

## Проблемы и возможности развития концепции риска технических систем

А. М. ЛЕПИХИН<sup>1,2,\*</sup>, В. В. ЛЕЩЕНКО<sup>2</sup>, Н. А. МАХУТОВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, 630090, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>НТЦ “Нефтегаздиагностика”, 105066, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт машиноведения РАН, 101000, Москва, Россия

\*Контактный автор: Лепихин Анатолий Михайлович, e-mail: [aml@ict.nsc.ru](mailto:aml@ict.nsc.ru)

*Поступила 18 мая 2023 г., доработана 03 июля 2023 г., принята в печать 06 июля 2023 г.*

Дан краткий анализ развития концепций риска аварий технических систем. На основе концепции минимизации стоимости жизненного цикла предложена новая трактовка риска технических систем, включающая потери как от аварий, так и от нарушений работоспособного состояния. Рассмотрены задачи оценки риска в предлагаемой формулировке. Ввиду ограниченности возможностей аналитических методов оценки риска основное внимание акцентируется на использовании методов Монте-Карло. Рассмотрены возможности оценок риска на основе статистических данных об авариях и нарушениях работоспособности. В качестве примера выполнены оценки риска аварий наземных и морских подводных трубопроводных систем с учетом нарушений работоспособности. Показано, что предлагаемый подход дает более высокие оценки риска по сравнению с традиционным подходом.

*Ключевые слова:* техническая система, работоспособность, авария, риск, модель, ущерб, трубопровод.

*Цитирование:* Лепихин А.М., Лещенко В.В., Махутов Н.А. Проблемы и возможности развития концепции риска технических систем. Вычислительные технологии. 2023; 28(4):22–34. DOI:10.25743/ICT.2023.28.4.003.

Современный этап развития техники и технологий характеризуется быстрой сменой концепций и возможностей. Технологические процессы и технические системы значительно усложнились, увеличились рабочие параметры их энергоэффективности, нагруженности и производительности, уменьшились запасы, возросла взаимосвязь между узлами и системами. Одновременно изменился характер опасностей и увеличился риск крупномасштабных аварий со значительными человеческими и экономическими потерями. В быстро меняющейся научно-методологической, технологической и информационной среде вопросы безопасности и защищенности технических систем вызывают все большую озабоченность. На этом фоне значительно усилился интерес к вопросам законодательного регулирования и нормирования процедур обоснования безопасности технических систем. При этом сохраняется фундаментальная роль характеристик прочности и надежности компонентов и систем.

Разрабатываемые инновации в проектировании и производстве технических систем позволяют решать сложные задачи, но одновременно порождают новые механизмы отказов и опасностей, а также новые риски, обусловленные сложно формализуемыми

функциональными и структурными зависимостями внутри систем и взаимодействиями систем с внешней средой. С другой стороны, достижения в знаниях, методах и технологиях, расширение обмена информацией, доступность больших объемов данных и вычислительных возможностей, а также прогресс в знаниях открывают новые возможности для развития методов анализа и оценки рисков. Происходит быстрая эволюция концепций, создаются новые подходы и методы оценки рисков. В настоящей статье рассматриваются особенности современной трансформации концептуальных формулировок риска и обсуждаются некоторые направления развития анализа и оценки рисков.

Развитие концепций риска основывается на следующих положениях:

- объемы знаний, информации и данных, доступных для анализа и описания опасностей создаваемых технических систем, моделирования и расчета рисков, существенно выросли и продолжают расти;
- возможности моделирования и доступные вычислительные мощности увеличились многократно и позволяют проводить беспрецедентный анализ с использованием новых математических методов и вычислительных технологий;
- возросшая сложность систем, состоящих из большого числа разнородных элементов (конструктивных, аппаратных, человеческих, цифровых), организованных в сильно взаимосвязанные структуры, приводит к поведению, которое трудно предвидеть или предсказать;
- для систематического и эффективного управления рисками необходимо рассматривать все этапы жизненного цикла технических систем и сценарии возможных аварий, включая предотвращение, смягчение последствий, управление кризисными ситуациями. Это влечет за собой расширенное видение путей и методов оценки рисков сложных систем;
- риск значительно меняется со временем, а также изменяются условия и эффективность мер предотвращения аварий, защиты и смягчения последствий.

Анализ и оценка риска — это наука, которая активно развивается в течение последних десятилетий для решения задач рационального управления техногенной безопасностью и системного понимания механизмов аварий и катастроф. Аварийные события, для которых проводится оценка, обычно являются экстремальными по параметрам и маловероятными по проявлениям. Редкость этих событий предопределяет очень малый объем статистической информации об их возникновении. Поэтому особенность задачи состоит в использовании всех имеющихся знаний для анализа и прогнозирования рисков. Обычно эти знания содержат экспертные оценки, подкрепленные косвенными физическими наблюдениями, а также прямые эмпирические наблюдения и расчетные оценки с использованием математических моделей. Основная идея оценки риска заключается в том, чтобы путем систематического анализа и моделирования структурировать информацию и знания, доступные на уровне исходных событий, для оценки риска на системном уровне. Поскольку знания об этих событиях и поведении систем в аварийных ситуациях ограничены, результаты оценки имеют широкие границы неопределенности. Уменьшение неопределенностей является еще одной актуальной задачей анализа риска.

Общая методология, используемая для описания и анализа неопределенностей, основывается на методах теории вероятностей, теории надежности и теории риска [1, 2]. В рамках достижений указанных теорий были разработаны методы вероятностной оценки риска (PRA), вероятностной оценки безопасности (PSA) и количественной оценки риска (QRA). Первое применение методологии вероятностного анализа риска к технологическим системам атомных электростанций относится к началу 1970-х гг. [3]. Основ-

ные принципы, лежащие в основе современного вероятностного анализа риска, с тех пор мало изменились. Тем не менее чисто вероятностные подходы к оценке риска оспариваются, когда речь идет о крайне маловероятных авариях технических систем с экстремальными последствиями. Еще более сложной проблемой является анализ беспрецедентных рисков, не имеющих аналогов. В связи с этим интенсивно разрабатываются альтернативные модели и методы обработки информации и анализа неопределенностей и риска [4–6].

В классической концепции понятие риска вводится для оценки возможности возникновения события или ситуации с нежелательными последствиями. Последствия обычно рассматриваются в связи с некоторыми целевыми значениями, а основное внимание уделяется негативным эффектам — экономическим ущербам, социальным и экологическим потерям. Международный совет по управлению рисками (IRGC) определяет риск как неопределенное негативное последствие события или деятельности [7]. Различные аналогичные определения риска можно найти в глоссарии специальной группы Общества анализа рисков (SRA) по фундаментальным вопросам анализа рисков (<http://www.sra.org>).

Формально риск  $R$  представляется как набор сценариев  $S_i$ , частот событий  $\lambda_i$  и их последствий  $C_i$  [8]:

$$R = \{S_i, \lambda_i, C_i\}, \quad i = 1, \dots, N. \quad (1)$$

При практической оценке риска это определение приводит к необходимости разработки методов выявления полного набора  $N$  сценариев аварий, которые могут произойти, методов оценки частоты их возникновения и их последствий. Поскольку полнота сценариев аварий не может быть гарантирована, а собственно оценки проводятся в условиях ограниченных знаний и приближенного моделирования, в работе [8] предложена несколько расширенная концептуальная формулировка риска

$$R = \{S_i, P_i(\lambda_i, C_i)\}, \quad i = 1, \dots, N + 1, \quad (2)$$

где  $P_i(\lambda_i, C_i)$  — совместная функция вероятностей, описывающая неопределенности относительно частоты возникновения  $\lambda_i$  и последствий  $C_i$  сценария аварии  $S_i$ , а сценарий  $(N + 1)$  добавлен для учета неполноты множества сценариев, т. е. для тех сценариев, которые не рассматривались по причине неизвестности на момент анализа. Здесь можно отметить, что  $(N + 1)$ -й сценарий может рассматриваться как своеобразный “черный лебедь” [9].

Признание центральной роли знаний в анализе риска привело к необходимости расширения концептуальной формулировки до следующей формы [10]:

$$R = \{A, C, Q, I\}, \quad (3)$$

где  $A$  определяет набор сценариев аварий, которые могут произойти;  $C$  представляет набор последствий,  $Q$  — метрика, используемая для количественной оценки связанных неопределенностей, а  $I$  определяет совокупность знаний, которые используются при оценке риска (т. е. количественная оценка  $C$  и  $Q$  основана на  $I$ ). Отметим, что формулировка (3) не ограничивает представление неопределенности классическим вероятностным представлением. Здесь могут быть использованы альтернативные представления с использованием нечетких множеств и интервальных оценок [11, 12].

Формулировка (3) подчеркивает роль исходных знаний, систематически включаемых в модель оценки риска, и указывает, что результаты оценки риска являются функ-

циями текущего состояния знаний и соответствующих сделанных предположений и оценок значений параметров. Признание этого простого факта стало настолько важным, что возникла необходимость в явном определении концепции, согласно которой риск обусловлен знанием. С указанных позиций анализ и оценка риска — это способ генерирования и представления знаний о риске, позволяющий принимать необходимые решения. Такой подход требует разработки моделей риска на основе имеющихся знаний, а также новых представлений неопределенностей и распространения этих неопределенностей на показатели и параметры описания риска.

В практических приложениях концепция риска обычно рассматривается на основе комплекса ключевых понятий механики катастроф: опасность (danger) — угроза (threat) — уязвимость (vulnerability) — авария (accident) [13, 14]. С учетом этого риск определяется как

$$R = \sum_i^{m_i} \sum_j^{m_j} \sum_k^{m_k} \sum_l^{m_l} \sum_n^{m_n} P(d_i)P(h_j | d_i)P(v_k | h_j)P(a_l | v_k)(c_n | a_l), \quad (4)$$

где  $d_i \in D$  — опасности;  $h_j \in H$  — угрозы;  $v_k \in V$  — уязвимости;  $a_l \in A$  — аварийные ситуации;  $c_n \in C$  — потери;  $D, H, V, A, C$  — множества опасностей, угроз, уязвимостей, аварийных ситуаций и потерь соответственно.

Недостатки рассмотренных концепций риска состоят в следующем. Во-первых, определяющее допущение, лежащее в основе (1)–(4), заключается в том, что вероятности полагаются известными (оцениваемыми), а последствия — измеримыми. Фактически полнота сценариев всегда ограничена, а риск оценивается в условиях ограниченных знаний и приближенных моделей аварий. Во-вторых, риск является производной категорией. Он не может быть определен без предварительного анализа опасностей, угроз, уязвимостей и потерь. Причем, как отмечено выше, риск всегда рассматривается в контексте конкретных целей анализа и в условиях трудно формализуемых неопределенностей, связанных с опасностями и угрозами. Используемые частотные и вероятностные оценки событий не охватывают и не исчерпывают весь спектр возможных мер неопределенностей. Поэтому в рамках рассмотренных концепций не существует “реального” или “объективного” риска. Получаемые оценки отражают тот уровень знаний о физическом объекте, который существует в рассматриваемый момент времени.

Дискуссии по фундаментальному понятию “риск” и другим фундаментальным вопросам, связанным с его оценкой, продолжаются [15, 16]. Эти дискуссии укрепляют общее понимание того, что результаты оценки риска обусловлены имеющимися знаниями об анализируемой системе и/или процессе [4, 5, 17]. При этом признается неизбежность существования остаточного (неизвестного) риска, связанного с неопределенностями параметров и характеристик системы или процесса. В общем случае при анализе и оценке риска следует рассматривать следующие категории неопределенностей [18]:

- практически неизвестные (информация о переменных и параметрах отсутствует);
- частично известные (информации недостаточно для количественного вероятностного анализа);
- известные (информации достаточно для количественного вероятностного анализа).

В первом случае возможны беспрецедентные риски, обусловленные появлением событий — “черных лебедей”. Во втором случае возможны новые вариации известных рисков или известные риски могут проявляться в новых условиях. Наконец, в третьем случае могут повторяться известные риски. Во всех случаях риски связаны с экстремальными состояниями технических систем [19].

Выявление и описание сценариев экстремальных состояний является фундаментальной задачей анализа и оценки рисков. На практике эта задача далеко не тривиальна, если учитывать сложность систем и процессов. Необходимо рассматривать большой комбинаторный набор возможных сценариев, событий и условий, из которых лишь немногие, редкие приводят к критическим, небезопасным ситуациям. Это делает экспериментальные оценки риска экономически невыгодными и физически неосуществимыми. Поэтому при анализе риска сложных технических систем большое внимание уделяется статистическому моделированию сценариев аварий и катастроф с использованием методов Монте-Карло [20, 21]. Однако высокая размерность задач приводит к необходимости разработки специальных, достаточно сложных технологий статистического моделирования.

Изложенное выше относилось к классическим концепциям риска, определяющим “стоимость” негативных событий (аварий или катастроф технических систем) *post factum*, на основе статистических данных. Недостаток указанных концепций заключается в том, что они рассматривают не весь жизненный цикл технической системы, а только его катастрофический результат. Очевидно, что в анализе риска должна учитываться стоимость всего жизненного цикла системы, а не только стоимость аварий и катастроф. Существенным недостатком также является то, что риск рассматривается с позиций системной теории надежности, без учета особенностей физических процессов, приводящих к авариям и катастрофам.

Принимая изложенное во внимание, предложим более содержательную концептуальную формулировку риска. По современным представлениям управление жизненным циклом технических систем заключается в минимизации стоимости  $C$  жизненного цикла [22]:

$$\min_{\alpha} C(\alpha) = C_1 + C_2(\alpha) + \sum_{t=1}^N \left\{ \frac{C_{SLS}P_{SLS} + C_{ULS}P_{ULS}}{(1+r-g)^t} + \frac{C_m}{(1+r)^t} \right\}. \quad (5)$$

Здесь  $\alpha$  — вектор проектных переменных;  $C_1$  — начальная стоимость технической системы, не зависящая от проектных переменных;  $C_2(\alpha)$  — стоимость технической системы, зависящая от проектных переменных;  $C_{SLS}$  — затраты на восстановление работоспособного состояния в случае его нарушения;  $C_{ULS}$  — потери от аварии и затраты на восстановление после аварии;  $P_{SLS}$  — вероятность предельного состояния с нарушением работоспособности (service limit state);  $P_{ULS}$  — вероятность достижения предельного состояния с разрушением технической системы (ultimate limit state);  $C_m$  — стоимость обслуживания в процессе эксплуатации;  $r$  — годовая процентная ставка;  $g$  — годовой темп экономического роста;  $N$  — заданный срок службы (годы).

На основании (5) риск аварий технических систем следует рассматривать как взвешенную по вероятностям общую стоимость событий потери работоспособности и аварии в течение заданного времени  $t$ :

$$R = \sum_{t=1}^N \left\{ \frac{C_{SLS}P_{SLS} + C_{ULS}P_{ULS}}{(1+r-g)^t} \right\}. \quad (6)$$

В данном случае время  $t$  определяется периодом эксплуатации системы до аварии, длительностью события аварии и устранения ее последствий. Возможности использования выражения (6) с учетом множества возможных аварий и дисконтирования ущербов

на всем этапе жизненного цикла технической системы требуют отдельного обоснования. Формулировка риска (6) предполагает вычисление вероятностей предельных состояний конструкций технических систем  $P_{SLS}$  и  $P_{ULS}$ . Здесь следует отметить, что различные сценарии аварий и катастроф в конечном итоге реализуются именно через достижение предельных состояний конструкций, за которыми следуют нарушения работоспособности или структурной целостности (разрушения). Для анализа предельных состояний конструкций технических систем необходимо решать задачи механики деформирования и разрушения с определением компонент тензоров напряжений и деформаций в зонах конструктивных, технологических и эксплуатационных дефектов, а также определением уровней критических напряжений и деформаций в этих зонах.

В общем случае уравнение предельного состояния можно представить в следующем обобщенном виде [1, 23, 24]:

$$G(x, z, \gamma) = 0, \quad (7)$$

где  $G$  — функция заданного вида для случаев нарушения работоспособности или разрушения;  $x$  — случайные компоненты вектора проектных переменных  $\alpha$ ;  $z$  — детерминированные переменные вектора проектных переменных  $\alpha$ ;  $\gamma$  — коэффициенты запаса.

К случайным компонентам можно отнести нагрузки и воздействия, характеристики механических свойств конструкционных материалов, размеры дефектов, компоненты напряжений и деформаций. К детерминированным обычно относятся геометрические параметры, коэффициенты запасов прочности.

Уравнение (7) разделяет область  $\Omega(x)$  случайных переменных на область безопасности  $\Omega_S$  и область риска  $\Omega_R$ :

$$\Omega(x) = \Omega_S \cap \Omega_R, \quad \Omega_R = \{x \mid G(x, z, \gamma) \leq 0\}, \quad \Omega_S = \{x \mid G(x, z, \gamma) > 0\}. \quad (8)$$

Необходимо отметить, что в общем случае указанные области представляют собой пересечения частных областей по каждому  $i$ -му виду и критерию предельного состояния:

$$\Omega_S = \bigcap_{i=1}^n \Omega_S^i.$$

Следует подчеркнуть, что многообразие возможных пересечений областей  $\Omega_S$  или  $\Omega_R$  может создавать множества расчетных случаев, существенно усложняющих анализ риска.

С учетом выражений (7) и (8) вероятности  $P_{SLS}$  и  $P_{ULS}$  можно определить в следующем виде:

$$P_{SLS} = P \{G(x, z, \gamma) \notin \Omega_S^{SLS}\}, \quad \Omega_S^{SLS} = \bigcap_{i=1}^n \Omega_{SLS}^i,$$

$$P_{ULS} = P \{G(x, z) \notin \Omega_S^{ULS}\}, \quad \Omega_S^{ULS} = \bigcap_{j=1}^m \Omega_{ULS}^j.$$

Отличия областей  $\Omega_S^{SLS}$  и  $\Omega_S^{ULS}$  заключаются в том, что область  $\Omega_S^{SLS}$  определяется проектными ограничениями на переменные с использованием частных коэффициентов запасов  $\gamma$ , в то время как область  $\Omega_S^{ULS}$  задается критериальными ограничениями по условиям разрушения без использования коэффициентов запаса [23]. Особое значение в этом случае имеют критерии механики разрушения [23, 24].

При заданных совместных плотностях распределения вероятностей  $f(x)$  случайных переменных указанные вероятности можно записать в следующем виде:

$$P_{SLS} = P \{G(x, z, \gamma) \leq 0\} = 1 - \iiint_{\Omega_S^{SLS}} f(x) dx, \quad (9)$$

$$P_{ULS} = P \{G(x, z) \leq 0\} = 1 - \iiint_{\Omega_S^{ULS}} f(x) dx. \quad (10)$$

Для вычисления вероятностей (9) и (10) необходимы дополнительные допущения о моделях и классах событий отказов. Нарушения работоспособности можно рассматривать как события, относящиеся к классам частых или умеренно вероятных. Вероятности  $P_{SLS}$  таких событий можно определить с использованием классических моделей теории надежности первого (FORM) и второго (SORM) порядков, особенности которых подробно описаны в работах [25, 26]. Аварии и катастрофы технических систем относятся к классам редких и практически невероятных событий. Вероятности  $P_{ULS}$  таких событий можно определить с использованием пуассоновских моделей теории надежности [24, 27]. Следует особо подчеркнуть, что аналитические решения для вероятностей (9) и (10) можно получить только для однокритериальных уравнений предельных состояний с малым числом переменных. Для современных технических систем, конструкции которых содержат  $10^5$ – $10^6$  и более разнородных элементов, находящихся под разными нагрузками и воздействиями при сложных напряженно-деформированных состояниях, получить аналитические решения для вероятностей  $P_{SLS}$  и  $P_{ULS}$  практически невозможно. Принимая во внимание изложенное, кратко рассмотрим основные методы численного определения вероятностей  $P_{SLS}$  и  $P_{ULS}$ .

Одним из возможных численных вариантов решения задач (9) и (10) является использование интеграла Римана. В этом случае указанные вероятности определяются по формуле

$$P_{LS} = \sum_{i_1=1}^{m_1} \cdots \sum_{i_n=1}^{m_n} I\{G(x)\} f(x_1 + i\Delta x_1, x_2 + i\Delta x_2, \dots, x_n + i\Delta x_n) \Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n,$$

где  $m_i$  — число шагов для  $i$ -й переменной;  $n$  — число случайных переменных;  $I\{G(x)\} = \begin{cases} 1, G(x) \leq 0 \\ 0, G(x) > 0 \end{cases}$  — индикаторная функция.

Другой, более эффективный вариант — использование прямого метода Монте-Карло [28]. В этом случае вероятности  $P_{SLS}$  и  $P_{ULS}$  определяются по формулам

$$P_{SLS} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i \{G(x, z, \gamma) \leq 0\}, \quad P_{ULS} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i \{G(x, z) \leq 0\}.$$

Снижение числа реализаций модели  $N$  достигается расширенным методом Монте-Карло с применением выборки по важности. На основе этого метода при заданной функции плотности вероятностей выборки по важности  $h(x)$  вероятности  $P_{SLS}$  и  $P_{ULS}$  можно определить как

$$P_{SLS} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i \{G(x, z, \gamma) \leq 0\} \frac{f(x)}{h(x)}, \quad P_{ULS} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i \{G(x, z) \leq 0\} \frac{f(x)}{h(x)}.$$

В последнее время был разработан более эффективный метод численного моделирования, получивший название “метод марковских цепей Монте-Карло” [29, 30]. При использовании этого метода область безопасности необходимо разбить на ряд вложенных подобластей и последовательно определить вероятности нахождения вектора базисных переменных в этих подобластях безопасности. Результирующие вероятности предельных состояний можно определить с использованием алгоритма Метрополиса – Хастингса по формуле

$$P_{LS} = \frac{1}{N_1} \sum_{k=1}^{N_1} I_{F_1} \{ \alpha_k^{(1)} \} \prod_{i=1}^{m-1} \frac{1}{N_i} \prod_{k=1}^{N_i} I_{F_i} \{ \alpha_k^i \},$$

где индикаторная функция  $I_F$  определяется как

$$I_{F_1} = \begin{cases} 1, & \alpha_k^{(1)} \in F_1 \\ 0, & \alpha_k^{(1)} \notin F_1 \end{cases}, \quad I_{F_i} = \begin{cases} 1, & \alpha_k^{(i)} \in F_i \\ 0, & \alpha_k^{(i)} \notin F_i \end{cases},$$

где  $F_i$  — подобласть области  $\Omega_S^i$ ,  $I_{F_i}$  — индикаторная функция для подобласти  $F_i$ ,  $\alpha_k$  — проектные параметры.

Общая схема определения вероятностей  $P_{SLS}$  и  $P_{ULS}$  указанными выше методами заключается в вычислении статистических параметров компонент напряжений и деформаций (средних значений  $\bar{\sigma}_{ij}$ ,  $\bar{\varepsilon}_{ij}$ , средних квадратических отклонений  $\tilde{\sigma}_{ij}$ ,  $\tilde{\varepsilon}_{ij}$ , функций распределения вероятностей  $f(\sigma_{ij})$ ,  $f(\varepsilon_{ij})$ ) для рассматриваемых элементов конструкций технических систем при заданных вариациях нагрузок, размеров и числа дефектов, а также характеристик механических свойств. Компоненты напряжений и деформаций должны определяться с учетом вероятностей наличия в элементах конструкций пуассоновских ансамблей дефектов со случайными размерами из допустимого множества размеров. Далее проводится проверка условия достижения предельного состояния (SLS или ULS) по заданному критерию в рассматриваемой части конструкции. Если это условие выполняется, то индикаторная функция в указанных формулах увеличивается на единицу.

Алгоритм получения вероятностей включает:

- определение набора случайных и детерминированных переменных  $\alpha = \{x, z\}$ ;
- задание функций плотностей распределения вероятностей случайных переменных  $f(x)$ ;
- преобразование случайных переменных в стандартизированные нормально распределенные переменные;
- создание набора случайных переменных с использованием генераторов случайных чисел;
- получение численного решения краевых задач для заданного набора случайных переменных;
- задание плотностей вероятностей для выборки важности  $h(x)$ ;
- проверку условия достижения предельного состояния;
- $N$ -кратное моделирование;
- оценку вероятностей разрушения по указанным формулам.

При наличии статистики отказов (нарушений работоспособности), аварий и катастроф технических систем вероятности  $P_{SLS}$  и  $P_{ULS}$  в формуле (6) могут быть заменены статистическими оценками. Оценки затрат и ущербов  $C_{SLS}$  и  $C_{ULS}$  также можно получить из статистических данных или оценить экономическими методами.

В качестве примера в табл. 1 и 2 приведены данные о вероятностях отказов и суммах ущербов для наземных и морских подводных трубопроводных систем. Наземные трубопроводные системы относятся к категории критически важных объектов, а морские подводные трубопроводы — к категории стратегически важных объектов экономики России, для которых требуется обоснование безопасности по критериям рисков. В табл. 3 представлены результаты оценок риска аварий трубопроводов в классической форме произведения вероятностей на ущербы. Вероятности и ущербы в данном случае приняты по средним и максимальным значениям, представленным в табл. 1 и 2.

На рисунке представлены результаты расчетов риска по формуле (6) с использованием данных из табл. 1 и 2 как функция времени простоя трубопровода (месяцы). Затраты  $C_{SLS}$  принимались по статистическим данным затрат на диагностирование и ремонт трубопроводов. Для наземных трубопроводов средние значения  $C_{SLS}$  составляют 0.5–1.2 млн долл., для подводных  $C_{SLS} \approx 5–9$  млн долл. Вероятности  $P_{SLS}$  принимались равными вероятностям наличия недопустимых дефектов и повреждений по данным внутритрубной диагностики ( $P_{SLS} \approx 10^{-3}–10^{-4}$ ). Такие дефекты не приводят к авариям, но требуют устранения.

Сравнение результатов, приведенных в табл. 3, и графиков показывает, что учет ущербов от нарушений работоспособности может оказывать существенное влияние на

Т а б л и ц а 1. Статистические оценки вероятностей аварий трубопроводов (по данным баз данных PARLOC и DOT)

Table 1. Statistical estimations of pipeline accident probabilities (according to PARLOC and DOT databases)

Показатель, (км·год) <sup>-1</sup>	Наземные трубопроводы		Подводные трубопроводы	
	нефтепроводы	газопроводы	нефтепроводы	газопроводы
Среднее значение	$1.26 \cdot 10^{-3}$	$2.05 \cdot 10^{-4}$	$3.34 \cdot 10^{-4}$	$1.89 \cdot 10^{-3}$
Стандартное отклонение	$1.48 \cdot 10^{-5}$	$7.83 \cdot 10^{-6}$	$8.11 \cdot 10^{-5}$	$1.93 \cdot 10^{-4}$
Нижняя 80 % граница	$1.24 \cdot 10^{-3}$	$1.95 \cdot 10^{-4}$	$2.30 \cdot 10^{-4}$	$1.65 \cdot 10^{-3}$
Верхняя 80 % граница	$1.30 \cdot 10^{-3}$	$2.15 \cdot 10^{-4}$	$4.38 \cdot 10^{-4}$	$2.14 \cdot 10^{-3}$

Т а б л и ц а 2. Статистические оценки ущербов от аварий трубопроводов (по данным базы данных CONCAWE)

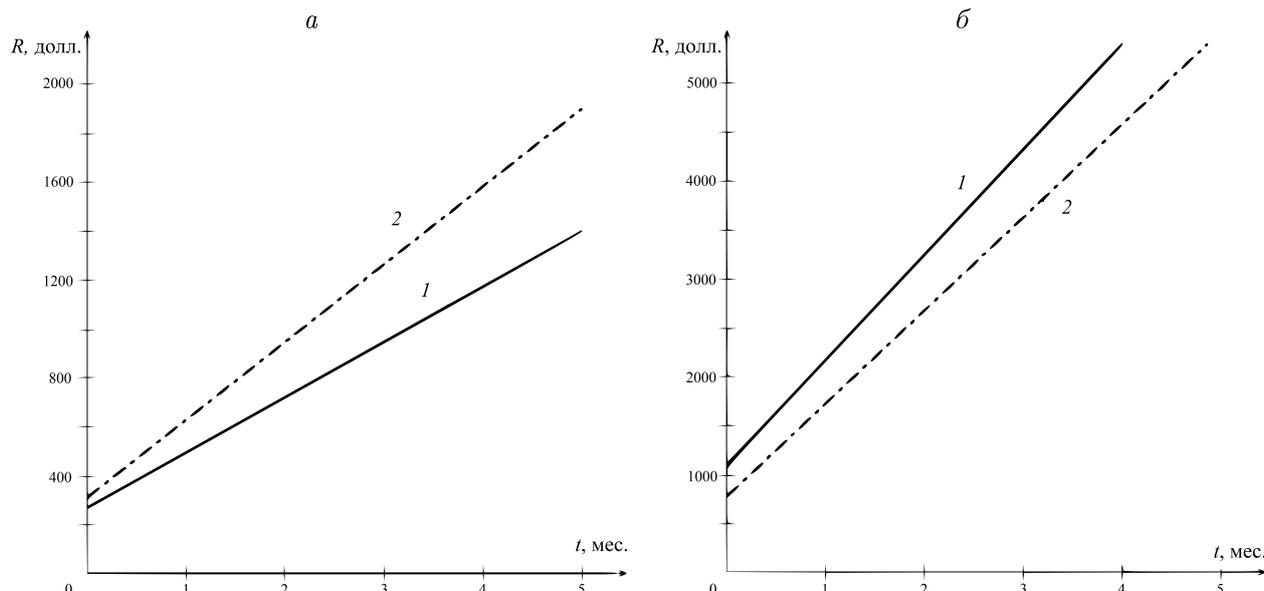
Table 2. Statistical estimates of damages from pipeline accidents (according to CONCAWE database)

Показатель, долл.	Наземные трубопроводы		Подводные трубопроводы	
	нефтепроводы	газопроводы	нефтепроводы	газопроводы
Средние значения	$10^4–10^5$	$10^5–10^6$	$10^5–10^6$	$10^4–10^5$
Максимальные значения	$10^8$	$10^9$	$10^7$	$10^7$

Т а б л и ц а 3. Статистические оценки рисков аварий трубопроводов

Table 3. Statistical risk assessments of pipeline accidents

Показатель, долл./ (км·год)	Наземные трубопроводы		Подводные трубопроводы	
	нефтепроводы	газопроводы	нефтепроводы	газопроводы
Средние значения	$(0.12–1.30) \cdot 10^2$	$(0.19–2.15) \cdot 10^2$	$(0.23–4.38) \cdot 10^2$	$(0.16–2.14) \cdot 10^2$
Максимальные значения	$1.26 \cdot 10^5$	$2.05 \cdot 10^5$	$3.30 \cdot 10^3$	$1.89 \cdot 10^4$



Функции риска аварий наземных (*a*) и подводных (*б*) трубопроводов (1 — нефтепроводы, 2 — газопроводы)

Risk functions of accidents of onshore (*a*) and underwater (*б*) pipeline (1 — oil pipelines, 2 — gas pipelines)

величину риска аварий. Получаемые оценки оказываются несколько выше классических оценок. Помимо этого оценки риска по формуле (6) позволяют учесть время простоя трубопровода из-за нарушений работоспособности или аварии.

## Заключение

Изменения и инновации в технике и технологиях с широкой цифровизацией и информатизацией всех аспектов принятия решений, усложнением и увеличением стоимости технических систем, изменением климата и экстремальными природными явлениями, террористическими и злонамеренными угрозами требуют дальнейшего развития концепций и методов количественного анализа и моделирования рисков. В связи с этим в статье рассмотрены некоторые направления исследований и разработок в отношении расширения оценок рисков в рамках концепции оптимизации стоимости жизненного цикла изделий и непрерывности бизнеса, а также оценки безопасности и защищенности технических систем по критериям рисков. Показана важность учета в оценках риска не только событий аварий, но и вероятностей нарушения работоспособности технических систем и связанных с этим ущербов.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий.

## Список литературы

- [1] Shuhir E. Applied probability for engineers and scientists. McGraw-Hill; 1997: 533.
- [2] Soong T.T. Fundamentals of probability and statistics for engineers. Wiley; 2004: 391.
- [3] Reactor safety study, an assessment of accident risks. Wash 1400. Report NUREG-75/014. Washington, D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission.

- [4] **Aven T., Zio E.** Some considerations on the treatment of uncertainties in risk assessment for practical decision making. *Reliability Engineering and System Safety*. 2011; 96(1):64–74.
- [5] **Aven T.** The risk concept — historical and recent development trends. *Reliability Engineering and System Safety*. 2012; (99):33–44.
- [6] **Kang R., Zhang Q., Zeng Z., Zio E., Li X.** Measuring reliability under epistemic uncertainty: review on non-probabilistic reliability metrics. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2016; 29(3):571–579.
- [7] An introduction to the IRGC risk governance framework. International Risk Governance Council; 2012: 23. Available at: <https://www.preventionweb.net/publication/introduction-irgc-risk-governance-framework>.
- [8] **Kaplan S., Garrick B.J.** On the quantitative definition of risk. *Risk Analysis*. 1981; 1(1):11–27.
- [9] **Taleb N.** Statistical consequence of fat tails. *STEM*; 2020: 431.
- [10] **Aven T., Renn O.** Risk management and governance. Berlin, Heidelberg: Springer; 2010: 278.
- [11] **Dubois D.** Possibility theory and statistical reasoning. *Computational Statistics and Data Analysis*. 2006; 51(1):47–69.
- [12] **Pedroni N., Zio E., Pisanisi A., Couplet M.** A critical discussion and practical recommendations on some issues relevant to the non-probabilistic treatment of uncertainty in engineering risk assessment. *Risk Analysis*. 2017; 37(7):1315–1340. DOI:10.1111/risa.12705.
- [13] **Perrow Ch.** Normal accidents: living with high-risk technologies. NY: Basic Books; 1999: 386.
- [14] **Lepikhin A.** A critical look at risk analysis of disasters. *WIT Transactions on Information and Communication Technologies*. 2010; (43):59–67. Available at: <https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-information-and-communication-technologies/43/21523>.
- [15] **Zio E.** The future of risk assessment. *Reliability Engineering and System Safety*. 2018; (177):176–190. DOI:10.1016/j.res.2018.04.020.hal-01988966.
- [16] **Cox L.A.** Breakthroughs in decision science and risk analysis. John Wiley & Sons; 2015: 328.
- [17] **Zio E.** Challenges in the vulnerability and risk analysis of critical infrastructures. *Reliability Engineering and System Safety*. 2016; (152):137–150.
- [18] **Flage R., Aven T.** Emerging risk — conceptual definition and a relation to black swan type of events. *Reliability Engineering and System Safety*. 2015; (144):61–67.
- [19] **Ale B.** Risk analysis and big data. *Reliability Engineering and System Safety*. 2016; 36(3):153–165.
- [20] **Rubino G., Tuffin B.** Rare event simulation using Monte Carlo methods. Wiley & Sons; 2009: 277. Available at: [http://nzdr.ru/data/media/biblio/kolxoz/M/MV/Rubino%20G.,%20Tuffin%20B.%20\(eds.\)%20Rare%20event%20simulation%20using%20Monte%20Carlo%20methods%20\(Wiley,%202009\)\(ISBN%200470772697\)\(277s\)\\_MV\\_.pdf](http://nzdr.ru/data/media/biblio/kolxoz/M/MV/Rubino%20G.,%20Tuffin%20B.%20(eds.)%20Rare%20event%20simulation%20using%20Monte%20Carlo%20methods%20(Wiley,%202009)(ISBN%200470772697)(277s)_MV_.pdf).
- [21] **Marseguerra M., Zio E.** Monte Carlo approach to PSA for dynamic process systems. *Reliability Engineering and System Safety*. 1996; 52(3):227–241.
- [22] **Enevoldsen I., Sorensen J.D.** Reliability-based optimization of series systems and parallel systems. *Proceeding IFIP WG 7.5 Conference of Reliability and Optimization of Structural Systems*. Kagawa, Japan; 1993; (5):31–46.
- [23] **Махутов Н.А.** Безопасность и прочность. Фундаментальные и прикладные исследования. Новосибирск: Наука; 2008: 528.
- [24] **Лепихин А.М., Махутов Н.А., Москвичев В.В., Черняев А.П.** Вероятностный риск-анализ конструкций технических систем. Новосибирск: Наука; 2003: 173.
- [25] **Madsen H.O., Krenk S., Lind M.** Methods of structural safety. Prentice Hall; 1986: 403.

- [26] **Ditlevsen O., Madsen H.O.** Structural reliability methods. Wiley & Sons; 2007: 361.
- [27] **Болотин В.В.** Ресурс машин и конструкций. М.: Машиностроение; 1990: 448.
- [28] **Melchers R.E., Beck J.L.** Structural reliability analysis and prediction. Wiley & Sons; 2018: 515.
- [29] **Au S.K., Beck J.L.** Estimation of small failure probabilities in high dimensions by subset simulation. Probabilistic Engineering Mechanics. 2001; (1):263–277.
- [30] **Shayanfar M.A., Barkhordari M.A., Roudak M.A.** An adaptive importance sampling-based algorithm using the first order method for structural reliability. International Journal of Optimization in Civil Engineering. 2017; 7(1):93–107.

---

Вычислительные технологии, 2023, том 28, № 4, с. 22–34. © ФИЦ ИВТ, 2023  
Computational Technologies, 2023, vol. 28, no. 4, pp. 22–34. © FRC ICT, 2023

ISSN 1560-7534  
eISSN 2313-691X

---

MATHEMATICAL MODELLING

---

DOI:10.25743/ICT.2023.28.4.003

## Problems and possibilities for developing the risk concept of technical systems

A. M. LEPIKHIN<sup>1,2,\*</sup>, V. V. LESCHENKO<sup>2</sup>, N. A. MAKHUTOV<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Federal Research Center for Information and Computational Technologies, 630090, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup>NTTs NefteGazDiagnostics, 105066, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Institute of Mechanical Engineering RAS, 101000, Moscow, Russia

\*Corresponding author: Anatoly M. Lepikhin, e-mail: nikoly@icc.ru

Received May 18, 2023, revised July 03, 2023, accepted July 06, 2023.

### Abstract

The article gives a brief analysis for development of the concepts for risk analysis of accidents in technical systems. The new interpretation of the risk of technical systems is proposed, including both losses from accidents and losses from violations of the working condition and based on the concept of minimizing the cost of the life cycle. The problems of risk assessment in the proposed formulation are considered. The main attention is paid to the prospects of risk assessments using Monte Carlo methods due to the limited capabilities of analytical methods for risk assessment. The capabilities of risk assessments based on statistical data on accidents and malfunctions are considered. The assessments of the risk of accidents and malfunctions of onshore and offshore underwater pipeline systems are carried out. It is shown that the proposed approach gives higher risk estimates compared to the traditional approach.

*Keywords:* technical systems, working capacity, accidental, risk, model, loss, pipeline.

*Citation:* Lepikhin A.M., Leschenko V.V., Makhutov N.A. Problems and possibilities for developing the risk concept of technical systems. Computational Technologies. 2023; 28(4):22–34. DOI:10.25743/ICT.2023.28.4.003. (In Russ.)

**Acknowledgements.** The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for Federal Research Center for Information and Computational Technologies.

### References

1. **Shuhir E.** Applied probability for engineers and scientists. McGraw-Hill; 1997: 533.
2. **Soong T.T.** Fundamentals of probability and statistics for engineers. Wiley; 2004: 391.
3. Reactor safety study, an assessment of accident risks. Wash 1400. Report NUREG-75/014. Washington, D.C.: U.S. Nuclear Regulatory Commission.

4. **Aven T., Zio E.** Some considerations on the treatment of uncertainties in risk assessment for practical decision making. *Reliability Engineering and System Safety*. 2011; 96(1):64–74.
5. **Aven T.** The risk concept — historical and recent development trends. *Reliability Engineering and System Safety*. 2012; (99):33–44.
6. **Kang R., Zhang Q., Zeng Z., Zio E., Li X.** Measuring reliability under epistemic uncertainty: review on non-probabilistic reliability metrics. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2016; 29(3):571–579.
7. An introduction to the IRGC risk governance framework. International Risk Governance Council; 2012: 23. Available at: <https://www.preventionweb.net/publication/introduction-irgc-risk-governance-framework>.
8. **Kaplan S., Garrick B.J.** On the quantitative definition of risk. *Risk Analysis*. 1981; 1(1):11–27.
9. **Taleb N.** Statistical consequence of fat tails. *STEM*; 2020: 431.
10. **Aven T., Renn O.** Risk management and governance. Berlin, Heidelberg: Springer; 2010: 278.
11. **Dubois D.** Possibility theory and statistical reasoning. *Computational Statistics and Data Analysis*. 2006; 51(1):47–69.
12. **Pedroni N., Zio E., Pasanisi A., Couplet M.** A critical discussion and practical recommendations on some issues relevant to the non-probabilistic treatment of uncertainty in engineering risk assessment. *Risk Analysis*. 2017; 37(7):1315–1340. DOI:10.1111/risa.12705.
13. **Perrow Ch.** Normal accidents: living with high-risk technologies. NY: Basic Books; 1999: 386.
14. **Lepikhin A.** A critical look at risk analysis of disasters. *WIT Transactions on Information and Communication Technologies*. 2010; (43):59–67. Available at: <https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-information-and-communication-technologies/43/21523>.
15. **Zio E.** The future of risk assessment. *Reliability Engineering and System Safety*. 2018; (177):176–190. DOI:10.1016/j.res.2018.04.020.hal-01988966.
16. **Cox L.A.** Breakthroughs in decision science and risk analysis. John Wiley & Sons; 2015: 328.
17. **Zio E.** Challenges in the vulnerability and risk analysis of critical infrastructures. *Reliability Engineering and System Safety*. 2016; (152):137–150.
18. **Flage R., Aven T.** Emerging risk — conceptual definition and a relation to black swan type of events. *Reliability Engineering and System Safety*. 2015; (144):61–67.
19. **Ale B.** Risk analysis and big data. *Reliability Engineering and System Safety*. 2016; 36(3):153–165.
20. **Rubino G., Tuffin B.** Rare event simulation using Monte Carlo methods. Wiley & Sons; 2009: 277. Available at: [http://nzdr.ru/data/media/biblio/kolxoz/M/MV/Rubino%20G.,%20Tuffin%20B.%20\(eds.\)%20Rare%20event%20simulation%20using%20Monte%20Carlo%20methods%20\(Wiley,%202009\)\(ISBN%200470772697\)\(277s\)\\_MV\\_.pdf](http://nzdr.ru/data/media/biblio/kolxoz/M/MV/Rubino%20G.,%20Tuffin%20B.%20(eds.)%20Rare%20event%20simulation%20using%20Monte%20Carlo%20methods%20(Wiley,%202009)(ISBN%200470772697)(277s)_MV_.pdf).
21. **Marseguerra M., Zio E.** Monte Carlo approach to PSA for dynamic process systems. *Reliability Engineering and System Safety*. 1996; 52(3):227–241.
22. **Enevoldsen I., Sorensen J.D.** Reliability-based optimization of series systems and parallel systems. *Proceeding IFIP WG 7.5 Conference of Reliability and Optimization of Structural Systems*. Kagawa, Japan; 1993; (5):31–46.
23. **Makhutov N.A.** Bezopasnost' i prochnost'. *Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya [Safety and strength. Fundamental and applied research]*. Novosibirsk: Nauka; 2008: 528. (In Russ.)
24. **Lepikhin A.M., Makhutov N.A., Moskvichev V.V., Chernyaev A.P.** Veroyatnostnyy risk-analiz konstruktivnykh tekhnicheskikh sistem [Probabilistic risk analysis of the designs of technical systems]. Novosibirsk: Nauka; 2003: 173. (In Russ.)
25. **Madsen H.O., Krenk S., Lind M.** Methods of structural safety. Prentice Hall; 1986: 403.
26. **Ditlevsen O., Madsen H.O.** Structural reliability methods. Wiley & Sons; 2007: 361.
27. **Bolotin V.V.** Resurs mashin i konstruktivnykh [Resource of machines and structures]. Moscow: Mashinostroenie; 1990: 448. (In Russ.)
28. **Melchers R.E., Beck J.L.** Structural reliability analysis and prediction. Wiley & Sons; 2018: 515.
29. **Au S.K., Beck J.L.** Estimation of small failure probabilities in high dimensions by subset simulation. *Probabilistic Engineering Mechanics*. 2001; (1):263–277.
30. **Shayanfar M.A., Barkhordari M.A., Roudak M.A.** An adaptive importance sampling based algorithm using the first order method for structural reliability. *International Journal of Optimization in Civil Engineering*. 2017; 7(1):93–107.