

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ  
INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 338.3:621.391:[004.5+004.67]



DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-4-112-122 Оригинальная статья /Original article

**О гипотезе уравнения состояния технической системы**

**Д.И. Лобач**

Департамент по ядерной и радиационной безопасности Министерства  
по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь,  
220030, г.Минск, ул.Берсона, 16, Республика Беларусь

**Резюме. Цель.** Цель исследования заключается в формулировке и демонстрации потенциальных дополнительных экспертных возможностей и гипотезы для повышения качества рассмотрения проектов технических систем при сочетании анализа технических характеристик проекта и параметров влияния человеческого фактора. **Метод.** В работе рассматривается получение инвариантных соотношений для некоторых характеристик технических систем, на основании которых формулируется гипотеза уравнения состояния технической системы. **Результат.** Результат исследования состоит в разработке и развитии вспомогательных аналитических подходов для сравнения отдельных эксплуатационных параметров проектов, проведения экспертной оценки новых и существующих технических систем проектов, устройств и технологий в ходе осуществления экспертной деятельности. Применение гипотезы уравнения состояния технической системы позволяет проводить экспертные оценки безопасности технической системы. **Вывод.** Использование дополнительных экспертных подходов и гипотез позволяет провести наработку опыта экспертных оценок для сравнения проектов, корреляционный анализ данных, определение потенциальных возможностей в контексте осуществления дальнейших модификаций и модернизаций технических систем проекта, выработать улучшенные эксплуатационные прогнозы и стратегии, осуществить принятие адекватных управленческих решений.

**Ключевые слова:** экспертная оценка, безопасность, сэйфеометрика, уравнение состояния, техническая система, человеческий фактор, стратегия, прогноз.

**Для цитирования:** Д.И. Лобач. О гипотезе уравнения состояния технической системы. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(4):112-122. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-112-122

**On the hypothesis of the equation for technical system state**

**D.J. Lobach**

Department on nuclear and radiation safety of Ministry on emergency situations  
of the Republic of Belarus,  
16 Bersona Str. Minsk 220030, Belarus

**Abstract. Objective.** The objective of the study is to formulate and demonstrate potential additional expert capabilities and a hypothesis to improve the quality of technical system projects by combining the analysis of technical characteristics of the project and human factor influence parameters. **Method.** The paper considers obtaining invariant relationships for some characteristics of technical systems, on the basis of which a hypothesis of the equation of state of a technical system is formulated. **Result.** Auxiliary analytical approaches have been developed to compare individual operational parameters of projects, conduct an expert assessment of technical systems of projects, devices and technologies. The use of the hypothesis of the equation of state of a technical system allows for expert assessments of the safety of a technical system. **Conclusion.** The use of additional expert approaches and hypotheses allows for the accumulation of experience in expert assessments, correlation analysis of data, determination of potential capabilities in the context of further modifications and upgrades of technical systems of the pro-

ject, development of improved operational forecasts and strategies, and adoption of adequate management decisions.

**Keywords:** expert assessment, safety, safeometrics, equation of state, technical system, human factor, strategy, forecast.

**For citation:** D.J. Lobach. On the hypothesis of the equation for technical system state. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024;51(4):112-122. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-4-112-122

**Введение.** Для успешного продвижения в различных сферах экономики коммерческих проектов технических систем (далее – ТС) требуется подтверждение необходимости или целесообразности использования комплектующего оборудования проекта, его обоснованность для конкретных эксплуатационных условий [1-3]. Это относится как к атомной промышленности, так и к другим отраслям. Наличие дополнительных элементов, блоков и т.п. для дублирования важных технологических процессов, решения производственных задач, а также создания запаса безопасности может увеличивать стоимость проекта любого объекта. Важно учитывать комплексность задач при проектировании ТС, которое, как итерационный процесс, сочетает процедуры описания ТС и их анализа [4]. Применение вспомогательных устройств должно быть аргументировано и в ходе экспертной оценки следует продемонстрировать (показать), как их использование влияет на безопасную эксплуатацию техники в организации.

Состояния безопасности проектов ТС могут иметь неопределённости в требованиях к качеству данных для нестандартных эксплуатационных ситуаций, а экспертный анализ ТС и пути принятия управленческих решений связаны с обеспечением безопасности функционирования структурно-сложных систем [5,6]. В ходе организации и проведения экспертных работ необходимо провести классификацию предстоящих задач для оценки безопасности ТС и выбрать оптимальные методы анализа [7].

При недостатке экспертных данных и опыта для подтверждения уровня безопасности проектов ТС вспомогательные методы сэйфеометрики для оценки параметров технологий позволяют получить возможность наглядного и относительного количественного сравнения характеристик для такой ситуации [8-10]. В некоторых случаях при недостатке компетентности специалистов и из-за распространения у них клипового мышления [11] применение дополнительных методов оценки безопасности позволяет проверить состояние техники, удостовериться в поддержании требуемого уровня безопасности, также при этом повышается наглядность реакций ТС на команды и действия управления.

В организациях часто важно оценить, как соответствует уровень безопасности ТС состоянию культуры безопасности (далее – КБ), профессионализму специалистов, отношению работников в коллективах (их дух, настроение) к поддержанию безопасности [12-14]. Для этого надо определить при каких условиях можно сопоставить (сравнить влияние, оценить корреляцию) изменению технических параметров систем или суперпозиции таких параметров ТС характеристики влияния человеческого фактора (далее – ЧФ) на производстве или их изменение, чтобы рассмотреть является ли сформированная в организации КБ адекватной или соответствует состоянию ТС, требуемому уровню безопасности. Проверку таких соотношений нельзя провести измерением величин с достоверной статистикой экспериментальными методами, поэтому во многих случаях следует руководствоваться правдоподобными эмпирическими закономерностями и гипотезами.

**Постановка задачи.** Надёжность и риски событий для новых проектов обычно ещё недостаточно рассчитаны и изучены, а сами инновационные технологии могут быть не проверены и ещё себя не зарекомендовали. Аналогичная ситуация для ТС происходит в отношении практики и опыта их эксплуатации и регулирования безопасности.

Тема подтверждения или демонстрации безопасности инновационных технологий возникает, например, в свете динамичных разработок и ожидаемых (декларируемых)

сроков внедрения передовых конструкций ядерных реакторов как для абсолютно новых, так и с использованием или опирающихся на инновационные технологии для существующих систем, компонентов, материалов, технологий производства, возведения, строительства. К настоящему времени подобное комплексное рассмотрение проблематики оценки возможностей и безопасности проектов ТС с подготовкой отдельного документа для экспертного рассмотрения проводится в Международном агентстве по атомной энергии [3]. В проектах атомных электростанций внедряются инновационные технологии, используются новые подходы и концепции на уровне компонентов и систем, как и в других сферах экономики, где тоже вкладываются значительные финансовые ресурсы и требуется высокая конкурентоспособность для продвижения новых технологий.

Следует отметить, что затраты на финансирование и поддержание требуемого уровня безопасности ТС составляют часть экономики производства. Поэтому можно сказать, что безопасность входит в число экономических категорий. В [3] приводится неполный перечень вопросов, с которыми можно столкнуться при подтверждении или демонстрации безопасности инновационных технологий, где особое значение могут иметь полное отсутствие информации или опыта по некоторым ключевым направлениям. Эти вопросы требуют пояснений и детализаций с учётом конкретных условий реализации проектов ТС. Если в ходе экспертных оценок или экспертиз перечисленные проблемы не рассмотреть и не решить, то будут поставлены под сомнение способность разработчиков, операторов и других заинтересованных сторон обеспечить демонстрацию безопасности инновационной технологии. Также это вызовет отсутствие доказательств и подтверждений должного уровня безопасности для регулирующего государственного органа, который не будет способен принимать компетентные и своевременные решения о безопасности конструкций реакторов, использующих инновационную технологию, например, для предоставления лицензии, разрешительных документов и т.д.

Использовать методы количественной оценки уровня безопасности для последующего сравнения и методы для расчёта риска аварий это не одно и то же. Но это и не отменяет одно другое, а дополняет друг друга. Для этих подходов различаются как постановка задачи, так и их результат, практическая значимость. В целях оценки безопасности при рассмотрении проектов ТС с перечисленными проблемами новых технологий использование традиционных подходов основано на использовании термодинамических величин и состояний, которые исследуются в ходе наработки эксплуатационного опыта. Этого недостаточно при работе экспертов для анализа быстро реализуемых задач.

Для экспертных оценок и экспертиз важно иметь в наличии арсенал вспомогательных методов сравнения, опирающихся на имеющиеся в распоряжение данные и не требующих значительного дополнительного времени их наработки. На основании методологии сэйфгеометрики использование сравнения количественного изменения уровня безопасности или других показателей базируется на их различии или изменении для старых и новых технологий, в ходе применения новых технологических решений, изменении одних показателей при фиксировании других характеристик [8-10]. Полученные в ходе анализа количественные закономерности (например, в ходе *DATA MINING*) могут быть использованы для относительного или рейтингового сравнения проектируемых, планируемых или применяемых технологий без использования длительной наработки экспериментальных данных. Использование сравнительного подхода позволяет провести первичную оценку преимуществ как внедрения инновационных технологий в действующие проекты, так и для существующих устройств.

Необходим глубокий всесторонний анализ и описание практического проявления связей, возможности их записи в математической форме. В дальнейшем, правдоподобные эмпирические закономерности экспертом должны быть имплементированы к каждой конкретной ситуации (имеется понимание связей между параметрами и потенциалами, интерпретация работы проекта ТС, проведены анализы минимизации возможных негатив-

ных последствий от работы системы, повышения эффективности показателей проекта, устойчивости функционирования системы, реализации механизмов восстановления работоспособности, осуществлено накопление данных). Изменение и совершенствование проектов или применение новых технологических решений, по которым эксперту надо проводить анализ, подтверждение и демонстрацию их новых признаков, осуществляется по разным направлениям. Реальные ТС сложны и комплексны, поэтому для практического понимания их функционирования экспертами часто используются модельные условности, например, при рассмотрении можно полагать, что системы независимы, тождественны, однородны, а влияние организационных действий и человеческого фактора происходит одинаково на все составляющие элементы.

**Методы исследования.** Главная задача аналитиков при проведении экспертных рассмотрений состояния безопасности ТС – оценить параметры проекта и сравнить их с данными от референтных конструкций, ранее реализованных аналогов, технологиями конкурентов, уточнить условия функционирования ТС и достигнутый уровень безопасности. Комплексные количественные показатели в сфере безопасности не могут быть измерены абсолютными методами, приборами. Эксперту следует ориентироваться на имеющиеся и подходящие эмпирические закономерности и выражения для них [8].

В [9,10] было показано, что для оценки уровня безопасности системы можно использовать как абсолютные величины, параметры сэйфеометрики (например,  $N_{PC}$  – количество рабочих систем (далее – РС);  $N_{CB}$  – количество систем безопасности (далее – СБ) для рассматриваемого технического объекта,  $M_{\Phi}$  – количество проектных или запроектных факторов опасности (предписанных событий или отказов или иного, на усмотрение эксперта) для этого технического объекта), так и относительные характеристики, удобные для понимания и рассмотрения – потенциалы сэйфеометрики (например,  $\alpha = N_{CB}/M_{\Phi}$  – степень опасности;  $\tau = N_{CB}/N_{PC}$  – уровень технической оснащённости СБ;  $\Theta = 1/\tau = N_{PC}/N_{CB}$  – технологической насыщенностью проекта (в контексте оснащённости рабочим оборудованием, техническими комплексами и т.п.)). Вышеуказанные характеристики являются детерминированными величинами (в том числе базируются на конкретных характеристиках проекта). Уровень безопасности ТС  $Q$ , зависящий только от таких параметров, тоже будет детерминированной величиной.

Технические характеристики проекта, его КПД могут быть ослаблены неэффективным применением ТС. Это происходит по причине участия в эксплуатационном процессе работников с разным уровнем профессионализма. Их отношение к своей деятельности в совокупности с их компетентностью формируют систему КБ в организации [14-16]. КБ, влияющая на уровень безопасности  $Q$  зависит от ЧФ у сотрудников и связана со случайными величинами проявления ЧФ на индивидуальном и организационном уровне [12,13]. Такая связь может быть показана двумя величинами:  $R_{CSC}$  (показатель организационной (коллективной) культуры безопасности, групповой фактор,  $R_{CSC} \in ]0; 1]$ ) и  $R_{ISC}$  (показатель индивидуальной (персональной) культуры безопасности, личный фактор,  $R_{ISC} \in ]0; 1]$ ) и характеризоваться плотностью распределения вероятности  $p(R_{CSC}, R_{ISC})$ . Значения этих показателей могут быть определены по-отдельности в ходе проведения анкетирования, опросов или исследований [7-11]. Из теории вероятностей известно, что когда одномерные переменные  $R_{CSC}$  и  $R_{ISC}$  будут являться статистически независимыми, тогда для всех возможных значений этих переменных выполняется условие  $p(R_{CSC}, R_{ISC}) = p(R_{CSC})p(R_{ISC})$ , где  $p(R_{CSC})$  и  $p(R_{ISC})$  – их одномерные плотности распределения вероятности. Однако при использовании подходов математической статистики  $R_{CSC}$  может зависеть от  $R_{ISC}$ , и это надо учитывать при экспертной оценке.

Показателям организационной и индивидуальной КБ в любой момент времени, в любое состояние ТС можно сопоставить показатель комплексной КБ  $R_{SC}$ . Его величина  $R_{SC} = (R_{CSC} \times R_{ISC})$ , где  $R_{CSC}$  и  $R_{ISC}$  значения соответствующих случайных величин. Для средних величин оценка проводится аналогично. Полагаем, что  $R_{CSC}$  и (или)  $R_{ISC}$  не могут

принимать нулевые значения, иначе это будет значить несистемное, неорганизованное, непрофессиональное функционирование (в хаотичных условиях), когда безопасность невозможно обеспечить.

Следует заметить, что свойства и параметры проекта непосредственно определяют степень угрозы ТС организации для работников, населения и окружающей среды (например, химические предприятия, объекты атомной энергетики и др.) [15]. Технологическая насыщенность проекта  $\Theta$  формирует и характеризует его диверсионную технологическую привлекательность для проведения несанкционированных действий, поскольку это определяет тяжесть последствий от саботажа и т.п. Привлекательными для злоумышленников могут быть и низкие уровни КБ, формирующие негативные эффекты ЧФ в организации, и высокая зависимость ТС от влияния ЧФ. Обычно предварительно собираются сведения об имеющихся уязвимостях для определения и выбора «слабых» мест производств, путей вмешательства при планировании и организации таких действий. Где имеются в проекте ТС места с бóльшим технологическим риском, влиянием ЧФ, там больше уязвимостей, на которые направлено внимание злоумышленников и которые используются при проведении несанкционированных действий [14]. В работе [9] был представлен частный инвариант для потенциалов сэйфеометрики:  $\alpha \times Q = const$  для систем с разными значениями  $\tau$ . Обобщённые инварианты для потенциалов и показателей сэйфеометрики были получены в работе [10]:

$$\frac{\alpha \times Q}{\tau} = const \text{ или } \frac{N_{PC} \times Q}{M_{\Phi}} = const . \quad (1)$$

Эти закономерности будем использовать для последующих рассуждений об оценке и анализе параметров состояний ТС.

**Обсуждение результатов.** Относительное сравнение состояний ТС с использованием инвариантов. Главная задача проводимого здесь экспертом анализа – как ТС будет переходить из одного состояния в другое, что при этом будет происходить, к чему это приведёт для функционирования проекта и к чему надо быть готовым при эксплуатации.

Технические характеристики проекта ТС, условий его реализации (внешние условия) являются физическими детерминированными параметрами. Другие характеристики, в которых реализуется проект, например, саботаж с влиянием ЧФ, уровень КБ (внутренние свойства управления и коллектива), представляющие собой совокупность внутренних свойств, возможностей, недостатков, достоинств, не могут быть измерены и являются случайными, могут быть описаны вероятностными величинами.

Рассмотрение (1) проводится в предположении, что, если для одной и той же системы, когда влияние ЧФ одинаково (по условиям или проявлению) и представлено в организационной и индивидуальной КБ (в целом) или за промежуток времени, когда изменение влияния ЧФ пренебрежимо мало. Для двух состояний одной и той же ТС из (1) можно получить уравнения:

$$\frac{\alpha_1 \times Q_1}{\tau_1} = \frac{\alpha_2 \times Q_2}{\tau_2} \text{ или } \frac{N_{PC1} \times Q_1}{M_{\Phi 1}} = \frac{N_{PC2} \times Q_2}{M_{\Phi 2}} . \quad (2)$$

Схематично рассмотрение разных состояний ТС можно провести на рис. 1 ( $M_{\Phi 1} < M_{\Phi 2}$ ). Изменение состояний ТС можно рассмотреть на рис. 1 с использованием нескольких частных инвариантов параметров сэйфеометрики:

1. Создание запаса безопасности при  $Q = const$  или для переходов с  $Q_1$  или  $Q_2$  ( $Q_2 > Q_1$ ) может происходить при увеличении использования дополнительных РС с их СБ ( $N_{PCD} < N_{PCB} < N_{PCA} < N_{PCE}$ ). Чем меньше был начальный уровень безопасности, тем больше надо вовлечь в использование РС с их СБ. Переход ТС для состояний  $DA$  и  $BE$  означает охват бóльшего количества  $M_{\Phi}$  ( $M_{\Phi 1} < M_{\Phi 2}$ )  $\Rightarrow \Delta N_{PC}(M_{\Phi 1}) = N_{PCB} - N_{PCD} < N_{PCE} - N_{PCA} = \Delta N_{PC}(M_{\Phi 2})$ .

2. При уменьшении  $M_{\Phi}$   $\Delta(M_{\Phi 2} - M_{\Phi 1})$  уровень безопасности можно снизить в  $Q_2/Q_1$  раз для  $N_{PC} = const$ .

3. Удержание более высокого уровня безопасности  $\Delta Q \geq 0$  можно произвести с уменьшением количества РС  $\Delta N_{PC}$  и (или)  $\Delta M_{\Phi}$ . При увеличении  $\Delta N_{PC}$  и  $\Delta M_{\Phi}$  требуется увеличить уровень безопасности ТС.

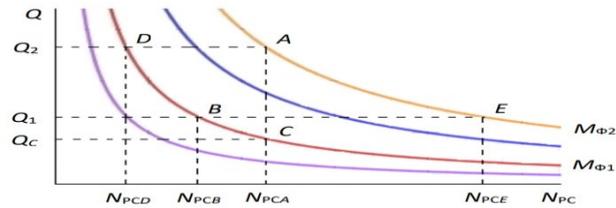


Рис.1. Изменение уровня безопасности  $Q$  в зависимости от количества рабочих систем  $N_{PC}$  для разных величин проектных или запроектных факторов опасности  $M_{\Phi}$

Fig.1. The change in the level of safety  $Q$  depending on the number of operating systems  $N_{PC}$  for different values of design or beyond design hazard factors  $M_{\Phi}$

**Гипотеза уравнения состояния ТС.** Эксплуатационное состояние ТС может быть описано как детерминированными, так и вероятностными характеристиками. В работах [9,10] показано, что подходящие априорные параметры проекта удобно использовать для оценки безопасности ТС.

Введём понятие идеальной ТС, которая может включаться/выключаться и функционировать отдельно от других таких же ТС. Все такие ТС не имеют связи между собой (модель, упрощение рассмотрения). Их строение в ходе работы не рассматривается. Функционирование самой ТС может быть рассмотрено, как отдельной подсистемы.

Введём характеристики внутренних свойств ТС:  $Y = L \times R_{CSC} \times R_{ISC}$ ,  $L$  – показатель независимости работы ТС от ЧФ, характеризуется степенью автономности, показывает долю автоматизированных процедур,  $L \in ]0; 1]$ . Коэффициент  $Y$  характеризует внутренние свойства, реагирование системы при усилении влияния ЧФ, устойчивость к ЧФ или восстановление ТС при его действии,  $Y \in ]0; 1]$ .

Для  $R_{CSC} \times R_{ISC} < 1$  значение  $L = \beta$ , где  $\beta$  – степень автономности [9]  $\beta \in ]0; 1]$  (при  $\beta=1$  – максимальная автономность), для компенсации ЧФ требуется повышенная автономность (дополнительное оснащение, автоматизация и т.п.). С уменьшением использования технологий с участием людей коэффициент  $L \in ]1; L_{MAX}]$ , где  $L_{MAX} = 1/(R_{CSC} \times R_{ISC})$  (запроектная степень автономности), требуемая для компенсации всех эффектов, связанных с влиянием ЧФ в рамках функционирования ТС. Поскольку в эксплуатации ТС необходимы люди (работники), то очевидно, что уменьшение ЧФ не может быть достигнуто с неизменной численностью коллектива. Поэтому при уменьшении количества людей будет уменьшаться влияние ЧФ на ТС. Это будет возможно при введении в проект ТС дополнительной автономности (до  $L_{MAX}$ ).

Система должна иметь минимальное техническое оснащение, которое должно быть в наличии и использоваться по прямому назначению, быть в работоспособном состоянии ( $L \neq 0$ ). При действии ЧФ экспертная оценка наиболее удобна, если рассмотрение проводится для непрерывного влияния ЧФ или при возможности исключить ЧФ. Если же для влияния ЧФ требуются определённые условия (в ТС есть или формируются «скачки» условий), то необходимо либо рассмотреть состояния ТС для разных условий (с ЧФ и без ЧФ), либо определить причины этого и исключить возможность возникновения таких разных состояний ТС. Величина  $\zeta$ , запроектный коэффициент, потенциал, который характеризует запас безопасности проекта, улучшение проекта при его модификациях или модернизациях. До  $Y \leq 1$  значение  $\zeta=1$ , а при достижении  $Y$  своей максимальной величины 1 увеличение  $\frac{N_{PC} \times Q}{M_{\Phi}}$  может быть связано с увеличением  $\zeta$ . При идеальных условиях проведения работ в организации ( $R_{CSC} \times R_{ISC} \approx 1$ ,  $\beta=1$ ), для ТС с максимальной рабочей эффективностью (ТС в идеальном состоянии)  $\frac{N_{PC} \times Q}{M_{\Phi}} = 1$  (обобщённый инвариант) в относительных единицах (далее – отн.ед.), при  $Y=1$  отн.ед..

В инвариантах (1) имеются структурные элементы, которые можно дополнительно рассмотреть и интерпретировать:  $N_{PC} \times Q$  – эффективное количество РС за счёт учёта всех факторов на безопасность  $Q$ ;  $\alpha \times Q$  – эффективное влияние всех СБ на безопасность ТС за счёт учёта всех существующих факторов; величина  $Q/M_{\Phi}$  показывает то, что факторы  $M_{\Phi}$  действуют на ослабление безопасности  $Q$ , обусловленной текущим значением  $Y$  и способствуют уменьшению эффективности работы всех РС. Полагаем, что все РС работают при действии всех  $M_{\Phi}$ , а при  $Y > 1$  отн.ед. РС работают эффективнее при действии тех же  $M_{\Phi}$ .

При указанных предположениях, с учётом свойств функциональных зависимостей гиперболического типа, состояние любой ТС в любое время можно гипотетически представить уравнениями следующего вида (уравнения состояния идеальной ТС):

$$\frac{N_{PC} \times Q}{M_{\Phi}} = \zeta \times L \times R_{CSC} \times R_{ISC} \quad (3.1)$$

$$\frac{\alpha \times Q}{\tau} = \zeta \times L \times R_{CSC} \times R_{ISC} \quad (3.2)$$

Уравнения (3.1)-(3.2) позволяют оценить (определить) одни параметры эксплуатации ТС через другие на основании обобщения эмпирических наблюдений и построения правдоподобных логических выводов. Размерность левой и правой части уравнений соответствуют друг другу ([отн.ед]≡[отн.ед]), эти параметры характеризуют состояние ТС с разных позиций рассмотрения в отн.ед.. Сами эти величины корреспондируются друг другу (соответствуют в рамках их интерпретации). Все реальные ТС имеют как особенности построения, эксплуатации, взаимодействия с окружающими факторами, так и общие свойства, которые характеризуют идеальную ТС (модель). Схематично переход ТС между различными состояниями можно рассмотреть на рис. 2 ( $\tau_2 > \tau_1$ ).

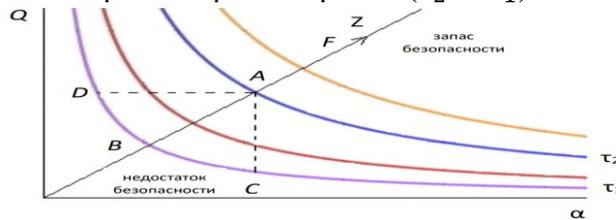


Рис. 2. Изменение уровня безопасности ТС  $Q$  в зависимости от степени опасности  $\alpha$  для систем с разным уровнем технической оснащённости СБ  $\tau$

Fig. 2. Changes in the safety level of TS  $Q$  depending on the degree of danger  $\alpha$  for systems with different levels of technical equipment of SS  $\tau$

Внедрение автоматизации, уменьшение использования людей повышают уровень безопасности, что увеличивает величину  $Q$ . В таком случае  $L > 1$  и это будет показывать, как система откликается на уменьшение влияния ЧФ.

При  $Y > 1$ , когда запас безопасности высок ( $A \rightarrow F$ ), то и влияние ЧФ на ТС либо ничтожно, либо компенсируется в рамках запроектных характеристик, следует полагать, что система входит в состояние с более высоким уровнем безопасности. В этом состоянии системе требуется меньше персонала с ЧФ, либо вообще работники не требуются, возможно ей управляет искусственный интеллект или восполнение безопасности происходит постоянно и это экономически неограничено. При  $Y=1$  осуществляется полное использование потенциала проекта ТС (100%). Эффекты влияния ЧФ на ТС сведены к минимуму или нулю ( $R_{CSC} \times R_{ISC} \approx 1$ ,  $\beta=1$ , т.е. имеется на практике максимальная автономность, состояние без влияния ЧФ, например, автоматизация). Для состояния  $Y=1$  имеется технический рубеж, когда ТС своими возможностями преодолевает влияние ЧФ. До этого ЧФ препятствует проектному функционированию ТС и эффективность ТС, используемых технологий меньше 100%. Для  $Y > 1$  за счёт модернизаций, совершенствования рабочих процедур и управления ТС, замены работников на технологии без участия людей:  $\frac{N_{PC} \times Q}{M_{\Phi}} > 1 \Rightarrow$  при уменьшении количества внешних, препятствующих факторов  $M_{\Phi}$  уменьшается необходимость в дополнительных усилиях по обеспечению безопасности, свойствах ТС

по понижению уровня опасности (при учёте всех аспектов охраны труда работников, технической и других видов обеспечения безопасности, должном обслуживании технических устройств (проведение своевременных осмотров, диагностик, ремонтов и т.п.)). Ось-вектор  $Z$  (греч. дзетта, для рассмотрения параметра  $\zeta$ ) – шкала запаса, резерва безопасности проекта, запроектной устойчивости. Это характеристика возможностей и потенциала системы, скрытых свойств, управления, запроектных возможностей, которые появились в ходе усовершенствований проекта (модификаций или модернизаций).

Пусть в точке  $A$   $Y=1$ , тогда при переходе ТС из состояния  $A$  к  $B$   $Y$  уменьшается (на  $AB$   $Y \rightarrow 0$ ). Переход ТС от  $B$  к  $A$  может осуществляться при  $(R_{CSC} \times R_{ISC}) \rightarrow 1$  и  $\beta \rightarrow 1$ . При изменении состояния ТС из  $A$  к  $F$   $Y$  увеличивается (например, происходит переход на полную автономность). Это можно осуществить при увеличении  $\zeta$  и (или) уменьшении  $M_\Phi$  (при тех же  $N_{PC}$  и  $N_{CB}$ ). Обобщённый анализ уравнений (3.1)-(3.2) показывает наличие трёх семейств состояний ТС:

1. *Состояние ТС при  $Y=1$* : Здесь выполняется обобщённый инвариант, который соответствует на графике гиперболе, характеризуемой показателями или потенциалами сэйфеометрики для проектного состояния ТС (без учёта влияния ЧФ ( $R_{ISC} = 1, R_{CSC} = 1$ ) и  $\beta=1$ ).

2. *Состояние ТС при  $Y<1$* : Гиперболы, расположенные ближе к началу координат, характеризуют инварианты для состояния ТС в области с недостатком безопасности. Для этих состояний  $L \times R_{CSC} \times R_{ISC} < 1, L \leq 1, R_{ISC} \leq 1, R_{CSC} < 1$  (если  $R_{ISC} < 1 \Rightarrow R_{CSC} \neq 1$ ). Такое сопоставление инварианта и  $Y$  является правдоподобным.

3. *Состояние ТС при  $Y>1$* : Здесь ТС будет иметь запас (резерв) безопасности. Такое состояние может наступить при уменьшении количества работников и повышении степени автономности, автоматизации и роботизации, т.е.  $L \in ]1; L_{MAX}]$ . Это компенсирует влияние ЧФ и недостаточность для  $R_{ISC}$  и  $R_{CSC}$ . Здесь при эксплуатации ТС начинает играть роль потенциал  $\zeta$ . В целом переход ТС от  $Y=1$  в область  $Y<1$  или  $Y>1$  в меньшей степени зависит от изменения показателей самой ТС, оборудования, устройства (только от того, что заложено проектом). Такой переход зависит от вовлечения в работу ТС и управление людей с ЧФ (наличием или отсутствием у них профессиональных качеств и адаптационных к системой работе свойств их личности), влияния ЧФ на технологию, зависит от внутренних характеристик системы (которые могли появиться уже после реализации проекта, например, дополнительное оборудование, создание условий для персонала, изменение эргономики производства), характеристик группы персонала (как коллектива в целом) и организационной структуры.

**Вывод.** По результатам проведенного анализа необходимо сделать выводы и дать рекомендации в части возможных или необходимых изменений в организации производства и труда по вопросам эксплуатации и управления ТС. Уравнение состояния ТС позволяет проанализировать как КБ уменьшает уровень безопасности в системе. В направлении вдоль  $AB$  (рис.2) параметр  $Y$  будет уменьшаться из-за уменьшения уровня КБ в организации. В этом случае уровень безопасности в системе уменьшается, а сама система становится более чувствительной к влиянию внешних факторов. Все изменения параметров, входящих в  $Y$ , определяют внутренние условия обеспечения безопасности и реагирования на внешние факторы. Эксперту важно отметить, как для разных производственных ситуаций и времени изменяется уровень безопасности и КБ. Эффективное значение КБ в организации является суперпозицией организационной и индивидуальной КБ. Отдельные коэффициенты можно определить по специализированным методикам. Для более глубокой проработки влияния ЧФ на уровень безопасности надо иметь несколько методик оценки КБ в организации. При проведении анализа эксперту будет полезно сравнить результаты (для изучения корреляций данных), полученные от применения других методик оценки [9-11]. Использование уравнений (3.1)-(3.2) позволяет, зная погрешности в определении одних величин, определить ошибки оценки для других параметров [17-19]. Применение различ-

ных подходов даёт эксперту возможность, исключая маловероятные данные приблизиться к максимально правдоподобию рассмотрению закономерностей, получить достаточную, эффективную или асимптотически эффективную оценку различных соотношений и статистике параметров для этого.

Можно оценить минимальный приемлемый уровень КБ, чтобы поддерживать безопасность систем, противодействовать внешней угрозе (вреда от несанкционированного действия), минимальные значения уровня безопасности в системе для несанкционированных действий, уточнить какое для таких задач требуется иметь минимальное, критическое количество  $N_{PC}$  с  $N_{CB}$  (или  $\Theta$ ). Эксперту целесообразно дать предложения в эксплуатационные стратегии реализации проекта, рекомендации для эксплуатации в пределах изменения  $M_{\Phi}$ , вариаций использования  $N_{PC}$  или  $N_{CB}$ , оценить как надо или можно технически повысить возможности ТС.

Гипотеза (3.1)-(3.2) позволяет получить для рассмотрения многофакторную зависимость для уровня безопасности ТС  $Q$ , сформулировать задачи для одно и двух факторных анализов, например, для функции  $Q = Q(R_{ISC}, R_{CSC})$ . В результате этого эксперт, в зависимости от своих целей и замысла анализа, может для выделенных соотношений величин провести корреляционный и дисперсионный анализ влияющих на  $Q$  факторов [19].

Применение дополнительных методов оценки технологий позволяет сделать прогноз изменения уровня безопасности ТС при изменении проектных и запроектных параметров системы. Количественная экспертная оценка с использованием гипотезы уравнения состояния ТС позволяет в ходе эксплуатации одновременно рассматривать технические параметры проекта и влияние на них ЧФ. Это предоставляет возможность построения инвариантных соотношений между разными величинами [9,10], проведения анализа имеющихся характеристик методами математической статистики [17-19].

Основная проблема приведенной в статье гипотезы заключается в том, что все сформулированные с её помощью выводы будут базироваться на допущениях и предположениях, сделанных при рассмотрении обобщённых инвариантов и связей уровня профессионализма и КБ с уровнем безопасности ТС. Этот вопрос находится в разрезе закона научной индукции [12], поэтому важно обозначать условия применения гипотезы и учитывать принцип правдоподобия (результаты последующих оценок будут эквивалентны первоначальному (исходному) анализу). Уравнения (3.1)-(3.2) базируются на свойстве инвариантности в соотношениях (1), что является аргументом того, что оценка с применением гипотезы может проводиться с максимальным правдоподобием.

Для проведения анализа важно иметь представление о взаимовлияниях технических характеристик проекта и существующего в организации уровня действия ЧФ, сформированного системой обеспечения КБ. Использование моделирования и прогнозирования состояний ТС в разрезе вспомогательных подходов и методологий, например, сэйфеометрики [8], должно опираться только на правдоподобную интерпретацию результатов анализа.

В ходе проведения рассмотрений и экспертных оценок проектов ТС, с учётом меняющейся квалификации специалистов в отрасли [11], возникают такие вопросы, например, как рассматривать инновационные технологии, можно ли доверять прежним эксплуатационным данным или надо использовать вспомогательный аналитический аппарат, новые средства сбора и обработки информации. С одной стороны, инновационные технологии могут иметь разный уровень эксплуатационного опыта, наработок. С другой стороны, совершенствуется нормативное регулирование, уточняются или ужесточаются требования безопасности к технологиям. Зачастую опытные эксперты проводят параллели, сравнения рассматриваемого проекта объекта с существующими (современными, проверенными и т.п.) конструкциями. Дополнительные рекомендации для выбора конкретных стратегий экспертной работы и регулирования безопасности, которым должны следовать разработчики и пользователи технологий, работники регулирующих органов при рас-

смотрении вопросов безопасности ТС для инновационных технологий, подтверждения безопасного их использования надо искать в аналитических материалах исследований безопасности по следующим аспектам:

- разработка общих требований к проекту, которым должна соответствовать инновационная технология;
- применение разных подходов и средств сбора данных для проектирования и анализа безопасности, включая рассмотрение результатов испытаний и экспериментов;
- результаты оценки безопасности, включая анализ безопасности, оценки инженерных аспектов, человеческого фактора и долгосрочной безопасности, проверки и валидации расчётных кодов и тестирования на этапе проектирования и лицензирования;
- информация о ходе конструирования, изготовления, внедрения, предэксплуатационных испытаний, а также квалификации вовлечённых специалистов;
- проблемы в ходе срока службы конструкции, такие как старение и деградация, в управлении отходами, решение вопроса о выводе из эксплуатации (по проекту и фактически);
- проведение в ходе анализа поиска новых данных о функционировании проекта.

Вспомогательные методы оценки могут служить для подтверждения или уточнения намерений специалистов и руководителей организации при принятии ими решений, обоснованности проведения модификаций и модернизаций проекта в условиях влияния ЧФ.

#### **Библиографический список:**

1. Safety assessment for facilities and activities. General safety requirements. International Atomic Energy Agency. IAEA safety standards series, No.GSR Part4(Rev.1).–Vienna: International Atomic Energy Agency, 2016.
2. Safety of nuclear power plants : design. Specific safety requirements. International Atomic Energy Agency. IAEA safety standards series, No. SSR-2/1 (Rev.1). – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2016.
3. SPESS F Document Preparation Profile (DPP) Version 4 dated 06 October 2022. DS537. Safety demonstration of innovative technology in power reactor designs [Электронный ресурс] // International Atomic Energy Agency. 2022. <https://www.iaea.org/sites/default/files/dpp537.pdf>
4. Норенков, И.П., Арутюнян, Н.М. Эволюционные методы в задачах выбора проектных решений. Машиностроение и компьютерные технологии. сентябрь 2007. [Электронный ресурс] <https://cyberleninka.ru/journal/n/mashinostroenie-i-kompyuternye-tehnologii?i=854303>
5. Бочков А.В. О методах качественной оценки состояния безопасности структурно-сложных систем // Надежность. – 2020. – № 20(3). – С. 34-46. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-3-34-46>
6. Бочков, А.В. О методе синтеза рисков в управлении безопасностью структурно-сложных систем// Надежность. – 2020. – № 20(1). – С. 57-67. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-1-57-67>
7. Газизов, Т.Т. Классификация методов глобальной оптимизации для решения задач безопасности / Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, часть 1, июнь 2008. – 2008. – № 2 (18). – С. 130-131.
8. Лобач, Д. И. Новые проблемы, методология и возможности сэйфеометрики / Д. И. Лобач // Промышленная безопасность. – 2023. – № 01. – С. 34-36. ISSN 2958-4523.
9. Лобач, Д.И. О развитии экспертных возможностей для рассмотрения проектов оборудования и технологических решений / Д. И. Лобач // Системный анализ и прикладная информатика. – 2023. – № 2. – С. 38-41. <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2023-2-38-41>
10. Лобач, Д.И. О развитии подходов системной оценки безопасности при проектировании технических систем / Д.И.Лобач // Онтология проектирования. – 2023. – Т.13. – №4(50). – С.615-624. <https://doi.org/10.18287/2223-9537-2023-13-4-615-624>.
11. Ковалев, М. М. Образование для цифровой экономики / М. М. Ковалев // Цифровая трансформация. – 2018. – № 1 (2). – С. 37–42.
12. Человеческий фактор и безопасность ядерных установок. Материалы Международной конференции МК-2000 / Москва, Обнинск : ОНИЦ «Прогноз», 2001.
13. Абрамова, В.Н. Организационная психология, организационная культура и культура безопасности в атомной энергетике. – Москва, Обнинск : ИГ – СОЦИН, 2009.
14. Safety culture, Safety series, No.75-INSAG-4, a report by the International Nuclear Safety Advisory Group. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 1991.

15. Examples of safety culture practices, Safety reports series, No.1. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 1997.
16. Key practical issues in strengthening safety culture, Safety series, No. INSAG-15, a report by the International Nuclear Safety Advisory Group. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2002.
17. Hudson, D.J. Statistics. Lectures on Elementary Statistics and Probability, Geneva, 1964,.
18. Тейлор, Дж. Введение в теорию ошибок. – М., 1985.
19. Колде, Я.К. Практикум по теории вероятности и математической статистике. – М., 1991.

#### References:

1. Safety assessment for facilities and activities. General safety requirements. International Atomic Energy Agency. IAEA safety standards series, GSR Part4 (Rev.1).Vienna:International Atomic Energy Agency; 2016.
2. Safety of nuclear power plants : design. Specific safety requirements. International Atomic Energy Agency. IAEA safety standards series, no. SSR-2/1 (Rev. 1) . Vienna: International Atomic Energy Agency; 2016.
3. SPSS F Document Preparation Profile (DPP) Version 4 dated 06 October 2022. DS537. Safety demonstration of innovative technology in power reactor designs [Electronic resource]. International Atomic Energy Agency, 2022. <https://www.iaea.org/sites/default/files/dpp537.pdf>
4. Norenkov I.P., Harutyunyan N.M. Evolutionary methods in the problems of choosing design solutions. Mechanical engineering and computer technology, september 2007 [Electronic resource]. <https://cyberleninka.ru/journal/n/mashinostroenie-i-kompyuternye-tehnologii?i=854303> (In Russ.)
5. Bochkov A.V. On the methods of qualitative estimation of the safety state of structurally complex systems. Dependability. 2020; 20(3): 34-46. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-3-34-46> (In Russ.)
6. Bochkov A.V. On the method of risk synthesis in the safety management of structurally complex systems. Dependability. 2020; 20(1): 57-67. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-1-57-67> (In Russ.)
7. Gázizov T.T. Global optimization method classification on security problems solution. Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. 2008; 2(18): 130-131. (In Russ.)
8. Lobach D.J. New problems, methodology and possibilities of Safeometrics . Promyšlennaâ bezopasnost'. 2023; 01: 34-36. ISSN 2958-4523. (In Russ.)
9. Lobach D.J. About development of expert possibilities for consideration of equipment projects and technological decisions . System analysis and applied information science. 2023; 02: 38-41. <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2023-2-38-41> (In Russ.)
10. Lobach D.J. On the development of approaches to system safety assessment in the design of technical systems. Ontology of designing. 2023; 13(4): 615-624. <https://doi.org/10.18287/2223-9537-2023-13-4-615-624>. (In Russ.)
11. Kovalev M. M. Education for the Digital Economy. Digital transformation. 2018; 1(2): 37–42. (In Russ.)
12. The human factor and the safety of nuclear installations. Materials of the International conference MK-2000 . Moscow, Obninsk : ONITS "Forecast"; 2001. (In Russ.)
13. Abramova V.N. Organizational psychology, organizational culture and safety culture in atomic energy . Moscow, Obninsk : IG – SOCIN; 2009. (In Russ.)
14. Safety culture, Safety series, No.75-INSAG-4, a report by the International Nuclear Safety Advisory Group. Vienna: International Atomic Energy Agency; 1991.
15. Examples of safety culture practices, Safety reports series, No.1. Vienna: International Atomic Energy Agency; 1997.
16. Key practical issues in strengthening safety culture, Safety series, No.INSAG-15, a report by the International Nuclear Safety Advisory Group. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2002.
17. Hudson D.J. Statistics. Lectures on Elementary Statistics and Probability, Geneva, 1964 (In Russ.).
18. Taylor J. Introduction to the theory of errors. M.; 1985. (In Russ.)
19. Kolde Ya.K. Practicum on probability theory and mathematical statistics. M.; 1991. (In Russ.)

#### Сведения об авторе:

Лобач Дмитрий Иосифович, кандидат технических наук, гражданский государственный служащий в отставке; [lobachd@yandex.ru](mailto:lobachd@yandex.ru) ORCID: 0000-0001-5512-0032 ResearcherID: HKN-7220-2023

#### Information about the author:

Dmitry J. Lobach, Cand. Sci. (Eng), Retired Civil Servant; [lobachd@yandex.ru](mailto:lobachd@yandex.ru) ORCID: 0000-0001-5512-0032 ResearcherID: HKN-7220-2023

#### Конфликт интересов/Conflict of interest.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов/The author declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/ Received 18.06.2024.

Одобрена после рецензирования / Revided 25.07.2024.

Принята в печать /Accepted for publication 25.10.2024.