

# Техническое регулирование безопасности промышленных объектов: анализ и количественная оценка риска

**Э.А. Грановский**, генеральный директор, канд. техн. наук

ООО «Научный центр изучения рисков «РИЗИКОН», г. Северодонецк, Украина

e-mail: gran@rizikon.lg.ua, granovskiy@rizikon.ru

## Ключевые слова:

величина риска,  
экспертные оценки,  
системный анализ,  
дерево неисправностей,  
системное и феноменологическое дере-  
во событий,  
доверительный интервал,  
последствия.

*Рассматриваются методы количественной оценки риска на основе результатов анализа опасности как с использованием экспертных оценок, так и системного анализа опасного объекта. Показано, что когда измерителями факторов риска выступают эксперты, количественная оценка величины риска без статистической обработки мнений экспертов и оценки достоверности результата не корректна.*

*Рассматриваются основные методы системного анализа для количественной оценки риска. Показано, что приводимая в некоторых документах частота аварийной разгерметизации по видам оборудования получена без обоснования представительности и однородности выборки, а также независимости входящих в нее событий. Для структурно-сложных технологических систем однородность выборки в связи с уникальностью таких систем не может быть обеспечена. Показано, что логико-вероятностный анализ структурно-сложных систем с использованием статистических данных о видах отказов компонентов оборудования в процессе эксплуатации для получения вероятности первичных событий в логических схемах позволяет оценить неопределенность риска, что необходимо для принятия решений.*

## 1. Введение

Если область применения анализа риска определена и выявлены (идентифицированы) опасности, свойственные объекту анализа (см. [1]), то для выявленных опасностей может быть определен риск последствий их реализации. Часто говорят о качественных и количественных методах оценки величины риска, что представляется не совсем верным. Для принятия решений всегда необходимо получить количественное значение риска, но в некоторых методах измерителями величины риска выступают эксперты — в этом случае математическая статистика работает с результатами экспертных оценок, а в других выполняется анализ системы и на основании результатов анализа осуществляется моделирование возникновения и развития случайных и детерминированных нежелательных процессов. В последнем

случае необходимо получить и обработать информацию о неисправностях в системе и ошибках персонала, провести анализ систем управления, в том числе выполняющих функции безопасности с расчетом вероятности возможных последствий, и определить интегральные показатели риска.

Во всех случаях количественная оценка риска производится на основании системного анализа с использованием набора методов, который зависит от цели анализа, технологических особенностей и сложности системы, стадии ее жизненного цикла и времени на выполнение работы. Основные технологии анализа риска описаны в нормативных документах, но на мировом рынке существует большое количество технологий, в том числе и информационных, корректное применение которых в большой степени зависит от квалификации экспертов.

Таблица 1

Характеристика частоты несчастного случая (аварии)

Описание	Уровень	Индивидуальные особенности предмета (объекта)	Характеристика
Частый	A	Может происходить часто в жизни предмета (объекта)	Постоянно ощущается (испытывается)
Вероятный	B	Будет происходить несколько раз в жизни предмета (объекта)	Будет происходить часто
Происходит периодически	C	Скорее всего, произойдет когда-нибудь в жизни того или иного предмета (объекта)	Будет происходить несколько раз
Незначительный	D	Маловероятно, но возможно в жизни того или иного предмета (объекта)	Маловероятно, но следует ожидать, что произойдет
Невероятный	E	Настолько маловероятно, что можно полагать, что не произойдет в жизни того или иного предмета (объекта)	Маловероятно, но возможно
Исключается	F	Не способен возникнуть. Этот уровень используется, когда опасности выявлены и устранены (физически невозможно)	Неспособен возникнуть

Рамки статьи не позволяют рассмотреть все применяемые методы для такой наукоемкой проблемы, как анализ риска, но проанализировать основные ошибки, допускаемые при реализации технологий такого анализа, регламентированных международными и национальными стандартами, представляется важным.

## 2. Экспертные оценки величины риска

На стадии анализа и выявления (идентификации) присущих технологической системе опасностей с применением, например методов [2, 3], пытаются качественно, основываясь на мнении экспертов (фактически голосованием), определить уровень риска (критичность). Чтобы эксперты могли выступать измерителями факторов риска, надо от качественных характеристик перейти к количественным значениям. Если использовать матрицу риска стандарта министерства обороны США [4], то каждой качественной характеристике частоты может быть

противопоставлена вероятность реализации опасности в течение года (табл. 1). Качественной характеристике последствий может быть противопоставлен их возможный масштаб, например возможное число пострадавших, площадь загрязненного грунта и другие необратимые воздействия на окружающую природную среду, денежные потери и т. п. (табл. 2).

При выборе количественных характеристик и качественных показателей риска по матрице риска для оценки его критичности необходимо учитывать допустимый риск, методология определения которого изложена в [5]. Оценка экспертами факторов риска должна быть анонимной, чтобы исключить влияние других мнений. Эксперты могут делать предварительные количественные оценки, изучать аналоги, для которых выполнялась количественная оценка риска, моделировать аварии, выполнять другие оценочные расчеты. Экспертная оценка факторов риска должна быть выполнена для каждой опасности аварии по всей итоговой таблице исследования HAZOP.

Таблица 2

Характеристика последствий несчастного случая (аварии)

Описание событий	Категория тяжести	Критерии последствий несчастного случая (аварии)
Катастрофическое	1	Может привести к одному или нескольким последствиям: <ul style="list-style-type: none"> <li>смерть, постоянная полная потеря трудоспособности;</li> <li>значительное необратимое воздействие на окружающую среду;</li> <li>денежные потери, равные или превышающие \$10 млн</li> </ul>
Существенное	2	Может привести к одному или нескольким последствиям: <ul style="list-style-type: none"> <li>постоянная частичная потеря трудоспособности, травмы или профессиональное заболевание, которые могут привести, по крайней мере, к госпитализации трех работников;</li> <li>значительное обратимое воздействие на окружающую среду;</li> <li>денежные потери, <math>\geq</math> \$1 млн но <math>&lt;</math> \$10 млн</li> </ul>
Несущественное	3	Может привести к одному или нескольким последствиям: <ul style="list-style-type: none"> <li>травмы или профессиональные заболевания с потерей одного или более рабочего дня;</li> <li>умеренное обратимое воздействие на окружающую среду;</li> <li>денежные потери, <math>\geq</math> \$100K, но <math>&lt;</math> \$1 млн</li> </ul>
Пренебрежимо низкое	4	Может привести к одному или нескольким последствиям: <ul style="list-style-type: none"> <li>травмы или профессиональные заболевания не приводят к потере рабочего времени;</li> <li>минимальное воздействие на окружающую среду;</li> <li>денежные потери <math>&lt;</math> \$100K</li> </ul>

Зная сумму баллов каждого эксперта по факторам риска  $x_j = \sum_{i=1}^n x_{ji}$ ,  $j = \overline{1, m}$  ( $n$  – количество факторов риска,  $m$  – число экспертов), можно вычислить весовые коэффициенты оценки факторов риска каждым экспертом:

$$P_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \delta x_{ji} \text{ здесь } \delta x_{ji} = \frac{x_{ji}}{x_j}.$$

Если рассматривать каждое «измерение» факторов риска экспертом как случайную величину, то возможна обработка мнений экспертов с использованием методов математической статистики [6]. Для проверки согласованности мнений группы экспертов можно использовать коэффициенты ранговой корреляции, например коэффициент конкордации Кендалла. В последнем случае после перехода к оценке факторов риска в рангах в соответствии с определением рангов определяется:

- сумма рангов по каждому фактору риска

$$r_i = \sum_{j=1}^m r_{ji}, i = \overline{1, n};$$

- среднее значение ранга по каждому фактору

$$\bar{r}_i = \frac{r_i}{m}, i = \overline{1, n};$$

- общая сумма рангов по всей матрице  $r_c = \sum_{i=1}^n r_i$ ;

- пофакторное среднее сумм рангов  $\bar{r} = \frac{r_c}{n}$ ;

- отклонение общей суммы рангов  $i$ -го фактора от пофакторной средней  $\Delta_i = r_i - \bar{r}$ ,  $i = \overline{1, n}$ ;

- сумма квадратов отклонений  $S = \sum_{i=1}^n \Delta_i^2$ ;

- максимально возможное значение суммы квадратов отклонений рангов по каждому фактору от общей средней величины  $S_{\max} = \frac{1}{12} m^2 (n^3 - n)$ ;

- значение коэффициента конкордации Кендалла  $W = \frac{S}{S_{\max}}, W \in [0; 1]$ .

Если  $W < 0,2-0,4$ , значит, согласованность экспертов слабая; если  $W > 0,6-0,8$ , то согласованность экспертов сильная. Слабая согласованность обычно обусловлена следующими причинами:

- в рассматриваемой группе экспертов действительно отсутствует общность мнений;
- внутри группы существуют коалиции с высокой согласованностью мнений, однако, обобщенные мнения коалиций противоположны.

Для принятия решения о согласованности мнений экспертов используется распределение Пирсона ( $\chi^2$ -распределение). Определяется расчетное значение  $\chi_p^2 = Wm(n-1)$ . Для заданной доверительной вероятности  $\alpha$  и числа степеней свободы  $k = n-1$  по таблице  $\chi^2$ -распределения находят критическое значение  $\chi_{кр}^2$ . Если  $\chi_{кр}^2 < \chi_p^2$ , то гипотеза о согласованности решений экспертов принимается, если  $\chi_{кр}^2 > \chi_p^2$ , то отвергается. Чем больше  $\alpha$ , при которой  $\chi_{кр}^2 < \chi_p^2$ , тем выше достоверность оценки риска каждой опасности рассматриваемой на сессии HAZOP. Если результаты экспертной оценки риска не могут считаться достоверными, то необходимо либо менять группу экспертов, либо проводить количественную оценку риска с использованием методов анализа риска технологических систем [7, 8] на основе собираемой статистической информации по видам отказов и ошибкам персонала, с учетом паспортных данных по надежности оборудования и систем управления.

Количественная оценка риска может основываться на экспертных оценках в тех случаях, когда для каких-то опасных событий имеющейся информации для расчетов риска недостаточно. При этом необходимо понимать, что если количественная оценка, основанная на экспертных оценках, позволяет определить риски только для отдельных опасных событий, то оценка риска, основанная на моделировании случайных и детерминированных процессов в технологической системе, позволяет определить интегральные значения риска для всей этой системы. В любом случае экспертная оценка количественных показателей риска остается субъективной и неполной.

### 3. Системный анализ и количественные методы оценки величины риска

Более объективен системный анализ объекта с моделированием случайных процессов, определяющих вероятность начальных условий возникновения и формирования аварийных ситуаций и аварий, и моделирование детерминированных аварийных процессов при случайных начальных условиях. Такой анализ требует применения большого объема знаний как об изучаемом объекте, так и в области теории вероятности, математической статистики и математического моделирования физико-химических процессов. При этом надо понимать, что *аварийный процесс имеет две фазы* [9]:

- длительная фаза накопления отказов и ошибок в системе, заканчивающаяся иницированием аварии;
- быстрый процесс развития аварийных процессов, сопровождающийся формированием поражающих факторов и их воздействием на лю-

дей, имущество и окружающую природную среду.

Независимо от того, какие из существующих методов используются для анализа опасности и оценки риска системы, всегда необходимо понимать ее иерархическую структуру и определить уровень разукрупнения, когда можно выделить элемент системы и получить для него всю существенную информацию с целью определить виды отказов, частоту их возникновения и возможные последствия. Необходимо также понимать, каким образом впоследствии осуществится синтез системы с целью получить интегральные показатели риска.

Методы системного анализа, используемые для оценки вероятности возникновения и развития аварии, разделяют на индуктивные и дедуктивные. Из наиболее распространенных *индуктивных* методов системного анализа можно выделить следующие: количество деталей (Parts Count); предварительный анализ опасности (РНА); анализ опасности отказов (FHA); модель успешного пути; анализ видов и последствий отказов (FMEA); его модификация «анализ видов, последствий и критичности отказов» (FMESCA) и др.

Среди индуктивных методов *FMESCA* [10] наиболее мощный метод анализа. Последовательно проводя анализ всех видов отказов каждого элемента системы, определяют последствия, к которым приводят эти отказы, надежность системы (вероятность ее безотказной работы) и достаточность систем управления и контроля. Поскольку элементов системы и видов отказов достаточно много, необходимо пройти множество цепочек событий, рассматривая множество различных нежелательных последствий, приводящих к потере работоспособности системы. *FMESCA* успешно используется для машин и механизмов, когда главной задачей является определение показателей их надежности. *FMESCA* не учитывает взаимодействие различных частей системы, когда к одному и тому же нежелательному событию приводят различные цепочки событий, имеющие различные логические связи. Поэтому практически невозможно проследить связь между параллельными цепочками событий, приводящими к одинаковым последствиям. *FMESCA* применяют к отдельным видам отказов и их последствиям для системы в целом. Каждый вид отказа рассматривают как независимый, поэтому не корректно его применять для рассмотрения зависимых отказов или отказов, обусловленных последовательностью нескольких событий.

Наиболее системным методом *дедуктивного* анализа и оценки риска технологических систем является метод «дерева неисправностей» (FTA) [11,12], который особенно полезен для анализа структурно-

сложных систем со множеством областей контактов и взаимодействий. Для источника опасности, устанавливаемого анализом иерархической структуры системы, определяется (как правило, в процессе анализа опасности [1]) верхнее нежелательное событие с точки зрения безопасности объекта (событие, которое может рассматриваться как авария). После этого при анализе работы всех элементов системы, их устройства, условий эксплуатации определяют возможные маршруты, по которым это нежелательное событие может реализоваться. Для выявления этих маршрутов последовательно сверху вниз рассматриваются все отклонения в протекающих процессах, неисправности оборудования, сбои в работе аппаратных средств и системах управления, ошибки персонала и другие отказы, которые могут привести к реализации верхнего нежелательного события, устанавливается логическая связь между событиями. В «дереве неисправностей» наряду с видами отказов элементов оборудования анализируются отказы систем управления технологическим процессом, выполняющих функции безопасности. Если хотя бы один отказ в минимальном наборе отказов, приводящих к реализации верхнего нежелательного события, не произойдет, то не реализуется и это нежелательное аварийное событие. Реализация верхнего нежелательного события в «дереве неисправностей» приводит к инициированию аварии. В этом случае внешние (не связанные с управлением процесса) системы снижения риска будут в случае срабатывания уменьшать последствия, но не предотвращать их.

После инициирования аварии (верхнее нежелательное событие в «дереве неисправностей» произошло) более эффективен метод моделирования ее случайного развития «дерево событий». Начальным событием «дерева событий» будет верхнее нежелательное событие «дерева неисправностей». Различают системное и феноменологическое «дерево событий». В системном «дереве событий» каждая применяемая система, выполняющая функцию безопасности (далее — систем безопасности), создает две аварийные ситуации: при безотказной работе системы безопасности и при ее отказе. Вероятность отказа системы безопасности выполнять свою функцию определяется анализом «дерева неисправностей» этой системы. Каждый набор событий срабатывания и отказа всех применяемых систем безопасности определяет вероятность реализации определенных условия формирования аварийной ситуации. В феноменологическом «дереве событий» с учетом свойств опасных веществ, поступающих в атмосферу, и динамики процесса формирования аварийной ситуации для каждого состояния, установленного в системном «дереве событий»,

определяется вероятность реализации вида аварийного процесса с учетом случайного появления источников зажигания в пространстве и во времени.

Анализ структурно-сложных технологических систем в соответствии со стандартами [7, 8] требует значительных затрат. Поскольку регламентированные методики [13, 14] предлагают данные о вероятности разгерметизации или полного разрушения технологического оборудования, являющегося источником опасности, возникает соблазн не выполнять полный анализ системы с построением «дерева неисправностей» и системных «деревьев событий», а использовать эти данные, ограничиваясь построением только феноменологического «дерева событий». Но поскольку в регламентированных методиках не приводятся исходные данные, по которым проводилась статистическая обработка для получения частоты разгерметизации, корректность их применения вызывает большие сомнения (табл. 3).

Таблица 3

Частота разгерметизации сосудов под давлением [14]

Тип оборудования	Частота разгерметизации		
	Полное разрушение		Продолжительный выброс через отверстие 10 мм
	Мгновенный выброс	Продолжительный выброс	
Сосуды под давлением	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-5}$
Технологические аппараты (ректификационные колонны, конденсаторы и фильтры)	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-4}$
Химические реакторы	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-4}$

Во-первых, ничего нельзя сказать о случайности выборки, т.е. события разгерметизации и разрушения оборудования независимые и не связаны ли результат с каким-либо дополнительным условием. Указано, что в данных о частоте разгерметизации [14] не учитывается влияние коррозии, эрозии, усталости, вибрации, но непонятно, как в процессе наблюдения исключались эти и другие факторы.

Во-вторых, поскольку события разгерметизации достаточно редки, не показано, что объем выборки представительный.

В-третьих, не указано распределение плотности вероятности и его характеристики. Влияние вида распределения на результаты статистической обработки можно проследить на примере. Если в исходных данных указано, что среднее время безотказной работы некоего элемента составляет 100 ч и утверждается, что распределение времени его наработки на отказ имеет экспоненциальный характер, то вероятность безотказной работы этого элемента в течение 10 ч составит 0,905 (вероятность отказа 0,095). Если утверждается, что распределение времени его наработки на отказ нормальное со стандартным отклонением 40 ч, то вероятность безотказной работы этого элемента в течение 10 ч в этом случае составит 0,988 (вероятность отказа 0,012), т.е. вероятности отказа отличаются почти на порядок. Кроме того, не определен доверительный интервал вероятности разгерметизации и разрушения оборудования, что не позволяет учесть неопределенность оценки риска при принятии решений.

Данные в [15] более корректны (табл. 4). По крайней мере, указан вид распределения (Пуассона), а интенсивность отказов и верхняя граница дове-

Таблица 4

Статистика отказов сосудов под давлением [15]

Страна	Количество сосудов	Количество сосудоделет	Без разрушения		С разрушением		
			Число отказов	Интенсивность отказов $\lambda$ , год <sup>-1</sup>	$\lambda$ , верхняя граница доверительного интервала при доверительной вероятности 0,99	Число отказов	$\lambda$ , верхняя граница доверительного интервала при доверительной вероятности 0,99
Великобритания	2000	$3,1 \cdot 10^5$	65	$2 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	5	$3,2 \cdot 10^{-5}$
ФРГ (IRS-TUB)	7000	$6,7 \cdot 10^4$	30	$4,4 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$	0	$4,5 \cdot 10^{-5}$
ФРГ (группа исследований реакторов)	$1,1 \cdot 10^6$	$1,9 \cdot 10^6$	7435	$4 \cdot 10^{-4}$	–	40	$8,8 \cdot 10^{-6}$
США (EEl-TVA)	1033	$1 \cdot 10^4$	10	$1 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	0	$3 \cdot 10^{-3}$
США (EEl, данные о котлах и сосудах)	3000	$2,2 \cdot 10^4$	1	$4 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$	0	$1,4 \cdot 10^{-4}$
Великобритания (данные о котлах)	5000	$6 \cdot 10^4$	27	$4,5 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$	0	$5 \cdot 10^{-5}$
США (NBVPVI)	$5,36 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^6$	1043	$3,2 \cdot 10^{-4}$	–	115	$3,3 \cdot 10^{-5}$
США (ABMA)	$6,8 \cdot 10^4$	$7,2 \cdot 10^5$	–	–	–	0	$4,2 \cdot 10^{-6}$

рительного интервала для интенсивности отказов определены с учетом объема выборки и длительности наблюдений.

Но даже если выборки в табл. 4 достаточно представительны, то они неоднородны и применять их для анализа риска конкретной технологической системы и ее источников опасности неправомерно. Например, если рассматривать реакторы, то кроме существенных различий протекающих процессов, они отличаются существенными конструктивными особенностями и размерами. Процессы в реакторах отличаются: режимом движения реакционной среды (гидродинамическая обстановка в реакторе); условиями теплообмена в реакторе; фазовым составом реакционной смеси; способом организации процесса; характером изменения параметров процесса во времени (механизмом и кинетикой реакций, активностью катализатора) и т. п. По конструктивным характеристикам различают следующие типы реакторов: колонна, башня, автоклав, камера, печь, контактный аппарат, полимеризатор и др. На вероятность разгерметизации любого источника опасности будет влиять как его конструкция, так и обвязка. Существенны различия процессов и конструкций и для любых других аппаратов технологических систем.

Вероятность разгерметизации или разрушения оборудования будет зависеть также от количества, эффективности и надежности применяемых систем, выполняющих функции безопасности. В табл. 5 приведены системы безопасности, применяемые для двух складов сжиженных газов.

Видно, что даже для относительно однородного оборудования вероятность разгерметизации и разрушения благодаря системам, предназначенным для предотвращения этого события, может отличаться более чем на 5 порядков. Совершенно очевидно, что использование среднестатистических данных по авариям для отдельных видов оборудования возможно для прогнозирования аварийности в стране, в край-

нем случае, в отдельных регионах, когда выборка еще может считаться представительной и однородной, но для анализа риска конкретной технологической системы с ее особенностями необходимо исследовать эту систему.

Анализ риска необходим, прежде всего, для принятия решений о достаточности, эффективности и надежности систем безопасности, как предназначенных для предотвращения выхода параметров системы за критические значения, так и направленных на снижение возможных последствий. Для этого необходимо понимать всю цепочку событий, приводящих к аварийным процессам, и причинно-следственные связи между ними.

Комбинация «деревьев событий» источника опасности с «деревом неисправностей», приводящая к разгерметизации этого источника, позволяет определить все возможные пути реализации каждого из возможных, в соответствии с результатами анализа, аварийных процессов. До тех пор пока не определены ни вероятность, ни последствия аварий, анализ логики возникновения и развития аварий не будет качественным, без чего невозможно оценить риск и принять решения.

Для оценки вероятности последствий, прежде всего, необходимо определить вероятность первичных событий в «деревьях неисправностей» (базовые, условные и нераскрытые события), входящих в системное «дерево событий». Вероятность базовых событий (инициирующих неисправность) может быть определена по данным испытаний производителя (паспортные данные); обработкой данных об отказах в процессе эксплуатации; с использованием баз данных об интенсивности отказов, рассматриваемых или аналогичных объектов и их компонентов. Если первичным событием «дерева неисправностей» будет событие, не раскрытое из-за недостатка информации, то его вероятность может быть определена на основании экспертных оценок, как это рассматривалось выше.

Таблица 5

Сравнение систем безопасности для предотвращения аварий двух складов сжиженных углеводородных газов

№ п/п	Перевалочный комплекс сжиженных углеводородных газов	Парк сжиженных углеводородных газов нефтеперерабатывающего завода
1	Три независимые системы контроля, сигнализации и блокировки по температуре TIRSAH (включение орошения емкостей)	
2	Две независимые системы контроля, сигнализации и блокировки по давлению PIRSAH (открытие сброса газовой фазы в аварийную емкость)	Системы контроля давления
3	Две независимые системы контроля, сигнализации и блокировки по уровню LIRSAH (прекращение подачи продукта в резервуар)	Контроля и сигнализации уровня
4	Независимая система контроля и сигнализации уровня LIA «Садко»	
5	Два предохранительных клапаны (рабочий и контрольный) со сбросом газов на факел	Два предохранительных клапана: рабочий и контрольный со сбросом газов на факел на свечу

Если первичным будет условное событие, то его вероятность может быть определена как мера. Например, если при хранении легковоспламеняющейся жидкости (ЛВЖ) взрыв в резервуаре возможен при условии, что температура хранения выше нижнего температурного предела распространения пламени (НТПР),

то вероятность этого события  $P_{T > \text{НТПР}} = \frac{\bar{N}_{T > \text{НТПР}}}{N_r}$ , где:

$\bar{N}_{T > \text{НТПР}}$  — среднее количество дней в году, когда температура окружающей среды выше НТПР;  $N_r$  — количество дней в году. Если технологическая система переходит из менее опасного состояния в более опасное при условии отказа системы, выполняющей функцию безопасности (условное событие), то вероятность отказа этой системы может быть определена любым из методов анализа надежности [10–12, 16, 17].

В итоге расчет вероятности верхнего нежелательного события в «дереве неисправностей» технологической системы может быть выполнен, если известна

вероятность базовых событий — отказ компонентов оборудования технологической системы и систем управления. Количество однотипных компонентов оборудования и систем управления (насосы, подшипники, уплотнительные соединения, штуцеры, датчики, реле, регуляторы и т. д.), используемых в опасных производствах, достаточно велико. При этом вероятность их отказа обычно порядка  $10^{-1}$ – $10^{-2}$  и намного больше вероятности разгерметизации и разрушения оборудования технологической системы (см. табл. 3, 4). Поэтому данные об отказах компонентов систем, полученные в процессе эксплуатации, позволяют обеспечить необходимый объем выборки, ее однородность и определить вид распределения плотности вероятности. Ниже приведены примеры результатов статистической обработки по видам отказов в процессе эксплуатации установки первичной переработки нефти АВТ-6 для элементов оборудования (табл. 6) и систем управления (табл. 7). Распределение Пуассона, доверительная вероятность  $\alpha = 0,9$ .

Таблица 6

Анализ видов отказов центробежных насосов

Вид отказа	Кол-во отказов <i>i</i> -го вида	Доля отказов <i>i</i> -го вида, %	Вероятность отказа в течение года		
			$P_v$	$P_{cp}$	$P_n$
<i>Период наблюдения в насосо-часах <math>\bar{T}_{ик} = 2\,717\,737</math></i>					
Вибрация заднего подшипника (КОМПАКС)	2	1,3	0,0029	0,0015	0,0004
Вибрация переднего подшипника (КОМПАКС)	25	16,2	0,0198	0,0182	0,0137
Износ резьбы в теле насоса	1	0,65	0,0017	0,0007	0,0001
Нарушение герметичности корпуса	2	1,3	0,0029	0,0015	0,0004
Отказ системы охлаждения торцевых уплотнений	7	4,5	0,0079	0,0051	0,0029
Отказ системы охлаждения насоса	13	8,44	0,0532	0,0375	0,0252
Падение давления на нагнетании	10	6,5	0,0412	0,0290	0,0181
Повышение температуры переднего подшипника	3	1,95	0,0039	0,0022	0,0008
Повышенная вибрация насоса	19	12,3	0,0187	0,0139	0,0095
Посторонний шум при работе	5	3,26	0,0059	0,0037	0,0018
Пропуск фланцевых соединений	1	0,65	0,0017	0,0007	0,0001
Пропуск затворной системы торцевых уплотнений	1	0,65	0,0017	0,0007	0,0001
Пропуск сальниковых уплотнений	2	1,3	0,0029	0,0015	0,0004
Пропуск торцевых уплотнений	54	35,06	0,0462	0,0390	0,0323
Уменьшение расхода	6	3,9	0,0068	0,0044	0,0040
Утечка масла	3	1,95	0,0039	0,0022	0,0008

Таблица 7

Анализ видов отказа датчиков давления

Вид неполадки	Кол-во неполадок <i>i</i> -го вида	Доля неполадок <i>i</i> -го вида, %	Вероятность отказа в течение года		
			$P_v$	$P_{cp}$	$P_n$
<i>Период наблюдения в датчиково-часах <math>\bar{T}_{ик} = 8\,848\,000</math></i>					
Завышение показаний	15	23,08	0,0046	0,0034	0,0023
Занижение показаний	7	10,77	0,0024	0,0016	0,0009
Нестабильные показания	36	55,38	0,0101	0,0081	0,0063
Отсутствие показаний	4	6,15	0,0015	0,0009	0,0004
Показания не меняются	3	4,62	0,0012	0,0007	0,0002

Таблица 8

**Вероятность разрушения колонн вследствие роста давления до критических значений**

Границы доверительного интервала вероятности разрушения, $P_{рк}$	Вероятность разрушения колонны		
	К-1, $P_{рк1}$	К-2, $P_{рк2}$	К-8а, $P_{рк3}$
Верхнее $P_{рк}^в$	$1,22 \cdot 10^{-8}$	$7,82 \cdot 10^{-9}$	$1,94 \cdot 10^{-7}$
Среднее $P_{рк}^ср$	$4,84 \cdot 10^{-9}$	$3,66 \cdot 10^{-9}$	$1,55 \cdot 10^{-7}$
Нижнее $P_{рк}^н$	$6,90 \cdot 10^{-10}$	$1,38 \cdot 10^{-9}$	$9,330 \cdot 10^{-8}$

Поскольку для обнаруженных в процессе эксплуатации видов отказов определен доверительный интервал, при построении «дерева неисправностей» может быть определен доверительный интервал вероятности возникновения нежелательного события. К сожалению, рамки статьи не позволяют представить полное «дерево неисправностей», но из табл. 8 видно, что при заданном уровне доверия истинное значение вероятности верхнего нежелательного события «дерева неисправностей» (разрушение колонны) может оказаться в диапазоне значений, несущественно отличающихся от среднего.

В этом случае неопределенность оценки риска позволяет принимать решения о его допустимости. В случае, когда доверительный интервал соизмерим с оцененной величиной риска или даже больше его, неопределенность результатов анализа риска уже не позволяет принять экономически оправданное решение. Если в феноменологическом «дерево событий» с учетом неопределенности выполнена оценка вероятности реализации вида аварийного процесса, то выполняется моделирование условий формирования аварийной ситуации и собственно аварийного процесса с определением параметров распространяющихся в пространстве поражающих факторов и последствий их воздействия на людей, имущество и окружающую природную среду.

Уникальность процессов, технологических и конструктивных особенностей системы и входящих в нее аппаратов, выступающих источником опасно-

сти, делает невозможным создание универсальных методик для моделирования аварий и оценки их последствий на все случаи жизни. Требуется учитывать физико-химические и опасные свойства смесей, термодинамическую и газодинамическую обстановку в технологической системе, условия разгерметизации и истечения многофазных и многокомпонентных потоков в атмосферу, фазовые переходы с учетом неидеальности многокомпонентных смесей и другие факторы. Эксперт, оценивая риски системы, должен выполнить постановку задачи моделирования условий формирования аварийных ситуаций, собственно аварийных процессов и воздействия поражающих факторов на людей, имущество и окружающую природную среду с учетом уникальности технологической системы.

#### 4. Заключение

Рассмотрены основные принципы количественной оценки риска для технологических систем. Если по результатам анализа опасности количественная оценка риска основана на экспертных оценках факторов риска, то необходима статистическая обработка сделанных оценок с определением согласованности мнений группы экспертов и степени достоверности оценки. Количественная оценка риска, основанная на логико-вероятностном анализе структурно-сложных систем с использованием статистических данных о видах отказов компонентов оборудования в процессе эксплуатации для получения вероятности первичных событий в логических схемах, позволяет выполнить оценку неопределенности риска, необходимую для принятия решений. Использование вместо логико-вероятностного анализа частоты разгерметизации видов оборудования, полученной на основании данных об аварийности, для количественной оценки риска технологической системы не позволяет сделать оценку неопределенности, так как не обеспечивается представительность и однородность выборки в случае применения этой частоты для конкретного источника опасности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Грановский Э.А. Техническое регулирование безопасности промышленных объектов: анализ опасности // Безопасность в техносфере. 2016. № 4, с. 63–70.
2. ГОСТ Р 51901.11–2005 (МЭК 61882:2001). Менеджмент риска. Исследование опасности и работоспособности. Прикладное руководство.
3. EP 95–0312. HAZID. HSE Manual. Shell International Exploration & Production B.V.
4. Military Standard 882A, System Safety Program Requirements, Department of Defense, Washington, D.C. 20301, 28 June 1977 — MIL-STD-882E, Department of Defense, Standard Practice System Safety, 11 May 2012, USA.
5. Грановский Э.А. Техническое регулирование безопасности промышленных объектов: определение допустимого риска // Безопасность в техносфере. 2016. № 2, с. 77–83.
6. Орлов А.И. Организационно-экономическое моделирование: Учебник в 3-х частях. Часть 2. Экспертные оценки. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2011. 486 с.



7. ГОСТ Р 51901.1–2002 (МЭК 60300–3–9:1995). Менеджмент риска. Анализ риска технологических систем.
8. ГОСТ Р 51901.5–2005 (МЭК 60300–3–1:2003) Менеджмент риска. Руководство по применению методов анализа надежности.
9. Легасов В. Проблемы безопасного развития техносферы. Журнал «Коммунист», М., 1987г, № 8, с. 92–101
10. ГОСТ Р 51901.12–2007 (МЭК 60812:2006). Менеджмент риска. Метод анализа видов и последствий отказов.
11. Vesely W.E., Goldberg F.F., Roberts N.H., Haasl D.F. Fault Tree Handbook. U.S. Nuclear Regulatory Commission (NUREG-0492) Washington, D.C. 20555, January 1981
12. ГОСТ Р 27.302–2009, Группа Т 59. Национальный стандарт Российской Федерации. Надежность в технике. Анализ дерева неисправностей.
13. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах. Утверждена приказом МЧС РФ № 404 от 10.06.2009 г. (с изменениями 14.12.2010 г.)
14. Руководство по безопасности «Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах». Утверждено приказом Ростехнадзора РФ № 144 от 11.04.2016 г.
15. Абросимов А.А. Экология переработки углеводородных систем. М.: Химия, 2002.
16. ГОСТ Р 51901.14–2005 (МЭК 61078:1991). Менеджмент риска. Метод структурной схемы надежности.
17. ГОСТ Р 51901.15–2005 (МЭК 61165:1995). Менеджмент риска. Применение Марковских методов.

## REFERENCES

1. Granovskiy E.A. Tekhnicheskoe regulirovanie bezopasnosti promyshlennykh ob"ektov: analiz opasnosti [Technical regulation of the safety of industrial facilities: hazard analysis]. *Zhurnal «Bezopasnost' v tekhnosfere»* ["Safety in Technosphere" magazine]. 2016, I. 4. (in Russian)
2. GOST R51901.11–2005 (MEK 61882:2001). Menedzhment riska. Issledovanie opasnosti i rabotosposobnosti. Prikladnoe rukovodstvo [GOST R51901.11–2005 (IEC61882: 2001). Management of risks. Hazard and Operability Study. Application Guide]. (in Russian)
3. ER95–0312. HAZID. HSE Manual. Shell International Exploration & Production B.V. (in Russian)
4. Military Standard 882A, System Safety Program Requirements, Department of Defense, Washington, D.C. 20301, 28 June 1977 — MIL-STD-882E, Department of Defense, Standard Practice System Safety, 11 May 2012, USA.
5. Granovskiy E.A. Tekhnicheskoe regulirovanie bezopasnosti promyshlennykh ob"ektov: opredelenie dopustimogo riska [Technical regulation of the safety of industrial facilities: the definition of acceptable risk]. *Zhurnal «Bezopasnost' v tekhnosfere»* ["Safety in Technosphere" magazine]. 2016, I. 2, pp. 77–83. (in Russian)
6. Orlov A.I. Organizatsionno-ekonomicheskoe modelirovanie [Organizational-economic modeling]. *Ekspertnye otsenki* [Expert evaluation]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2011. 486 p. (in Russian)
7. GOST R51901.1–2002 (MEK 60300–3–9:1995). Menedzhment riska. Analiz riska tekhnologicheskikh sistem [GOST R51901.1–2002 (IEC60300–3–9: 1995). Management of risks. Analiz riska tehnologicheskikh sistem]. (in Russian)
8. GOST R51901.5–2005 (MEK 60300–3–1:2003) Menedzhment riska. Rukovodstvo po primeneniyu metodov analiza nadezhnosti [GOST R51901.5–2005 (IEC60300–3–1: 2003) Risk Management. Guidance on the application of reliability analysis methods]. (in Russian)
9. Legasov V. Problemy bezopasного razvitiya tekhnosfery [problems of safe technosphere]. *Zhurnal «Kommunist»* [The magazine "Communist"]. Moscow, 1987, I. 8, pp. 92–101. (in Russian)
10. GOST R51901.12–2007 (MEK 60812:2006). Menedzhment riska. Metod analiza vidov i posledstviy otkazov [GOST R51901.12–2007 (IEC60812: 2006). Management of risks. The method of analysis types and consequences of the accident]. (in Russian)
11. Vesely W.E., Goldberg F.F., Roberts N.H., Haasl D.F. Fault Tree Handbook. U.S. Nuclear Regulatory Commission (NUREG-0492) Washington, D.C. 20555, January 1981.
12. GOST R27.302–2009, Gruppy T59. Natsional'nyy standart Rossiyskoy Federatsii. Nadezhnost' v tekhnike. Analiz dereva neispravnostey [GOST R27.302–2009, group T59. Russian Federation National Standard. Reliability engineering. Analiz derevaneispravnostey]. (in Russian)
13. Metodika opredeleniya raschetnykh velichin pozharnogo riska naproizvodstvennykh ob"ektakh. Utverzhdena prikazom MChS RF № 404 ot 10.06.2009g. [A method for determining the assessed value of objects naproizvodstvennykh fire hazard. Approved by Decree of the Ministry of Emergency Situations of the Russian Federation № 404 from 10.06.2009g. (In edition of 14.12.2010g.)]. (in Russian)
14. Rukovodstvopo bezopasnosti «Metodicheskie osnovy po provedeniyu analiza opasnostey i otsenki riska avariyy na opasnykh proizvodstvennykh ob"ektakh». Utverzhdeno prikazom Rostekhnadzora RF № 144 ot 11.04.2016g. [Rukovodstvopo security "Methodical bases on carrying out hazard analysis and assessment of risks of accidents at hazardous production facilities." Approved by Order of Rostekhnadzor № 144 from 11.04.2016g]. (in Russian)
15. Abrosimov A.A. Ekologiya pererabotki uglevodородnykh sistem [Environmental processing of hydrocarbon systems]. Moscow, Khimiya Publ., 2002. (in Russian)

16. GOST R51901.14–2005 (MEK 61078:1991). *Menedzhment riska. Metod strukturnoy skhemy nadezhnosti* [GOST R51901.14–2005 (IEC61078: 1991). Risk management. The method of structural reliability schemes]. (in Russian)
17. GOST R51901.15–2005 (MEK 61165:1995). *Menedzhment riska. Primenenie Markovskikh metodov* [GOST R51901.15–2005 (IEC61165: 1995). Risk management. Application of Markov techniques]. (in Russian)

## Technical Regulation of Safety of Industrial Facilities: Analyses and Risk Quantitative Assessment

**E.A. Granovskiy**, Candidate of Technical Sciences, General Director, “Scientific Center of Risk Investigation “RIZIKON”, Severodonetsk, Ukraine

*The methods of quantitative risk assessment based on results of hazard analysis using both expert estimates and systematic analysis of a dangerous object are discussed. It is shown that when the experts are measuring the risk factors, quantitative assessment risk without statistical processing of expert opinions and evaluation of the reliability of the result is not adequate.*

*The basic methods of system analysis for quantitative risk assessment are considered. It is shown that the frequency of emergency depressurization for certain types of equipment given in the normative documents, received without justification that the sample is representative and homogeneous, and the events occurring in it are independent. For complex technological systems, representativeness and homogeneity of the sample, due to their uniqueness, cannot be ensured.*

*It is shown that the logical-and-probabilistic analysis of complex systems with the use of statistical data on types of failures in the operation of the process equipment components for the probability calculation of the primary events in the logic circuits, allows to determine risk assessment uncertainty, which is necessary for decision-making.*

**Keywords:** risk magnitude, expert appraisal, system analysis, fault tree, system and phenomenological event tree, confidence span, consequences.

### Минобрнауки России, ФАНО и РАН сформируют постоянную систему национальной подписки на международную базу научных данных

Министр образования и науки Российской Федерации О.Ю. Васильева совместно с главой Федерального агентства научных организаций (ФАНО) М.М. Котюковым и вице-президентом Российской академии наук (РАН) А.И. Григорьевым подвели итоги работы по проекту национальной подписки на коллекции ведущих международных журналов. В 2015 г. по поручению Правительства Российской Федерации впервые систематизирован доступ к полнотекстовым статьям, опубликованным в зарубежных журналах, и международным базам научного цитирования.

Ядро подписки составили базы Web of Science и Scopus, а также более 20 коллекций полнотекстовых журналов, технических стандартов и баз патентной информации. Доступ к ним для более чем 300 организаций вне зависимости от ведомственной принадлежности организовало и оплатило Министерство образования и науки Российской Федерации. Это ядро было дополнено журналами Американского физического и математического общества, другими важными коллекциями по отдельным направлениям наук, доступ к которым обеспечило ФАНО России. Кроме того, Российский фонд

фундаментальных исследований организовал для ученых подписку на коллекции журналов *Springer* и *Nature*.

Участники обсуждения одобрили трехуровневую модель подписки и решили перейти от эксперимента к построению постоянно действующей системы национальной подписки, сделав обсуждения моделей развития регулярными, а отчеты о доступе к коллекциям — открытыми и публичными. Была сформулирована и главная цель развития системы национальной подписки — сделать доступ для всех научных и образовательных организаций к научной информации неограниченным и беспрепятственным.

Окончательная модель национальной подписки будет представлена Министерством Совету по национальной подписке и научной общественности совсем скоро — в конце января 2017 г.

Но кроме обеспечения доступа российских научных и образовательных организаций к зарубежным журналам, по предложению РАН решено начать экспансию российских журналов в международные базы данных — предложения по этому проекту также будут представлены ведомством в конце января 2017 г.

*Источник информации: Минобрнауки России*