

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ОЦЕНОК ПРИ АНАЛИЗЕ БЕЗОПАСНОСТИ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

А.И. ГРАЖДАНКИН, М.В. ЛИСАНОВ, А.С. ПЕЧЕРКИН (ГУП «НТЦ  
«Промышленная безопасность»)

Использование вероятностных оценок риска для анализа состояния безопасности — одно из наиболее дискуссионных направлений в теории безопасности [1–4]. Норматив Госгортехнадзора России РД 08-120—96 [5] рекомендует с осторожностью относиться к применению количественных показателей риска в качестве критериев безопасности, учитывая сложность рассматриваемых объектов и большую неопределенность используемой для расчетов информации [3, 6, 7]. Вместе с тем наличие таких показателей в качестве нормируемых критериев пожарной безопасности [8, 9] и попытки принять их в качестве основных показателей промышленной безопасности требуют необходимых разъяснений.

Рассмотрим основы математического аппарата, применяемого при оценке риска каких-либо негативных событий на опасных производственных объектах (ОПО).

Определим и обозначим события:

$A$  — авария на ОПО (нерасчетное внезапное высвобождение энергии);

$C_i$  — реализация аварии по  $i$ -му сценарию;

$B_i$  — причинение ущерба  $y_i$  ОПО и (или) другим объектам.

Полный риск  $R$  эксплуатации ОПО, как математическое ожидание причиняемых ущербов  $Y$ , можно представить следующим образом:

$$R = M[Y] = \sum_{i=1}^n P(B_i) y_i, \quad (1)$$

где  $P(B_i)$  — вероятность причинения ущерба  $y_i$  ОПО и (или) сторонним объектам.

Формулу (1) полезно разбить на два слагаемых — риск аварии  $R_A$  и штатный риск  $R_{III}$ , т.е.

$$R = R_A + R_{III} = \sum_{i=1}^{n-1} P(B_i) y_i + [P(B_n) \approx 1] \sum_{j=1}^m \overline{y_{nj}}, \quad (2)$$

где  $\overline{y_{nj}}$  — размер средних ущербов, причиняемых ОПО и сторонним объектам при штатном функционировании ОПО. К основным из них относят убытки ОПО от деятельности других субъектов  $\overline{y_{ТЭО}}$  и платы за загрязнение окружающей среды  $\overline{y_{ООС}}$ .

Величина  $\overline{y_{ООС}}$  на стадии проектирования оценивается с помощью процедуры ОВОС (оценка воздействия предполагаемой деятельности на окружающую среду), на стадии эксплуатации ОПО — по документам, устанавливающим предельно допустимые выбросы в атмосферу (том ПДВ), сбросы в водные объекты (том ПДС) и лимиты размещения отходов. На начальном этапе проектирования вели-

чина  $\overline{y_{ТЭО}}$  оценивается технико-экономическим обоснованием (ТЭО) намечаемой деятельности на стадии эксплуатации — с помощью процедуры аудита финансово-экономического характера (далее не будем останавливаться на методах определения величин, составляющих штатный риск  $R_{III}$ , так как это выходит за рамки настоящей статьи).

Риск аварии  $R_A = \sum_{i=1}^{n-1} P(B_i) y_i$  как при проектирова-

нии, так и при эксплуатации ОПО оценивается в рамках декларирования промышленной безопасности ОПО или иных процедур, требующих проведения анализа риска. Члены произведения первого слагаемого формулы (2) отличаются от аналогичных членов второго слагаемого тем, что величины вероятностей, как правило, очень малы, а величины ущербов наоборот могут быть очень высокими.

Подробнее остановимся на методах оценки риска аварии  $R_A$ . Для этого сначала определим событие  $B_i$  через события  $A$  и  $C_i$  (определения см. выше):

$$B_i = A \cap C_i. \quad (3)$$

Поскольку события  $A$  и  $C_i$  являются совместными, искомая вероятность события, связанного с причинением ущерба  $y_i$  сторонним объектам, определяется как:

$$P(B_i) = P(A \cap C_i) = P(A)P(C_i|A). \quad (4)$$

Подставляя выражение (4) в формулу (2), получаем:

$$R = R_A + R_{III} = \sum_{i=1}^{k=(n-1)} P(A)P(C_i|A) y_i + \overline{y_{ООС}} + \overline{y_{ТЭО}} \quad (5)$$

или в более сжатом виде для риска аварии  $R_A$ :

$$R_A = \sum_{i=1}^k P(A)P(C_i|A) y_i = [P(A)] \left[ \sum_{i=1}^k P(C_i|A) y_i \right]. \quad (6)$$

Первый член  $[P(A)]$  произведения в выражении (6) описывает причинные составляющие, а второй —

$\left[ \sum_{i=1}^k P(C_i|A) y_i \right]$  — последствия возможной аварии.

Оценка последствий возможных аварий на ОПО (нахождение в выражении (6) второго члена) — в настоящее время достаточно изученный вопрос. Существуют многочисленные методики оценок последствий, которые хорошо зарекомендовали себя в практике декларирования промышленной безопас-

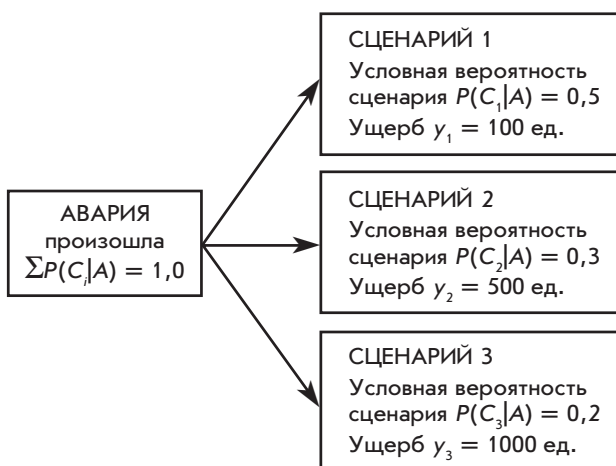


Рис.1. «Дерево событий» (исходов аварии)

ности [10, 11 и др.]. В большинстве своем они базируются на методах анализа «деревьев событий». На рис. 1 приведен пример одного из таких «деревьев». Подчеркнем, что здесь используются условные, а не истинные вероятности, причем условием является факт наступления события-аварии.

Таким образом, анализ последствий возможных аварий привязан к конкретному объекту и отражает его индивидуальную специфику (место расположения, энергетические запасы, особенности технологии и т.д.).

Сложнее обстоит дело с оценкой вероятности возникновения самой аварии —  $P(A)$ . Существующие методики оценки  $P(A)$  сложны, громоздки и трудоемки в основном из-за отсутствия, неточности и неопределенности исходных данных. Поэтому на практике, обычно  $P(A)$  принимают, как среднестатистическую по отрасли для данного типа ОПО, что, к сожалению, не отражает специфики декларируемого ОПО. К тому же из рассмотрения зачастую выпадают некоторые причины возникновения аварий и соответственно становится затруднительным рекомендовать индивидуальные меры безопасности, направленные на предупреждение аварии на конкретном ОПО, хотя, как показывает практика, меры по снижению вероятности аварии на два-три порядка эффективнее мер, направленных на снижение возможных ущербов по критерию «затраты—результаты» [4].

Одно из возможных решений создавшейся проблемной ситуации — оценка вероятности возникновения происшествия  $P(A)$  путем имитационного моделирования (ИМ) процесса возникновения происшествия в системе «оператор—оборудование—рабочая среда». Такое моделирование в известной степени — компромиссное решение между неопределенностью исходных данных и точностью получаемых оценок. Кроме того, с помощью ИМ можно оптимизировать комплекс мероприятий безопасности по уменьшению вероятности  $P(A)$ , т.е. предупреждение аварий на конкретном ОПО [12].

К сожалению, в силу объективных и субъективных причин  $P(A)$  не применяется широко на практике специалистами по промышленной безопасности риска ОПО. К объективным причинам можно отнести высокую трудоемкость оценки  $P(A)$ , так как объект исследования ОПО — сложная дискретная система. Одна из основных субъективных причин — механистическое распространение методов теории надежности, применимых к отдельным узлам и элементам для использования в анализе риска ОПО в целом, которые являются сложными системами. Некорректность такого подхода проявляется в том, что теория надежности [2, 8], как и любая другая теория, имеет свою область применения, которая ограничена успешным решением поставленных задач только для отдельных простых элементов и технических узлов, но никак не для сложных систем. Во-первых, сложная система не есть простая сумма отдельных элементов [3, 6 и др.], а во-вторых, даже если в первом приближении представить ОПО как простую сумму отдельных узлов, то закономерности возникновения отказов для ОПО и составляющих его узлов будут качественно различаться, поскольку вид функции распределения суммы случайных величин стремится к нормальному, независимо от вида функций распределения составляющих случайных величин (в нашем случае для узлов и элементов ОПО время между восстанавливаемыми отказами распределено по экспоненциальному закону).

Другая субъективная причина некорректного использования вероятности возникновения происшествия  $P(A)$  при оценке риска ОПО — «привычка» некоторых специалистов по промышленной безопасности использовать «знакомые» и «удобные» им количественные характеристики из теории надежности — надежность, безотказность, наработка на отказ и др. Как уже отмечалось выше, эти показатели строго применимы только для анализа «простых» (бинарных: есть—нет отказа<sup>1</sup>) систем — клапан, задвижка, насос, отрезок трубопровода и др., и в явном виде, конечно, не применяются, но все это отложило отпечаток на размерность применяемых при анализе риска ОПО количественных характеристик<sup>2</sup>.

Некоторые разработчики деклараций промышленной безопасности при анализе риска ОПО употребляют термин «вероятность (частота) аварии» с размерностью 1/год. Целесообразно рассмотреть причины его появления, а также корректность употребления в различных случаях. Условимся далее

<sup>1</sup> В сложных системах отказы отдельных элементов не всегда приводят к отказу всей системы, кроме того, у сложных систем есть целый спектр состояний — динамическое равновесие, нарушение равновесия, адаптация к неблагоприятным ситуациям, опасные и критические ситуации и, наконец, авария.

<sup>2</sup> На выбор размерности показателей безопасности повлияли также объективные трудности статистической обработки данных об аварийности и травматизме в промышленности СССР и Российской Федерации — достаточно вспомнить неизвестные коэффициенты обязательной отчетности: коэффициенты частоты и тяжести аварийности и травматизма —  $K_4$  и  $K_7$ .

обозначать величину, характеризующую повторяемость события-аварии, как  $\lambda$  (1/год).

Во-первых,  $\lambda$ , как среднюю интенсивность потока аварий на ОПО, легко вычислить для некоторой отраслевой совокупности действующих объектов, если известна статистика аварий по отрасли за несколько последних лет

$$\lambda = \frac{N}{nT}, \quad (7)$$

где  $N$  — число аварий;  $n$  — число объектов;  $T$  — период рассмотрения.

Отметим, что говорить об устойчивости величины  $\lambda$  не приходится, так как интенсивность зависит от периода рассмотрения и в общем случае имеет существенные колебания в силу редкости событий-аварий и ограниченности средней продолжительности эксплуатации ОПО, составляющей 30–50 лет<sup>1</sup>. Статистическая устойчивость величины  $\lambda$  является примером только для некоторых типов ОПО, например для линейной части магистральных трубопроводов, вследствие их большой протяженности (т.е. для «множества объектов» по отрасли надзора).

Оцененная подобным образом среднеотраслевая характеристика  $\lambda_{\text{отрасль}}$  не отражает специфики конкретного ОПО, а поэтому затруднительно ранжировать ОПО по степени опасности и, следовательно, рекомендовать внедрение конкретных (адресных) мер безопасности на определенных ОПО в первую очередь, т.е. в конечном счете эффективно расходовать и распределять ресурсы на обеспечение безопасности.

Но возвратимся к самому факту применения на практике величины, характеризующей повторяемость аварий на ОПО,  $\lambda$  [1/год], что приводит к некоторым неточностям, недопониманиям и искажениям. Такую же размерность имеет и средняя интенсивность аварий на ОПО, которая линейно зависит от средней интенсивности выполняемых на ОПО работ —  $I_n$ , так как  $P(A) = \text{const}$  для «идеального» ОПО<sup>2</sup> в силу свойства устойчивости частоты, поэтому

$$\lambda = P(A)I_n. \quad (8)$$

В качестве временного периода усреднения обычно принимают один год.

Теперь рассмотрим вопрос о повторяемости аварий [1/год], как о плотности распределения вероятности. Такой подход является «наследием» теории надежности<sup>3</sup>, в которой вероятность отказов отдельных элементов оценивается математическим аппаратом случайных величин теории вероятностей. В качестве случайной величины выбирается момент времени наступления отказа  $t$  или интервал времени между двумя последовательными отказами  $\Delta t$  (оце-

нивается в часах для узлов и элементов). Имея статистические оценки случайных величин, легко вычислить другие важные в теории надежности показатели — безотказность, наработка на отказ и др.

Установив функцию распределения этих случайных величин  $t$  или  $\Delta t$ , вычислим вероятность наступления отказа за какой-то промежуток времени<sup>1</sup>. Рассмотрим характерные плотности распределения вероятностей случайных величин  $t$  (или  $\Delta t$ ) для простого элемента (узла) и для ОПО, как сложного объекта.

Известно, что вероятность  $P_k(\Delta t)$  наступления  $k$  событий-отказов для простого элемента (узла) за интервал времени  $\Delta t$  выражается законом распределения Пуассона:

$$P_k(\Delta t) = \frac{(\lambda \Delta t)^k}{k!} e^{-\lambda \Delta t}. \quad (9)$$

Из формулы (9) следует, что функция плотности вероятности случайной величины  $\Delta t$  для простейшего потока событий-отказов имеет вид показательного (экспоненциального) распределения с параметром  $\lambda$ :

$$f(\Delta t) = \lambda e^{-\lambda \Delta t}. \quad (10)$$

где  $\lambda$  — интенсивность (плотность) потока событий-отказов.

Если предположить, что аналогичное распределение характерно и для ОПО, то область ординат, принимаемых в рассмотрение при анализе риска ОПО, будет находиться очень близко к началу координат. При условии известной малости интенсивности  $\lambda$  и вероятности аварий  $P(A)$  можно пренебречь видом функции плотности вероятности  $f(\Delta t)$  на интересующем участке и принять ее постоянной, т.е.  $f(\Delta t) = \lambda$ . Тогда справедливы следующие соотношения:

$$P_{\Delta t}(A_i) = \lambda[\Delta t \equiv 1 \text{ год}], \quad (11)$$

где  $P_{\Delta t}(A_i)$  — это вероятность события  $A_i$  (наступление аварии в течение года). Заметим, что  $P_{\Delta t}(A_i)$  — безразмерная величина и численно совпадает с интенсивностью аварий на ОПО —  $\lambda^*$ . Но как выяснили выше, всегда известна функция плотности вероятностей интервалов времени между отказами — она постоянна и равна  $\lambda^{**}$ . Поэтому необходимость использования аппарата случайных величин необоснованна и более того «вредна», поскольку создается «научная» путаница в понятиях и терминах, используемых в промышленной безопасности. Если уж идти этим путем, то необходимо учитывать, что для ОПО, как сложной системы, функция плотности вероятности  $f(\Delta t)$  не является экспоненциальной и для большинства ОПО скорее выглядит, как представ-

<sup>1</sup> Если бы для какого-либо конкретного ОПО можно было легко с приемлемым уровнем доверительной вероятности по данным статистики оценить  $\lambda$ , то такое ОПО необходимо медленно закрывать — слишком много аварий.

<sup>2</sup> Характеристика которого условно постоянна во времени.

<sup>3</sup> Например, В. Маршалл [1] трактует надежность, как «величину обратную риску», а риск, как «темп реализации опасности», т.е. как интенсивность аварий, что не совсем одно и то же.

<sup>1</sup> Принципиальным отличием ОПО, как сложных систем, от отдельных простых элементов и узлов состоит в том, что нас не очень интересует, когда (в какой именно момент  $t$ ) наступит авария, поскольку такие события редки, а больше заботит частота этих событий, как статистическая оценка вероятности аварийного события.

\* Именно поэтому их часто путают.

\*\* При  $\lambda \Delta t < 0,01$  формула (10) превращается в  $f(\Delta t) = \lambda \Delta t$ .

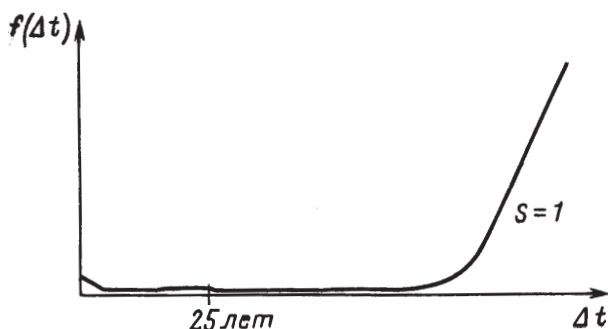


Рис. 2. Плотность вероятности интервалов времени между авариями для ОПО (теоретическая кривая Мабута)

лено на рис. 2, т.е. функция плотности распределения интервалов между временем наступления аварии  $f(\Delta t)$  на ОПО для интересующего участка (время жизни ОПО) малополезна при определении вероятности аварии<sup>1</sup>, а только лишь указывает на то, что интенсивность аварий необходимо оценивать  $\lambda^*$ , опираясь на соотношение (8).

Итак, приведем некоторые обобщения по обсуждаемой проблеме.

1. Риск есть мера опасности. Он характеризует возможность возникновения аварии и тяжесть ее последствий. Численно риск можно выразить математическим ожиданием ущерба при функционировании ОПО.

2. Существует некоторое преобладание апостериорных над априорными методами предупреждения и снижения тяжести последствий возможных аварий. Большинство мер безопасности носят характер «методов пожарной команды». (Как правило, эти методы имеют ярко выраженную популистскую основу, — чем крупнее авария, тем эффективнее спасение.)

3. Для более эффективного прогнозирования и предупреждения возможных аварий необходимо развитие априорных методов оценки риска, в частности, значение вероятности аварии на конкретном ОПО можно оценить с помощью построения и анализа «деревьев отказов» или имитационного моделирования процесса возникновения происшествий в человеко-машинной системе «оператор-оборудование-рабочая среда».

4. Основная цель анализа риска, в том числе с помощью оценок вероятностей аварийных ситуа-

<sup>1</sup> Так как функция плотности вероятности случайной величины постоянна, то она не несет никакой дополнительной информации кроме значения  $\lambda$ , и необходимость ее использования отпадает сама собой.

\* Именно этой величиной в основном оперируют специалисты по промышленной безопасности.

ций, — выявление «слабых» мест для последующего обоснования мер обеспечения безопасности. Использование вероятностных оценок в качестве критериев безопасности опасных производственных объектов представляется сомнительным и преждевременным из-за упрощений, допущений в используемом математическом аппарате, отсутствия достоверной статистики по инцидентам, авариям и надежности оборудования, на базе которой построены существующие методики расчета показателей пожарной безопасности. Применение в промышленности новых технологий, использование нетрадиционных технических решений не предполагает быстрого получения достаточного числа статистически достоверных данных по аварийности, а также безотказности эксплуатируемого оборудования. Расчеты вероятности аварийных ситуаций, как правило, необходимы для сравнительного анализа различных вариантов, обоснования и оптимизации предлагаемых мер безопасности.

#### Список литературы

1. Маршалл В. Основные опасности химических производств / Пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — 672 с.
2. Хенли Э.Дж., Кумамото Х. Надежность технических систем и оценка риска. — М.: Машиностроение, 1984.
3. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. — М.: Наука, 1978.
4. Белов П.Г. Теоретические основы системной инженерии безопасности. — Киев: КМУ ГА., 1997. — 426 с.
5. РД 08-120—96. Методические рекомендации по проведению анализа риска опасных производственных объектов (утверждены постановлением Госгортехнадзора России от 12.07.96 № 29).
6. Емельянов В.В., Ясиновский С.И. Введение в интеллектуальное имитационное моделирование сложных дискретных систем и процессов. Язык РДО. — М.: АНВИК, 1998. — 427 с.
7. Анализ риска и его нормативное обеспечение / В.Ф. Мартынюк, М.В. Лисанов, Е.В. Кловач, В.И. Сидоров // Безопасность труда в промышленности. — 1995. — № 11. — С. 55–62.
8. ГОСТ Р 12.3.047—98. ССБТ. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля.
9. ГОСТ 12.1.004—91. ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования.
10. Методика оценки последствий химических аварий (методика «Токси»), согл. с Госгортехнадзором России (письмо от 03.07.98 № 10-03/342), НТЦ «Промышленная безопасность».
11. РД «Методическое руководство по оценке степени риска аварий на магистральных нефтепроводах». (Утв. АК «Транснефть», приказ от 30.12.99 № 152; согл. с Госгортехнадзором России, письмо от 07.07.99 № 10-03/418).
12. Гражданкин А.И., Белов П.Г. Экспертная система оценки техногенного риска опасных производственных объектов // Безопасность труда в промышленности. — 2000. — № 11. — С. 6–10.