ство с контролем горения топлива, смесеприготовительный узел, огнеупорный туннель-камера и др.). КРТ прошел испытания в промышленных условиях, которые подтвердили его высокую эффективность.

Данный водонагреватель обеспечивает значительную экономию топлива и снижение выбросов в окружающую среду. Установка водонагревателя на объекте теплопотребления способствует повышению комфортности жилья, улучшению эксплуатационных показателей системы теплоснабжения и безопасности труда обслуживающего персонала.

Список литературы

1. *Батуков П.М.* Проблемы устойчивости и безопасности на предприятиях коммунальной энергетики // Безопасность труда в промышленности. — 2001. — № 3. — С. 17–19.
2. *Соснин Ю.П., Бухаркин Е.Н.* Высокоэффективные газовые контактные водонагреватели. — 4-е изд. — М.: Стройиздат, 1988. — 376 с.
3. *Кудинов А.А., Антонов В.А., Алексеев Ю.Н.* Энергосбережение в газифицированных котельных установках путем глубокого охлаждения продуктов сгорания // Теплоэнергетика. — 2000. — № 1. — С. 59–61.

УДК 658.567.004.65:519.21

ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ РИСКА АВАРИИ В ТЕРМИНАХ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ

А.И. ГРАЖДАНКИН, канд. техн. наук, Д.В. ДЕГТЯРЕВ, М.В. ЛИСАНОВ, канд. физ.-мат. наук, А.С. ПЕЧЕРКИН, д-р техн. наук (ГУП «НТЦ «Промышленная безопасность»)

При использовании основных показателей риска аварии для количественной оценки риска, проводимой в рамках декларирования и экспертизы промышленной безопасности опасных производственных объектов (ОПО), важно соблюдать единство подходов. Результаты выборочных проверок показывают, что в некоторых декларациях промышленной безопасности не всегда достаточно четко и определенно представлены результаты анализа риска аварии на ОПО. Поэтому, руководствуясь Методическими указаниями по проведению анализа риска опасных производственных объектов (РД 03-418—01), рассмотрим понятие «риск аварии» как меру опасности, характеризующую возможность возникновения аварии на ОПО и тяжесть ее последствий.

Так как авария на ОПО может быть отнесена к случайным явлениям, то в самом простом случае мера опасности может быть оценена при анализе случайных величин ущербов (потерь) от аварии. Так, при рассмотрении события «отказ технического устройства»[1] в теории надежности [1, 2] оперируют в основном дискретной характеристической случайной величиной X (в более общем случае случайной величиной T — моментом времени наступления отказа), которая равна 1, если за определенное время отказ происходит, и равна 0, если не происходит. В свою очередь, события, связанные с крупными нежелательными последствиями в сложных системах (например, банкротство компании[1], авария на ОПО), обычно анализируют, рассматривая случайную величину потерь (ущербов) $Y \geq 0$ [3] при планируемой или осуществляемой деятельности. В области промышленной безопасности $Y \geq 0$ — это случайная величина потерь (ущербов) от аварии при эксплуатации ОПО. Отметим, что приведенные в РД 03-418—01 определения количественных показателей риска аварии (индивидуальный, коллективный и социальный риски, ожидаемый ущерб) представляют собой собственно характеристики случайной величины аварийных потерь Y при эксплуатации ОПО.

Несколько особняком стоит определение «потенциальный территориальный риск», которое характеризует случайное событие — возникновение в определенной точке территории факторов аварии, достаточных для смертельного поражения человека, и определяется, как и технический риск, дискретной характеристической случайной величиной D, равной 1, если за определенное время такое событие происходит, или равной 0, если не происходит.

Обычно в практике анализа риска аварии потери Y разделяют на материальные G (непрерывная случайная величина) и людские N (дискретная случайная

[1] Вероятность такого события определяется в РД 03-418—01 как «технический риск».

[1] На экономическом жаргоне говорят: «Риск — это нежелательные потери».

величина). В дальнейших рассуждениях, для описания дискретных и непрерывных случайных величин, будем использовать соответственно *N* и *G*, а для общего случая употреблять *Y*.

Специально отметим, что дальнейшие рассуждения, не претендуя на новизну и всеохватность, приводятся для упорядочения и определения места в теории вероятностей показателей риска аварии, используемых при декларировании и экспертизе промышленной безопасности ОПО. Кроме того, обратим внимание на тот факт, что в практике анализа риска аварии чаще оперируют не с вероятностями, а со средними интенсивностями (частотами) нежелательных событий за определенное время. Если рассматривать происходящие аварии как стационарный пуассоновский поток событий, то связь между вероятностью события *A* за время *t* и его интенсивностью λ достаточно проста [4]:

$$P_A(t) = 1 - \mathbf{e}^{-\lambda t}, \qquad (1)$$

при $\lambda t < 0{,}01$

$$P_A(t) = \lambda t.$$

Поэтому все последующие формулы в данной статье приводятся в терминах теории вероятностей и при необходимости могут быть достаточно легко видоизменены. Более подробно о связи величин, используемых при оценке риска аварии, изложено в работе [5].

Рассмотрим дискретную случайную величину людских потерь *N* при аварии на ОПО с возможными значениями $n_0 \equiv 0$, n_1, n_2, ..., n_k. Каждое из этих значений *N* может принять с некоторой вероятностью p_0, p_1, p_2, ..., p_k. Описание дискретной случайной величины *N* считается полным с точки зрения теории вероятностей, если установлен закон распределения случайной величины, который обычно представляют в виде ряда распределения [4].

n_i	0	n_1	n_2	...	n_s	...	n_k
p_i	$1-\sum_{i=1}^{k} p_i$	p_1	p_2	...	p_s	...	p_k

Причем $\sum_{i=0}^{k} p_i = 1$, $p_0 = 1-\sum_{i=1}^{k} p_i$ — вероятность безаварийной эксплуатации ОПО.

Чтобы придать ряду распределения более наглядный вид, прибегают к его графическому изображению: по оси абсцисс откладывают возможные значения случайной величины, а по оси ординат — вероятности этих значений. Для наглядности полученные точки иногда соединяют отрезками прямых. Такая фигура называется многоугольником распределения [4]. Пример многоугольника распределения числа погибших при аварии на нефтеперекачивающей станции с резервуарным парком представлен на рис. 1. Многоугольник распределения, так же как и ряд распределения, полностью характеризует случайную величину, он является одной из форм закона распределения.

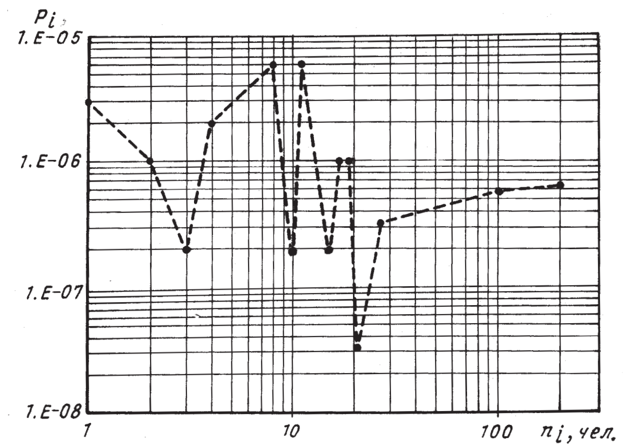

Рис. 1. Многоугольник распределения числа погибших при аварии на нефтеперекачивающей станции с резервуарным парком

С точки зрения теории вероятностей нетрудно убедиться, что для непрерывной случайной величины ряд распределения построить нельзя: непрерывная случайная величина имеет бесконечное множество возможных значений (так называемое «несчетное множество»). Кроме того, каждое отдельное значение непрерывной случайной величины обычно не обладает никакой отличной от нуля вероятностью. Поэтому самая универсальная характеристика любой случайной величины *Y* — ее функция распределения *F*(*y*), равная вероятности *P* того, что случайная величина *Y* примет значение меньше *y*:

$$F(y) = P(Y < y). \qquad (2)$$

Функцию распределения *F*(*y*) иногда называют интегральным законом распределения [4].

В практике анализа риска [6—8] обычно используют несколько видоизмененную характеристику случайной величины потерь

$$\bar{F}(y) = P(Y \geq y). \qquad (3)$$

Чаще ее называют *F*/*N*-кривой (диаграммой) или *F*/*G*-кривой. За этими общеупотребительными названиями «скрывается» классическая функция распределения потерь *F*(*y*), только построенная в координатах {*y*; 1 − *F*(*y*)}, так как

$$\bar{F}(y) \equiv 1 - F(y). \qquad (4)$$

Далее будем называть эту характеристику случайной величины потерь *Y* при аварии на ОПО интегральной функцией распределения потерь $\bar{F}(y)$ (*F*/*Y*-кривая). Графическое изображение интегральной функции распределения $\bar{F}(n)$ потерь персонала при аварии (*F*/*N*-кривая)[1] для многоугольника распределения, представленного на рис. 1, показано на рис. 2.

[1] «Социальный риск» согласно РД 03-418—01.

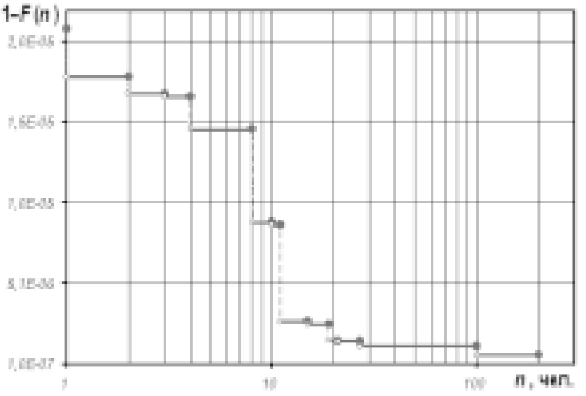

Рис. 2. Интегральная функция распределения $\bar{F}(n)$ числа погибших *n* при аварии на нефтеперекачивающей станции с резервуарным парком (*F/N*-кривая):
1 – *F*(*n*) — вероятность гибели за год персонала, более *n* человек

Основные свойства интегральной функции распределения потерь $\bar{F}(y)$ (*F*/*Y*-кривая) как функции распределения потерь при аварии на ОПО *F*(*y*), построенной в координатах {*y*; 1 – *F*(*y*)}:

1. Интегральная функция распределения потерь $\bar{F}(y)$ — невозрастающая функция с неотрицательной[1] областью определения своего аргумента $y \in [0, +\infty)$, т.е. при $y_2 > y_1$

$$\bar{F}(y_2) \le \bar{F}(y_1).$$

2. На плюс бесконечности интегральная функция распределения потерь равна нулю ($\bar{F}(+\infty) = 0$), а при нулевом аргументе — принимает значение, равное единице ($\bar{F}(0) = 1$).

3. Интегральная функция распределения людских потерь $\bar{F}(n)$ — разрывная ступенчатая функция, скачки которой происходят в точках, соответствующих возможным значениям случайной величины *N*, и равны вероятностям этих значений. Сумма всех скачков $\bar{F}(n)$ равна единице.

4. Вероятность попадания случайной величины на заданный участок $\alpha \le Y < \beta$ равна модулю приращения интегральной функции распределения $\bar{F}(y)$ на этом участке:

$$P(\alpha \le Y < \beta) = \left|\bar{F}(\alpha) - \bar{F}(\beta)\right|.$$

В частном случае при g = 1 т значение интегральной функции распределения потерь нефти $\bar{F}(g)$ для линейной части магистральных нефтепроводов равно вероятности аварии за год с разливом более 1 т нефти; значение функции *F*/*N* при *n* = 1 чел. равно вероятности несчастного случая со смертельным исходом, связанного с аварией на ОПО.

Отдельно остановимся на вопросе графического изображения интегральной функции распределения потерь $\bar{F}(y)$ (*F*/*Y*-кривая), так как даже в наиболее известном переводном источнике о промышленных авариях [6] алгоритм построения представлен с неточностями. К тому же в некоторых декларациях промышленной безопасности (большинство разработок ЗАО «Индустриальный риск», ИКЦ «Промтехбезопасность»; экспертиза Государственной экспертизы проектов МЧС и др.) многоугольники распределения потерь выдаются за *F*/*Y*-кривые. Пример неправильного построения *F*/*N*-кривой приведен на рис. 3. При этом предпринимаются безуспешные попытки аппроксимировать точки многоугольника распределения, которые могут непосредственно соединяться отрезками прямых только для наглядности [4]. Какая-либо обоснованная целесообразность поиска гладкой функциональной зависимости среди дискретных значений отсутствует.

Например, внимательно рассматривая так называемую *F*/*N*-кривую и расположенные около нее точки (см. рис. 3), можно узнать, что в районе административных зданий раз в 1000 лет при аварии может погибнуть точно 1,3 человека. Однако, судя по авторской *F*/*N*-кривой, не менее тех же 1,3 чел. будут гибнуть уже гораздо реже — раз в 5000 лет, а раз в 1000 лет погибнет не менее полчеловека.

Можно предположить, что использование не дискретной, а непрерывной случайной величины людских потерь на рис. 3 связано с трактовкой смерти как крайней степени травмирования человека. Однако в этом случае необходимо располагать однозначной зависи-

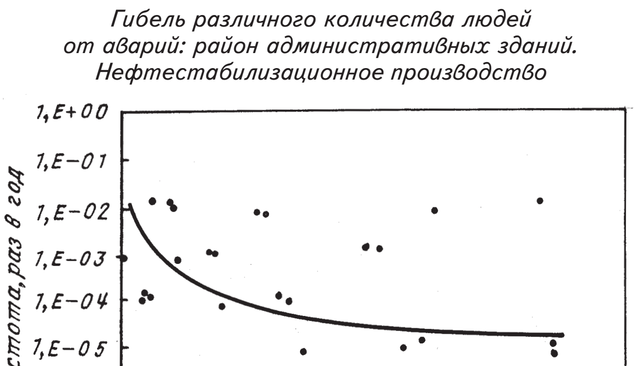

Рис. 3. Пример неправильного построения *F*/*N*-кривой (рисунок заимствован из декларации промышленной безопасности НГДУ «Первомайнефть», разработанной ООО «ПромЭкоЭксперт»; экспертиза проведена ООО «Технологии: анализ и управление»)

[1] Сознательно не принимаем в рассмотрение отрицательные значения *Y*, которые в общем случае могут существовать и трактоваться как прибыль или положительный эффект от аварии. Этот вопрос выходит за рамки настоящей статьи.

мостью между степенью травмирования и, например, потерянным временем жизни человека[1]. Возможное толкование величины людских потерь в 1,3 чел. как условия непостоянного нахождения персонала на рабочем месте полностью несостоятельно, так как все возможные условия уместно включать в полное значение вероятности гибели персонала в соответствии с теоремой умножения вероятностей [4].

Здесь необходимо вспомнить, что одна из основных целей оценки риска аварии — получение достоверных количественных показателей, пригодных для эффективного управления процессом обеспечения промышленной безопасности на ОПО. Оперирование неоднозначными исходными данными даст такие же неоднозначные практические рекомендации и результаты управления.

Для устранения возможных разночтений, а также более удобного построения F/N-кривых приведем выражение (3) в развернутом виде:

$$\bar{F}(y)=\begin{cases} 1, & y=0 \\ \sum_{i=1}^{k} p_i = 1-p_0, & 0<y\le y_1 \\ \ldots & \ldots \\ \sum_{i=s}^{k} p_i, & y_{s-1}<y\le y_s \\ \ldots & \ldots \\ p_k, & y_{k-1}<y\le y_k \\ 0, & y_k<y<\infty \end{cases}. \tag{5}$$

Из формул (3) и (5) следует, что никакие точки, обозначающие отдельные сценарии аварии, не могут лежать выше F/Y-кривой.

Для непрерывной случайной величины материальных потерь при аварии G может быть определена функция плотности распределения (плотность вероятности) [4]:

$$f(g)=F'(g)=-\bar{F}'(g). \tag{6}$$

Среди основных числовых характеристик случайных величин нужно прежде всего отметить те, которые характеризуют положение и разброс значений случайной величины на числовой оси (математическое ожидание, мода, медиана и дисперсия).

Математическое ожидание дискретной случайной величины N (коллективный риск согласно РД 03-418—01) определяется как

$$R_{\text{кол}}=M[N]=\sum_{i=1}^{k} n_i p_i. \tag{7}$$

Если ввести в рассмотрение случайную величину числа рискующих попасть в аварию U, то можно записать общее выражение для среднего по группе рискующих индивидуального риска $R_{\text{инд}}$ как математического ожидания M частного случайных величин N и U:

[1] Шкала Россера (R. Rosser, P. Kund, 1978).

$$R_{\text{инд}}=M\left[\frac{N}{U}\right]=M[N]M\left[\frac{1}{U}\right]+K_{n,1/u}, \tag{8}$$

где $K_{n,1/u}$ — корреляционный момент [4] случайных величин N и $1/U$. В частном случае при $U=\text{const}$

$$R_{\text{инд}}=M\left[\frac{N}{U}\right]=\frac{1}{u}M[N]=\frac{R_{\text{кол}}}{u}, \tag{9}$$

где u — общее число рискующих людей.

Математическое ожидание непрерывной случайной величины G (ожидаемый ущерб согласно РД 03-418—01) определяется как

$$R_{\text{руб}}=M[G]=\int_0^{\infty} g f(g)\,dg. \tag{10}$$

Модой $\mathcal{M}$ дискретной случайной величины называется ее наиболее вероятное значение, а непрерывной — значение, в котором плотность вероятности [4] максимальна.

Медианой $\mathcal{Me}$ случайной величины Y называется такое ее значение, для которого $P(Y<\mathcal{Me})=P(Y>\mathcal{Me})$ [4]. В случае симметричного модального распределения медиана совпадает с математическим ожиданием и модой.

Для полноты приведем и формальное определение дисперсии случайной величины Y — математическое ожидание квадрата соответствующей центрированной величины $\overset{\circ}{Y}: D[Y]=M\left[\overset{\circ}{Y}{}^2\right]$. Более подробно о свойствах и способах вычисления дисперсии читайте в работе [4].

В терминах теории вероятностей основные показатели, используемые при анализе риска аварии на ОПО, представлены в таблице.

Кратко коснемся вопроса о точности и достоверности получаемых оценок, так как в общем случае при анализе риска аварии приходится иметь дело с неточными и неполными исходными данными, а рассматривается только основная часть спектра сценариев возможных аварий на ОПО. В самом простом случае при решении подобных задач вместе с методами теории вероятностей могут использоваться, с соответствующими условиями, стандартные методы математической статистики, как для определения законов распределения случайных величин потерь при аварии на ОПО, так и для нахождения неизвестных параметров этих распределений.

В заключение, в качестве обобщения отметим следующее:

1. Использование более полного набора достоверных количественных показателей позволяет более обоснованно оценить риск аварии и предложить рекомендации, направленные на обеспечение промышленной безопасности ОПО. При количественной оценке риска аварии ОПО задача максимум — определить полный ряд распределения рассматриваемых случайных величин X, D и N, построить F/Y-кривые или функ-

Показатель риска аварии на ОПО	Случайная величина	Тип	Показатель риска в терминах теории вероятностей	Формула, описание
Технический риск	Есть–нет отказ X	Дискретная характеристическая	Вероятность отказа с определенными последствиями, который произойдет за некоторый отрезок времени	$p_{i=1}$ — вероятность того, что X=1
Потенциальный территориальный риск	Есть–нет факторы смертельного поражения D	То же	Вероятность возникновения за определенное время в некоторой точке пространства факторов смертельного поражения	$p_{i=1}$ — вероятность того, что D=1
Социальный риск (F/N-кривая)	Людские потери при аварии N	Дискретная	Интегральная функция распределения людских потерь	$\bar{F}(n) = P(N \geq n)$
Полное описание сценариев аварии с гибелью людей	То же	То же	Ряд распределения N (графически — многоугольник распределения)	$\begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline n_i & 0 & n_1 & n_2 & \ldots & n_s & \ldots & n_k \\ \hline p_i & 1-\sum_{i=1}^{k} p_i & p_1 & p_2 & \ldots & p_s & \ldots & p_k \\ \hline \end{array}$
Коллективный риск ($R_{\text{кол}}$)	—«—	—«—	Математическое ожидание N	$R_{\text{кол}} = M[N] = \sum_{i=1}^{k} n_i p_i$
Индивидуальный риск ($R_{\text{инд}}$)	Людские потери при аварии N и число рискующих U	Дискретные	Математическое ожидание N и U	$R_{\text{инд}} = M\left[\frac{N}{U}\right] = M[N]M\left[\frac{1}{U}\right] + K_{n,1/u}$
Риск материальных потерь (F/G-кривая)	Материальные потери при аварии G	Непрерывная	Интегральная функция распределения материальных потерь	$\bar{F}(g) = P(G \geq g)$
Полное описание сценариев аварии с материальными потерями	То же	То же	Плотность вероятности G (графически — кривая распределения)	$f(g) = F'(g) = -\bar{F}'(g)$
Ожидаемый ущерб ($R_{\text{руб}}$)	—«—	—«—	Математическое ожидание G	$R_{\text{руб}} = M[G] = \int_0^{\infty} g f(g)\,dg$
Наиболее вероятный ущерб	—«—	—«—	Мода G	$G=g$ при $f(g) \to \max$
Полный ожидаемый вред (ущерб) от аварии (R_{Σ})	Людские и материальные потери при аварии N, G	Смешанная	Сумма математических ожиданий N и G	$R_{\Sigma} = H\sum_i n_i p_i + \int g F'(g)\,dg$, где H — стоимостная оценка человеческой жизни

цию плотности вероятности потерь G от аварии; а задача минимум — построить репрезентативный статистический ряд Y и оценить основные числовые характеристики случайных величин материальных G и людских N потерь (математическое ожидание, мода и дисперсия).

2. Специалистам-разработчикам деклараций, кандидатам в эксперты и экспертам в области промышленной безопасности рекомендуем обратить особое внимание на правильность трактовки основных показателей риска, приводимых в работах по анализу риска аварий на ОПО.

Список литературы

1. *Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д.* Математические методы в теории надежности. — М.: Наука, 1965. — 333 с.
2. *Хенли Э. Дж., Кумамото Х.* Надежность технических систем и оценка риска / Пер. с англ. — М.: Машиностроение, 1984. — 528 с.
3. *Aven T.* Reliability and Risk Analysis. Elsevier Applied Science, 1992.
4. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. — М.: Высшая школа, 1998. — 576 с.
5. *Гражданкин А.И., Лисанов М.В., Печеркин А.С.* Использование вероятностных оценок при анализе безопасности опасных производственных объектов // Безопасность труда в промышленности. — 2001. — № 5. — С. 33—36.
6. *Маршалл В.* Основные опасности химических производств / Пер. с англ. Г. Барсамян и др. — М.: Мир, 1989. — 672 с.
7. *Finkelstein M.S.* Measured of Risk and a Concept of Acceptable Risk / Proceeding of the International Scientific School Modelling and Analysis of Safety, Risk and Quality in Complex Systems. — SPb, 2001.
8. *Rasmussen N.* Reactor Safety Study — an Assessment of Accident Risk in US Commercial Nuclear Power Plants. WASH-1400 // Nuclear Regulatory Commission. — Washington DC, 1975.