

**О некоторых проблемах анализа и оценки влияния человеческого фактора  
на безопасность технических систем**

**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.** Целью исследования является формулировка и описание случаев, при которых возможно проведение корреляционного и других видов анализа для некоторых ситуаций количественной оценки влияния человеческого фактора на безопасность технических систем с применением правдоподобных закономерностей и статистических распределений; рассмотреть проблемы и вопросы достоверности, возникающие в ходе решения таких задач. **Метод.** Приведены случаи возможного применения распределения хи-квадрат для оценки влияния человеческого фактора на безопасность систем при участии людей в производственных операциях. **Результат.** Для анализа и оценок предложен подход применения критерия согласия хи-квадрат, даны пояснения и рекомендации по реализации экспертных исследований в этой области. **Вывод.** Рассмотрены условия и описаны возможности для проведения анализа при оценке влияния человеческого фактора на функционирование технических систем.

**Ключевые слова:** уровень и оценка безопасности, корреляционный анализ, человеческий фактор, прогноз, сэйфеометрика, культура безопасности, распределение хи-квадрат

**Для цитирования:** Д.И. Лобач. О некоторых проблемах анализа и оценки влияния человеческого фактора на безопасность технических систем. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024;51(2):91-100. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-2-91-100

**On some problems of analysis and assessment of the influence of the human factor on the  
safety of technical systems**

**D.I. Lobach**

Department on Nuclear and Radiation Safety  
of Ministry on Emergency Situations of the Republic of Belarus,  
16 Bersona St., Minsk 220030, Belarus

**Abstract. Objective.** The purpose of the theoretical research of the article is to formulate and describe cases in which it is possible to conduct correlation and other types of analysis for some situations to quantify the impact of the human factor on safety of technical systems using plausible patterns and statistical distributions, to consider some problems and reliability issues that arise in the course of solving such problems. **Method.** Some cases of possible application of the chi-square distribution to assess the impact of the human factor on safety of systems with the participation of people in technological operations are presented. **Result.** Approach on using of agreement criterium of chi-square, explanations and recommendations on the implementation of expert research in this area are offered for analysis and assessment. **Conclusion.** The article considers the conditions and describes the possibilities for carrying out some types of analysis in assessing the impact of the human factor on the functioning of technical systems.

**Keywords:** safety level and assessment, correlation analysis, human factor, prognosis, safeometrics, safety culture, chi-squared distribution

**For citation:** D.I. Lobach. On some problems of analysis and assessment of the influence of the human factor on the safety of technical systems. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024;51(2):91-100. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-2-91-100

**Введение.** При рассмотрении возможностей и рисков случаев неисправностей и аварийных ситуаций в технических системах (далее – ТС) часто при проведении оценок опираются на расчёты и статистические распределения отказов устройств (из теории надёжности) без учёта функционирования проекта ТС во взаимодействии с его персоналом. Осуществление такого анализа часто предусмотрено требованиями нормативной и технологической документации, где нет указаний о необходимости оценки действий людей, т.е. человеческого фактора (далее – ЧФ). В этой ситуации влияние ЧФ может быть учтено в погрешностях проведения оценок, как элемент поля внешних условий в ходе наблюдений за ТС. Тем не менее, оценка влияния ЧФ важна для принятия управленческих решений при эксплуатации ТС.

В ходе изучения вопросов безопасности ТС эксперт в большинстве случаев имеет дело с двумя ситуациями: когда неблагоприятный эффект ещё не случился, либо отказ оборудования или отклонение от проектного функционирования уже произошло. Проведение анализа ожидаемых и реальных результатов для правдоподобного прогнозирования влияния ЧФ на производственные системы часто ограничено временем рассмотрения, количеством наблюдений, отсутствием достоверной статистики событий. В зависимости от конкретной ситуации влияние ЧФ может произойти в ходе единичных зарегистрированных (наблюдаемых) случаев либо при накоплении результатов большого количества действий (для многочисленных событий).

**Постановка задачи.** Правдоподобие или максимальное правдоподобие анализа научного исследования заключается в определении такого метода оценки, когда ошибка или отклонение от эмпирических значений (рассмотрений) в ходе применения одних аналитических инструментов анализа оказывается наименьшей, нежели при использовании других методов и подходов [1]. При рассмотрении состояний исследуемых технологий и ТС для получения детерминированных результатов целесообразно выделять независимые факторы и зависимости [2,3]. В этом случае разные эксперты без сомнений смогут валидировать полученные в ходе анализа данные.

Для получения максимально правдоподобных данных о влиянии ЧФ на безопасность необходимо использовать анализ многочисленных подробных отчётов, где должно быть предусмотрено предоставление показателей для таких оценок (например, в [1] приводится пример, как в течение 20 лет на основании педантичных данных отчётов военных собирались сведения о количестве кавалеристов прусской армии, погибших в результате падения под ними коня). Подбор и использование подходящих статистических предположений и моделей, проведение аналогий, является целью разработки вспомогательных концепций [3]. Круг проблематик, связанных с оценкой влияния ЧФ, достаточно широко рассмотрен для многих отраслей, например, атомной промышленности [4,5] (включая документы международных организаций [6,7]), информационных технологий [8,9] и др.

**Методы исследования.** Основные элементы методологии анализа и оценки влияния ЧФ на безопасность ТС и сопутствующие этому вопросу проблемы. К проведению исследований вопроса влияния ЧФ могут привлекаться как опытные в этом направлении эксперты, так и специалисты, осуществляющие такие оценки время от времени. Компетентные исследователи будут иметь в своём арсенале проверенные методики и наработки, а менее опытные аналитики накапливают знания и умения в ходе текущих работ. Разовые эксперты часто сами проводят исследование или же им предоставляют для обработки данные из заинтересованной организации. Они систематизируют отчёты и анализируют накопленную статистику по влиянию ЧФ. Изучение влияния ЧФ может предусматриваться рекомендациями международных организаций [6,7], предписываться

для требований нормативных документов [10]. Проявление ЧФ можно оценивать через фиксацию конкретных случаев отклонений в действиях работников или в результатах производственных операций (действиях ТС, качестве и (или) количестве продукции и т.п.) в сериях наблюдаемых явлений. Также учитываем, что влияние ЧФ будет осуществляться опосредованно через реализацию в производственном процессе организации конкретного типа или уровня профессионализма специалистов и проявление разных видов культуры безопасности (далее – КБ) – индивидуальной или организационной (групповой) [11-13]. При рассмотрении случаев проявления ЧФ будем полагать, что возникновение одного ЧФ – случайное событие (в настоящей статье не рассматриваются неслучайные (намеренные) несанкционированные действия).

С точки зрения математической статистики все исследователи могут делать ошибки первого (отвергается правильная гипотеза) или второго (принимается неправильная гипотеза) рода [14]. Проверяемая гипотеза – это альтернативная гипотеза. Эксперт в ходе сбора данных и проведения анализа может балансировать между ошибками первого и второго рода для того, чтобы использовать наиболее правдоподобный подход и получить соответствующий результат. Спонтанное оперативное реагирование на случаи влияния ЧФ, принятие решений без проведения оценок и анализа событий, без сбора статистических данных часто является причиной ошибок первого рода. Статистическая гипотеза проверяется статистическими методами. Гипотезу проверяют на основании выборки, полученной из генеральной совокупности событий. Из-за случайности выборки в результате проверки могут возникать ошибки, что является причиной неправильных решений. По одним выборкам принимается правильное решение, а по другим – неправильное. Проверка гипотез позволяет оценить неопределённость вывода эксперта. Например, решение принимается на основании значений некоторой выборки (статистики данных) с двумя непересекающимися множествами событий. Одно со значениями, при которых гипотеза принимается – область принятия гипотезы (допустимая область). Второе подмножество, когда гипотеза отвергается или принимается альтернативная гипотеза – критическая область. Эксперту надо уменьшить вероятность принятия неправильных решений. Уменьшение вероятности ошибки первого рода увеличивает вероятность ошибки второго рода и наоборот. Эксперт может исследовать функции рассматриваемых величин или вероятности для правильного и неправильного решения на минимум с целью выбора наилучшей статистики анализа (подхода). Основные элементы анализа базируются на применении аппарата математической статистики. Развитие дополнительных подходов или прикладных разновидностей (методик, практических рекомендаций) является расширением экспертных возможностей, например, как в концепции сэйфеометрики [2,3,15]. Принимая определённую гипотезу, надо указывать, что выводы и рекомендации будут основываться на конкретных подходах, исходить из условий рассмотрения и получения данных. Применение иных методов и концепций могут дать другие результаты и поводы для принятия других управленческих решений.

В начале проведения анализа и оценки влияния ЧФ эксперту надо определить какие данные для него являются исходными. К таким можно отнести следующие сведения: детерминированные характеристики проекта ТС, его параметры и суперпозиции параметров (например, параметры и потенциалы сэйфеометрики [15]), детерминированные величины, полученные в ходе использования аналитических методик (например,  $R_{CSC}$  (показатель организационной (групповой) культуры безопасности и  $R_{ISC}$  (показатель индивидуальной (персональной) культуры безопасности)), функции распределения  $p(x_i)$  или плотности вероятности  $p(x)$  для событий с влиянием ЧФ, их параметры, одно или многофакторные эмпирические и полуэмпирические зависимости (например,  $p(R_{CSC})$ ,  $p(R_{ISC})$ ,  $p(R_{CSC}, R_{ISC})$ , для уровня безопасности  $Q = Q(R_{ISC}, R_{CSC})$ , а также число событий, операций, действий и т.п.  $x$  или  $x_i$  при полном их количестве  $N$ , вероятности благоприятного исхода  $\Psi$ , а неблагоприятного  $\Phi = 1 - \Psi$ ). В качестве рабочих подходов, концепций

и методик эксперт может использовать любые удобные способы проведения анализа и оценок (распределения математической статистики, инварианты, уравнения состояния и др.), которые приводят к правдоподобным сравнениям и результатам, а маловероятные данные необходимо отделять для их пояснения или исключать [2,15].

Одним из элементов анализа статистических распределений (например, биномиального, распределения Пуассона или Гаусса) является определение и уточнение их характеристик (среднее значение величины (математическое ожидание), дисперсия, асимметрия). Эксперту следует искать практические причины и проблемы при отклонении апостериорных параметров от априорных, для чего можно проводить возможные аналогии и сравнения для явлений, *DATA MINING*.

Рассмотренные экспертом функции распределения описывают генеральные совокупности, т.е. гипотетический полный набор всех возможных значений, которые может принимать случайная величина. Исследователь всегда имеет дело с выборкой – конечным числом значений случайной величины. В любой конечной серии оценок нельзя определить точно ни истинное среднее значение, ни дисперсию, ни другие параметры функции распределения случайной величины.

Цель статистического анализа эксперта – найти методы, с помощью которых можно было бы получить оценки неизвестных параметров генеральной совокупности и их погрешности, которые в свою очередь являются случайными величинами.

На практике в большинстве случаев для оценки истинного среднего значения случайной величины используют среднее арифметическое при условии, что эта величина распределена по нормальному (или близкому к нему) закону. С увеличением числа оценок среднее значение всё более приближается к математическому ожиданию. Выборочное среднее значение случайной величины при большем количестве наблюдений будет являться значительно более точной оценкой математического ожидания, чем отдельное значение случайной величины из-за меньшего разброса относительно истинного среднего. Точность оценки возрастает пропорционально  $\sqrt{N}$ , где  $N$  - число независимых событий [1,14]. Такая оценка при наблюдении подходит для предположения о независимости отдельных случаев проявления влияния ЧФ.

Оценка дисперсии имеет смысл, если эксперт предполагает определённый тип распределения случайной величины. Для распределения Пуассона относительная погрешность уменьшается, как  $1/\sqrt{x}$ , если количество  $x$  событий с ЧФ увеличивается (например, оценка проводится более длительное время). Для удобства анализа дискретных событий с ЧФ можно использовать распределение Гаусса (непрерывное), если распределение Пуассона (дискретное) не соответствует описанию рассматриваемых экспертом явлений и его предположений (ожиданий). Гауссово распределение определяется двумя параметрами: средним значением величины  $\mu$  и шириной распределения на полувысоте  $\delta$ , а распределение Пуассона определяется только параметром среднего значения  $\mu$  (можно использовать при построении гистограмм для событий с ЧФ или для рассмотрения КБ). Распределение Пуассона, для которого среднее число событий  $x$  велико, дискретная природа явлений становится менее существенной, и такое распределение хорошо аппроксимируется для удобства рассмотрения функцией Гаусса с теми же средним значением и шириной (гауссова аппроксимация распределения Пуассона).

Это аналогично соответствующей аппроксимации биномиального распределения, когда параметр числа наблюдений (оценки)  $N$  велик. Распределение Гаусса является хорошим приближением для описания широкого круга статистических процессов, в т.ч. влияния ЧФ. При количестве наблюдений событий с ЧФ от 5 и выше распределение Пуассона хорошо аппроксимирует нормальное распределение [1]. Частный случай распределения Гаусса с одним параметром можно получить предельным переходом (при  $\mu \rightarrow \infty$ ) из распределения Пуассона. При росте  $\mu$  относительная ширина распределения Пуассона уменьшается ( $\delta = 1/\sqrt{\mu}$ ). Для больших  $x$  в этом случае асимметрия распре-

деления Пуассона также стремится к нулю. Можно получить функцию распределения событий с ЧФ в виде  $p(x) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi\mu}}\right) \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\mu}\right]$ , где  $x$  – непрерывная случайная величина;  $p(x)$  имеет смысл плотности вероятности. В представлении распределения Гаусса  $p(u) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\right) \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right)$ , где  $u = \frac{x-\mu}{\sigma}$  его среднее значение равно нулю, а стандартное отклонение – единице ( $\sigma$  – дисперсия). В таком виде эксперту удобно рассматривать априорные гипотезы об отклонении рассматриваемой величины от интересующего значения.

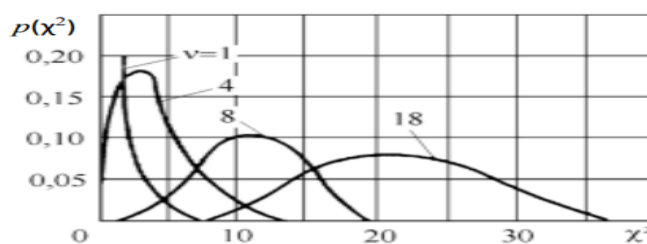
Не во всех случаях эксперт может провести воспроизведение или повторение случаев влияния ЧФ. Однако, если такое возможно, а оценка проводится для улучшения эксплуатационных процессов, то можно использовать гипотезу о законе распределения (критерии согласия)  $\chi^2$  (хи-квадрат). Это распределение находит широкое применение при проверке согласия экспериментальных данных с некоторой априорной гипотезой, получении доверительных интервалов для статистических параметров, проверке независимости переменных. Для применения распределения  $\chi^2$  эксперту необходимо иметь априорную статистику влияния ЧФ и далее провести наблюдение за некоторым количеством  $v$  случайных величин  $x_i$ , каждая из которых распределена по нормальному закону со своим математическим ожиданием  $\mu_i$  и дисперсией  $\sigma_i^2$ . Здесь рассматривается сумма квадратов нормированных значений случайных величин  $U_i^2 = \frac{(x_i - \mu_i)^2}{\sigma_i^2}$  (новая случайная величина, которая всегда положительна):

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^v U_i^2 = \sum_{i=1}^v \frac{(x_i - \mu_i)^2}{\sigma_i^2} \quad (1)$$

Количество наблюдений событий с ЧФ, проведенных экспертом,  $v$  называют числом степеней свободы. Величины  $U_i$  нормированы и имеют одно и то же среднее значение, равное нулю, и равную единице дисперсию, поэтому распределение плотности вероятности случайной величины  $\chi^2$  зависит только от  $v$ . Из математической статистики известно, что плотность распределения вероятности для  $\chi^2$  [1]:

$$p(\chi^2) = \frac{1}{2^{\frac{v}{2}} \left(\frac{v}{2} - 1\right)!} (\chi^2)^{\left(\frac{v}{2} - 1\right)} \exp\left[-\left(\frac{\chi^2}{2}\right)\right], \quad 0 < \chi^2 < \infty. \quad (2)$$

На рис. 1 показано, как значения  $v$  соответствуют количеству случаев  $x_i$  (видно, как для меньших значений  $v$  гистограммы распределения уже, чем для больших).



**Рис.1. Схематичный вид распределения  $\chi^2$  для различных значений степени свободы  $v$**

**Fig.1. A schematic view of the distribution  $\chi^2$  for different values of the degree  $v$**

Чем больше  $v$  (наблюдений, проверок, операций, опытов и других случаев влияния ЧФ), тем больше априорных событий может быть описано предположением эксперта. Большому значению  $v$  будет соответствовать меньший максимум для  $p(\chi^2)$ .

Среднее значение (математическое ожидание)  $\chi^2$  равно числу степеней свободы  $M(\chi^2) = v$ , а дисперсия  $2v$ . Для применения важно распределение накопленной вероятности  $p(\chi^2 < \chi_{\Gamma}^2) = \int_0^{\chi_{\Gamma}^2} p(\chi^2) d\chi^2$  (в соответствии с критерием согласия (гипотезой)  $\chi_{\Gamma}^2$ ). В руководствах по статистике приводятся подробные таблицы  $p(\chi^2 < \chi_{\Gamma}^2)$  для различных  $v$  с учётом доверительной вероятности, выбранной экспертом.

Одной из целей анализа и оценки эксперта является тщательное рассмотрение закона распределения события с ЧФ. Точный закон такого распределения в эксперименте определить невозможно, поскольку для этого понадобилось бы бесконечное число наблюдений событий с ЧФ для получения генеральной совокупности, а из конечного числа случаев определяется лишь конечная выборка. Поэтому исследование эксперта не доказывает правильность его гипотезы, а лишь позволяет сделать заключение о непротиворечивости её с эмпирическими данными. Профессионализм работников никак не зависит от  $N$  или  $x$ , но его оценка будет точнее при увеличении числа наблюдений, событий и т.п.. Величины  $N$  или  $x$  будут эмпирическими факторами обучения специалистов на своём опыте и ошибках. Также и показатель организационной КБ в группе не возникает спонтанно. Он является совокупным продуктом компетентности работников, их индивидуальной КБ.

Пусть с использованием критерия согласия  $\chi^2$  требуется проверить гипотезу о том, что случайная величина числа событий с влиянием ЧФ  $x$  подчиняется закону распределения  $p(x)$ . Рассмотрим эксперимент, в котором получено  $N$  независимых наблюдений  $x$ . Разобьем всю область изменений  $x$  на  $l$  интервалов  $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_l$  и подсчитаем количество значений  $x$ , попавших в каждый из интервалов. Поскольку теоретическое распределение (гипотеза) предполагается известным, можно рассчитать теоретическое число значений  $x$  в  $i$ -м интервале  $Np_i$ , где  $p_i$  – вероятность попадания случайной величины в  $i$ -й интервал. Если эмпирические частоты  $n_i$  сильно отличаются от теоретических (априорные)  $Np_i$ , то предположение о согласии гипотезы эксперта и эксперимента (наблюдений) следует отвергнуть. Критерий  $\chi^2$  дает возможность количественно выразить эту степень согласия.

Пусть проверяемая гипотеза  $p(x)$  верна. Тогда случайная величина  $n_i$  подчиняется, например, биномиальному распределению с математическим ожиданием  $Np_i$  и дисперсией  $Np_i(1 - p_i)$ . При  $N \rightarrow \infty$  сумма  $\sum_{i=1}^l \frac{(n_i - Np_i)^2}{Np_i}$  имеет распределение  $\chi^2$  с  $\nu = l - 1$  степеней свободы независимо от закона распределения  $x$ .

В качестве меры расхождения между гипотезой ( $Np_i$ ) и экспериментом ( $n_i$ ) используется критерий

$$\chi_{\Gamma}^2 = \sum_{i=1}^l \frac{(n_i - Np_i)^2}{Np_i}. \quad (3)$$

Чем меньше различаются эмпирические и априорные частоты, тем меньше значение  $\chi_{\Gamma}^2$ . Распределение  $\chi_{\Gamma}^2$  при  $N \rightarrow \infty$  стремится к распределению  $\chi^2$  (1). Здесь применяют критерий согласия  $\chi_{\Gamma}^2$  следующим образом: рассчитав  $\chi_{\Gamma}^2$  и задавшись доверительной вероятностью корреляции  $\alpha$ , находят по таблицам значение  $\chi_{\alpha, \nu}^2$  для  $\nu = l - 1$ . Если при выбранном экспертом  $\alpha$   $\chi_{\Gamma}^2 > \chi_{\alpha, \nu}^2$ , то гипотеза и эксперимент расходятся, если  $\chi_{\Gamma}^2 < \chi_{\alpha, \nu}^2$  – согласуются. Хотя распределение  $\chi_{\Gamma}^2$  описывается формулой (2) только при  $N \rightarrow \infty$ , на практике вполне достаточно, чтобы  $n_i$  было больше 5. В противном случае увеличивают интервалы  $\Delta_i$  (из теории математической статистики равенство интервалов при построении критерия  $\chi_{\Gamma}^2$  не требуется) [1]. Фактически для применения критерия  $\chi^2$  для  $N$  независимых событий с проявлением ЧФ надо из экспериментальных (апостериорных) и теоретических (априорных) значений вероятностей результатов вычислить случайную величину  $\chi^2$ :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(p_i^3 - p_i^T)^2}{p_i^T}, \quad (4)$$

где  $k$  – число принимаемых значений  $N$ , т.е.  $k = N_{\max} - N_{\min} + 1$ .

Полученную величину  $\chi^2$  следует сравнить с критическим значением  $\chi_{\Gamma}^2$  ( $\chi^2 \geq \chi_{\Gamma}^2$ ), которое находят для разного числа степеней свободы  $\nu = k - 1$  и предположения

о вероятности справедливости гипотезы (параметры для гипотезы определяют из таблиц математической статистики [1]). Например, для распределения Пуассона среднее число событий определяется по формуле  $\bar{N} = \frac{\sum_{N_{\min}}^{N_{\max}} N_i}{k}$ , где  $N_i$  – количество событий, которое произошло  $n_i$  раз. Экспериментальное (апостериорное) значение вероятности  $P_i^{\mathcal{J}}$  наблюдения событий  $N_i$  можно оценить по формуле  $P_i^{\mathcal{J}} = \frac{n_i}{N}$ . Теоретическое (априорное) значение вероятности  $P_i^T$  наблюдения событий  $N_i$  получим из выражения  $P_i^T = \frac{(\bar{N})^{N_i}}{N_i!} e^{-\bar{N}}$ .

Величина  $P_i^T$  может быть рассмотрена, как расчётная (гипотетическая) на основании количества событий  $N$ , вероятности благоприятного исхода  $\Psi$  или неблагоприятного  $\Phi$ . Значение  $P_i^{\mathcal{J}}$  может быть получено на основании количества событий, операций, действий и т.п.  $x$  или  $x_i$  при полном их количестве  $N$ , а также с учётом КБ  $R_{ISC}$  и  $N$ .

Если рассматривается две гипотезы (нулевая и конкурирующая), то для применения критериев сравнения (например,  $\chi^2$ ,  $t$  Стьюдента) надо установить уровень значимости для принятия гипотезы. Эксперт должен иметь в наличии несколько исходов рассмотрения (могут быть справедливы та или иная гипотеза, но они могут как допускать результат, так и отвергать его). В зависимости от того к какому выводу он придёт, можно совершить ошибки первого или второго рода. Эксперт при рассмотрении данных в ходе анализа также может полагать (или обосновать), что если некоторые величины могут являться подозрительными (сомнительными, невероятными), то к ним надо применить критерий Шовене (предварительно установив его) для отбрасывания неподходящих результатов [16]. В случае при возникновении маловероятного события его следует рассмотреть отдельно, эксперт даже может признать его значимым, но выходящим за рамки критерия Шовене (гипотеза справедлива, но критерий значимости отвергает её) [1].

При исследовании уровня безопасности ТС и анализа количественных величин в этой области можно оценить значения нескольких признаков и поэтому получить как одномерные, так и многомерные выборки данных. Смысл обработки данных – установить связи между признаками, которые для случайных величин могут носить статистический характер. Полученные при этом функциональные зависимости будут корреляциями, которые эксперт может использовать в ходе своего анализа (как *know-how*, *DATA MINING*). Многомерные функциональные зависимости, например, для уровня безопасности  $Q$  [2,3], позволяют строить корреляционные таблицы данных, проводить одно, двух и многофакторные процедуры дисперсионного анализа. Для наглядного представления результатов анализа можно использовать гистограммы априорных и апостериорных распределений величин.

**Обсуждение результатов.** Для анализа влияния ЧФ при помощи подходящих статистик следует собрать или накопить исходные данные и сформулировать гипотезу о статистическом распределении случаев влияния ЧФ. Априорному распределению надо сопоставить параметры, например, среднее значение, дисперсия, асимметрия. Если целью эксперта является сравнение результатов данных, полученных от разных методик, то необходимо конкретизировать и сформулировать в разрезе проводимой оценки смысл такого анализа. При построении экспертом апостериорного распределения необходимо методами математической статистики провести анализ исходных и конечных зависимостей и их параметров, расхождения изученных характеристик.

Обычно, перед проведением эксперимента уже сформулирована одна или несколько априорных гипотез, полученных из теории или в результате предыдущих экспериментов (часто косвенных). Поскольку рассматриваемое событие – случайное, то даже если закон его распределения точно известен, ввиду ограниченности выборки будут наблюдаться отклонения результатов наблюдения от вычисленного по распределению. Иногда надо рассмотреть вопрос: случайны ли наблюдаемые отклонения интересующих событий от предсказываемых теорией данных или имеются систематические расхождения, т.е. теория

неверна. Эксперт может использовать критерий согласия, т.е. критерий проверки гипотезы о предполагаемом распределении. С его помощью можно установить (в предположении с установленной доверительной вероятностью) согласуются экспериментальные наблюдения с априорной гипотезой или нет. Доверительную вероятность следует принять исходя из условий анализа или близкой к единице.

Эксперту следует иметь ввиду, что всякое рассмотрение влияния ЧФ на ТС всегда производится на фоне распределений отказов в ТС по техническим причинам. Исходные данные для оценки таких вопросов тоже подлежат, как минимум, описанию и постулированию, либо могут быть рассмотрены отдельно. В основе анализа отказов и надёжности во многих случаях пользуются правдоподобными допущениями, которые могут быть описаны функцией распределения Вейбулла [17], а для структурного описания работы ТС используется теорема Байеса из теории вероятностей [17, 18]. Если эксперт применяет такой подход, то в качестве априорной зависимости можно рассмотреть распределение отказов без влияния ЧФ, а эмпирические закономерности от действия ЧФ могут быть взяты, как апостериорные. Предположения и применение априорных зависимостей могут проводиться совместно с подходящим для анализа (с применением подходов вероятностного анализа безопасности, исходя из имеющихся данных) ранжированием ТС и оборудования по влиянию на безопасность (например, по показателям Фусселя – Веселя, Бирнбаума, коэффициента повышения/снижения риска и т.п. [19]).

Возможен ли эксперимент для оценки влияния ЧФ? Основная проблема тут заключается в фиксировании и (или) формировании начальных условий. Само проявление ЧФ стимулирует работу эксперта над ошибками даже при рассмотрении серии событий. Факты ЧФ могут быть непохожи, иметь разные свойства. Другие проблемы будут заключаться в подходах интерпретации полученных данных, корреляции результатов от разных методик, подходов оценки. Фактически можно получить построенную (гипотезу) и экспериментальную (апостериорную) модели явления. Для уточнения расхождений моделей эксперт использует гипотезы корреляций данных. В этом разрезе необходимо предварительно продумать вопросы о том, как эксперимент может отличаться от теории явления (гипотезы), какое может быть критическое отклонение или какие есть (или появились в ходе анализа) признаки правдоподобия для изучаемого случая.

Зачастую эксперимент для рассмотрения (наблюдения) влияния ЧФ является следствием (результатом) случая или проявления конкретного события для ТС, либо расследования происшествия с ЧФ, например, при полном количестве событий  $N$  в  $x$  или  $x_i$  случаях произошел сбой (событие с ЧФ), что будет соответствовать определению значения  $P_i^?$ . Практически всегда это будет какое-нибудь негативное проявление ЧФ, может быть даже несчастный случай. Эксперт может рассмотреть, как технология эксплуатируется разными работниками (например, при проведении апробации, «обкатки» технологии с участием разных сотрудников).

Для случаев исполнения некачественных действий или производства бракованной продукции, а также возможности аварии или сбоя на одинаковом оборудовании необходимо накопить сведения из эксперимента. Таблицы математической статистики [1,14,16] при  $N < 4$  не всегда содержат удовлетворяющие эксперта (подходящие) критерии соответствия и значения вероятности справедливости гипотезы или доверительной вероятности корреляции. Полученные при этом результаты могут быть сомнительными и у эксперта будет большой риск сделать ошибку второго рода.

**Вывод.** Для расширения возможностей экспертных оценок и анализа при рассмотрении проектов оборудования и технологических решений с использованием количественной оценки их параметров требуются сбор и обработка или подготовка дополнительных данных из проектов, которые характеризуют системы и комплексы, внешние условия реализации проекта ТС (включая требования к влиянию ЧФ на функционирование проекта). Эти данные должны быть представлены (подготовлены) либо проектантами



на основании требований или рекомендаций, либо самими экспертами, как *know-how* (эксклюзивные знания эксперта, например, при конкуренции экспертных аналитических подходов для их заказчиков, поскольку экспертиза является дорогостоящей деятельностью).

Более углубленная и всесторонняя количественная оценка влияния ЧФ на ТС является методическим инструментом для эффективного управления производством. Применение специальных прикладных методик оценки действия ЧФ целесообразно объединять для проведения системного и всестороннего анализа, для рассмотрения вопросов безопасности ТС в комплексе с другими вопросами, в разрезе иных аналитических направлений. Использование разных подходов и методологий (для верификации или валидации) должно быть адаптировано для решения конкретных задач, например, как предлагается в рамках сэйфеометрики [2,3], чтобы применяемые модели, эмпирические подходы, инварианты были правдоподобными и детерминированными. На основании закона научной индукции полученные с их помощью результаты (*DATA MINING*, апостериорные знания) будут иметь такие же свойства [1].

#### Библиографический список:

1. Hudson, D.J. Statistics. Lectures on Elementary Statistics and Probability, Geneva, 1964, Худсон Д. Статистика для физиков. Лекции по теории вероятностей и элементарной статистике. – М:Мир, 1970.
2. 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>
3. Лобач, Д.И. Новые проблемы, методология и возможности сэйфеометрики / Д.И. Лобач // Промышленная безопасность. – 2023. – № 01. – С. 34-36. ISSN 2958-4523.
4. Человеческий фактор и безопасность ядерных установок. Материалы Международной конференции МК-2000 / Москва, Обнинск : ОНИЦ «Прогноз», 2001.
5. Абрамова, В.Н. Организационная психология, организационная культура и культура безопасности в атомной энергетике. – Москва, Обнинск : ИГ – СОЦИН, 2009.
6. Human factors engineering aspects of instrumentation and control system design, Series: IAEA nuclear energy series, No. NR-T-2.12. – Vienna: International atomic energy agency, 2021.
7. Human factors engineering in the design of nuclear power plants, Series: IAEA safety standards series, No. SSG-51. – Vienna: International atomic energy agency, 2019.
8. Акимова, Г.П., Соловьев А.В., Пашкина Е.В. Методологический подход к определению влияния человеческого фактора на работоспособность информационных систем// Труды ИСА РАН. – 2007. – Т.29. – С.102-112.
9. Соловьев, А.В. Моделирование влияния человеческого фактора на функционирование информационных систем / А.В.Соловьев // Труды ИСА РАН. – 2021. – Т.71 (1). – С.34-43.
10. Regulatory oversight of human and organizational factors for safety of nuclear installations, Series: IAEA TECDOC series, No. 1846. – Vienna: International atomic energy agency, 2018.
11. Safety culture, Safety series, No.75-INSAG-4, a report by the International Nuclear Safety Advisory Group. – Vienna: International atomic energy agency, 1991.
12. 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.
13. Examples of safety culture practices, Safety reports series, No.1. Vienna: International atomic energy agency, 1997.
14. Колде, Я.К. Практикум по теории вероятности и математической статистике. – М., 1991.
15. 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>.
16. Тейлор, Дж. Введение в теорию ошибок. – М., 1985.
17. Буляница А.Л. Оценка вероятности ошибочной интерпретации результатов ПЦР-анализа. Ч.1. Отказы технических устройств//Научное приборостроение. - 2023. – Т.33. – № 2. – С.49-61.
18. Альбицкая, Е.С. Методы количественной оценки кибербезопасности на АЭС. 1 часть / Е.С. Альбицкая // Атомная техника за рубежом. – 2019. – №2. – С.19-25.
19. Анализ причин и последствий аварии на АЭС Fukushima как фактор предотвращения тяжелых аварий в корпусных реакторах : монография / В.И. Скалозубов, А.А. Ключников, В.Н. Ващенко, С.С. Яровой ; под ред. В.И. Скалозубова ; НАН Украины, Ин-т проблем безопасности АЭС. – Чернобыль (Киев. обл.) : Ин-т проблем безопасности АЭС, 2012. – 280 с.

## References:

1. Hudson D.J. Statistics. Lectures on Elementary Statistics and Probability, Geneva, 1964, D. Hudson, Statistics for physicists. *Lectures on Probability Theory and Elementary Statistics*. Moscow:Mir;1970.
2. 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.)
3. Lobach D.J. New problems, methodology and possibilities of Safeometrics. *Promyshlennââ bezopasnost'*. 2023; 01: 34-36. ISSN 2958-4523. (In Russ.)
4. The human factor and the safety of nuclear installations. Materials of the International conference MK-2000 . Moscow, Obninsk : ONITS "Forecast"; 2001. (In Russ.)
5. Abramova V.N. Organizational psychology, organizational culture and safety culture in atomic energy . Moscow, Obninsk : IG – SOCIN; 2009. (In Russ.)
6. Human factors engineering aspects of instrumentation and control system design, Series: IAEA nuclear energy series, No. NR-T-2.12. Vienna: International atomic energy agency; 2021.
7. Human factors engineering in the design of nuclear power plants, Series: IAEA safety standards series, No. SSG-51. Vienna: International atomic energy agency; 2019.
8. Akimova G.P., Solovyev A.V., Pashkina E.V. The methodical approach for assessment of human factor influence on efficiency of information systems. *Proceedings of the Institute for Systems Analysis Russian Academy of Sciences (ISA RAS)*. 2007; 29: 102-112. (In Russ.)
9. Soloviev, A.V. Modeling the influence of the human factor on the functioning of information systems / A.V. Solovyov. *Proceedings of ISA RAS*. 2021; 71(1): 34-43. (In Russ.)
10. Regulatory oversight of human and organizational factors for safety of nuclear installations, Series: IAEA TECDOC series, No. 1846. Vienna: International atomic energy agency; 2018.
11. Safety culture, Safety series, No.75-INSAG-4, a report by the International Nuclear Safety Advisory Group. Vienna: International atomic energy agency; 1991.
12. 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.
13. Examples of safety culture practices, Safety reports series, Vienna: International atomic energy agency; 1997; 1.
14. Kolde Ya.K. Practicum on probability theory and mathematical statistics. M.; 1991. (In Russ.)
15. 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.DOI10.18287/2223-9537-2023-13-4-615-624.(In Russ.)
16. Taylor J. Introduction to the theory of errors. M.; 1985. (In Russ.)
17. Bulyanitsa A. L. Estimation of the probability of erroneous interpretation of the results of PCR analysis. Part 1. Failures of technical devices . *Scientific Instrument Engineering* 2023; 33(2): 49-61 (In Russ.).
18. Albitskaja E.S. Methods for quantifying cybersecurity at nuclear power plants. part 1. *Nuclear technology abroad*. 2019; 2: 19-25. (In Russ.)
19. Skalozubov V.I., Kliuchnikov V.N., Vaschenko V.N., Jarovoy S.S. Analysis of the causes and consequences of the Fukushima nuclear power plant accident as a factor in preventing severe accidents in hull reactors. Monograph. Chernobyl:Institute of NPP Safety Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine; 2012.

## Сведения об авторе:

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

## Information about author:

Dmitry I. Lobach, Cand. Sci. (Eng), Retired civil servant; 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 20.01.2024.

Одобрена после рецензирования/ Reviced 25.02.2024.

Принята в печать/ Accepted for publication 25.02.2024.