
НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 621.01:531.8

АНАЛИЗ И УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ ПРОЧНОСТИ, РЕСУРСА И РИСКАМИ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭНЕРГОУСТАНОВОК С РАЗЛИЧНЫМИ ВИДАМИ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ

© 2022 г. Н. А. Махутов^{1,*}, М. М. Гаденин¹

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

*e-mail: safety@imash.ru

Поступила в редакцию 27.07.2021 г.

Принята к публикации 20.10.2021 г.

Научный анализ условий перехода объектов энергетики (тепловой, гидравлической, атомной) от штатных к аварийным и катастрофическим ситуациям показывает, что важное значение для обеспечения и повышения условий безопасной эксплуатации энергоустановок в рамках действующих концепций, стратегий, норм и регламентов имеет уровень научно-практического обоснования прогнозируемых и приемлемых рисков, характеризующих штатные и предельные состояния таких объектов. Стратегия решения названных для объектов энергетики проблем в рассматриваемом направлении определяет и закрепляет переход на анализ и управление рисками, как на основополагающую систему обеспечения безопасных условий эксплуатации в дополнение к существующим и развиваемым подходам, базирующимся в основном на параметрах прочности и ресурса.

Ключевые слова: прочность, ресурс, риск, безопасность, предельные состояния, аварии, катастрофы, вероятность, ущерб

DOI: 10.31857/S0235711922010060

Постановка проблем. Наряду с ключевой проблемой достижения энергоэффективности вопросы научных исследований и прикладных разработок в области прочности и ресурса энергоустановок занимали видное место в длительном, многовековом развитии энергетики. С этой целью шло непрерывное совершенствование состава энергоносителей (твердых, жидких, газообразных, ядерных), конструкций энергоустановок, используемых конструкционных материалов и технологий производственных процессов добычи, хранения, транспортировки, преобразования и использования энергоресурсов и энергоустановок. На такой научно-технической базе в течение многих десятилетий повышался коэффициент полезного действия энергоустановок, увеличивались их единичные установленные мощности, снижалась стоимость производства тепловой и электрической энергии. В свою очередь, указанные тенденции развития энергетики предъявляли все новые требования к объектам энергетического машиностроения – их энерговооруженности, работоспособности, прочности и сроков службы.

В настоящее время в нашей стране (как и в других промышленно и энергетически развитых странах) сформировался определенный состав энергетического потенциала: 1) традиционные тепловые электростанции и теплоэнергоцентрали (ТЭС, ТЭЦ) с установленной мощностью 165 ГВт (66%, 24%); на угле, нефти, мазуте (3%); газе (73%), торфе (0.1%); 2) гидроэлектростанции (ГЭС) с установленной мощностью

30 ГВт (11.5%); 3) возобновляемая энергетика (ВЭЭ) (ветровая, геотермальная, солнечная) с выработкой электроэнергии в 0.2%.

Максимальные единичные мощности энергоустановок России составляют для ТЭЦ и АЭС – 1.2 млн кВт, ГЭС – 6.4 млн кВт.

Магистральные трубопроводы (МТ) для транспортировки газообразных и жидких теплоносителей имели все возрастающие давления (от 0.7 до 1.0 МПа) и диаметры (от 400 до 1400 мм) с их общей протяженностью более 200 тысяч км; объем резервуаров для хранения (РХ) энергоносителей увеличивался от 10^4 до 2×10^5 м³.

Сроки службы функционирующих энергоустановок достигли 30–50 лет и более, а проектные сроки перспективных ГЭС и АЭС увеличиваются до 60–80 лет и более. При их проектировании в традиционных нормативных расчетах запасы прочности по пределам текучести n_y составляли 1.5–2.2, а по пределам прочности n_u – 2.5–3.5 с их постоянным снижением на 2–3% в год. Пределы текучести σ_y и прочности σ_u конструкционных, преимущественно металлических материалов, по мере совершенствования технологий повышаются соответственно на 4.5–5.0 МПа и 3.0–3.5 МПа в год.

Вместе с тем, совершенствование методов расчета, создания материалов, технологий производства и эксплуатации не позволили исключить не только эксплуатационные повреждения и отказы, но и аварии и катастрофы на энергоустановках всех типов, как в нашей стране, так и за рубежом.

Возникавшие тяжелые аварийные и катастрофические ситуации на АЭС (Чернобыльская – в СССР, ТМА – в США, Фукусима – в Японии), ГЭС (Саяно-Шушенская – в России, Бангиао – в Китае, Шрисайлам – в Индии, Итайлу – в Бразилии, Таум Сок – в США), на ТЭЦ (Костромская – в СССР, Норильская – в России, Аризонская – в США, Тевельская – во Франции) сопровождались гибелью людей, разрушением самих станций и прилегающих гражданских и промышленных объектов, загрязнением окружающей среды.

Экономические ущербы от таких аварий и катастроф измерялись сотнями миллионов и десятками миллиардов долларов, обессточиванием жилищ десятков миллионов человек.

С учетом сказанного, в Стратегии национальной безопасности Российской Федерации [1], в Энергетической стратегии России [2], в Основах государственной политики Российской Федерации в области обеспечения и повышения ядерной и радиационной [3], промышленной [4] безопасности, а также защиты от чрезвычайных ситуаций [5] на ближайшие годы и дальнейшую перспективу предусмотрены фундаментальные и прикладные исследования, конструкторско-технологические и контрольно-надзорные мероприятия по снижению во времени τ энергетических и социально-экономических рисков $R(\tau)$ до приемлемого (допускаемого) уровня [$R(\tau)$]. Научно-методической основой реализации этих мероприятий в экономике страны становится риск-ориентированный подход [1]. Целый ряд базовых положений по нему отражен в многотомном издании, выпускаемом по рекомендации Совета Безопасности, РАН, МЧС России, Российских Фонда и Общества “Знание” [6].

Фундаментальные исследования возникновения и развития тяжелых аварий и катастроф на сложных объектах инженерной инфраструктуры и объектах обеспечения жизнедеятельности осуществляют Российская академия наук, Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления (ОЭММПУ РАН) и его институты (ИМАШ, ИВТАН, ИПМех, ИПМАШ). Так как эти катастрофы имеют существенную многофакторность и исследуются в междисциплинарной постановке для человека, природы и техносферы, то условия их инициирования и развития на всех стадиях жизненного цикла являются предметом научных разработок по всем фундаментальным направлениям (механика, физика, химия, математика, экономика, социология, биология, география). Это обстоятельство структурно отражено на рис. 1.



Рис. 1. Научные основы обеспечения безопасности объектов энергетики на основе теории катастроф.

Институт машиноведения в составе АН СССР и РАН около семидесяти лет проводил и проводит систематические исследования и разработки по решению прямых задач прочности, ресурса, надежности, живучести, безопасности и рисков [7] энергоустановок ТЭС, ТЭЦ, ГЭС, АЭС совместно с ведущими институтами Минэнерго, Минэнергомаша, Минпрома, Минатома, Росатома, Росэнергоатома (ЦКТИ, ВТИ, ЦНИИТМАШ, Гидропроект, ВНИИГАЗ, НИИ “Транснефть”, НИКИЭТ, ОКБ ГП, ВНИИАЭС, ОКБМ, ИАЭ-НИЦ КИ).

В последние годы наукой и государством во главу поставлены новые задачи, когда требования к безопасности и рискам формируют требования к живучести, надежности, ресурсу и прочности [1–9].

Прямые и обратные задачи исследований и разработок. В рамках фундаментальной математической теории катастроф возникновение чрезвычайных ситуаций происходит в точке бифуркации состояния системы, характеризующей мгновенный ее переход из неопасного (докритического) в закритическое (катастрофическое) при бесконечно малом изменении параметров такой функционирующей системы. Реальные катастрофы сложных технических систем, включая энергетические установки, развиваются во времени τ , начиная от долей секунд и заканчивая минутами и часами. При этом стадии формирования накапливаемых повреждений, отказов и аварийных ситуаций могут протекать во временах, превышающих указанные выше времена катастроф на несколько порядков.

В соответствии с общей теорией безопасности и риск-ориентированными подходами [6–9] под рисками $R(\tau)$ на заданной стадии τ (числе лет) жизненного цикла энергетического объекта понимается их функциональная связь между вероятностью (ча-

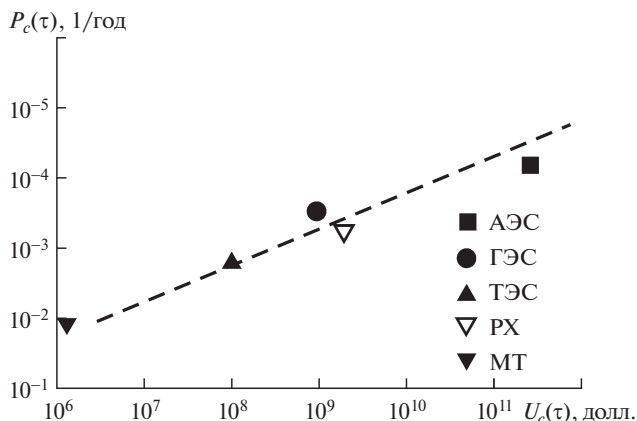


Рис. 2. Характеристики максимальных (критических) ущербов $U_c(\tau)$ и частот $P_c(\tau)$ возникновения тяжелых аварий и катастроф на объектах энергетики.

стойкой) $P(\tau)$ возникновения данного опасного состояния и ущербами (потерями) $U(\tau)$, сопутствующими проявлению этого состояния

$$R(\tau) = F_R \{P(\tau), U(\tau)\}. \quad (1)$$

Между параметрами рисков $P(\tau)$ и $U(\tau)$ существует связь, близкая к степенной

$$U(\tau) = K_P P(\tau)^{m_P}, \quad (2)$$

где K_P – параметр, зависящий от вида энергоносителя и типа энергоустановки; m_P – характеристика опасности энергетического объекта.

Для наиболее тяжелых аварий и катастроф на АЭС, ГЭС, ТЭС, РХ, МТ в нашей стране и за рубежом, имевших место в последние четыре десятилетия, предельные величины ущербов $U_c(\tau)$ от них и частоты (вероятности) $P_c(\tau)$ возникновения по данным [6, 7] представлены на рис. 2.

Для тяжелых аварий и катастроф величина m_P в выражении (2) составляет 0.4–0.45. Для определенного типа объектов (например, АЭС) при варьировании видов аварийных ситуаций (отказы важных систем, разрушения, аварии) этот показатель может изменяться в более широких пределах 0.35–0.5.

Обобщенная диаграмма для анализа рисков по выражению (1) на основе [7] представлена на рис. 3.

Для различных по тяжести опасных i -ситуаций на диаграмме (рис. 3) показаны границы критических рисков $R_c(\tau)$ с учетом данных рис. 2 с параметрами $P_c(\tau)$, $U_c(\tau)$, приемлемых рисков $[R(\tau)]$ с параметрами $[P(\tau)]$, $[U(\tau)]$, пренебрежимых рисков $R_n(\tau)$ с параметрами $P_n(\tau)$, $U_n(\tau)$. Эти границы определяют три основные области функционирования объектов – неприемлемых, приемлемых и пренебрежимых рисков.

Область приемлемых (допускаемых) рисков устанавливается на основе введения в рассмотрение запасов n_R по критическим рискам и их параметрам (рис. 1, 2)

$$[R(\tau)] = \frac{R_c(\tau)}{n_R}. \quad (3)$$

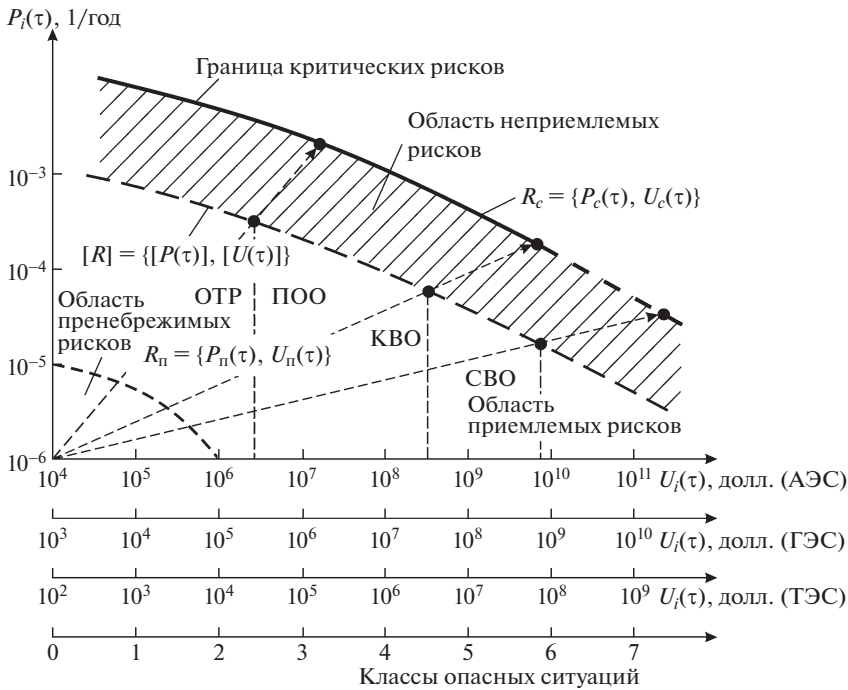


Рис. 3. Обобщенная диаграмма для анализа областей приемлемых и неприемлемых рисков по классам опасностей и типам объектов энергетики.

Величины n_R по опыту анализа безопасности [6, 7] назначаются в пределах $3 \leq n_R \leq 5$. Для пренебрежимых рисков величины запасов n_R должны быть увеличены не менее чем на порядок.

По приведенной диаграмме (рис. 3) для объектов техносферы устанавливаются: 1) классы опасных ситуаций от 1 до 7 (1 – локальные, 2 – объектовые, 3 – местные, 4 – региональные, 5 – национальные, 6 – глобальные, 7 – планетарные); 2) категории опасности объектов (объекты технического регулирования ОТП с числом более 10^6 – элементы, детали, узлы энергоустановок; потенциально опасные объекты ПОО с числом более 10^5 – крупные компоненты энергоустановок и установки малой мощности; критически важные объекты КВО с числом более 10^3 – крупные ТЭС, ТЭЦ, МТ, РХ; стратегически важные объекты СВО с числом более 10^2 – уникальные ГЭС и АЭС).

При прямом решении задач безопасности и рисков $R(\tau)$ и $[R(\tau)]$ для сложных технических объектов с учетом стадий развития опасных ситуаций на основе механики, физики, химии и математики катастроф (рис. 1) в первую очередь анализируются динамика опасных процессов, инициирующие факторы и собственно процессы развития этих ситуаций [6, 7, 10–12]. В большинстве случаев авариям и катастрофам предшествуют нарушения условий прочности, когда в несущих элементах напряжения σ и деформации e достигают предельных величин, определяющих сопротивление разрушению [7]

$$\sigma_{\sigma} = f\{Q^s, \tau^s, N^s, t^s, d^s\} \leq \left\{ \left(\frac{\sigma_u}{n_u}, \frac{\sigma_y}{n_y}, \frac{e_c}{n_e}, \frac{\tau_c}{n_{\tau}}, \frac{N_c}{n_N}, \frac{l_c}{n_l} \right) f(m) \right\}, \quad (4)$$

где Q^s – внешние и внутренние эксплуатационные воздействия; τ^s – время достижения предельного состояния в эксплуатации; t^s – экстремальная температура; d^s – накопленное повреждение; σ_u и σ_y – пределы прочности и текучести материала; e_c – критическая деформация; τ_c – время возникновения разрушения; N_c – число циклов до разрушения; l_c – критический размер трещин; n – соответствующие запасы ($1.2 \leq n \leq 10$); m – показатель степени для уравнений кривых деформирования в упругопластической области, кривых длительной и циклической прочности и трещиностойкости ($0.05 \leq m \leq 0.25$).

Допускаемые напряжения $[\sigma]$ и деформации $[e]$ при этом составляют $[\sigma] = \sigma_c/n_\sigma$, $[e] = e_c/n_e$. Для конструкционных материалов характеристики прочности (σ_u , σ_y), пластичности (e_c), временного и циклического ресурса (τ_c , N_c) и трещиностойкости (l_c) связаны со временем эксплуатации (τ^s , N^s) степенными зависимостями, а с температурой t^s – экспоненциальными [7–10, 14].

В процессе эксплуатации в несущих элементах (в их критических сечениях и точках) происходит накопление эксплуатационных повреждений d^s , оцениваемое через отношения соответствующих параметров прочности, пластичности, ресурса и трещиностойкости

$$d^s = \left\{ \frac{\sigma^s}{\sigma_u, \sigma_y}, \frac{e^s}{e_c}, \frac{\tau^s}{\tau_c}, \frac{N^s}{N_c} \right\} = \left\{ \frac{1}{n_u, n_y}, \frac{1}{n_e}, \frac{1}{n_\tau}, \frac{1}{n_N}, \frac{1}{n_l} \right\}. \quad (5)$$

В практике инженерных расчетов и в нормативных документах допускаемый ресурс $[\tau] = \tau_c/n_\tau$ обычно исчисляется во временных параметрах (секундах, часах, годах). При этом параметр времени эксплуатации объекта τ^s линейно связан с числом циклов его нагружения N^s через частоту приложения эксплуатационной циклической нагрузки. Циклический ресурс в этом случае будет равен $[N] = N_c/n_N$. В соответствии с этим накопленные эксплуатационные повреждения составят

$$d^s = d(\tau^s) = 1/n_{\tau^s}. \quad (6)$$

При увеличении τ^s от 0 до τ_c накопленные повреждения d^s возрастают от нуля до критического значения d_c , принимаемого равным единице ($d_c = 1$), т.е.

$$0 \leq d^s(\tau) \leq 1. \quad (7)$$

Все параметры в выражениях (4)–(6) являются случайными величинами, в связи с чем, в общем случае расчеты прочности, ресурса, трещиностойкости становятся вероятностными (рис. 4, пунктирные линии) с функциями плотности вероятности $f(\tau)$ и вероятности $P(\tau)$. На каждом из i -режимов эксплуатации ($i = 1, 2, \dots$) с приращением времени нагружения на $\Delta\tau_i$ используется правило линейного суммирования повреждений

$$d^s = \sum_i \frac{\Delta\tau_i}{\tau_c} = 1. \quad (8)$$

Каждой стадии эксплуатации τ^s ($0 \leq \tau^s \leq \tau_c$) и каждой величине накапливаемых повреждений d^s соответствуют свои опасности и риски $R(\tau^s)$, зависящие от вероятности $P(\tau)$ по выражению (1). В технической литературе, когда не учитываются величини

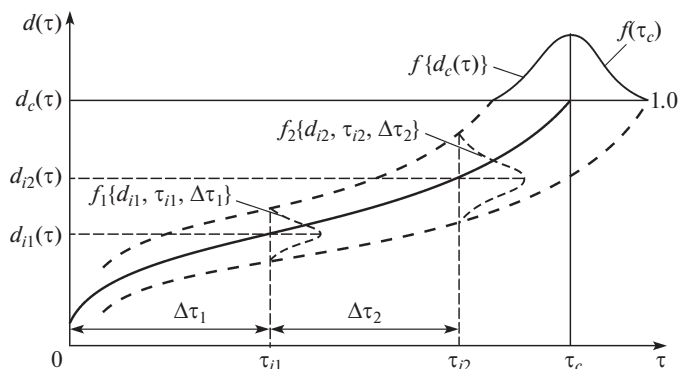


Рис. 4. Диаграмма вероятностного процесса накопления повреждений.

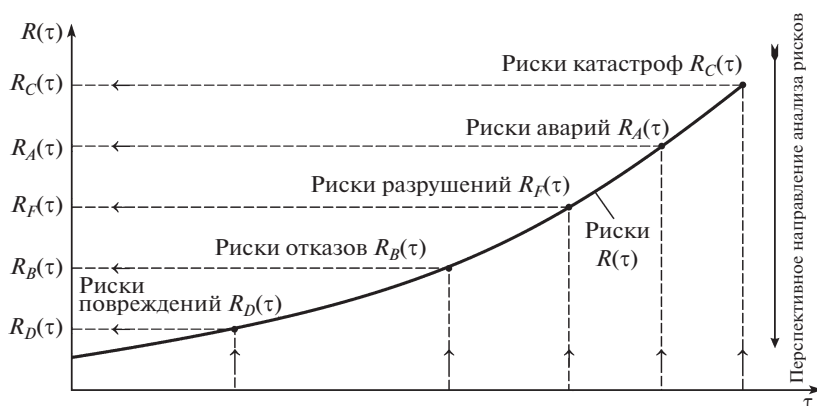


Рис. 5. Риски опасных состояний объектов и определяющие их параметры.

ны ущербов $U(\tau)$, в качестве технического риска принимается [7, 13] величина $R_T(\tau)$, определяемая как

$$R_T(\tau) = 1 - P(\tau^s). \tag{9}$$

В такой трактовке эти риски связаны с надежностью объекта в эксплуатации. Повышению надежности объектов при $P(\tau^s) \rightarrow 1$ соответствует снижение технических рисков $R_T(\tau^s) \rightarrow 0$. Для реально функционирующих объектов при $\tau^s > 0$ величины $d(\tau^s) > 0$, $P(\tau^s) < 1$ и $R_T(\tau) > 0$.

По мере накопления повреждений $d(\tau^s)$ в объектах возникают опасные состояния – отказы и разрушения, ведущие к отказам, авариям и катастрофам. Если при этом учитывать экономические ущербы (затраты) $U(\tau^s)$, связанные с необходимостью диагностики технических состояний, проведения регламентных ремонтно-восстановительных работ, заменой поврежденных элементов, аварийными остановками оборудования, а также предельно высокие (критические) ущербы $U_c(\tau)$ при возможных тяжелых

катастрофах, то по аналогии с рис. 4 можно построить кривую нарастающих экономических рисков (рис. 5).

Начальная стадия повреждений объекта характеризуется их малыми величинами $d(\tau^s) \ll 1/n$. Отказам соответствует образование локального разрушения (трещин) l с размерами на уровне допустимых или превышающих размеры, определяемые по нормам контроля. Дальнейшая эксплуатация может сопровождаться локальными или полными разрушениями не критических элементов объекта, когда уже не выполняются нормативные требования к прочности и ресурсу по выражению (4). Возникающие при этом разрушения ведут к опасным аварийным ситуациям (разрушениям узлов, компонентов объектов, пожарам, взрывам). В наиболее опасных случаях аварийные ситуации переходят в катастрофические с полным разрушением объектов, гибелью операторов, персонала и населения, с повреждением природной среды [7, 9].

Катастрофам соответствуют переходы рисков в последовательности $R_D(\tau) \rightarrow R_B(\tau) \rightarrow R_F(\tau) \rightarrow R_A(\tau) \rightarrow R_C(\tau)$. Риски катастроф $R_C(\tau)$ для наиболее опасных объектов (КВО, СВО) определяют критические риски $R_c(\tau)$ в выражении (3) и границы критических рисков. Введение в этом случае запасов по рискам n_R дает возможность построить области неприемлемых $R_c(\tau)$ и приемлемых $[R(\tau)]$ рисков по рис. 3.

Безопасность $S(\tau^s)$ всех типов объектов (ОТР, ПОО, КВО, СВО), включая объекты энергетики, можно оценить по величинам рисков для данной стадии эксплуатации или жизненного цикла

$$S(\tau^s) = \frac{[R(\tau^s)]}{R(\tau^s)}. \quad (10)$$

Согласно (10) если $R(\tau^s) < [R(\tau^s)]$, то $S(\tau^s) \geq 1$ и безопасность анализируемого объекта обеспечена. При $S(\tau^s) < 1$ необходима разработка комплекса мероприятий, для достижения условий эксплуатации объекта в области приемлемых рисков.

Необходимые экономические затраты $Z_R(\tau)$ на снижение текущих рисков $R(\tau^s)$ до приемлемого уровня $[R(\tau^s)]$ можно оценить расчетом по выражению

$$Z_R(\tau^s) = \frac{1}{m_Z} \{ R(\tau^s) - [R(\tau^s)] \}, \quad (11)$$

где m_Z – коэффициент эффективности затрат на достижение заданного уровня безопасности объекта в области приемлемых рисков. Этот коэффициент при надлежащем обосновании рисков, проведении диагностических и мониторинговых работ можно принять на уровне $m_Z = 5-10$.

Для крупных энергетических объектов (КВО, СВО) атомной, гидравлической энергетики, морских платформ критические риски $R_c(\tau)$ с учетом данных рис. 2, 3 могут достигать величин порядка 10^7 долл/год. Если принять в выражении (3) величину запаса по рискам n_R не менее 5–10, то приемлемыми можно считать риски на уровне $R(\tau^s) = 10^6$ долл/год. При величине m_Z на уровне 5 затраты на снижение рисков до приемлемого уровня согласно выражению (11) составят 1.8×10^6 долл/год для АЭС, и 1.8×10^5 долл/год для ГЭС.

Одним из важнейших мероприятий в области повышения безопасности по критериям рисков $R(\tau^s)$ и $[R(\tau^s)]$ можно считать [7, 14, 15] проведение мероприятий по научно-обоснованному продлению ресурса безопасной эксплуатации объекта (рис. 6).

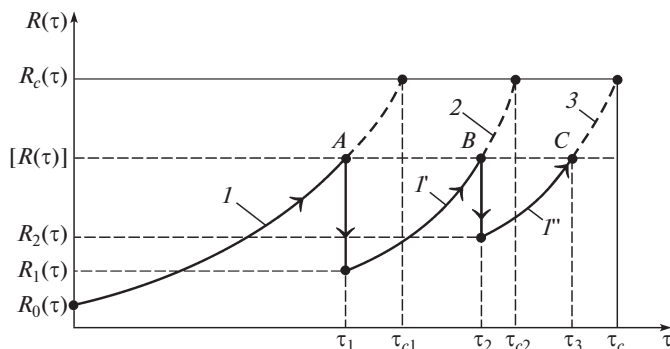


Рис. 6. Диаграмма изменения рисков $R(\tau)$ в эксплуатации при реализации мероприятий по их снижению и продлению ресурса безопасной эксплуатации.

Проведение проектных расчетов ресурса по нормам прочности на основе (4) и расчетно-экспериментальной оценки повреждений по (5)–(8) и рис. 4, а также рисков по рис. 5, позволяет осуществлять продлеваемую эксплуатацию на временах $\tau_1 \leq \tau_2 \leq \tau_3$ при сохранении уровней приемлемых рисков $[R(\tau^s)]$. При этом экономический эффект от применения технологии продленного ресурса будет существенно (на порядки) превышать затраты $Z_R(\tau)$ на переход к риск-ориентированному подходу в соответствии с современными требованиями [1]. С учетом этих требований в ближайшей (до 2025 г.) и отдаленной (до 2030–2035 гг.) перспективе на повестку будет поставлен вопрос о решении обратных задач обеспечения безопасности $S(\tau)$ по критериям рисков $R(\tau)$ и $[R(\tau)]$. Определяемые на основе научных разработок параметры $S(\tau)$ и $R(\tau)$ и назначаемые государственными органами в качестве ключевых параметры $[R(\tau)]$ потребуют выполнения углубленных исследований, разработок и норм расчетов по новой последовательности: “Безопасность $S(\tau) \rightarrow$ Риски $R(\tau)$, $[R(\tau)] \rightarrow$ Временной и циклический ресурс $[\tau]$, $[N] \rightarrow$ Прочность $[\sigma]$, $[e]$ ”. Это обстоятельство нашло свое отражение как в новой постановке рассматриваемых задач [1–5], так и в применяемых и развиваемых методах их решения [6–15].

Заключение. Определение характеристик прочности и ресурса по условиям обеспечения безопасности и рисков при эксплуатации энергоустановок и оборудования тепловой, гидравлической и атомной энергетики должно осуществляться на основе использования силовых и деформационных критериев образования и развития разрушения. Параметрами таких критериев являются данные о типах конструкционных материалов, о стандартных и специальных характеристиках их механических свойств, данные о конструктивных формах рассматриваемых элементов и об их эксплуатационной нагруженности. При этом построение общей системы уравнений для оценки опасных и безопасных состояний энергоустановок для описания взаимосвязи их текущих повреждений, внешних воздействий и реакций на них должно осуществляться на базе концепции учета изменения свойств материалов на всех стадиях жизненного цикла. Использование для достижения поставленной цели на стадиях проектирования и эксплуатации критериев риска, в состав ключевых параметров которых входят характеристики прочности и ресурса, позволяет применять их в качестве комплексного риск-ориентированного подхода, как к определению условий безопасной эксплуатации энергооборудования, так и управлять разработкой и реализацией новых проек-

тов, с учетом мероприятий по снижению опасных уровней рисков до приемлемых на всех стадиях жизненного цикла.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-58-00019)

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стратегия национальной безопасности Российской Федерации. Утверждена Указом Президента Российской Федерации от 02.07.2021 г. № 400.
2. Энергетическая стратегия Российской Федерации до 2035 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 09.06.2020 г. № 1523-р.
3. Основы государственной политики в области обеспечения и ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу. Утверждены Указом Президента РФ от 13 октября 2018 г., № 585.
4. Основы государственной политики Российской Федерации в области промышленной безопасности на период до 2025 года и дальнейшую перспективу. Утверждены Указом Президента РФ от 6 мая 2018 г., № 198.
5. Основы государственной политики Российской Федерации в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций на период до 2030 года и дальнейшую перспективу. Утверждены Указом Президента РФ от 11 января 2018 г., № 12.
6. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Безопасность средств хранения и транспорта энергоресурсов / Научный руководитель Н.А. Махутов. М.: МГОФ “Знание”, 2019. 928 с.
7. *Махутов Н.А.* Безопасность и риски: системные исследования и разработки. Новосибирск: Наука. 2017. 724 с.
8. Стратегические риски России. Оценка и прогноз / Под общ. ред. Ю.Л. Воробьева. М.: Деловой экспресс, 2005. 385 с.
9. *Воробьев Ю.Л., Акимов В.А., Соколов Ю.И.* Комплексная безопасность человека. М.: ВНИИ ГОЧС, 2011. 360 с.
10. *Ганиев Р.Ф.* Фундаментальные и прикладные проблемы нелинейной волновой механики и машиностроения. Прорывные волновые технологии и волновое машиностроение // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2019. № 6. С. 3.
<https://doi.org/10.1134/S0235711919060051>
11. *Сайфуллин И.Ш.* Информационная система по свойствам углеводородов и их производных (ИСУП) // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2020. № 4. С. 4.
12. *Хасьянова Д.У.* Условия обеспечения эксплуатационной надежности и герметичности термомеханических соединений трубопроводов муфтами // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2020. № 2. С. 31.
<https://doi.org/10.31857/S023571192002008X>
13. Probability, Combinatorics and Control. Edited by Andrey Kostogryzov and Victor Korolev. London: IntechOpen, 2020. 322 p.
<https://doi.org/10.5772/intechopen.79802>
14. Nuclear Materials / Ed. by P. Tsvetkov. London: IntechOpen, 2021. 138 p.
<https://doi.org/10.5772/intechopen.83315>
15. Multiscale Solid Mechanics. Strength, Durability, and Dynamics / Ed. by H. Altenbach, V.A. Eremeyev, L.A. Igumnov / Springer Nature Switzerland AG, Cham. 2021. 499 p.
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-54928-2>