

# ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ И РИСКОВ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ РАБОЧЕЙ  
ГРУППЫ ПРИ ПРЕЗИДЕНТЕ  
РАН ПО АНАЛИЗУ РИСКА  
И ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОСТИ  
ЧЛЕН-КОРРЕСПОНДЕНТ РАН

Николай Андреевич  
Махутов



ВЕДУЩИЙ  
НАУЧНЫЙ СОТРУДНИК  
ИНСТИТУТА МАШИНО-  
ВЕДЕНИЯ ИМЕНИ  
А.А. БЛАГОНРАВОВА РАН

Михаил Матвеевич  
Гаденин



В проблемах модернизации экономики страны существенная роль отводится энергоэффективности и энергосбережению на основе модернизации и развития энергетики, энергетического машиностроения и энергоресурсов. В соответствии с этим должна осуществляться взаимоувязанная и научно обоснованная стратегия повышения уровня энергообеспечения жизнедеятельности человека, общества и государства и снижения рисков создания и функционирования действующих и проектируемых объектов современной энергетики<sup>1</sup>.

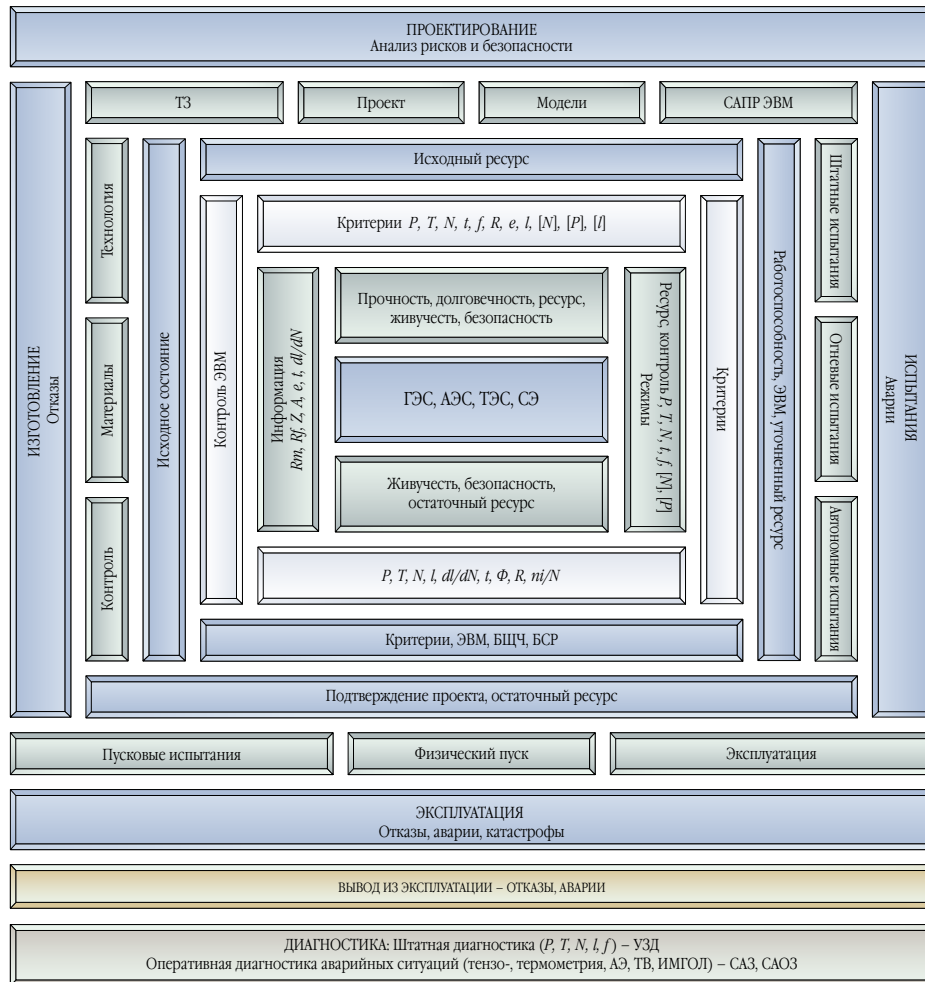
Крупнейшие техногенные катастрофы последних десятилетий на стратегически важных объектах энер-

гетики в нашей стране и за рубежом указывают на исключительную сложность и важность принципиально новых и научно обоснованных подходов к проектированию, созданию, эксплуатации и выводу из эксплуатации этих объектов. Тяжелые катастрофы на объектах атомной энергетики имели место в США (АЭС «Тримайл-Айленд», 1979 год), СССР (Чернобыльская АЭС, 1986 год), Японии (АЭС «Фукусима-1», 2011 год) с повреждениями и расплавлением активной зоны реакторов, взрывами и пожарами, выбросами радиоактивности в окружающую среду и нанесением ущерба жизни и здоровью операторов и населения. Крупнейшей в гидроэнергетике была катастрофа на отечественной Саяно-Шушенской ГЭС (2009 год). Тяжелые аварии имели место на парогенераторах ПГВ-1000, электрогенераторах мощностью 400–1200 МВт на Ленинградской АЭС и Костромской ГРЭС.

Федеральные законы «О промышленной безопасности опасных производственных объектов», «Об использовании атомной энергии», «О безопасности гидротехнических сооружений», «Об электроэнергетике» и «О техническом регулировании» предусматривают вывод на государственный уровень решения проблем безопасности через систему декларирования безопасности и государственных регламентов. Фундаментальные исследования по теории безопасности и рискам и научно-методические вопросы проектирования, строительства и эксплуатации сложных энергетических систем (ядерные реакторы, теплоэнергоустановки, гидротурбины) в пределах срока их службы требуют введения новых критериев оценки исходной и остаточной прочности, ресурса и живучести, которые характеризуют переход этих систем к предельному состоянию, угрожающему объектам, персоналу, населению и окружающей среде, что должно рассматриваться как неприемлемое и недопустимое. При этом одной из важнейших становится проблема циклической прочности несущих

<sup>1</sup> Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. М., 1998–2009. Т. 1–34.

1



БЛОК-СХЕМА АНАЛИЗА ПРОЧНОСТИ, ЖИВУЧЕСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ЭНЕРГООБОРУДОВАНИЯ

элементов рассматриваемого оборудования, в том числе в чрезвычайно широком диапазоне чисел циклов нагружения – от  $10^0$  до  $10^{12}$  и более.

В число базовых проблем обеспечения циклической прочности энергооборудования для всех стадий его жизненного цикла входят три главных:

- расчетно-экспериментальный анализ напряженно-деформированных состояний  $(\sigma, \epsilon)$  с учетом механических  $P^3$ , термических  $Q_t^3$ , аэрогидродинамических  $Q_{ah}^3$ , электромагнитных  $Q_{em}^3$  и сейсмических  $Q_s^3$  воздействий. При этом локальные напряжения  $\sigma_{max}^3$  и деформации  $\epsilon_{max}^3$  зависят от эксплуатационного числа циклов нагружения  $N^3$ , времени  $\tau^3$  и температуры  $t^3$   $\{\sigma_{max}^3, \epsilon_{max}^3\} = F_{\Delta} \{P^3, Q_t^3, Q_{ah}^3, Q_{em}^3, Q_s^3, P_v^3, N^3, \tau^3, t^3\}$  (1);
- анализ закономерностей циклического упругого и упругопластического деформирования для варьируемых частот  $f_t$ , амплитуд напряжений  $\sigma_a^u$  и деформаций  $\epsilon_a^u$ , температур  $t^u$  и времени  $\tau^u$   $\{\sigma_{max}^u, \epsilon_{max}^u\} = F_{\text{ли}} \{f_t, (\sigma_a^u, \epsilon_a^u), t^u, \tau^u\}$  (2);
- анализ критериев и условий накопления повреждений  $d^u$ , а также циклической долговечности  $N_c^u$  для стадий образования и развития трещин

$$\{d^u, N_c^u\} = F_{\text{зи}} \{f_t, (\sigma_a^u, \epsilon_a^u), t^u, \tau^u\} \quad (3).$$

Результаты экспериментальных и расчетных исследований на образцах, моделях и натуральных конструкциях энергооборудования дают возможность определить запасы по напряжениям  $n_{\sigma}$ , деформациям  $n_{\epsilon}$ , числу циклов  $n_N$ , времени  $n_{\tau}$  и размеру трещин  $n_l$

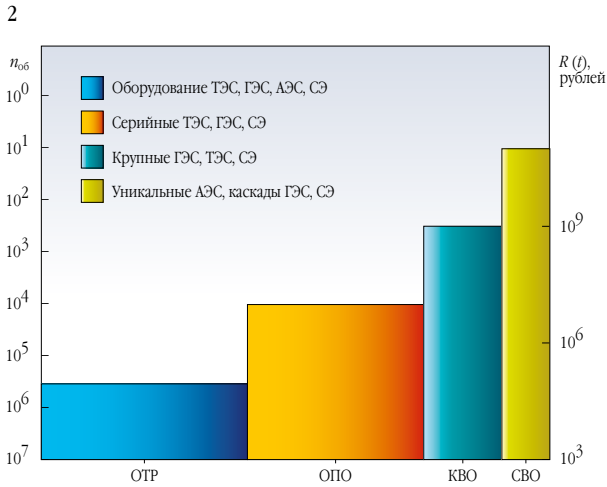
$$\{n_{\sigma}, n_{\epsilon}, n_N, n_{\tau}, n_l\} = \left\{ \frac{\sigma_c}{\sigma_{max}^3}, \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{max}^3}, \frac{N_c}{N^3}, \frac{\tau_c}{\tau^3}, \frac{l_c}{l^3} \right\} \quad (4),$$

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

Основными иницирующими факторами тяжелых катастроф на атомных станциях были опасные сейсмические воздействия  $Q_s^3$  (АЭС «Фукусима», Япония), нерегламентированные тепловые  $Q_t^3$  и механические  $P^3$  воздействия (ЧАЭС, АЭС ТМА), наложенные усталостные повреждения  $d^u$  и запредельные дефекты типа трещин  $l^3$  (СШ ГЭС, КГРЭС, ЛАЭС). Это обуславливало снижение запасов прочности, ресурса, живучести и рост рисков  $R(t)$  за счет техногенных  $R_T(t)$ , природных  $R_S(t)$  и антропогенных  $R_N(t)$  иницирующих и поражающих факторов

$$R(t) = F_R \{R_T(t), R_S(t), R_N(t)\} \quad (5).$$





СТРУКТУРА ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ

Экономические риски  $R(t)$  для национальной экономики и национальной безопасности могут измеряться десятками и сотнями миллиардов рублей, потерями жизней и здоровья, нанесением значительных ущербов окружающей природной среде.

На рисунке 1 показана комплексная блок-схема решения проблем обеспечения прочности и безопасности таких потенциально опасных энергетических объектов, как атомные электростанции (АЭС), тепловые электростанции (ТЭС), гидроэлектростанции (ГЭС), специальные энергоустановки (СЭ). Эти проблемы охватывают все стадии жизненного цикла объектов: проектирование, изготовление, испытания и эксплуатацию. Проектирование включает в себя разработку и согласование технического задания (ТЗ) с введением базовых требований по прочности, ресурсу и безопасности<sup>2</sup>. Сама разработка проекта состоит из ряда стадий (принципиальные схемы, предэскизный, технический и рабочий проекты). На этой стадии с использованием систем автоматизированного проектирования (САПР) разрабатываются физические и математические модели. На стадии проектирования проводится анализ прочности на основании нормативных и дополнительных расчетов и обосновывается исходный ресурс. Основными критериями и характеристиками таких расчетов являются: эксплуатационные нагрузки  $P$ , температуры  $T(t)$ , числа циклов  $N$ , частоты  $f$ , характеристики сопротивления материалов  $R(\sigma_T, \sigma_B, \sigma_{ДП})$ , деформации  $e$ , дефекты  $l$ . В качестве допустимых с использованием соотношений (1)–(4) обосновываются характеристики  $[N]$ ,  $[P]$ ,  $[l]$  с заданными величинами запасов  $n$ . По комплексу расчетных и эксплуатационных исследований составляется заключение о прочности, долговечности, ресурсе, живучести и безопасности рассматриваемых объектов.

На стадии изготовления решаются вопросы выбора, обоснования и развития технологий материа-

лов и контроля. Для изготовленных элементов, систем и объектов в целом устанавливаются исходные состояния: фактические механические свойства и их отклонения от технических требований, уровень реальной дефектности несущих узлов, геометрические формы и их отклонения. Уточненные данные контроля заносятся в паспорта и в банки данных. Все эти характеристики являются исходной информацией о параметрах прочности  $R_m(\sigma_B)$ ,  $R_f(S_{OT})$ , деформативности  $A$  (удлинений),  $Z$  (сужении), деформациях  $e$ , температуре  $t$ , скорости роста трещин  $dl/dN$  (или  $dl/dN\tau$ ). На их основе проводится уточнение проектных характеристик прочности, долговечности, ресурса, живучести и безопасности.

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

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

Для стадии ввода в эксплуатацию осуществляются предпусковые и пусковые испытания (холодная и горячая обкатка), физический пуск (с корректировкой всех систем поддержания эксплуатации) и ввод в эксплуатацию. При этом назначается и уточняется система штатной диагностики основных параметров: нагрузок  $P$ , температур  $T$ , циклов  $N$ , частот  $f$ , дефектов  $l$  (с использованием преимущественно штатных систем ультразвуковой диагностики УЗД). Для объектов высокой потенциальной опасности разрабатываются, создаются и применяются методы и системы оперативной диагностики аварийных ситуаций – с использованием тензо-, термометрии, акустической эмиссии (АЭ), термовидения (ТВ), импульсной голографии (ИМГОЛ). Получаемые при этом данные могут давать исходную информацию для включения систем автоматической защиты (САЗ) и систем автоматической оперативной защиты (САОЗ).

На начальной стадии эксплуатации должна быть получена важнейшая информация по подтверждению или корректировке проектных решений о прочности, долговечности, ресурсе, живучести и безопасности. По мере исчерпания уточненного проектного ресурса проводится оценка остаточного ресурса безопасной эксплуатации. Для согласования всей информации для всех стадий жизненного цикла объекта должны использоваться унифицированные критерии и расчетные программы. При этом данные о ресурсе могут выводиться на блочные щиты управления (БЩУ) и бортовые счетчики ресурса (БСР) –  $n_i/N$ . Применительно к стадии эксплуатации важным научно-техническим и экономическим

<sup>2</sup> Исследование напряжений и прочности ядерных реакторов. Серия монографий из 9 томов

/Под ред. Н.А. Махутова и М.М. Гаденина. М., 1987–2009.



3

2020	VIII	Защищенность	Обеспечение защищенности		$Z_c$
2010	VII	Риск	Прислельные риски отказов, аварий и катастроф		$R$
1990	VI	Безопасность	Управление безопасностью		$S$
1980	V	Живучесть	Трещиностойкость		$L_{Ld}$
1970	IV	Надежность	Отказоустойчивость		$P_{BR}$
1960	III	Ресурс	Долговечность		$R_{N,t}$
1940	II	Жесткость, устойчивость	Сохранение размеров и формы		$R_\delta, R_\lambda$
1920	I	Прочность	Неразрушаемость		$R_\sigma$
Годы	Этапы развития	Базовые требования. Зона обеспеченности	Критерии. Практический результат		Направления развития

ОБЩАЯ СТРУКТУРА ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СТРАТЕГИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ

вопросом становится также вопрос о безопасном выводе объектов из эксплуатации (особенно в случаях накопленных остаточных радиоактивных излучений  $\Phi$ , химических воздействий, рабочих и аварийных воздействий на объекты, персонал и окружающую среду).

Исключительно важное значение как для нашей страны, так и для других промышленно развитых стран имеет достигнутый уровень проектного обоснования безопасности потенциально опасных объектов, в том числе по критериям прочности и ресурса. Из данных о вероятностях и рисках техногенных аварий и катастроф на объектах с исключительно высокой потенциальной опасностью следует, что различие в уровнях требуемых и приемлемых (в национальных и международных рамках) рисков, с одной стороны, и реализованных рисков – с другой, достигает двух и более порядков. Сказанное выше потребовало постановки на национальном и международном уровнях необходимости разработки новых фундаментальных и прикладных научных направлений:

- математической теории катастроф и вероятностной теории рисков;
- физики, химии и механики аварийных ситуаций и катастроф;
- теории предельных состояний, прочности и ресурса с учетом аварийных и катастрофических ситуаций;
- теории жесткой, функциональной и комбинированной аварийной защиты объектов, операторов и персонала;
- теории мониторинга и прогнозирования (с применением космических, воздушных и наземных систем) сценариев и последствий техногенных катастроф;
- научных методов, технологий и техники ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций техногенного характера.

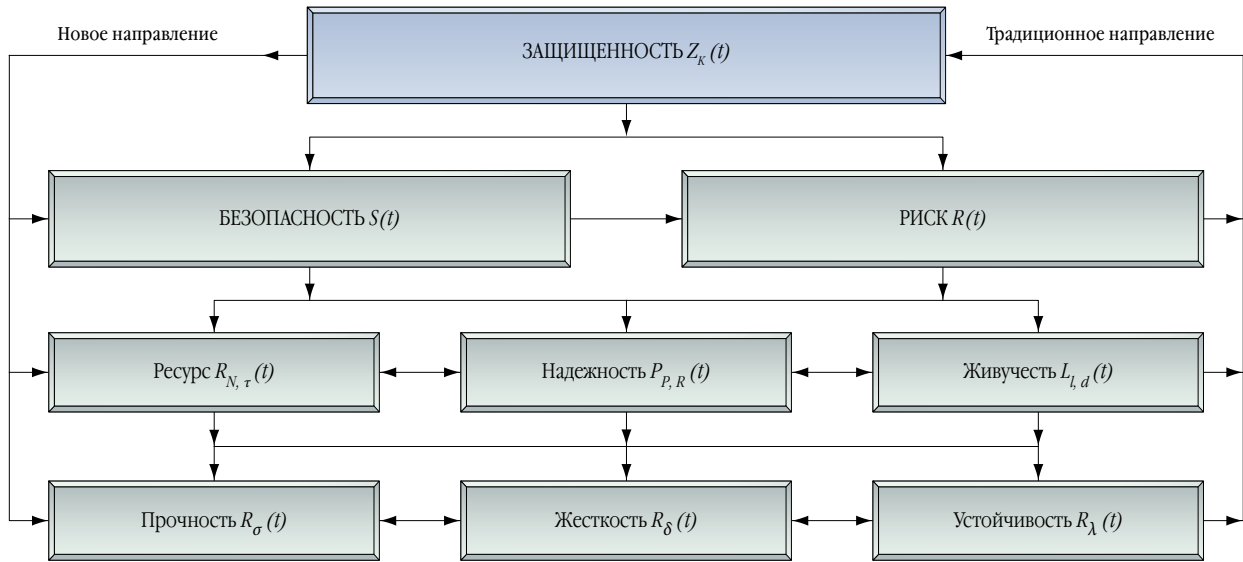
По уровню потенциальной опасности, по требованиям законодательства и Совета Безопасности Российской Федерации и с учетом риска  $R(t)$  возникновения аварий и катастроф объекты техносферы энергетической инфраструктуры могут быть разделены (рис. 2) на четыре основные группы, для которых предусмотрены соответствующие требования к безопасности:

- объекты технического регулирования (ОТР), безопасность эксплуатации которых обеспечивается по закону о техническом регулировании, – их число измеряется миллионами и десятками миллионов;
- опасные производственные объекты (ОПО), безопасность эксплуатации которых обеспечивается по закону о промышленной безопасности, – их число измеряется сотнями тысяч;
- критически важные объекты (КВО), безопасность эксплуатации которых обеспечивается по решению Совета Безопасности Российской Федерации, – их число измеряется тысячами;
- стратегически важные объекты (СВО), безопасность функционирования которых влияет на состояние национальной безопасности страны, – их число измеряется сотнями.

Необходимость введения четвертой категории объектов (СВО) обусловлена анализом самых тяжелых катастроф в нашей стране и за рубежом, к которым относятся катастрофы на атомных электростанциях (Чернобыльская АЭС – СССР; ТМА АЭС – США), на атомных подводных лодках (АПЛ «Комсомолец», «Курск» – СССР, Россия; «Трешер» – США), на железнодорожном транспорте (под Уфой, Арзамасом, Свердловском), на объектах сжиженного природного газа, на уникальных строительных объектах (США). Для нашей страны характерным примером такой тяжелой катастрофы стала крупнейшая авария на Саяно-Шушенской ГЭС 17 августа 2009 года, а для Японии и мира в целом – катастрофа на АЭС «Фукусима-1» 11 марта 2011 года.



4



ТРАДИЦИОННЫЙ И НОВЫЙ АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАЩИЩЕННОСТИ СВО

Система государственного надзора за безопасностью на большом числе СВО, КВО, ОПО и ОТР охватывает широкий спектр технологий, сценариев катастроф, видов повреждений, условий нагружения, методов диагностики и контроля. В настоящее время в наибольшей степени проявляется актуальность анализа рисков тяжелых катастроф для стратегически важных энергетических объектов (СВО), к которым, безусловно, относятся атомные и крупнейшие гидроэлектростанции, каскады ГЭС и их гидросооружения.

Углубленный анализ крупнейших техногенных и природно-техногенных катастроф самых последних лет, особенно разрушений на Саяно-Шушенской ГЭС, показывает недостаточность применяемых научных, инженерных, технологических, нормативных, надзорных и правовых решений в области безопасности и защищенности СВО.

В число решенных в рассматриваемом направлении и решаемых проблем включена и исторически сложившаяся последовательность формирования фундаментальных научных основ, разработки инженерных методов расчетов и испытаний, создания норм и правил проектирования и изготовления объектов техносферы (ОТР, ОПО, КВО, СВО), обеспечения их функционирования в заданных пределах проектных режимов и параметров. Базовыми, поэтапно повышающимися требованиями к штатному (нормальному) функционированию и проектным параметрам функционирования для стратегически важных объектов техносферы на всех стадиях их жизненного цикла в начале XXI века стали «прочность → жесткость → устойчивость → ресурс → надежность → живучесть → безопасность → риск → защищенность».

При этом в самом общем виде приняты следующие определения:

$R_{\sigma}$  – прочность, определяемая сопротивлением разрушению несущих элементов СВО при штатных и аварийных воздействиях;

$R_{\lambda}$  – устойчивость, определяемая сопротивлением потери начальной формы  $\lambda$  несущих элементов СВО при действии штатных или аварийных нагрузок;

$R_{\delta}$  – жесткость, определяемая сопротивлением несущих элементов СВО достижению недопустимых деформаций  $\delta$  при действии штатных или аварийных нагрузок;

$R_{N\tau}$  – ресурс (долговечность), определяемый временем  $\tau$  или числом циклов  $N$  до разрушения или потери устойчивости;

$R_{PR}$  – надежность, определяемая способностью СВО выполнять заданные функции в штатном или поврежденном состоянии при заданных нагрузках  $P$  или ресурсе  $R_{N\tau}$ ;

$L_{ld}$  – живучесть, определяемая способностью СВО выполнять свои функции в ограниченном объеме при недопустимых нормах повреждения  $d$  и размерах дефектов  $l$ ;

$S$  – безопасность, определяемая способностью СВО не переходить в катастрофическое состояние с нанесением значительных ущербов человеку, техносфере и природной среде;

$R$  – риск, определяемый вероятностью возникновения на СВО неблагоприятных ситуаций и ущербами от этих ситуаций в штатных и нештатных условиях;

$Z_c$  – защищенность, определяемая способностью СВО противостоять возникновению и развитию неблагоприятных ситуаций в штатных и нештатных условиях.

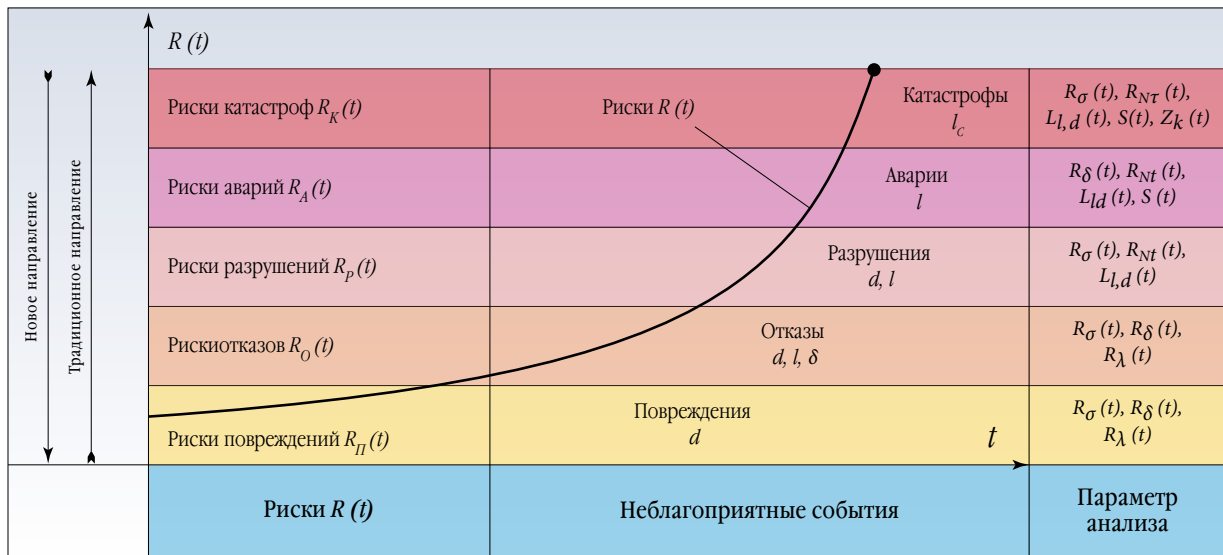
Указанные выше параметры работоспособности являются функциями времени  $t$ . Последний из них  $Z_c(t)$  наиболее важен для СВО.

На основе использования традиционных требований и параметров по рисунку 4 можно построить зоны обеспеченности и необеспеченности работоспособности объектов энергооборудования по различным критериям (рис. 3).





5



АЛГОРИТМ АНАЛИЗА ОПАСНЫХ СОСТОЯНИЙ СВО И СООТВЕТСТВУЮЩИХ РИСКОВ

На представленной диаграмме выделены годы и основные этапы развития (I–VIII), базовые требования, основные практические результаты и направления взаимодействия. Из рисунка 3 видно, что каждый вышераположенный элемент опирается на нижние элементы, как на основу. Это означает, в конечном счете, что решение проблем защищенности, риска и безопасности должно обязательно опираться на решение проблем «живучести → надежности → ресурса → жесткости → устойчивости → прочности» с прохождением через традиционные этапы их взаимодействия «I → VIII».

Фундаментальные результаты определения и обеспечения прочности (этап I) были получены в течение длительного времени к началу XX века, а замкнутый анализ жесткости и устойчивости (этап II) завершился к его середине. Во второй половине XX века сформировались теория и практика обеспечения «ресурса → надежности → живучести» (этапы III, IV, V). В конце прошлого века была поставлена фундаментальная проблема анализа и обеспечения безопасности и риска (этап VI) для всех потенциально опасных объектов гражданского и оборонного назначения с переходом (VII этап) на управление безопасностью по критериям рисков. На этих этапах требование безопасности было сформулировано как определяющее, что потребовало развития нового направления «VII → I» как основного для будущего развития техносферы. В начале этого века (2003 год) Советом Безопасности Российской Федерации была поставлена новая задача (этап VIII) обеспечения защищенности критически и стратегически важных объектов от аварий и катастроф техногенного, природного характера и террористических проявлений. Актуальность такой постановки возросла после катастрофы на Саяно-Шушенской ГЭС в 2009 году. Задача анализа рисков для СВО вытекает из «Основ стратегического планирования в Российской Федерации», утвержденных Указом Президента от 12 мая 2009 года №536.

В соответствии с изложенным и рисунком 3 базовый, характеризующий защищенность СВО функционал, включающий в себя на основе выражений (1)–(5) параметры прочности, ресурса, живучести, безопасности и рисков, может быть представлен в виде

$$Z_c(t) = F_z \{R(t), S(t), L_{ld}(t), P_{PR}(t), R_{Nt}(t), R_\sigma(t)\} \quad (6).$$

Основным направлением анализа и обеспечения защищенности КВО и СВО от неблагоприятных ситуаций с учетом выражения (6) является реализация основных требований к их работоспособности в штатных, аварийных и катастрофических ситуациях (рис. 4).

Новым направлением фундаментальных и прикладных исследований для обеспечения защищенности СВО от неблагоприятных ситуаций является то, которое изначально формирует уровень защищенности  $Z_c(t)$ . Этот уровень определяет все основные группы требований:

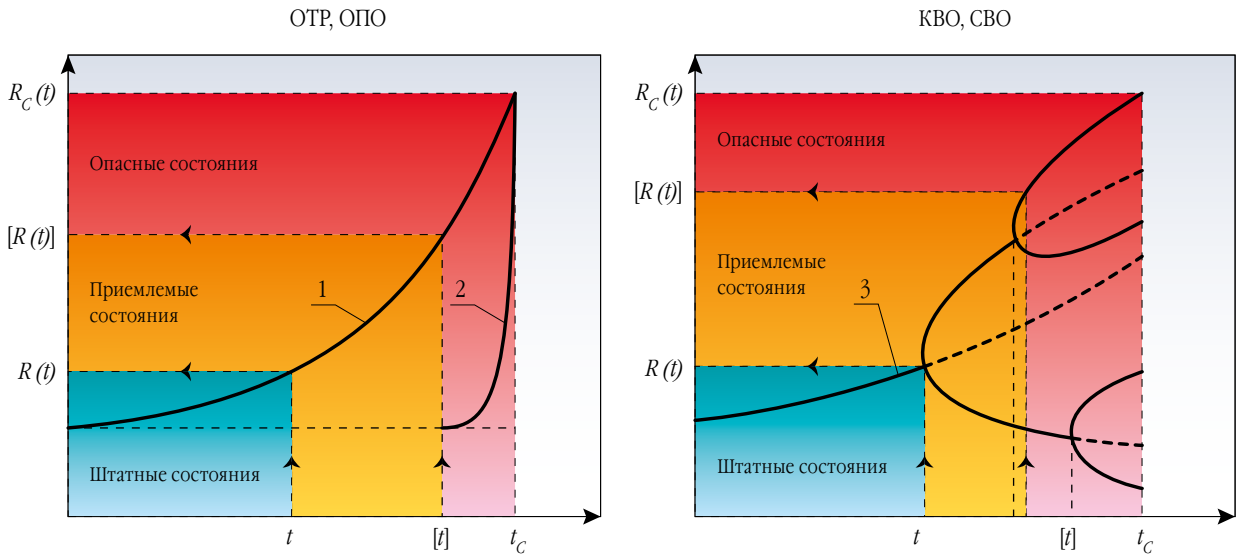
- безопасности  $S(t)$  и рисков  $R(t)$ ;
- ресурса  $R_{Nt}(t)$ , надежности  $P_{PR}(t)$ , живучести  $L_{ld}(t)$ ;
- прочности  $R_\sigma(t)$ , жесткости  $R_\delta(t)$ , устойчивости  $R_\lambda(t)$ .

В рамках традиционного направления изначально обеспечиваются группы требований по цепочке: прочности → жесткости → устойчивости; ресурса → надежности → живучести; безопасности → рисков. Каждому из традиционных «I → VIII» и новых «VIII → I» этапов соответствовал свой практический результат в исследованиях, проектировании, создании и эксплуатации объектов техносферы, включая СВО, «неразрушаемость → сохранение размеров и формы → долговечность → отказоустойчивость → трещиностойкость → безопасность → приемлемые риски → защищенность от отказов, аварий и катастроф». Указанная последовательность неблагоприятных событий, приводящих к катастрофе на СВО, может иметь различный вид (рис. 5), характеризуемый увеличением во времени  $t$  рисков  $R(t)$ .

Наличие потенциальной опасности в СВО не всегда сопровождается ее негативным воздействием на на-



6



ДИАГРАММЫ ИЗМЕНЕНИЯ РИСКОВ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ВОЗДЕЙСТВИЙ СИСТЕМЫ И ИХ РЕАКЦИЙ

иболее важные элементы. Для реализации опасности необходимо выполнение как минимум трех условий: опасность реально действует (присутствует); объект находится в зоне действия опасности; объект не имеет достаточного уровня защищенности  $Z_c(t)$ . В последнем случае должны применяться новые требования, критерии и методы повышения защищенности до заданного уровня.

При построении алгоритма анализа рисков  $R(\tau)$ , неблагоприятных событий и базовых параметров КВО и СВО учитываются следующие положения. Фаза инициирования повреждений, отказов, разрушений, аварий, катастроф и соответствующих им рисков  $R(\tau)$  может представлять собой во времени  $\tau$  как краткосрочный, так и длительный процесс, включающий в себя различные этапы отклонений от заданных режимов эксплуатации, накопления механических повреждений оборудования, отказов, а также нарушения контроля за качеством и состоянием оборудования и персонала КВО и СВО. Первая фаза накопления повреждений  $d$ , отказов и частичных разрушений  $l$  с развитием трещин заканчивается возникновением на КВО и СВО аварийной ситуации, которая может быть связана с начавшимися каскадными разрушениями и необратимыми отклонениями от условий нормальной эксплуатации. Катастрофа на КВО и СВО с образованием критических дефектов  $l_c$  является заключительной стадией развития неблагоприятных ситуаций и характеризуется самыми высокими неприемлемыми рисками  $R(\tau) = R_c(\tau)$ . По такому пути (традиционное направление) шло развитие самой техносферы и методов обеспечения работоспособности всех основных ее объектов.

На базе фундаментальных и прикладных исследований последних трех десятилетий по проблемам безопасности природно-техногенно-социальной сферы поставлена новая задача об определении и обес-

печении комплексной безопасности и защищенности критически важных объектов техносферы по критериям приемлемых и управляемых рисков<sup>3</sup>. При такой постановке задачи только безопасность и защищенность с заданными уровнями рисков дает основание к принятию (или непринятию) решений о допустимости реализации новых проектов или допустимости эксплуатации действующих критически и стратегически важных объектов инфраструктуры.

В общем случае для ОTR, ОПО, КВО и СВО характерны три сценария (разновидности) кинетики рисков  $R(t)$  во времени (рис. 6): 1 – сценарии монотонного возрастания рисков  $R(t)$  до критических значений  $R_c(t)$ ; 2 – сценарии с обострением, характеризующиеся резкими переходами к катастрофическим явлениям (событиям); 3 – сценарии с бифуркационными переходами и возникновением точек неустойчивости и со сложными траекториями изменения рисков. Сценарии 1 относятся к большому (основному) числу ОTR, сценарии 2 – к сложным потенциально опасным ОПО, сценарии 3 – к наиболее опасным, критически (КВО) и стратегически (СВО) важным объектам.

С учетом анализа затронутых выше общих проблем техногенной безопасности, направлений и перспектив развития различных типов энергооборудования и энергосистем в целом, обеспечение должного уровня их прочности и безопасности становится одним из актуальных направлений научно-технологического развития по мере роста их рабочих параметров и повышения потенциальной опасности систем «человек – машина – среда». При этом основными задачами дальнейших работ в этом направлении являются:

- фундаментальные исследования по механике деформирования и по механике катастроф, ле-

<sup>3</sup> Махутов Н.А. Прочность и безопасность. Фундаментальные

и прикладные исследования. Новосибирск, 2008.



жащие в основе создания критериев и методов решения комплексных проблем прочности, ресурса, живучести и безопасности энергооборудования с повышенной потенциальной опасностью техногенных аварийных ситуаций;

– прикладные исследования и разработки инженерных методик, алгоритмов, программ, моделей, стендов, аппаратуры для расчетно-экспериментального обоснования конструкторско-технологических решений при проектировании, создании, эксплуатации и выводе из эксплуатации действующих и принципиально новых высоко-рисковых объектов энергетики с применением комплексных критериев прочности, ресурса, живучести и безопасности.

Таким образом, введение в действие федеральных законов о техническом регулировании ОТР, промышленной безопасности ОПО, безопасности атомной энергетики, гидротехнических сооружений и решений о защищенности КВО и СВО предусматривает повышение роли фундаментальных и прикладных исследований прочности, ресурса, живучести для обеспечения комплексной безопасности. Такая трактовка будет получать свое прикладное отражение как в технических регламентах, так и в национальных стандартах и стандартах организаций. Из сказанного следует, что разработка алгоритмов анализа защищенности  $Z_k(\tau)$  СВО является важнейшим элементом комплексных научных исследований безопасности  $S(\tau)$  и рисков  $R(\tau)$ . Принятие решений об уровне защищенности СВО должно осуществляться по критериям приемлемых рисков  $[R(\tau)]$ . Уровни формирующихся  $R(\tau)$  и приемлемых  $[R(\tau)]$  рисков, в свою очередь, определяют достижимый уровень защищенности  $Z_k(\tau)$  при строго рассчитываемых и нормируемых необходимых затратах  $Z(\tau)$ . Такой подход, основанный на выражении (5), распространяется на обеспечение безопасности и защищенности всего спектра энергооборудования (ОТР, ОПО, КВО и СВО) на объектовом, отраслевом, региональном и федеральном

уровнях. В его разработке и реализации должны быть скоординированно задействованы ведущие академические институты, отраслевые НИИ и КБ, промышленные предприятия, руководство отраслей, субъектов Федерации и государства. При этом резко возрастает роль профессионально высокой и ответственной экспертизы всех проектов и объектов энергетики по критериям рисков. Если для ОТР можно опираться на саморегулируемые организации, а для ОПО – на сложившуюся практику экспертизы и декларирования промышленной безопасности, то для КВО и особенно СВО обеспечение, регулирование, экспертиза и надзор за безопасностью на основе количественных оценок рисков должны проводиться только на государственном уровне.

Координирующая роль в указанных новых разработках принадлежит Совету Безопасности Российской Федерации. Законодательная база перевода управления безопасным функционированием объектов энергетики должна создаваться Федеральным Собранием Российской Федерации, а формирование и реализация федеральных и государственных программ и технологических платформ современной энергетики будут осуществляться Правительством Российской Федерации (в первую очередь МЧС России, Минпромторгом России, Минэнерго России, Ростехнадзором, Росстандартом). Эти разработки несомненно должны опираться на результаты фундаментальных исследований Российской академии наук (в первую очередь институтов Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления).

Создание и использование критически и стратегически важных объектов энергетики на основе соблюдения новых требований к приемлемым уровням стратегических рисков энергообеспечения, энергоэффективности, энергосбережения и к защите этих объектов от тяжелых катастроф составляют суть перехода на новый уровень государственного стратегического планирования, отвечающего стратегии национальной безопасности<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> Махутов Н.А. Критерии безопасности и рисков в проблемах функционирования, модернизации и развития техносферы // Федеральный справочник. Вып. 23. С. 239–245.