного оборудования приобрели первостепенное значение (рис. 1).

В первые послевоенные годы основные усилия направлены на расширение исследовательских, технологических и конструкторских работ в области повышения точности технологических процессов, восстановления энергетического, тяжелого, транспортного машиностроения. Во второй половине XX в. ключевое значение стали приобретать вопросы исследований и развития автоматизации производства, авиационной, ракетно-космической и атомной промышленности с повышением требований к ресурсу, износостойкости, хладостойкости несущих элементов и узлов. При этом разработаны и реализованы государственные программы создания современных авиационных, ракетно-космических и транспортных систем, атомных энергетических реакторов на тепловых нейтронах для стационарных и мобильных энергетических установок, машин и техники северного исполнения. В качестве примеров



▲ Рис. 1. Этапы развития основных направлений фундаментальных и прикладных исследований в области обеспечения прочности и ресурса
 ▲ Fig. 1. Stages of development of the main directions of the basic and applied researches in the field of ensuring strength and service life

можно отметить, что в эти годы проведены исследования и разработаны рекомендации по оценке живучести уникальных турбогенераторов мощностью до 1200 МВт, технологических прессов и испытательных установок с усилиями 8–75 тыс. т, магистральных нефтегазопроводов диаметром до 1200–1400 мм и с давлением 80–100 кг/см². Важное место занимали работы по обеспечению прочности атомных реакторов на тепловых и быстрых нейтронах, термоядерных установок импульсного типа и с магнитным удержанием плазмы.

Наиболее сложными и значимыми были работы по многократным космическим системам («Энергия-Буран»), по ракетным двигателям на водородном топливе. Эти инновационные проекты мирового уровня дали мощный импульс развитию фундаментальных исследований в академических, ведущих отраслевых институтах и прикладных разработок в профильных научно-исследовательских и технологических организациях и конструкторских бюро, а также в системах государственного надзора и военной приемки.

После распада СССР резко сократилась интенсивность промышленного развития в стране, включая практически все отрасли машиностроения. Это

привело к резкому понижению востребованности научных исследований в целом, что, безусловно, сказалось на уровне технологической независимости и национальной безопасности страны.

В последние десятилетия XX в. и в начале XXI в. в принципиально новых условиях государством в соответствующих отраслях, доктринах, концепциях поставлены задачи углубленного развития теории безопасности, рисков и повышения защищенности человека, общества, государства, техносферы и природной среды от аварийных и катастрофических ситуаций, в результате чего начаты соответствующие новые научные исследования в рамках государственных и федеральных целевых программ и проектов. В настоящее время в приоритетном порядке осуществляются соответствующие исследования и разработки новых ядерных энергоустановок для освоения дальнего космоса, техники и технологий освоения российского шельфа, сверхскоростного и тяжеловесного железнодорожного транспорта, оборонной техники новых поколений [5, 6].

Научные основы анализа ресурса и сроков службы технических систем и промышленных объектов

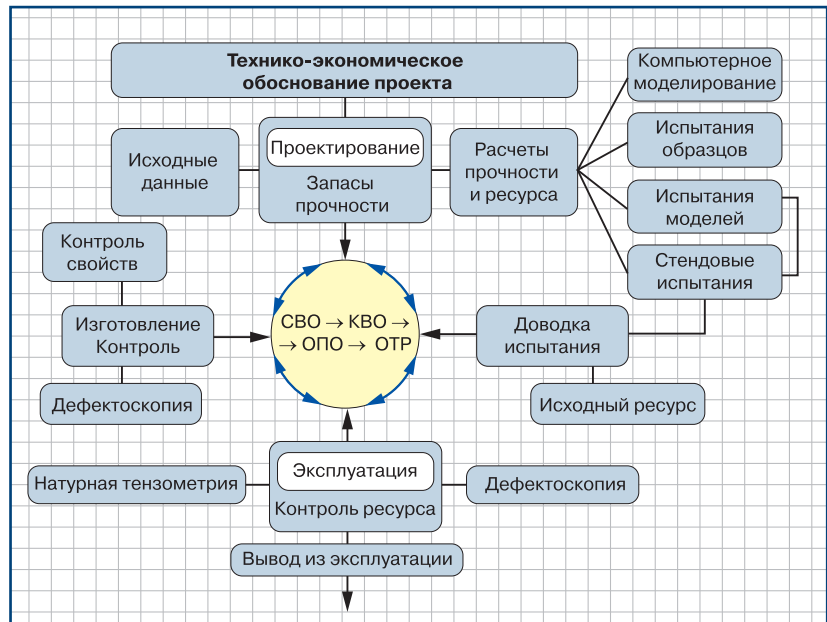
Практически названные выше проблемы решаются на основе реализации комплекса фундаментальных исследований в области управления ресурсом современных высоконагруженных технических систем и промышленных объектов (объекты технического регулирования — ОТР, опасные производственные объекты — ОПО, критически важные объекты — КВО и стратегически важные объекты — СВО) с обеспечением условий их безопасной эксплуатации и защищенности от аварий и катастроф на основе концепции риска [6–9]. Так, применительно к высокорисковым инженерным объектам для анализа условий эксплуатационной нагруженности и управления ресурсом безопасной эксплуатации требуется углубленное рассмотрение с этих позиций всех стадий их жизненного цикла (рис. 2), включая стадии проектирования, изготовления, а также мероприятия по контролю механических свойств материала и его дефектности, испытаний, доводки, эксплуатации и безопасного вывода из эксплуатации на основе данных о расчетном и остаточном ресурсе [7–12].

Это направление научных исследований и разработок основано еще в середине XX в. и в настоящее время имеет прогрессирующее развитие. Решение

проблемы определения состояния высокорискового технического объекта и управления ресурсом его безопасной эксплуатации включает анализ ее базовых составляющих, в число которых в первую очередь входят [5–11] вопросы определения прочности и ресурса, а также оценки на основе полученных данных условий безопасности эксплуатации рассматриваемой конструкции и обеспечения ее защищенности от аварий и катастроф (рис. 3).

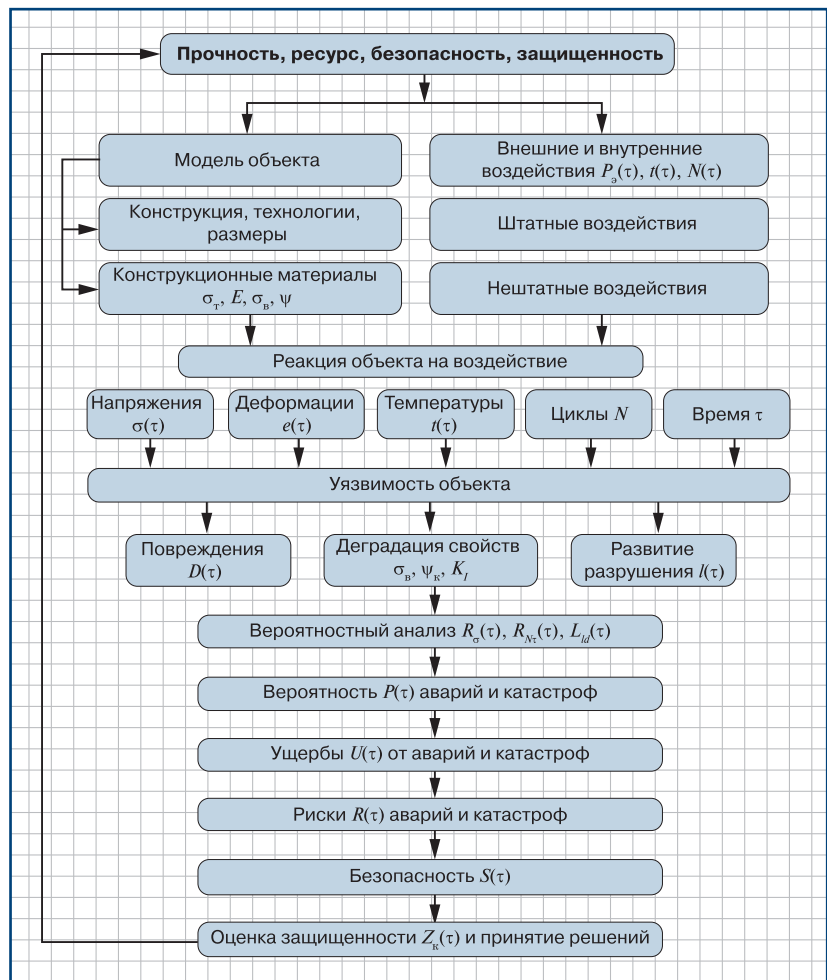
В этом направлении выполняется ряд соответствующих мероприятий, включающих такие этапы, как моделирование исследуемого объекта, разработка его конструкции и технологий изготовления, выбор приемлемых для заданных условий эксплуатации конструкционных материалов с соответствующим набором характеристик механических свойств — пределов текучести σ_t , прочности σ_b и пластичности ψ , модуля упругости E .

В совокупности с названными мероприятиями в таких расчетах для соответствующего времени эксплуатации τ оцениваются и учитываются внешние и внутренние эксплуатационные воздействия на анализируемую конструкцию (нагрузки $\sigma_y(\tau)$, температуры $t_y(\tau)$, циклы $N_y(\tau)$, задаются параметры штатных и возможных нештатных воздействий в процессе эксплуатации и, как результат, определяются интегральные параметры реакций конструкции на комплекс заданных воздействий с учетом ее конструктивных особенностей и свойств материала. В число таких параметров входят локальные и номинальные напряжения $\sigma(\tau)$ и деформации $e(\tau)$ в наиболее нагруженных зонах, значения эксплуатационных температур $t(\tau)$, чисел циклов N и времени t нагружения. По этим параметрам через характеристики поврежденности $D(\tau)$, изменения или деградации механических свойств материала σ_b, ψ_k, K_f , коэффициента интенсивности напряжений K_f , размеров и расположения развивающихся дефектов $l(\tau)$ определяется уязвимость объекта к возникновению чрезвычайных ситуаций путем определения вероятностных характеристик действующих эксплуатационных параметров, включая распределение напряжений,



▲ Рис. 2. Структура анализа стадий жизненного цикла высоконагруженных несущих конструкций промышленных объектов

▲ Fig. 2. The structure of analysis of the service life stages of highly loaded bearing structures of the industrial objects



▲ Рис. 3. Алгоритм анализа прочности, ресурса, безопасности и защищенности высокорисковых технических систем

▲ Fig. 3. Algorithm of analysis of strength, service life, safety and security of high-risk technical systems

спектры циклической нагруженности и развитие повреждаемости.

С учетом перечисленных данных для рассматриваемого объекта могут быть определены вероятности возникновения на нем аварии или катастрофы $P(\tau)$, возможного ущерба от их реализации $U(\tau)$ и, как следствие, параметры риска $R(\tau)$, безопасности $S(\tau)$ и защищенности $Z_k(\tau)$ для принятия решения о возможности его безопасной эксплуатации.

Определяющие закономерности и критерии

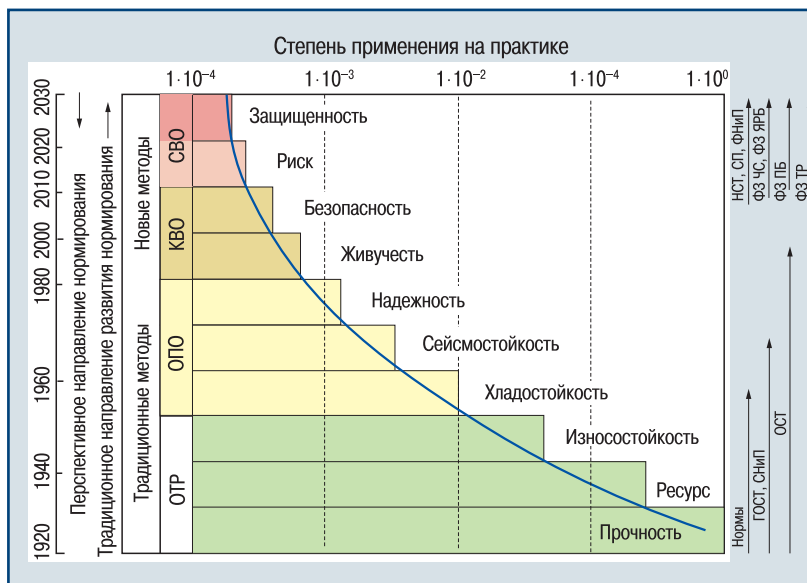
Первая и основная задача перехода от традиционных методов расчетов на стадии проектирования к перспективным состоит в том, что при решении проблемы обеспечения условий безопасной эксплуатации оборудования техносферы следует изначально решать задачи достижения заданного уровня рисков $R(\tau)$ и заданного уровня защищенности $Z(\tau)$ от возможных аварий и катастроф и требовать применения таких норм расчетов и испытаний, которые обеспечивали бы приемлемый уровень этих изначально заданных параметров защищенности и риска

$$Z_k(\tau) = F_z\{R(\tau), S(\tau), L_{id}(\tau), P_{PR}(\tau), R_{Nc}(\tau), R_{\sigma}(\tau), R_{\delta}(\tau), R_{\lambda}(\tau)\}. \quad (1)$$

Эти требования определяют в дальнейшем все другие группы расчетных характеристик: безопасности $S(\tau)$, ресурса $R_{Nc}(\tau)$, надежности $P_{PR}(\tau)$, живучести $L_{id}(\tau)$, прочности $R_{\sigma}(\tau)$, жесткости $R_{\delta}(\tau)$, устойчивости $R_{\lambda}(\tau)$. При этом траектории развития неблагоприятных событий, приводящих к отказам, могут иметь различный вид, характеризуемый ростом во времени τ величин рисков $R(\tau)$.

Если по шкале времени расположить последовательность решения рассматриваемых проблем в области обеспечения безопасной эксплуатации инженерных конструкций (рис. 4), включая прочность, ресурс, износостойкость, хладостойкость, сейсмостойкость, надежность, живучесть, безопасность, риск и защищенность, а также соотнести их с типами объектов — ОТР, ОПО, КВО, СВО [7, 8], то следует отметить, что по мере того, как решаемые проблемы становятся все более сложными, степень научно обоснованного и применяемого на практике нормативного обеспечения существенно сокращается, а решение этих проблем, включая применение наряду с традиционными методами новых, названных выше методов расчетов, становится все более важным.

Комплексный расчетно-экспериментальный анализ ресурса эксплуатируемых и проектируемых объектов и их оборудования базируется, как отмечено



▲ Рис. 4. Структура анализа и нормативного определения ресурса и срока безопасной эксплуатации инженерных объектов

▲ Fig. 4. The structure of the analysis and regulatory definition of the service life and the period of safe operation of the engineering objects

выше, в первую очередь на оценке условий накопления эксплуатационных повреждений, а также на изучении условий перехода его элементов из штатных в предельные состояния с учетом критериев прочности, трещиностойкости и живучести. В этот анализ включаются: расчетно-экспериментальное обоснование статической, длительной и циклической прочности, ресурса и рисков при штатных и нештатных ситуациях; выбор типов предельных состояний, расчетных схем и случаев, расчетных характеристик и методов анализа напряженно-деформированных состояний, методов диагностики технического состояния, назначения запасов по прочности и долговечности, изучение вероятностей достижения предельных состояний; оценка рисков аварий и катастроф [7–19]. Перечисленные процедуры реализуются с использованием комплекса критериальных выражений, расчетных уравнений и расчетных характеристик, применяемых для анализа и определения штатных и предельных состояний инженерных объектов при различных режимах их эксплуатации. В комплекс критериальных входят следующие выражения.

Для оценки статической и длительной прочности

$$F_Q = \{ \sigma, e, t, \tau \} = F_Q \left\{ f_1 \left(\frac{\sigma_{\tau T}}{n_T}, \frac{\sigma_{\tau B}}{n_B}, \frac{\sigma_{\tau д.п.}}{n_{\sigma}}, \frac{e_{\tau K}}{n_e}, \frac{\tau_K}{n_{\tau}} \right), f_2(m) \right\}, \quad (2)$$

где F_Q — функционал, характеризующий зависимость напряжений от совокупности силовых воздействий Q ; σ, e — действующие во времени τ при температуре t напряжения и деформации; f_1 — функциональная зависимость, включающая: $\sigma_{\tau T}$, $\sigma_{\tau B}$ и $\sigma_{\tau д.п.}$ — пределы

соответственно текучести, прочности и длительной прочности материала для времени деформирования τ соответственно, e_{τ_k}, τ_k — значения критических (при разрушении) величин деформации и времени; $n_\tau, n_b, n_\sigma, n_e, n_t$ — коэффициенты запаса (запасы) по пределам текучести и прочности, по напряжениям, деформациям и времени; $f_2(m)$ — функциональная зависимость показателя упрочнения m в упругопластической области деформирования (в большинстве случаев — степенная).

Для оценки ресурса по параметрам числа N циклов и времени τ

$$F_T \{ \sigma, e, N, \tau \} = \left\{ f_1 \left(\frac{\sigma_a}{n_\sigma}, \frac{e_a}{n_e}, \frac{N_p}{n_N} \right), f_2 \left(\sigma_\tau, \psi_\kappa, m_p, m_e \right) \right\}, \quad (3)$$

где F_T — функционал, характеризующий зависимость ресурса от амплитуд напряжений σ_a , деформаций e_a , разрушающего числа циклов N_p и соответствующих им запасов, а также располагаемой пластичности материала ψ_κ (относительного поперечного сужения) и показателей степени в уравнении кривой усталости для пластической m_p и упругой m_e составляющих циклической деформации e_a .

Для оценки трещиностойкости

$$F_K \{ \sigma, e, K_I, K_{Ic}, \tau, t \} = F_K \left\{ \frac{\sigma}{n_\sigma}, \frac{e}{n_e}, \frac{K_{Ic}}{n_K}, \frac{K_{Iec}}{n_{Ke}}, \frac{\tau_k}{n_\tau}, \frac{t_k}{n_t} \right\}, \quad (4)$$

где F_K — функционал, характеризующий зависимость коэффициентов интенсивности напряжений F_I и деформаций F_{Ie} от величин их критических значений F_{Ic} и F_{Iec} , уровней напряжений σ , деформаций e , критического времени до разрушения τ_k и критической температуры t_k с соответствующими запасами.

Для оценки живучести

$$F_{L_{ld}} \{ \sigma, e, l, N, \tau, K_I, K_{Ic} \} = F_{L_{ld}} \left\{ (\Delta K_I, \Delta K_{Ic}), \left(\frac{dI}{dN}, \frac{dI}{d\tau} \right) \right\}, \quad (5)$$

где $F_{L_{ld}}$ — функционал, характеризующий зависимость параметра живучести от величин действующих напряжений и деформаций, вызывающих повреждение материала d , размеров дефектов (трещин) l , скоростей роста последних по параметрам числа циклов dI/dN и времени $dI/d\tau$, а также величин размахов коэффициентов интенсивности напряжений K_I и деформаций K_{Ic} .

Для оценки риска и безопасности используются обобщенные выражения

$$F_R \{ P(\tau), U(\tau) \} = R(\tau); \quad (6)$$

$$F_S \{ R(\tau), n_R \} = S(\tau) \leq \frac{1}{n_R} R(\tau) = [R(\tau)] = F_M \{ R(\tau), n_R, M(\tau), m_M \}, \quad (7)$$

где F_R — функционалы, характеризующие риск $R(\tau)$ как аналитическую зависимость от вероятности $P(\tau)$ возникновения на объекте чрезвычайной ситуации того или иного типа и возможного ущерба $U(\tau)$ в случае ее реализации; F_S — характеризующая параметр безопасности $S(\tau)$ функциональная зависимость, которая связывает параметры реально имеющего место для анализируемого объекта в эксплуатации риска с заранее определенными критическим $R_k(\tau)$ (предельным) и допускаемым $[R(\tau)]$ (приемлемым) его значениями через коэффициент запаса по риску n_R . При этом уровень безопасности объекта функционально F_M зависит от значений критического риска, запаса по риску, а также от затрат $M(\tau)$ на проведение мероприятий по снижению опасности (риска) объекта и коэффициента эффективности этих затрат m_M .

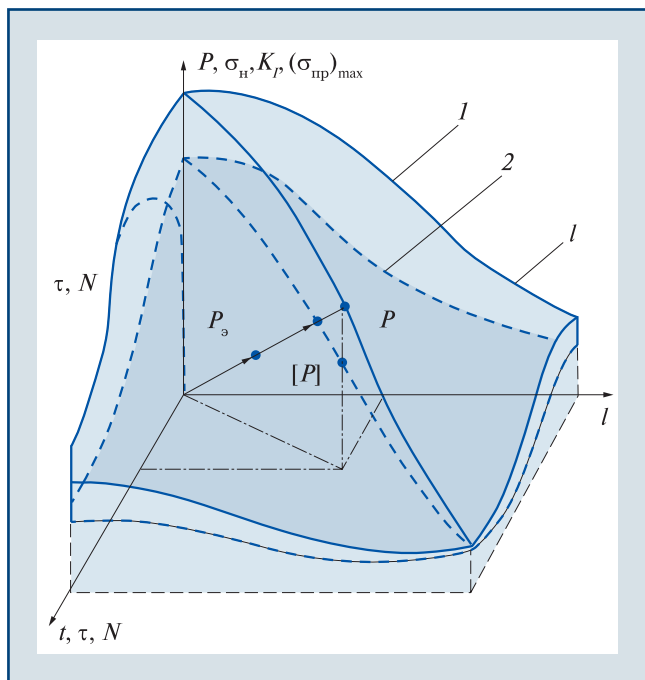
Приведенный комплекс функциональных и критериальных выражений (2)–(7) позволяет реализовать полную последовательность расчета объекта в целях обеспечения его безопасной эксплуатации, начиная от параметров прочности и заканчивая параметрами защищенности с приемлемыми значениями риска как на стадии проектирования, так и на определенных стадиях эксплуатации, в том числе и при принятии решений о продлении ресурса.

В современной трактовке оценка ресурса должна представлять собой не только некую количественную величину по параметрам времени или числа циклов нагружения, но и научно обоснованную гарантию того, что в пределах этого ресурса срок службы не должен превышать установленного ресурса, и при соответствующих запасах по ресурсу эксплуатация анализируемого объекта будет безопасной.

При оценке ресурса по сопротивлению циклическому разрушению подлежат анализу величины циклических напряжений, асимметрии цикла и чисел циклов, концентрация напряжений, циклические свойства материала, эксплуатационные температуры, специальные условия нагружения, остаточные напряжения и деформации. По этим данным определяются расчетные процессы и параметры воздействий, разрушающие напряжения и долговечность. Основой такого определения служат представленные выше соответствующие функционалы, включающие в себя расчетные зависимости (уравнения состояния, кривые деформирования и разрушения, деформационные и силовые критерии). В уточненных расчетах учитываются зоны сварных соединений, пластическое деформирование в наиболее нагруженных зонах, многообразии эксплуатационных воздействий, рассеяние характеристик механических свойств.

В общем случае на основе изложенных положений для анализа условий образования критических

повреждений в анализируемом объекте и его оборудовании могут быть построены пространственные трехмерные поверхности предельных 1 и допускаемых 2 состояний (рис. 5), координатными осями для которых являются:



▲ Рис. 5. Модель представления условий достижения предельных и допускаемых состояний
▲ Fig. 5. The model for representation of conditions for reaching limit and permissible states

ось показателей эксплуатационной нагруженности (усилия Q , номинальные напряжения σ_n , коэффициенты интенсивности напряжений K_p , приведенные локальные максимальные напряжения $(\sigma_{pr})_{max k}$ 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). Предельная нагрузка Q в этом случае является вектором, проходящим через начало координат с углами, соответствующими данному состоянию конструкции (по параметрам $l, t, \tau, N, \sigma_n, K_p, (\sigma_{pr})_{max k}$). 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. 5) к поверхности допускаемых состояний и допускаемой нагрузке $[Q]$. В этом случае прочность, ресурс и живучесть можно считать обеспеченными, если век-

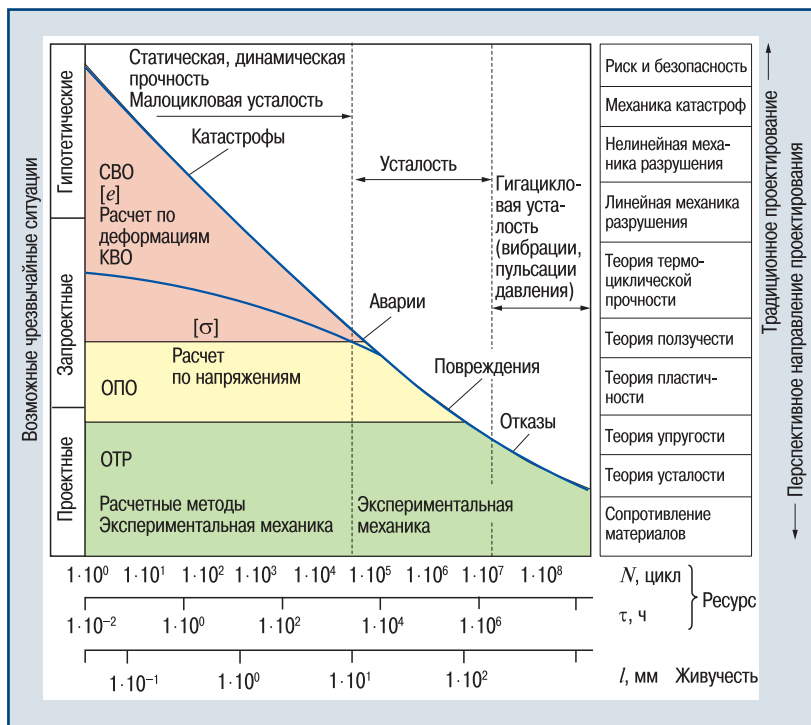
тор эксплуатационной нагрузки для тех или иных конкретных условий Q будет меньше или равен вектору допускаемой для этих условий нагрузки $[Q]$, т.е. $Q_0 \leq [Q]$.

Классические (традиционные) методы расчета прочности и ресурса развивались в предположении бездефектного конструкционного материала ($l = 0$). Современные методы технической диагностики позволили отказаться от этого базового положения с принятием допустимости существования дефектов, не превышающих предельные. В этом случае от предельных и допускаемых поверхностей можно перейти к предельным и допускаемым кривым (в плоскости « $Q, \sigma_n, K_p, (\sigma_{pr})_{max k} - t, \tau, N$ ») — 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 определялись по критериям линейной механики разрушения (статическая трещиностойкость) для плоскости « $Q, \sigma_n, K_p, (\sigma_{pr})_{max k} - l$ ». Для современных расчетов прочности, ресурса и живучести с использованием предельных и допускаемых состояний (см. рис. 5) важно принять единые уравнения состояния, критерии разрушения и комплексы 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.

Представленная на рис. 5 трехмерная модель условий достижения опасных и предельных состояний несущих элементов промышленных объектов позволяет определять эти условия путем анализа положения и величины соответствующего вектора нагруженности в рассматриваемом пространстве относительно допускаемых и предельных поверхностей.

Система выражений (1)–(7) служит основой анализа и назначения ключевых параметров ресурса безопасной эксплуатации промышленных объектов с учетом рисков возникновения чрезвычайных ситуаций и их защищенности. При этом соответствующий расчетно-экспериментальный анализ является базой построения обобщенных диаграмм прочности, ресурса (долговечности), живучести, термостойкости и хладостойкости (рис. 6) с использованием общих уравнений механики деформирования и разрушения (сопротивления материалов, теорий усталости, упругости, пластичности, ползучести, термоциклической прочности, линейной и нелинейной механики разрушения, механики катастроф, риска и безопасности). При этом для большого числа эксплуатируемых промышленных объектов базовые параметры их нагруженности яв-



▲ Рис. 6. Обобщенная диаграмма анализа прочности, ресурса, живучести и безопасности промышленных объектов

▲ Fig. 6. General chart of the analysis of strength, service life, survivability and safety of industrial objects

ляются широко варьируемыми, включая параметры временного (от десятков секунд, например для ракетно-космической техники, до сотен тысяч часов для длительно работающих конструкций, например энергетических ядерных реакторов) и поциклового (от однократного статического нагружения до испытывающих примерно $1 \cdot 10^{12}$ циклов нагружения) ресурсов, влияющими на живучесть дефектности различного уровня.

При относительно небольших уровнях нагруженности (нижняя область под кривой разрушения на рис. 6) для оценки ресурса используются относительно простые уравнения сопротивления материалов, теорий упругости и пластичности, и возникающие в этой области повреждения или отказы имеют, как правило, проектный характер. По мере роста уровней нагруженности в процессе эксплуатации возможно возникновение запроектных аварий, а для экстремально нагруженных элементов наиболее ответственных конструкций подлежат анализу и возможные гипотетические ситуации, способные привести к масштабным катастрофам.

Заключение

Рассмотренные выше подходы к определению ресурса и срока безопасной эксплуатации промышленных объектов и управлению ими иллюстрируют процедуры последовательного анализа условий возникновения отказов, повреждений, аварий и катастроф для проектных, запроектных и гипотетических ситуаций. При этом для объектов категорий ОТР,

ОПО, КВО и СВО при переходе от штатных к гипотетическим катастрофическим ситуациям роль деформационных критериев по сравнению с силовыми, в том числе при использовании нелинейной механики разрушения и механики катастроф, возрастает. Роль деформационных критериев прочности при анализе ресурса высоконагруженных конструкций и управления этим ресурсом применительно как к штатным условиям эксплуатации, так и при выходе за их пределы, становится еще более значимой, так как именно на высоких уровнях нагруженности материал переходит, как правило, в неупругую область деформирования, и нелинейные закономерности этого процесса становятся преобладающими. В особой степени это актуально при выходе эксплуатационных параметров конструкции за пределы штатных режимов.

Для дальнейшего развития методов и систем определения, нормирования и продления ресурса и сроков безопасной эксплуатации принципиальное значение имеет принятие основ

государственной политики в области обеспечения промышленной безопасности [20]. Вытекающие из этого положения задачи научной поддержки реализации этих основ предполагают постановку новых систематических научных исследований и реализацию соответствующих практических разработок [21].

Список литературы

1. *Достижения и задачи машиноведения. К 70-летию академика К.В. Фролова.* — М.: МГФ «Знание», 2006. — 416 с.
2. *Фортвов В.Е., Махутов Н.А.* Машиностроение России: состояние и развитие. — М.: РАН, 2010. — 71 с.
3. *Фортвов В.Е., Махутов Н.А.* Машиностроение России: этапы и приоритеты развития. — М.: РАН, 2016. — 80 с.
4. *Махутов Н.А., Фортвов В.Е.* Машиностроение России: перспективы и риски развития. — М.: Наука, 2017. — 104 с.
5. *Безопасность России.* Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. *Фундаментальные и прикладные проблемы комплексной безопасности.* — М.: МГОФ «Знание», 2017. — 992 с.
6. *Безопасность России.* Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. *Техногенная, технологическая и техносферная безопасность.* — М.: МГОФ «Знание», 2018. — 1016 с.
7. *Махутов Н.А.* Прочность и безопасность. *Фундаментальные и прикладные исследования.* — Новосибирск: Наука, 2008. — 528 с.
8. *Махутов Н.А.* Безопасность и риски: системные исследования и разработки. — Новосибирск: Наука, 2017. — 724 с.

9. *Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Управление ресурсом эксплуатации высокорисковых объектов.* — М.: МГОФ «Знание», 2015. — 600 с.

10. *Проблемы прочности, техногенной безопасности и конструкционного материаловедения/ под ред. Н.А. Махутова, Ю.Г. Матвиенко, А.Н. Романова.* — М.: ЛЕНАНД, 2018. — 720 с.

11. *Махутов Н.А., Гаденин М.М.* Техническая диагностика остаточного ресурса и безопасности. Сер. «Диагностика безопасности». — М.: Издательский дом «Спектр», 2011. — 187 с.

12. *Махутов Н.А., Гаденин М.М.* Техногенная безопасность: диагностика и мониторинг состояния потенциально опасного оборудования и рисков его эксплуатации: федер. справ. — М.: Центр стратегического партнерства, 2012. — Т. 26. — С. 307–314.

13. *Gadenin M.M.* Characteristics of mechanical properties of materials in studies of conditions of attainment of marginal stated// *Inorganic Materials.* — 2013. — Vol. 49. — № 15. — P. 1352–1356.

14. *Махутов Н.А.* Обоснование предельных состояний материалов и конструкций в штатных и нештатных ситуациях// *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* — 2013. — Т. 79. — № 12. — С. 3–5.

15. *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. 22–36.

16. *Makhutov N.A.* Generalized Regularities of Deformation and Destruction Processes// *Herald of the Russian Academy of Sciences.* — 2017. — Vol. 87. — № 3. — P. 217–228.

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.* Научная поддержка риск-ориентированного обоснования промышленной безопасности// *Безопасность труда в промышленности.* — 2015. — № 8. — С. 50–55.

19. *Печёркин А.С.* Обоснование и содержание порядка продления остаточного ресурса// *Безопасность труда в промышленности.* — 2018. — № 8. — С. 24–33. DOI: 10.24000/0409-2961-2018-8-24-33

20. *Об основах государственной политики Российской Федерации в области промышленной безопасности на период до 2025 года и дальнейшую перспективу: Указ Президента Рос. Федерации от 6 мая 2018 г. № 198.* URL: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71836636/> (дата обращения: 29.10.2018).

21. *Научное обеспечение основ государственной политики в области промышленной безопасности/ А.Л. Рыбас, Н.А. Махутов, М.М. Гаденин и др.*// *Безопасность труда в промышленности.* — 2018. — № 11. — С. 7–14. DOI: 10.24000/0409-2961-2018-11-7-14

kei51@mail.ru

Материал поступил в редакцию 3 апреля 2019 г.

«Bezopasnost Truda v Promyshlennosti»/ «Occupational Safety in Industry», 2019, № 4, pp. 7–15.
DOI: 10.24000/0409-2961-2019-4-7-15

Scientific Problems of Service Life Determination and Management of Industrial Objects Safe Operation Life

N.A. Makhutov, RAS Corresponding Member, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Research Associate, kei51@mail.ru

M.M. Gadenin, Cand. Sci. (Eng.), Lead Researcher
IMASH RAN, Moscow, Russia

A.S. Pecherkin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., First Dep. General Dir.
STC «Industrial Safety» CJSC, Moscow, Russia

B.A. Krasnyh, Cand. Sci. (Eng.), Chairman of the Scientific and Technical Council

Rostekhnadzor, Moscow, Russia

Abstract

To analyze the conditions of operational loading and management of safe operation service life for high-risk industrial objects, it is required to perform detailed study of all the stages of their life cycle, including stages of design, fabrication, operation and safe decommissioning based on data related to design and residual operation life. The number of such activities is implemented like modeling of the studied object, development of its design and manufacturing techniques, selection acceptable for the specified operation conditions of structural materials with the corresponding set of mechanical properties characteristics — yield stress, strength and plasticity, elasticity module.

The main objective of transition from conventional methods of calculations at a design stage to perspective one lies in the fact that at solving the problem of ensuring safe operation conditions of industrial equipment, it is required to solve initially the problems of ensuring the set level of risks and the level of its security from possible accidents and disasters. It is necessary to demand the application of such norms of strength and service life calculations, which would provide for acceptable level of these initially set parameters of security and risk.

The considered approaches to the determination of the life and its management and the safe operation life of industrial objects illustrate the procedures of the consecutive analysis of the conditions for occurrence of failures, damages, accidents and disasters for design, beyond design basis and hypothetical situations. At the same time for industrial facilities of various categories upon transition in estimates of the service life from regular to hypothetical catastrophic situations, the role of deformation criteria compared with power ones increases. In particular at the high levels of loading the material passes to, as a rule, into the inelastic area of deformation, and nonlinear regularities of this process become prevailing.

For further development of the methods and systems of definition, standardizing and extension of the service life and the terms of safe operation, the crucial significance is in accepting the basis of state policy in the field of ensuring industrial safety, which assume conducting new systematic scientific researches and implementation of the relevant practical developments.

Key words: service life management, safe operation life, industrial objects, technogenic safety, risk, security, strength, destruction, stresses, deformations, lifetime, structural materials.

References

1. Achievements and tasks of mechanical engineering. To the 70th anniversary of the academician K.V. Frolov. Moscow: MGF «Znanie», 2006. 416 p. (In Russ.).
2. Fortov V.E., Makhutov N.A. Mechanical engineering of Russia: state and development. Moscow: RAN, 2010. 71 p. (In Russ.).
3. Fortov V.E., Makhutov N.A. Mechanical engineering of Russia: stages and priorities of development. Moscow: RAN, 2016. 80 p. (In Russ.).
4. Makhutov N.A., Fortov V.E. Mechanical engineering of Russia: prospects and risks of development. Moscow: Nauka, 2017. 104 p. (In Russ.).
5. Safety of Russia. Legal, social-economic, and scientific and technical aspects. Basic and applied problems of the integrated safety and security. Moscow: MGOF «Znanie», 2017. 992 p. (In Russ.).
6. Security of Russia. Legal, socio-economic, and scientific and technical aspects. Technogenic, technological and technospheric safety. Moscow: MGOF «Znanie», 2018. 1016 p. (In Russ.).
7. Makhutov N.A. Reliability and safety. Basic and applied researches. Novosibirsk: Nauka, 2008. 528 p. (In Russ.).
8. Makhutov N.A. Safety and risks: system researches and development. Novosibirsk: Nauka, 2017. 724 p. (In Russ.).
9. Security of Russia. Legal, socio-economic, and scientific and technical aspects. Management of the service life of high-risk objects operation. Moscow: MGOF «Znanie», 2015. 600 p. (In Russ.).
10. Makhutov N.A., Matvienko Yu.G., Romanov A.N. Problems of strength, technogenic safety and structural materials science and engineering. Moscow: LENAND, 2018. 720 p. (In Russ.).
11. Makhutov N.A., Gadenin M.M. Technical diagnostics of the residual life and safety. Series. «Safety diagnostics». Moscow: Izdatelskiy dom «Spektr», 2011. 187 p. (In Russ.).
12. Makhutov N.A., Gadenin M.M. Technogenic safety: diagnostics and monitoring of the state of potentially hazardous equipment and risks of its operation: federal reference book. Moscow: Tsentr strategicheskogo partnerstva, 2012. Vol. 26. pp. 307–314. (In Russ.).
13. Gadenin M.M. Characteristics of mechanical properties of materials in studies of conditions of attainment of marginal stated. Inorganic Materials. 2013. Vol. 49. № 15. pp. 1352–1356.
14. Makhutov N.A. Substantiation of limit conditions of the materials and structures in regular and emergency situations. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Plant laboratory. Diagnostics of materials*. 2013. Vol. 79. № 12. pp. 3–5. (In Russ.).
15. Gadenin M.M. Multiparameter analysis of conditions of safe operation and integrity of cars and structures by criteria of strength, service life and survivability. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy = Problems of safety and emergency situations*. 2012. № 6. pp. 22–36. (In Russ.).
16. Makhutov N.A. Generalized Regularities of Deformation and Destruction Processes. Herald of the Russian Academy of Sciences. 2017. Vol. 87. № 3. pp. 217–228.
17. Gadenin M.M. Assessment of the influence of loading modes on the conditions of limit states reaching, and the purpose of stocks. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Plant laboratory. Diagnostics of materials*. 2013. Vol. 79. № 10. pp. 65–70. (In Russ.).
18. Makhutov N.A., Gadenin M.M. Scientific Support for Risk-Oriented Substantiation of Industrial Safety. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2015. № 8. pp. 50–55. (In Russ.).
19. Pecherkin A.S. Substantiation and Content of the Procedure for Residual Life Extension. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2018. № 8. pp. 24–33. (In Russ.). DOI: 10.24000/0409-2961-2018-8-24-33
20. On basic principles of the state policy of the Russian Federation in the field of industrial safety for the period up to 2025 and further perspective: Decree of the President of the Russian Federation of May 6, 2018 № 198. Available at: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71836636/> (accessed: October 29, 2018). (In Russ.).
21. Rybas A.L., Makhutov N.A., Gadenin M.M., Pecherkin A.S., Nadein V.A. Scientific Support of the State Policy Fundamentals in the Field of Industrial Safety. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2018. № 11. pp. 7–14. (In Russ.). DOI: 10.24000/0409-2961-2018-11-7-14

Received April 3, 2019

По страницам научно-технических журналов апрель 2019 г.

Технологии техносферной безопасности
(научный интернет-журнал)

Клубань В.С., Панасевич Л.Т., Ле Вьет Хай. Безопасная откачка нефти из горящих вертикальных стальных резервуаров. — 2019. — Вып. 1 (83).

Рассмотрены основные причины выбросов нефти из горящих вертикальных стальных резервуаров и предложены мероприятия по их предотвращению. Для предотвращения выбросов горячей нефти и вскипаний при пожаре в резервуаре предлагается производить принудительное интенсивное перемешивание нефти с использованием систем размыва донных отложений.

Полищук Е.Ю., Халепа П.В., Сивенков А.Б. Древесина как элемент конструктивной огнезащиты. — 2019. — Вып. 1 (83).

Приводится краткий анализ работ в области огнезащиты с точки зрения оценки перспектив использования древесины в качестве элемента конструктивной огнезащиты. Показано, что применение древесины в качестве конструктивной защиты позволяет обеспечить качество теплоизоляции защищаемой поверхности не ниже, чем у гипсоволокнистых плит, наиболее широко используемых для этих целей сегодня. При этом антипирирование древесины позволяет не только снизить уровень ее пожарной опасности, но и повысить теплоизоляционные свойства образующегося угольного слоя.