

**МЕЖДУНАРОДНЫЕ И НАЦИОНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ПРОЧНОСТИ, ЦЕЛОСТНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ  
ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**Член-корреспондент РАН Н.А. Махутов,  
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН**

**Доктор техн. наук В.В. Москвичев  
Красноярский филиал ИВТ СО РАН**

**Доктор техн. наук Е.М. Морозов  
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ**

**Доктор техн. наук В.Н. Шлянников  
Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН»**

**Кандидат техн. наук М.М. Гаденин, О.Н. Юдина  
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН**

**Кандидат техн. наук Е.Н. Федорова  
Красноярский филиал ИВТ СО РАН**

*В связи с 30-летием научного информационного сборника «Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций» обобщаются основные направления и результаты фундаментальных научных исследований и практических разработок в нашей стране и за рубежом по трем ключевым проблемам - прочность, целостность и безопасность сложных технических систем. Рассмотрение и решение этих проблем в такой последовательности обуславливалось на практике нарастанием во времени уровней их актуальности, сложности и научной обоснованности. Показано, что исходное применение упрощённых модели и методы расчетов компенсировались повышенными значениями коэффициентов запаса. Переход в расчетах от рассмотрения упругих деформаций к анализу упругопластических для наиболее нагруженных зон несущих элементов поставил необходимость решения проблем целостности и трещиностойкости. Повышение рабочих параметров и сложности конструкций технических систем на современном этапе, а также возрастание ущербов от возникновения техногенных аварий и катастроф на таких системах потребовали перехода к количественному определению уровней безопасности по критериям рисков. В решении указанных проблем ключевое место заняли вопросы анализа напряженно-деформированных состояний и построения расчетных уравнений с оценками параметров предельных состояний по критериям прочности, трещиностойкости, безопасности, защищенности и рисков.*

**Ключевые слова:** фундаментальные исследования, сложные технические системы, прочность, целостность, трещиностойкость, механика разрушения, безопасность, защищенность, риски, чрезвычайные ситуации, аварии, ущербы, напряженно-деформированные состояния, расчетные уравнения, критерии.

THE INTERNATIONAL AND NATIONAL RESEARCHES OF STRENGTH,  
INTEGRITY AND SAFETY OF ENGINEERING SYSTEMS

Corresponding Member of the RAS *N.A. Makhutov*  
The RAS Institute for Machine Sciences

Dr. (Tech.) *V. Moskvichev*,  
Krasnoyarsk Branch Office of Institute of Computational Technologies SB RAS

Dr. (Tech.) *E. Morozov*  
National research nuclear university, Moscow

Dr. (Tech.) *V. Shlyannikov*  
Kazan Scientific Center RAS

Ph.D. (Tech.) *M.M. Gadenin, O.N. Yudina*  
The RAS Institute for Machine Sciences

Ph.D. (Tech.) *E. Fedorova*  
Krasnoyarsk Branch Office of Institute of Computational Technologies SB RAS

*In relation with the 30 anniversary of the «Problems of safety and emergency situations» journal are summarized the basic problems and results of fundamental scientific researches and practical developments in our country and abroad in three key directions - strength, integrity and safety of the complex engineering systems. The analysis and the solution of these problems in such sequence it was stipulated in practice by growth in the time of levels of their actuality, complexity and scientific justification. It is showed that initial use of simplified models and methods of computations were compensated by heightened values of margins. Transition in computations from consideration of elastic strains to the analysis of elastic-plastic strains for the most loaded zones of bearing elements has delivered necessity of the solution of problems of integrity and crack resistance. Improving of service parameters and complexity of engineering systems structures at the present stage, and also increment of losses from occurrence of technogenic accidents and disasters on such systems have demanded transition to the quantitative determination of levels of safety by criteria of risks. At the solution of the indicated problems the key place was occupied with problems of the analysis of stress-strain states and build-up of the computational equations with estimations of limiting states parameters by criteria of strength, crack resistance, safety, protectability and risks.*

**Keywords:** fundamental researches, complex engineering systems, strength, integrity, crack resistance, the fracture mechanics, safety, protectability, risks, emergency situations, accidents, losses, stress-strain states, computational equations, criteria.

## 1. Введение

В связи с 30-летием научного информационного сборника «Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций» представляется важным кратко обобщить основные направления и результаты фундаментальных научных исследований и практических разработок в нашей стране и за рубежом по трем ключевым проблемам - прочность, целостность и

безопасность сложных технических систем. Эти вопросы исторически в XX – XXI вв. рассматривались в такой последовательности вследствие повышения их актуальности, сложности и научной обоснованности. На первых этапах их решения использовались наиболее простые, как правило, линейные подходы, методы и уравнения. Несовершенство знаний и упрощённые модели и методы расчетов компенсировались повышенными значениями коэффициентов запаса прочности [1-10]. Переход от упругих к упругопластическим деформациям в наиболее нагруженных зонах несущих элементов, совершенствование методов технической диагностики и мониторинга состояний во второй половине XX в. поставило на повестку дня необходимость анализа целостности и трещиностойкости [11-17]. Непрерывное повышение рабочих параметров и сложности технических систем (в атомной энергетике, ракетно-космическом комплексе, транспортных и технологических объектах и инфраструктуре), а также возрастание ущербов от техногенных аварий и катастроф потребовали перехода к количественному анализу безопасности по критериям рисков [13-20]. Составной и исходной частью этого анализа являлись решения задач прочности и целостности.

В отечественных и международных исследованиях и разработках XX – XXI вв. были получены существенные научные результаты, ставшие основой нормирования, регулирования и обеспечения безопасности. Ведущие академические институты и отраслевые научные организации Российской академии наук, Министерства по чрезвычайным ситуациям, Минобрнауки, Ростехнадзора, Росстандарта, ОАО «РЖД» и др. во взаимодействии с международными научными центрами США, Великобритании, Германии, Франции, Норвегии внесли свой вклад в решение проблем прочности, целостности и безопасности сложных технических систем [19-26].

## 2. Постановка проблем в области конструкционной прочности

Решения классических проблем статической прочности началось в XIX веке. Весь XX и начало XXI в. внесли существенное расширение этих проблем в области циклической, длительной высокотемпературной и низкотемпературной, коррозионной прочности (рис. 1).



Рис. 1. Направления и этапы исследований прочности и её критериальных характеристик

Каждому из направлений в области прочности соответствовали свои критериальные характеристики, определяемые при стандартных или унифицированных испытаниях лабораторных образцов:

- $\sigma_T, \sigma_B$  - пределы текучести и прочности при кратковременном нагружении;
- $\sigma_{aN}, N$  – разрушающие амплитуды напряжений при заданном числе циклов  $N$ ;
- $\sigma_{B\tau}, t$  – предел длительной прочности при заданных времени  $\tau$  и температуре  $t$ ;
- $S_{kt}, t$  – сопротивление отрыву при заданной температуре  $t$ ;
- $\sigma_{BK}, \tau, t, N$  - предел коррозионной прочности в заданной коррозионной среде, при заданных  $\tau, t, N$ .

Эти исследования в XX в. активно проводились в передовых промышленно развитых странах.

На базе научных исследований в XX в. в области механики деформирования и материаловедения сложилось прикладное направление конструкционной прочности, когда действующие максимальные номинальные эксплуатационные напряжения  $\sigma_{\max}^3$  не должны были превышать допускаемые  $[\sigma]$ , устанавливаемые по критериальным величинам по рис. 1 с введением запасов прочности  $n_\sigma$  по напряжениям

$$\sigma_{\max}^3 = \{p^3, F\} \leq [\sigma] = \frac{\sigma_{\text{оп}}}{n_\sigma} \quad (1)$$

где  $p^3$  – эксплуатационные нагрузки (усилия, изгибающие и крутящие моменты);  
 $F$  – характеристики опасного сечения (площади, моменты сопротивления).

При этом в качестве опасных принимались предельные напряжения  $\sigma_T, \sigma_B, \sigma_{aN}, \sigma_{B\tau}, S_{kt}, \sigma_{BK}$ , а запасы прочности  $n_\sigma$  в зависимости от условий нагружения (статического, циклического, высокотемпературного, длительного, низкотемпературного, коррозионного) варьировались в широких пределах ( $1,2 \leq n_\sigma \leq 3,5$ ). Расширение исследований по проблемам конструкционной прочности в XX в. было сопряжено с созданием новых отраслей промышленной деятельности и новых образцов техники (в машиностроении, строительной индустрии, энергетике, металлургии, нефтегазохимии, транспорте). В этих отраслях при реализации базового условия прочности в форме (1) были созданы и использованы свои нормы прочности – с учетом основных факторов эксплуатационного нагружения ( $N, \tau, t$ ). Однако, реальная практика проектирования, строительства и эксплуатации машин и конструкций показывала, что такой традиционный подход недостаточен. Это, в первую очередь, относилось к анализу прочности при непрерывном повышении  $p^3$  и поэтапном снижении  $n_\sigma$ , когда в зонах максимальной нагруженности стали возникать максимальные деформации  $e_{\max}^3$ ; их увеличение с ростом  $p^3$  проходило существенно более интенсивно, чем увеличение  $\sigma_{\max}^3$ .

$$\sigma_{\max}^3 = \sigma_T (e_{\max}^3 / e_T); e_{\max}^3 \leq [e] = \frac{\sigma_{\text{оп}}}{n_e}, \quad (2)$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести;  
 $e_T$  - деформация предела текучести ( $e_T = \sigma_T / E$ ,  $E$ - модуль продольной упругости);  
 $m$  – показатель упрочнения в упругопластической области;

- [ $e$ ] – допускаемая деформация;  
 $e_{оп}$  – опасная (критическая) деформация;  
 $n_e$  – запас по деформациям ( $n_e \geq n_\sigma$ ).

Для конструкционных металлических сплавов  $0,05 \leq m \leq 0,25$ .

В 60 – 70-е годы XX века в рамках национальных и международных программ были начаты фундаментальные и прикладные исследования по проблемам хрупкого разрушения и хладостойкости ответственных конструкций. Их реализация на международном уровне координировалась:

- Международным институтом сварки (International Institute of Welding – IIW) с 1948 г. с участием в последние годы до 60 государств;

- Международным конгрессом по разрушению (International Congress on Fracture – ICF) с 1969 г. с участием в последние годы более 1000 специалистов.

Наша страна (СССР – институты Академии наук и отраслевые институты) стала участником деятельности IIW и ICF, представляя результаты научных разработок и проекты нормативных материалов.

В начале мирного освоения атомной энергетики с 1954 года и особенно после крупнейших аварий на атомных электростанциях (АЭС) в США – Три-Майл-Айленд (ТМА – 1979 г.) и СССР (ЧАЭС – 1986 г. – Чернобыль) было существенно активизировано международное взаимодействие под эгидой периодической международной конференции по конструкционной механике в реакторных технологиях (Structural Mechanics in Reactor Technology – SMIRT). Наша страна (СССР – РФ) в этой деятельности была представлена работами организаций и специалистов в области атомной энергетики (Минсредмаш – Росэнергоатом), энергетики (Минэнергоатом) и фундаментальной науки (АН СССР – РАН).

Параллельно с этим с 1970 – 1980 гг. было организовано проведение совместных исследований по прочности, ресурсу ведущих центров и обществ промышленно развитых стран: США (Американское общество инженеров-механиков – American Society of Mechanical Engineers – ASME, Американское общество испытания материалов – American Society of Material Testing – ASTM); Великобритания (Имперский колледж – Imperial College London – ICL); Германия (Общество Фраунгофера – Fraunhofer-Gesellschaft zur Forschung – FGF); Норвегия (Норвежская академия технологических наук – Norwegian Academy of Technological Sciences – NATS) [24-26]. Обобщение этих исследований и разработок, выполнявшихся при их координации в нашей стране Государственным комитетом по науке и технике (ГКНТ СССР) и Академией наук (АН СССР, РАН) было осуществлено в [13, 14, 18, 19, 23].

### 3. Анализ проблем живучести и целостности конструкций

Анализ разрушений, крупных промышленных аварий, техногенных катастроф со второй половины XX века (в авиации, энергетике, железнодорожном транспорте, горнодобывающей промышленности, в магистральном трубопроводном транспорте) показал [14, 25, 27-32], что традиционное классическое условие прочности [13] не соблюдается. Разрушениям, авариям и катастрофам предшествовало образование и развитие трещин  $\ell$ . Это было связано с тем, что основная гипотеза прочности о мгновенном разрушении сплошного деформируемого тела при достижении в его опасной точке напряжениями  $\sigma_{max}^3$  величины предельного напряжения  $\sigma_{оп}$  не оправдывается. Решения задач теории упругости для тел с трещинами  $\ell$  показывают, что при любом уровне нагрузок и номинальных напряжений  $\sigma_n$  максимальные локальные напряжения  $\sigma_{max} \rightarrow \infty$ , при  $\ell > 0$  и  $\sigma_n > 0$ .

Кроме того, развитие в XXI в. средств дефектоскопии (ультразвуковой, магнитной, акустической, рентгеновской и др.) подтвердило наличие трещиноподобных дефектов не только в процессе эксплуатации, но и в процессе получения исходных конструкционных материалов и изготовления элементов конструкций.

В рамках линейной механики разрушения, ставшей к концу XX в. классической, определяющую роль в возникновении разрушений стали играть не только напряжения  $\sigma_{\max}^3$  по выражению (1), но сочетания номинальных напряжений  $\sigma_n$  и размеров трещин  $\ell$

$$\sigma_{\max}^3 = \{p^3, F, \ell\} = \sigma_n^3 \cdot \sqrt{\pi\ell} \{F, \ell\} = K_I^3 = [K_I] \leq \frac{K_{Ic}}{n_K}, \quad (3)$$

где  $K_I^3, [K_I], K_{Ic}$ - коэффициенты интенсивности напряжений соответственно при эксплуатации, допускаемые и критические.

Выражение (3) является базовым в научных исследованиях и прикладных оценках трещиностойкости (crackresistance) по критериям линейной механики разрушения (FractureMechanics).

Так как образование макротрещин  $\ell$  при изготовлении материалов и изделий и при их эксплуатации может сопровождаться накоплением и развитием микро-, мезо-, макроповреждений  $d^p$  (вакансий, дислокаций, пор, несплошностей), то в качестве обобщенного представления о фактическом поврежденном состоянии конструкций с присутствием в них трещин стали использовать понятие конструкционной целостности или целостности конструкций (StructuralIntegrity).



Рис. 2. Направления и этапы исследований трещиностойкости и целостности и их критериальных характеристик

При возникновении экстремальных эксплуатационных воздействий  $p^3$  в зонах трещин возникают большие пластические деформации  $e_{\max}^3$  по выражению (2), что потребовало перехода от линейной механики разрушения к нелинейной (рис. 2) с новой системой критериальных характеристик – энергетической –  $J_c$ -интеграла, деформационных – раскрытия трещин  $\delta_c$  и коэффициенты интенсивности деформаций  $K_{Ie}$

$$\{J_c, \delta_c, K_{Ie}\} = F\{K_I, \sigma_n^3, m\} \quad (4)$$

Исследования и разработки проблем трещиностойкости и целостности в США, СССР, Англии, Франции, Японии, Германии, Норвегии, Российской Федерации и других странах осуществлялись в рамках своих национальных программ и национальных научных и инженерных обществ (ASME, ASTM, ICL, FGF, NATS и др.).

В СССР и затем в Российской Федерации исследования и разработки велись в академических институтах (АН СССР – РАН) и головных НИИ отраслей. Общую научную координацию этих работ с 1956 г. осуществлял и осуществляет Национальный комитет по теоретической и прикладной механике, входящий в Международный союз теоретической и прикладной механики (IUTAM). Для координации работ в области механики разрушения Госкомитет по науке и технике, Госстандарт и Академия наук образовали специальную Научно-методическую комиссию.

Научно-методическая комиссия по стандартизации в механике разрушения (НМКС МР) Госстандарта СССР с 1976 г. вела разработки научных основ методов и средств определения трещиностойкости конструкционных материалов и сварных соединений и расчетов на трещиностойкость деталей машин и элементов конструкций при статическом, циклическом, динамическом и длительном нагружении. По результатам этих разработок в период 1979 – 1991 гг. участниками комиссии было разработано 18 нормативно-технических документов (научно-методических рекомендаций, руководящих документов) и ряд этих документов был доработан до уровня государственных стандартов (для оценки статической и циклической трещиностойкости).

В период 1995 – 2001 гг. в рамках Государственной научно-технической программы «Безопасность населения и народно-хозяйственных объектов с учетом риска возникновения природных и техногенных аварий и катастроф» (ГНТП «Безопасность») в серии «Механика катастроф» были выпущены два сводных тома этих документов [33, 34]. Работы НМКС были возобновлены в 2016 – 2018 гг. С 1989 по 2019 гг. институтами РАН была выпущена серия монографических и периодических публикаций в области механики разрушения и трещиностойкости [13-16].

Международное сотрудничество по проблемам механики разрушения с 70-х годов XX века осуществлялось по линиям международных конференций, конгрессов, совместных экспериментов и публикаций. Существенное значение при этом имел и перевод в нашей стране серии томов коллективной монографии специалистов США «Прикладные вопросы вязкости разрушения», участие наших ученых в деятельности национальных и международных организаций, IIW, ICF, SMiRT, ASTM, ASME, NATS. В связи с развитием атомной энергетики в государствах-членах Совета Экономической Взаимопомощи (СЭВ) в рамках программ Международного хозяйственного объединения «Интератом-энерго» (МХО ИЭА) было выпущено около 50 нормативно-технических документов по вопросам статической и циклической прочности, долговечности и трещиностойкости, включая унификацию и стандартизацию испытаний и расчетов атомных энергетических установок от ВВЭР-440 до ВВЭР-1000 и РБМК.

Существенное внимание в совместных международных исследованиях СЭВ в последней четверти XX в. было уделено анализу единой критериальной расчетной и экспериментальной базы прочности и трещиностойкости по двум программам:

- 1-35СЭВ (1976 – 1980 гг.) «Разработка и внедрение критериев, новых методик и специального оборудования для оценки материалов и для повышения надежности при их применении в машиностроительных конструкциях»;

- 22-К «Определение и повышение прочности и долговечности элементов машин и конструкций на стадиях проектирования, изготовления и эксплуатации на основе новых исследований материалов и элементов конструкций». Общую координацию этих исследований и разработок в СЭВ выполняла Академия наук (АН СССР).

В цикле международных и национальных фундаментальных и прикладных исследований АН СССР, ГКНТ СССР, Госстандарт СССР, СЭВ, ICF, SMiRT, ASME, IIW по комплексным программам прочности (см. рис. 1), трещиностойкости и целостности (см. рис. 2) были сформированы научно-методические основы:

- определения комплексов расчетных стандартных характеристик механических свойств материалов  $\sigma_T, \sigma_B, \psi_K, S_K, E, \mu, \sigma_{-1}, \sigma_{дп}, m$ ;

- расчетов прочности по критическим напряжениям  $\sigma_K$ , деформациям  $e_K$ , временным  $\tau_K$  и циклическим  $N_K$  долговечностям на стадии накопления повреждений  $d_0$  и возникновения трещин  $l_0$ ;

- расчетов живучести, трещиностойкости и целостности на основе методов линейной и нелинейной механики разрушения по критериям роста трещин при увеличении напряжений ( $d\ell/d\tau, d\ell/dN$ ).

Дополнительно к критериям  $n_\sigma, n_e, n_K$  в выражениях (1) – (3) в теориях механики разрушения и целостности конструкций были введены критерии допустимости дефектов  $[\ell]$  при заданных температуре  $t$ , числе циклов  $N$  и времени эксплуатации  $\tau$

$$\ell^3(t, N, \tau) \leq [\ell] = \frac{\ell_c}{n_\ell}, \quad (5)$$

где  $n_\ell$  - запас по размерам трещин;

$\ell_c$  - критический размер дефекта.

Запасы  $n_\ell$  по своим величинам занимали промежуточное положение  $n_\sigma \leq n_K \leq n_\ell \leq n_e$ .

В нашей стране (СССР – РФ) система этих запасов была вначале сформирована для объектов атомной энергетики, а потом распространена на объекты авиации, тепловой энергетики, нефтегазохимии.

В европейских странах проблема целостности конструкций как предмет научных и прикладных разработок была оформлена созданием в 1978 г. вначале Европейской группой по разрушению (European Group on Fracture – EGF), а затем с середины 1990 гг. – Европейского общества по конструкционной целостности (European Structural Integrity Society – ESIS).

Целью ESIS было накопление и расширение знаний по различным аспектам конструкционной прочности и трещиностойкости для повышения эффективности эксплуатации инженерных сооружений, конструкций и несущих элементов технических систем. Структура ESIS представлена Управляющим комитетом, Национальными комитетами 26 стран-участников и 18 Техническими комитетами.

Россия представлена в ESIS рядом ведущих специалистов РАН, отраслевых НИИ, вузов и в течение 30 лет участвует в Европейских конференциях по механике разрушения (ECF).

Существенным результатом российских и европейских исследователей стало введение в анализ выражений (1) – (5) кинетических (временных ипоцикловых) функций для параметров механики деформирования и разрушения

$$\{\sigma_T, \sigma_B, \sigma_a, \psi_K, K_{Ic}, J_c, \delta_c, K_{Ie}, \ell_c\} = F\{\tau, N\}. \quad (6)$$

Выражение (6) стало научной основой развития методов механических испытаний конструкционных материалов и расчетов прочности, долговечности и целостности сложных технических систем.

17 мая 2017 года в Москве (НИИ Транснефть) состоялось объединенное заседание российских специалистов, представляющих НМКС и Рабочую группу при президенте РАН по анализу риска и проблем безопасности и являющихся членами ESIS. На этом заседании были намечены перспективные направления совместных фундаментальных исследований и прикладных разработок.

#### 4. Комплексные проблемы безопасности сложных технических систем

Названные выше (см. п.п. 2, 3) крупные аварии и катастрофы второй половины XX-начала XXI в. поставили на повестку дня систематические исследования проблем комплексной безопасности. Как отмечалось выше, в нашей стране в 1989 – 1990 гг. Академией наук и Государственным комитетом по науке и технике была подготовлена и в 1991 г. утверждена Советом Министров СССР первая в мире Государственная научно-техническая программа «Безопасность населения и народнохозяйственных объектов с учетом риска возникновения природных и техногенных катастроф» (ГНТП «Безопасность») (рис. 3).

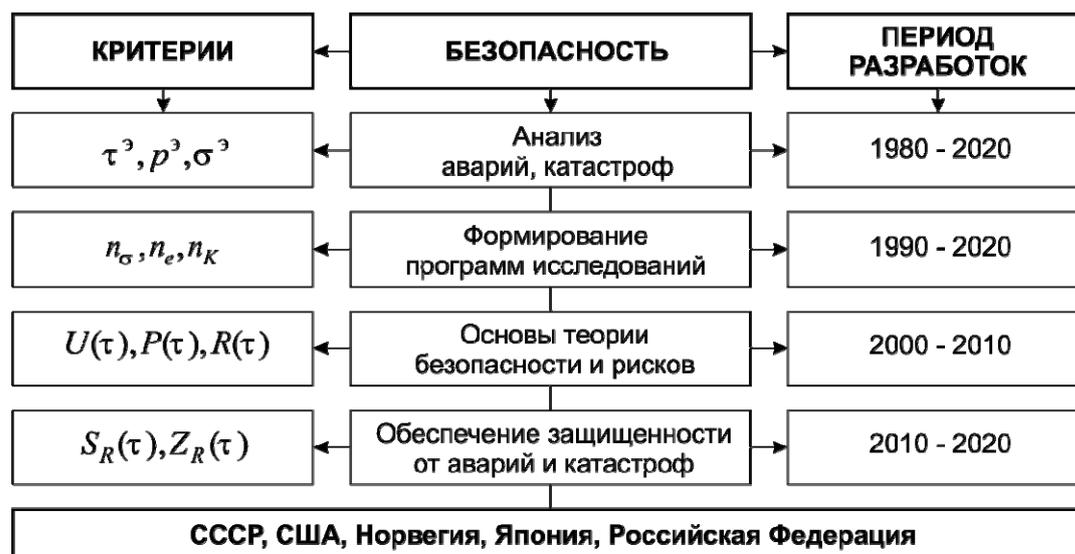


Рис. 3. Направления и этапы исследований и обоснования безопасности

В этой программе были выделены:

- три академических ключевых направления – безопасность технических систем, безопасность природной среды, правовые аспекты безопасности;
- три прикладных направления – безопасность промышленного комплекса, защита населения и территорий от чрезвычайных ситуаций, метрология и стандартизация в сфере безопасности;
- международное взаимодействие в решении проблем безопасности сложных технических систем.

Эта программа разрабатывалась в СССР (1989 – 1991 гг.) и Российской Федерации (1991 – 2002 гг.) с поэтапной её трансформацией в Государственную, а затем (2001 – 2005 гг.) Федеральную научно-техническую программу (ФЦНТП) и Федеральную целевую программу (ФЦП) «Приоритетные направления развития науки и техники».

С 2005 по 2015 гг. основное внимание к проблемам комплексной безопасности было сосредоточено в ФЦП «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера». В этих программах фундаментальные исследования проводились Российской академией наук с учетом результатов разработок по проблемным планам РАН. Прикладные исследования и разработки выполнялись Министерствами по чрезвычайным ситуациям (МЧС), по науке и образованию (Минобрнауки), промышленности и торговли (Минпромторг), энергетики (Минэнерго), транспорта (Минтранс), Ростехнадзора (РТН), Росприроднадзора (РПН), а также государственными корпорациями (Росатом, Роскосмос, Ростех) и акционерными обществами и компаниями (Газпром, Роснефть, РусГидро, Транснефть, РЖД).

В анализ аварийных и катастрофических ситуаций для реальных объектов включались основные расчетные параметры - времена  $\tau^3$ , воздействия  $p^3$ , напряжения  $\sigma^3$ , а также сценарии, источники и причины аварий и катастроф. Большинство из них было связано в конечном счете с возникновением во времени  $\tau^3$  повреждений, отказов, разрушений с последующим переходом сложных технических систем в аварийные и катастрофические состояния.

Научное существо исследований и разработок проблем безопасности сводилось к тому, что все основные расчетные выражения (1) – (6) и их параметры в отечественных исследованиях [14] трактовались в вероятностной постановке. При этом вероятность  $P$  повреждений, отказов, аварий и катастроф на объектах техносферы определялась по функциям распределения:

- эксплуатационных воздействий  $p^3$ , возникающих напряжений  $\sigma_{\max}^3$ , деформаций  $e_{\max}^3$ , коэффициентов интенсивности  $K_{\max}^3$ , размеров дефектов (трещин)  $\ell_{\max}^3$  для соответствующих  $t^3, \tau^3, N^3$ ;

- критериальных величин  $\sigma_{\tau}, \sigma_{\nu}, \sigma_a, \psi_k, K_{Ic}, \ell_c$  для соответствующих  $t_c, \tau_c, N_c$ .

Вероятность  $P(\tau^3)$  возникновения в эксплуатации для заданного времени опасных состояний определяется по указанным функциям распределения. Тогда запасы  $n_{\sigma}, n_e, n_K, n_{\ell}$  в выражениях (1) – (5) становятся связанными с  $P(\tau^3)$

$$\{n_{\sigma}, n_e, n_K, n_{\ell}\} = F_P\{P(\tau^3)\}. \quad (7)$$

Технический риск  $R_{\tau}(\tau^3)$  было предложено определять при  $n=1$  как

$$R_{\tau}(\tau^3) = 1 - P(\tau^3). \quad (8)$$

Такой подход с 1986 г. был использован для объектов атомной энергетики [28].

Величины ущербов  $U(\tau^3)$  оцениваются по таким показателям, как:

- число потерь человеческих жизней и здоровья, число поврежденных, разрушенных объектов, количество деградирующих объектов окружающей природной среды (обычно в 1 год);

- интегральные экономические ущербы для всех анализируемых объектов (социальных, технических, природных).

В первом случае размерность  $R(\tau^3)$  – 1/год, во втором – руб./год.

Обобщенным выражением интегральных рисков будет

$$R(\tau^3) = P(\tau^3) \cdot U(\tau^3). \quad (9)$$

Безопасное функционирование объектов техносферы с учетом рисков  $R(\tau^3)$  можно записать в форме, аналогичной (1) – (3), (5)

$$R(\tau^3) \leq [R(\tau)] = \frac{R_c(\tau)}{n_R}, \quad (10)$$

где  $[R(\tau)]$ ,  $R_c(\tau)$  – соответственно приемлемый и критический (неприемлемый) риск;  
 $n_R$  – запас по рискам ( $1 \leq n_R \leq 10$ ).

Обобщение исследований и разработок по комплексу расчетных методов и критерияльных характеристик, входящих в выражения (1) ÷ (10) проведено в [13, 14].

Международное взаимодействие в области исследований проблем безопасности сложилось в конце XX в. С учетом первых международных программ и планов по вопросам прочности и целостности (см. п.п. 2, 3) в России в 1992 – 1993 гг. на базе ИМАШ РАН был образован Международный институт безопасности сложных технических систем (МИБ СТС). В 1995 – 1997 гг. этим институтом была начата разработка совместных проектов РФ – США (РАН – ASME) в сфере безопасных технологий и технических систем [24]. По этим проектам анализировалось национальное законодательство двух стран, разрабатывались нормы и правила техногенной и природной безопасности, безопасного функционирования энергетических и промышленных объектов, относящихся к компетенции Росатома, Ростехнадзора, а также ASME, ASTM, NRC, DOE. Параллельно с этим на рубеже XX – XXI вв. совместно Россией и Норвегией по линии NTVA и РАН была осуществлена комплексная разработка проблем безопасности объектов морской шельфовой инфраструктуры [25]. Важное значение имело участие РАН и МЧС России в деятельности Европейского центра новых технологий и управления рисками (ЕЦНТУР). В рамках взаимодействия Россия – НАТО в период 2000 - 2010 гг. проводились международные разработки по проблеме «Прогнозирование и предотвращение катастроф» [26].

В 2001 – 2010 гг. МЧС России и другие ведомства приступили к реализации научных исследований и прикладных разработок в рамках программ СНГ по линии Межгосударственного совета по чрезвычайным ситуациям (МГС ЧС). Координацию этих работ осуществляет Научный совет при МГС ЧС [35].

В 2000 – 2010 гг. было организовано взаимодействие РАН, Росатома с Японией (Фонд технологий будущего) в области сейсмостойкости и техногенной безопасности [36].

Принципиальное значение для обеспечения комплексного анализа проблем прочности, уязвимости и безопасности сложных технических систем имело создание в ESIS, в техническом комитете TC12 рабочей группы (РГ2) «Безопасность технических систем» с активным участием и руководством в ней специалистов РАН и Минобрнауки.

С 2015 года Россия (МЧС, РАН) стала участником реализации рамочной Сендайской программы ООН до 2030 года по 5 крупным направлениям, включая исследование и понимание рисков [37].

Перспективы дальнейших национальных и международных разработок в области создания и функционирования новых объектов техносферы, в первую очередь, критически и стратегически важных, связывается с возможностью и необходимостью расчетно-экспериментального обоснования двух базовых параметров - безопасности  $S_R(\tau^3)$  и защищенности  $Z_R(\tau^3)$  от тяжелых аварий и катастроф с экстремально высокими ущербами.

С учетом выражений (9) и (10) безопасность  $S_R(\tau^3)$  и защищенность  $Z_R(\tau^3)$  будут оцениваться по критериям рисков  $R(\tau^3)$  и  $[R(\tau^3)]$

$$S_R(\tau^3) = [R(\tau^3)] - R(\tau^3). \quad (11)$$

$$Z_R(\tau^3) = 1 - R(\tau^3) / [R(\tau^3)]. \quad (12)$$

Выражения (11) и (12) показывают, что безопасность  $S_R(\tau^3)$  и защищенность  $Z_R(\tau^3)$  можно считать обеспеченными, если формирующиеся в процессе эксплуатации  $\tau^3$  риски  $R(\tau^3)$  меньше приемлемых  $[R(\tau^3)]$ . Эти выражения должны стать научной критериальной базой принятых в 2018 году основ государственной политики в области защиты от чрезвычайных ситуаций и обеспечения промышленной безопасности на период до 2030 года [21, 22].

## 5. Заключение

На каждом из этапов развития в XX – XXI вв. науки, техники и технологий общими междисциплинарными, межотраслевыми и международными направлениями обоснования, проектирования, изготовления и эксплуатации объектов и инфраструктуры жизнеобеспечения стали взаимоувязанные проблемы прочности, целостности и безопасности. В решении этих проблем ключевое место заняли вопросы анализа напряженно-деформированных состояний, уравнений и параметров оценки предельных состояний по критериям прочности, трещиностойкости, безопасности и рисков. Научный информационный сборник «Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций» на протяжении 30 лет уделял и уделяет пристальное внимание этим проблемам. Перспективы решения новых задач в сфере анализа и обеспечения безопасности сводятся к количественному определению и повышению защищенности сложных технических систем от тяжелых аварий и катастроф.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 18-08-00572\_a)*

## Литература

1. Griffith A.A. The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. Philosophical Transaction of Royal Society. - 1921, Ser.A., vol. 221, p163-198
2. Weibull W.A. Statistical theory of the strength of material. Proc. Royal Swedish Institute Engineering Research, Stockholm, - 1939, № 151.
3. Freudenthal A.M. Fatigue design and reliability. Techn. Rep. No 2. - 1963
4. Wells A.A. Notched Bar Tests. Fracture Mechanics and Brittle Strength of Welded Structures. British Welding Journal. Vol. 12, N1. - 1965, p.2-3

5. Liebowitz H. Progress in fatigue and fracture: Freudenthal anniversary volume. Vol. 1. Pergamon Press. - 1976 г. 299 p.
6. Paris P.C. and F. Erdogan F. Critical Analysis of Propagation Laws. / J. Basic Eng. Trans. ASME Ser. D55 (1963), pp. 528–534.
7. Coffin L.F. Aspects of high temperature fatigue with particular reference to thermal stresses. - Trans. ASME. - 1956, -V.78, - P.527-532.
8. 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.
9. Писаренко Г.С., Лебедев А.А., Матвеев В.В., Новиков Н.В., Третьяченко Г.Н., Трощенко В.Т. Прочность материалов и элементов конструкций в экстремальных условиях. – Киев: Наукова думка. - 1980. – Т.1.- 536 с.; Т.2.- 771с.
10. Панасюк В.В. Предельное равновесие хрупких тел с трещинами. Киев: Наукова думка. - 1968. – 256 с.
11. Морозов Е.М., Никишков Г.П. Метод конечных элементов в механике разрушения. (Изд. 2-е, испр.). М.: Изд-во URSS. - 2008. 254 с.
12. Шлянников В.Н. Решение задач нелинейного деформирования и разрушения материалов при сложном напряженном состоянии // Физическая мезомеханика. - 2012. Т. 15. № 1. С. 57-67.
13. Махутов Н.А. Прочность и безопасность. Фундаментальные и прикладные исследования. Новосибирск: Наука. - 2008. - 528 с.
14. Махутов Н.А. Безопасность и риски: системные исследования и разработки. Новосибирск: Наука. - 2017. - 724 с.
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. Москвичев В.В., Махутов Н.А., Черняев А.П. и др. Трещиностойкость и механические свойства конструкционных материалов технических систем. - Новосибирск: Наука. - 2002. - 334 с.
17. Федорова Е.Н. Исследование механизмов формирования и механического поведения структурно неоднородных защитных оксидных слоев / Безопасность и мониторинг техногенных и природных систем. Красноярск: Сибирский федеральный университет. - 2018. С. 111-112.
18. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Многотомное издание. Научный руководитель чл.-корр. РАН Н.А.Махутов. Тома 1-56. М.: МГОФ «Знание», 1998-2019.
19. Фундаментальные исследования и прикладные разработки проблем комплексной безопасности. Материалы к 20-летней (1998-2018 гг.) реализации проекта «Многотомная серия «Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты». Информационный бюллетень. Выпуск 5. М.: МГОФ «Знание». - 2018. - 128 с.
20. Гаденин М.М., Москвичев В.В., Неганов Д.А. Научная школа «Безопасность и защищенность критически и стратегически важных объектов техносферы» // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. - 2017. № 4. С. 3-15.
21. Основы государственной политики Российской Федерации в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций на период до 2030 года. Указ Президента Российской Федерации от 11 января 2018 г. № 12.
22. Основы государственной политики в области промышленной безопасности в Российской Федерации на период до 2025 года и на дальнейшую перспективу. Указ Президента Российской Федерации от 06 мая 2018 г. № 198.
23. ГНТП «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.
24. Охрана окружающей среды и инженерная безопасность. Первый американско-российский семинар ASME-РАН. Нью-Йорк – Москва, 4 марта - 6 апреля 1996 г. Материалы докладов и дискуссий. В 2-х томах. Нью-Йорк – Москва: АЙРЕКС. - 1996. Том 1 456 с. Том 2 – 464 с.

25. Safety and Reliability of Complex Technical Systems. Proc. of the Second Russian-Norwegian Seminar. Trondheim, May 25-27, 1994. The Norwegian Academy of Technological Sciences. NTVA-Rapport. - 1994. No 3.
26. Reliability Assessment of Cyclically Loaded Engineering Structures. Proc. of the NATO Advanced Research Workshop on Reliability Assessment of Cyclically Loaded Engineering Structures. June 6-8, 1996. Kluwer Academic Publishers. Dordrech/Boston/London. - 1997. 465 p.
27. Механика малоциклового разрушения/ Махутов Н.А., Бурак М.И., Гаденин М.М. и др. М.: Наука. - 1986. 264 с.
28. Исследования напряжений и прочности ядерных реакторов. Серия в 9 томах/ Н.А. Махутов, В.В. Стекольников, К.В.Фролов и др. Под ред. Н.А. Махутова и М.М. Гаденина. М.: Наука, 1987-2009.
29. Прочность и ресурс ЖРД / Махутов Н.А., Рачук В.С., Гаденин М.М. и др. М.: Наука. - 2011. – 525 с. (Серия «Исследования напряжений и прочности ракетных двигателей»)
30. Напряженно-деформированные состояния ЖРД / Махутов Н.А., Рачук В.С., Гаденин М.М. и др. М.: Наука. - 2013. - 646 с. (Исследования напряжений и прочности ракетных двигателей)
31. Локальные критерии прочности, ресурса и живучести авиационных конструкций / Махутов Н.А., Гаденин М.М., Москвичев В.В. и др. Новосибирск: Наука. - 2017. - 600 с. (Исследования прочности, ресурса и безопасности летательных аппаратов)
32. Ренессанс железных дорог: фундаментальные научные исследования и прорывные инновации / Под ред. Б.М. Лapidуса. Коллективная монография членов и научных партнеров Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». Ногинск: АНАЛИТИКА РОДИС. - 2015. – 252 с.
33. Механика катастроф. Определение характеристик трещиностойкости конструкционных материалов. Методические рекомендации. Под ред. Н.А. Махутова, М.М. Гаденина. Е.М. Морозова, В.Т. Алымова, М.Г. Плотницкой. Москва: ГНТП «Безопасность». - 1995. 359 с.
34. Механика катастроф. Определение характеристик трещиностойкости конструкционных материалов. Методические рекомендации. Под ред. К.В. Фролова. Н.А. Махутова, Е.М. Морозова, М.М. Гаденина В.Т., Алымова. Том 2. М.: ФЦНТП ПП «Безопасность» – Ассоциация КОДАС. - 2001. – 254 с.
35. Нормативно-правовая и методическая база стран СНГ по проблемам чрезвычайных ситуаций. М.: ФЦ ВНИИ ГОЧС. - 2003. 465 с.
36. Российско-японское сотрудничество по проблемам будущего Земли и высоких технологий. Первый международный Форум «Высокие технологии оборонного комплекса». Материалы конференции. 17-21 апреля 2000 г. – М.: ФЦП ПП «Безопасность». - 2000.
37. Сендайская рамочная программа по снижению риска бедствий на 2015-2030 гг. UNISDR. - 2015.- 40 с.

### **Сведения об авторах**

**Махутов Николай Андреевич** – главный научный сотрудник, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН). E-mail: safety@imash.ru. Тел. +7(495)930-80-78

**Москвичев Владимир Викторович** - профессор, Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, Красноярский филиал – Специальное конструкторско-технологическое бюро «Наука» (СКТБ «Наука» ИВТСО РАН), E-mail: krasn@ict.nsc.ru.

**Морозов Евгений Михайлович**, профессор НИЯУ МИФИ, 115409 Москва, Каширское шоссе, 31, evgeny.morozof@gmail.com

*Шлянников Валерий Николаевич*, профессор, руководитель научного направления ФИЦ КазНЦ РАН, 420111, Казань, Лобачевского, 2/31, shlyannikov@mail.ru, Тел. 7(843) 231-90-20

*Гаденин Михаил Матвеевич* – ведущий научный сотрудник, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН). E-mail: safety@imash.ru. Тел. +7(499)135-55-09

*Юдина Ольга Николаевна* – научный сотрудник, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН). E-mail: icts-olga@rambler.ru. Тел. +7(495)624-25-88

*Федорова Елена Николаевна*, с.н.с., Красноярский филиал ИВТ СО РАН, 630090 Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 6, efedorova@sfu-kras.ru, тел +7(391) 226-03-50