

*По материалам публикаций:*

*Гражданкин А.И., Федоров А.А.* К вопросу об оценке риска при декларировании промышленной безопасности опасных производственных объектов//Безопасность жизнедеятельности. – 2001. - N4. - С.2-6.

*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.

## **РИСК ПРОМЫШЛЕННЫХ АВАРИЙ И ЕГО ОЦЕНКА В ПРАКТИКЕ ДЕКЛАРИРОВАНИИ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ**

Нет необходимости перечислять крупные аварии и техногенные катастрофы, произошедшие в XX веке. Все они подробно описаны и систематизированы, произведен анализ причин, которые принимаются во внимание при проектировании и эксплуатации современных опасных производственных объектов (ОПО).

Казалось бы, накоплен солидный опыт в деле предупреждения и ликвидации аварий, проанализированы и вскрыты причины и условия их возникновения, принимаются последующие соответствующие меры безопасности. Однако кривые роста количества и тяжести техногенных происшествий не обнаруживают заметных тенденций к качественному снижению. Основных ответов на это противоречие, по-видимому, два:

1. Научно-технический прогресс и развитие производительных сил общества приводят ко всё возрастающему насыщению техносферы рукотворными (техническими) объектами, в которых аккумулированы искусственно созданные энергетические запасы, представляющие потенциальную опасность для человека и окружающей его среды.
2. На практике наблюдается приоритет использования апостериорных методов над априорными в вопросах совершенствования безопасности. Большинство мер безопасности осуществляемых на ОПО носят характер “методов пожарной команды”. (Увы, эти методы имеют ярко выраженную популистскую основу,- чем крупнее авария, тем эффективней спасение и телекартинка).

Первый пункт обычно не вызывает серьезных возражений. Действительно, человек создает технические объекты из утилитарных соображений, как устройства, совершающие полезную (для человека) работу. Непременным условием совершения любой работы является изменение (уменьшение) потенциала запасенной в техническом объекте энергии (или подводимой к нему). “С точки зрения энергии” едино, какую работу совершать – полезную или вредную для человека. Диссипация – одно из основных свойств энергии. Другими словами, энтропия любой закрытой системы, предоставленной самой

себе, согласно второму началу термодинамики, самопроизвольно увеличивается. Рукотворный технический объект направляет этот процесс в определенное, ограниченное, искусственное русло, для совершения помимо диссипации и полезной с точки зрения человека работы. Любое отклонение от такого процесса “более естественно”, чем искусственные рамки совершения полезной работы, что может привести, в конечном счете, к самопроизвольному высвобождению накопленной энергии из технического объекта – к аварии. Поэтому любой технический объект, имеющий или использующий искусственный запас энергии, потенциально опасен. К тому же скорость нарастания численности технических объектов в техносфере сопоставима или больше общего возрастания их надежности (хотя вновь строящиеся ОПО и имеют более высокую надежность, однако надежность эксплуатирующихся ОПО только снижается со временем).

Для рассмотрения второго пункта причин современного состояния аварийности и травматизма необходимо определиться в используемых ниже понятиях и терминах. Примем в качестве рабочих следующие определения:

**Опасность** – возможность причинения ущерба (вреда) кому- или чему-либо.

**Ущерб** – качественное и/или количественное изменение свойств рассматриваемого объекта в худшую сторону.

**Риск** – мера опасности.

Для ОПО риск эксплуатации  $R$  в самом первом приближении может быть количественно оценен математическим ожиданием ущерба  $Y$  при функционировании ОПО:

$$R = M[Y] \quad (1)$$

Определим и обозначим также следующие события:

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

Событие  $C_i$  – реализация аварии по  $i$ -му сценарию;

Событие  $B_i$  – причинение ущерба  $y_i$  ОПО и/или сторонним объектам.

Тогда формулу (1) можно представить следующим образом:

$$R = M[Y] = \sum_{i=1}^n P(B_i) \cdot y_i \quad (2)$$

где  $P(B_i)$  – вероятность причинения ущерба  $y_i$  при эксплуатации ОПО.

Формулу (2) полезно разбить на два слагаемых – риск аварии  $R_A$  и штатные потери  $R_{III}$ , т.е.:

$$R = R_A + R_{III} = \sum_{i=1}^{n-1} P(B_i) \cdot y_i + [P(B_n) \approx 1] \cdot \sum_{j=1}^m \overline{y_{nj}}, \quad (3)$$

где  $\overline{y_{nj}}$  - размер средних ущербов, причиняемых ОПО и/или сторонним объектам при штатном функционировании ОПО. К основным из них относят убытки от хозяйственной деятельности  $\overline{y_{тэо}}$  и платы за загрязнение окружающей природной среды  $\overline{y_{оос}}$ .

Оценка величины  $\overline{y_{оос}}$  на стадии проектирования проводится, как правило, с помощью процедуры ОВОС (оценка воздействия предполагаемой деятельности на окружающую среду), а на стадии эксплуатации - с помощью действующих индивидуальных нормативно-разрешительных документов ОПО – томов ПДВ,

ПДС и лимитов размещения отходов. Оценка величины  $\overline{y_{тэо}}$  на стадии проектирования проводится с помощью процедуры ТЭО (технико-экономического обоснования намечаемой деятельности), а на стадии эксплуатации - с помощью аудита финансово-экономического характера. Не будем более подробно останавливаться на методах определения величин составляющих штатные потери  $R_{III}$ , т.к. это выходит за рамки предмета рассмотрения.

$$R_A = \sum_{i=1}^{n-1} P(B_i) \cdot y_i$$

Оценка же величины риска аварии как на этапе проектирования, так и на этапе эксплуатации ОПО проводится главным образом в рамках процедуры декларирования промышленной безопасности ОПО.

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

$$B_i = A \cap C_i \quad (4)$$

Т.к. события  $A$  и  $C_i$  являются совместными, то искомая вероятность события, связанного с причинением ущерба  $y_i$  при эксплуатации ОПО определяется как:

$$P(B_i) = P(A \cap C_i) = P(A) \cdot P(C_i | A). \quad (5)$$

Подставляя выражение (5) в формулу (3), получим:

$$R = R_A + R_{III} = \sum_{i=1}^{k=(n-1)} P(A) \cdot P(C_i|A) \cdot y_i + \overline{y_{оос}} + \overline{y_{гзо}} \quad (6)$$

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

$$R_A = \sum_{i=1}^k P(A) \cdot P(C_i|A) \cdot y_i = [P(A)] \cdot \left[ \sum_{i=1}^k P(C_i|A) \cdot y_i \right] \quad (7)$$

Первый член  $[P(A)]$  произведения выражения (7) описывает причинные составляющие риска аварии  $R_A$ , а второй член  $\left[ \sum_{i=1}^k P(C_i|A) \cdot y_i \right]$  – последствия возможной аварии.

Оценка последствий возможных аварий на ОПО (т.е. нахождение в выражении (7) второго члена) является в настоящее время достаточно изученным вопросом - существуют многочисленные методики оценки последствий промышленных аварий, которые широко применяются на практике [6, 7, 8 и др.]. В большинстве своем они базируются на методах анализа “дерева событий” - сценариев развития аварии (Events Tree –рис.1) совместно с моделями поражения (см. напр. [5]).

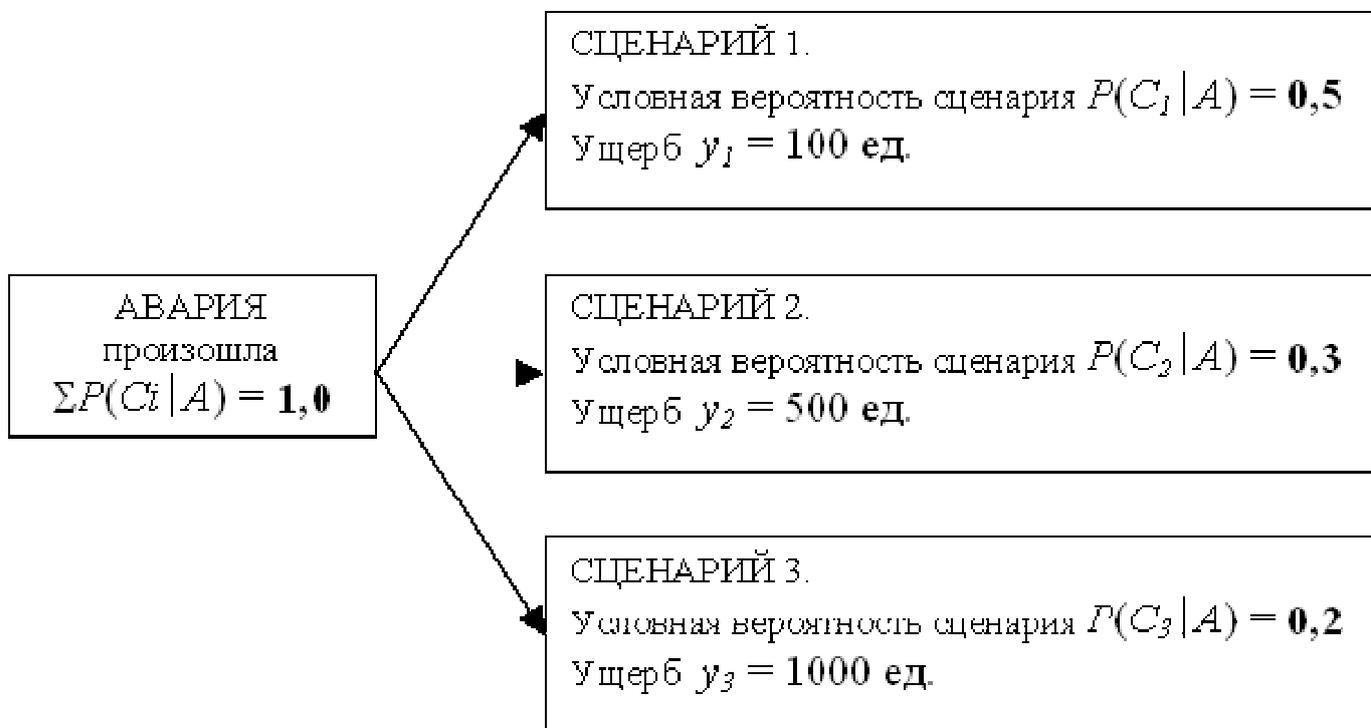


Рис.1 Дерево исходов аварии.

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 величины вероятности возникновения самой аварии -  $P(A)$ . Существующие методики (главным образом “дерево отказа” - Fault Tree) оценки величины  $P(A)$  сложны и трудоемки в основном из-за отсутствия, неточности и неопределенности исходных данных [1,9]. Поэтому на практике, обычно величину  $P(A)$  принимают, как среднестатистическую по отрасли для данного типа ОПО, что, к сожалению, не отражает специфику отдельного ОПО. К тому же из рассмотрения выпадает целый класс причин возникновения аварий, связанных с “человеческим фактором”. Соответственно становится затруднительным рекомендовать индивидуальные меры безопасности, направленные на снижение вероятности возникновения аварии для конкретного ОПО, хотя, как показывает практика, меры по снижению вероятности аварии на 2-3 порядка эффективнее мер, направленных на снижение возможных ущербов по критерию “затраты-результаты”.

В силу объективных и субъективных причин величина  $P(A)$  в явном виде не применяется широко на практике, как количественный показатель при анализе риска аварии ОПО. К объективным причинам можно отнести высокую трудоемкость точной оценки  $P(A)$ , так как объект исследования (ОПО) является сложной дискретной системой [4]. Одной из основных субъективных причин является механистическое распространение методов теории надежности, применимых к отдельным узлам и элементам, для анализа безопасности ОПО в целом, как сложных систем. Некорректность такого подхода проявляется в том, что теория надежности, 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.

Привычка оперировать “знакомыми” и “удобными” количественными характеристиками из теории надежности (безотказность, наработка на отказ и проч.) приводит к тому, что зачастую при анализе риска аварии употребляется термин “вероятность (частота) аварии” с размерностью  $1/\text{год}$ . Попробуем выяснить основные причины его появления, а так же корректность употребления в различных случаях. Условимся далее обозначать величину, характеризующую повторяемость события-аварии, как  $\lambda$  ( $1/\text{год}$ ).

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

$$\lambda = \frac{\text{число аварий}}{(\text{число объектов}) \cdot (\text{период рассмотрения})} \quad (8)$$

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 около 50-ти лет. Статистическая устойчивость величины  $\lambda$  является приемлемой только для некоторых типов ОПО, - например, для линейной части магистральных трубопроводов, вследствие их большой протяженности (т.е. “много объектов” по отрасли).

Оцененная подобным образом среднеотраслевая характеристика  $\bar{\lambda}_{отрасль}$  не отражает индивидуальность ОПО, а поэтому затруднительно ранжировать ОПО по степени опасности и, следовательно, рекомендовать внедрение адресных мер безопасности на определенных ОПО в первую очередь, т.е. в конечном счете, эффективно расходовать и распределять ресурсы на совершенствование безопасности.

Но возвратимся к самому факту применения на практике величины характеризующей повторяемость аварий на ОПО  $\lambda$  [1/год], что приводит к некоторым неточностям, недопониманием и искажениям. Например, ГОСТ 12.1.010-76 устанавливает вероятность взрыва на нефтяном промысле как величину равную  $1 \cdot 10^{-6}$  (1/год). В ГОСТе Р 12.3.047-98 “Пожарная безопасность технологических процессов” так же используются аналогичные величины.

Таковую же размерность имеет и средняя интенсивность аварий на ОПО, которая линейно зависит от средней интенсивности выполняемых на ОПО работ -  $I_n$ , т.к.  $P(A) = const$  для “идеального” ОПО в силу свойства устойчивости частоты, поэтому:

$$\lambda = P(A) \cdot I_n \quad (9)$$

В качестве временного периода усреднения обычно принимают 1 год. Это связано как с редкостью аварийных событий, так и с периодичностью представления отчетов надзорными органами.

Теперь рассмотрим вопрос о величине повторяемости аварий  $\lambda$  (1/год), как о плотности распределения вероятности, что скорее всего отражено в вышеприведенных ГОСТах. Такой подход является “наследием” теории надежности, в которой вероятность отказов отдельных элементов оценивается с помощью математического аппарата случайных величин теории вероятностей. В качестве случайной величины выбирается момент времени наступления отказа  $t$  или интервал времени между двумя последовательными отказами  $\Delta t$  (оценивается в часах для простых элементов). Имея статистические оценки этих случайных величин, легко вычислить другие важные в теории надежности показатели – безотказность, наработка на отказ и др.

Установив функцию распределения случайных величин  $t$  или  $\Delta t$ , можно вычислить вероятность наступления отказа за какой-то промежуток времени. 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 ровно  $k$  событий-отказов для простого элемента (узла) за интервал времени  $\Delta t$  выражается законом распределения Пуассона [2,3]:

$$P_k(\Delta t) = \frac{(\lambda \Delta t)^k}{k!} e^{-\lambda \Delta t} \quad (10)$$

Из (10) следует, что функция плотности вероятности случайной величины  $\Delta t$  для простейшего потока событий-отказов имеет вид показательного (экспоненциального) распределения с параметром  $\lambda$ :

$$f(\Delta t) = \lambda e^{-\lambda \Delta t}, \quad (11)$$

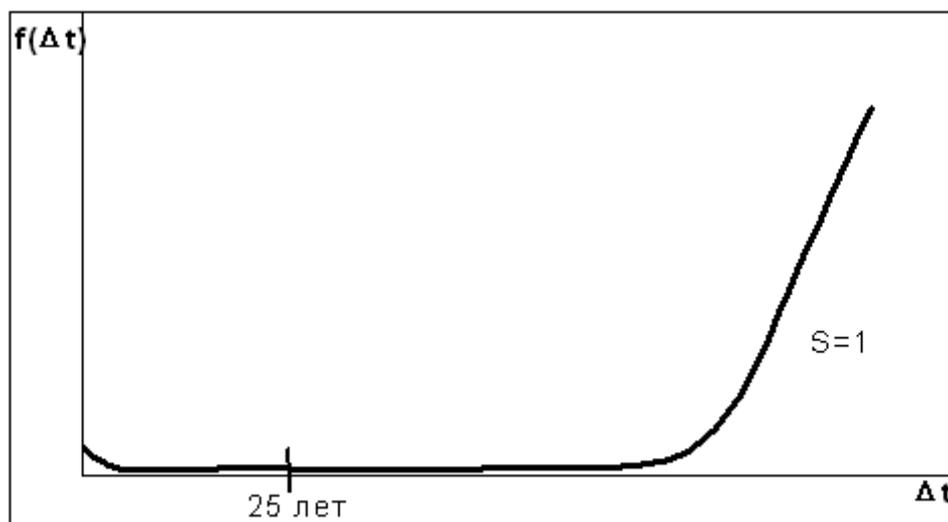
где  $\lambda$  трактуется как интенсивность (плотность) потока событий-отказов.

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 величин интенсивности  $\lambda$  и вероятности аварий  $P(A)$  можно пренебречь видом функции плотности вероятности  $f(\Delta t)$  на интересующем нас участке и принять ее постоянной, т.е.  $f(\Delta t) = \lambda$ . Тогда справедливы следующие соотношения:

$$P_{\Delta t}(A_t) = \lambda \cdot [\Delta t \equiv 1 \text{ год}], \quad (12)$$

где  $P_{\Delta t}(A_t)$  – это вероятность события  $A_t$ : наступление аварии в течение года. Заметим, что  $P_{\Delta t}(A_t)$  – безразмерная величина и численно совпадает с интенсивностью аварий на ОПО –  $\lambda$  (именно поэтому их часто и путают). Но как мы выяснили выше, нам всегда известна функция плотности вероятностей интервалов времени между отказами – она постоянна и равна  $\lambda$  (при  $\lambda \cdot \Delta t < 0.01$  формула (11) преобразуется в  $f(\Delta t) = \lambda \cdot \Delta t$ ). Поэтому безусловная необходимость использования аппарата случайных величин  $t$  (или  $\Delta t$ ) не всегда обоснованна и более того “вредна”, т.к. 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 на всей области определений и скорее выглядит, как представлено на рис. 2.



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

Т.е. функция плотности распределения интервалов между временем наступления аварии  $f(\Delta t)$  на ОПО для интересующего участка (время жизни ОПО) несколько не помогает нам в определении вероятности аварии, а только лишь указывает на то, что необходимо каким-то образом оценивать интенсивность аварий  $\lambda$ . Величину же интенсивности аварий  $\lambda$  можно оценить, опираясь на соотношение (9), или принять по существующей статистике (8).

В качестве обобщающего итога приведем краткие выводы по обсуждаемой проблеме:

1. Риск есть мера опасности и численно может выражаться математическим ожиданием ущерба (вреда) при функционировании ОПО (подобно тому, как в механике масса тела является мерой инертности).
2. При анализе риска используются понятия “интенсивность”, “частота” и “вероятность” аварии, которые в силу редкости событий-аварий численно совпадают, но имеют различные размерности:
  - Интенсивность аварий  $\lambda$  (1/год) – плотность потока событий-аварий во времени, прямо пропорциональна интенсивности работ  $I_n$  с коэффициентом пропорциональности равным  $P(A)$ . Традиционно под интенсивностью понимают частоту во времени (за год).

- Частота (частость) аварии [безразмерная величина] - статистическая оценка вероятности аварии  $P(A)$ , равная отношению интенсивности аварий  $\lambda$  к интенсивности работ  $I_n$  на ОПО.
  - Вероятность аварии  $P(A)$  [безразмерная величина] – числовая характеристика уровня опасности конкретного ОПО; одна из основных составляющих риска аварии.
1. Величина вероятности события, что “отказ произойдет за определенный период времени”  $P_{\Delta t}(A_t)$ , которая широко используется в теории надежности для анализа отказов простых элементов и узлов. Для ОПО  $P_{\Delta t}(A_t)$  численно совпадает с  $\lambda$ .
  2. Сомнительно использование в полном объеме методов теории надежности для анализа риска сложных систем. Например, функция плотности интервалов времени между двумя последовательными авариями  $f(\Delta t)$  для ОПО вряд ли имеет экспоненциальное распределение на всей области определения. К тому же знание этого распределения несколько не помогает в определении вероятности аварии на конкретном ОПО, так как значения  $P(A)$  реально очень малы, а поэтому и математический аппарат случайных величин теории вероятностей в данном случае не всегда эффективен.
  3. Вероятности аварии  $P(A)$  на ОПО может быть оценена с помощью имитационного моделирования процесса возникновения происшествия в человеко-машинной системе [1].

### Список литературы

1. **Белов П.Г.** Теоретические основы системной инженерии безопасности. Киев: КМУ ГА. - 1997. 426 с.
2. **Бусленко Н.П.** Моделирование сложных систем, М., “Наука”, 1978.
3. **Вентцель Е.С.** Теория вероятностей, М.: Высш. Шк., 1998. – 576 с.: ил.
4. **Емельянов В.В., Ясиновский С.И.** Введение в интеллектуальное имитационное моделирование сложных дискретных систем и процессов. Язык РДО. - Москва: “АНВИК”, 1998. - 427 с.
5. **Маршалл В.** Основные опасности химических производств: Пер. с англ.-М.:Мир, 1989. - 672с., ил.
6. Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах: Сборник документов. Серия 27. Выпуск 2 / Колл. авт. – М.: ГУП "НТЦ "Промышленная безопасность" Госгортехнадзора России, 2001. – 224с.
7. Отраслевое руководство по анализу и управлению риском, связанным с техногенным воздействием на человека и окружающую природную среду при сооружении и эксплуатации объектов добычи, транспорта, хранения и переработки углеводородного сырья с целью повышения их надежности и безопасности. 1-я редакция. /РАО “Газпром”, 1996. – 209с.
8. РД “Методическое руководство по оценке степени риска аварий на магистральных нефтепроводах”. Утв АК “Транснефть”, пр. от 30.12.99 №152; согл. Госгортехнадзором России, письмо от 07.07.99 №10-03/418.

9. *Хенли Э.Дж., Кумamoto X.* Надежность технических систем и оценка риска. – М.: Машиностроение, 1984.

***Приветствуется ссылка на авторов при использовании данных материалов***