

## Проблемы методологии оценки социального риска. Применение формулы Бернулли



**Д.В. Дегтярев,**  
ст. науч. сотрудник

АНО «Агентство  
исследований  
промышленных рисков»



**А.С. Печеркин,**  
проф., д-р техн. наук,  
ген. директор

НП «Группа компаний  
«Промышленная  
безопасность»

**Ключевые слова:** количественная оценка риска, риск-анализ, пожарный риск, индивидуальный риск, социальный риск, допустимый риск, формула Бернулли.

История количественной оценки риска насчитывает более полувека. Отдельные ее инструменты применялись еще в 60-е годы XX в. в гражданском самолетостроении в США [1–2]. Требования к проведению количественной оценки в некоторых странах установлены законодательно, принимаются критерии приемлемого риска, развиваются методики расчета [3–5]. Одни методики количественной оценки риска сменяют другие, и в свою очередь под натиском критики уступают место новым. Вместе с методиками изменяются и критерии нормирования показателей риска, выбираются новые показатели, призванные охарактеризовать безопасность производств и техногенных объектов.

Среди показателей риска аварий нет универсального, по одному значению которого можно было бы однозначно с высокой степенью научной достоверности судить о безопасности. Как правило, в международной практике принято устанавливать критерии для двух показателей: так называемого индивидуального риска и социального. Причем последний — более универсален, поскольку фактически представляет распределение вероятности случайной величины числа погибших в результате какого-либо происшествия, например техногенной аварии или пожара. Этот показатель, кажущийся логичным и естественным, на самом деле наиболее сложный для понимания и нормирования, что, однако, не стало препятствием для российских законодателей. В законодательстве о пожарной безопасности жестко установлены конкрет-

Показана недопустимость применения для расчета социального риска методологии, использованной в методике определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах, поскольку незначительные изменения исходных данных могут привести к неадекватным значениям, что абсолютно неприемлемо в условиях законодательного установления допустимых значений риска. Предложено для устранения неопределенности в расчетах социального риска при расчете вероятности гибели определенного числа людей использовать формулу Бернулли.

*The Article shows inadmissibility of using methodology for social risk calculation, which had been applied in the methods of defining calculated values of fire risk at hazardous production facilities, due to the fact that insignificant changes of basic data can result in inadequate values what is absolutely unacceptable in the conditions of legislative setting of risk acceptable values. It is proposed to use Bernoulli formula to avoid uncertainties in the calculations of social risk when calculating the probability of fatalities of a certain number of people.*

ные критерии для приемлемого индивидуального и социального риска (риск гибели одного или группы<sup>1</sup> людей от воздействия опасных факторов пожара), определив в 2008 г. необходимость обеспечения индивидуального пожарного риска в пределах  $1 \cdot 10^{-8}$  в год и социального пожарного риска  $1 \cdot 10^{-7}$  в год. В 2012 г. законодатели исправили технический регламент [6], установив, что на производственных объектах, на которых для людей, находящихся в жилой, общественно-деловой или рекреационной зоне вблизи объекта, обеспечение допустимых значений индивидуального и социального пожарного риска невозможно в связи со спецификой функционирования технологических процессов, допускается их увеличение соответственно до  $1 \cdot 10^{-6}$  в год и до  $1 \cdot 10^{-5}$  в год.

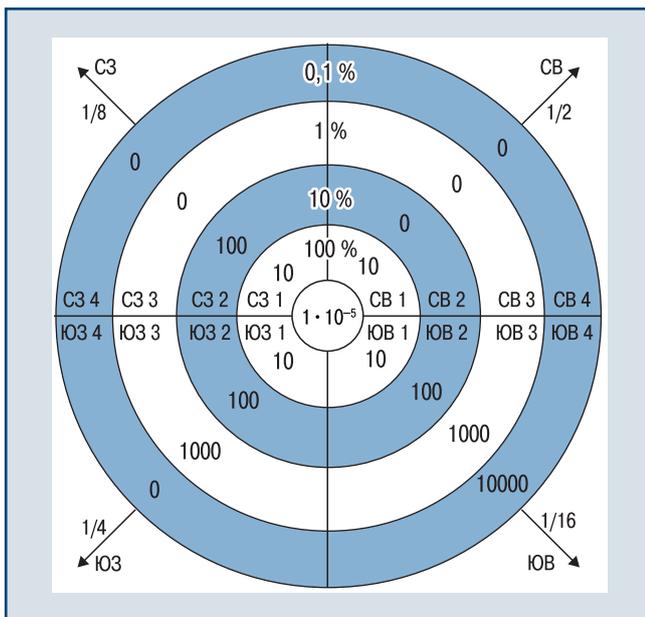
Вообще говоря, любой критерий должен быть тесно связан с определенной строго документированной методологией, которая не может ограничиваться общей концепцией, а обязана быть максимально подробной и детализированной, чтобы результаты, полученные на ее основе, допускали как можно меньше неопределенностей и могли быть верифицированы и устойчиво повторены разными группами специалистов. Что и было сделано для расчетов пожарного риска. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных

<sup>1</sup> Под «группой» можно понимать любое число людей, но в классической методологии риска обычно принимают 10 чел., что видно из соотношения допустимых значений индивидуального и социального риска в техническом регламенте [6].

объектах [7] появилась спустя год после выхода технического регламента [6]. Несмотря на ряд неопределенностей, которые допускает методика и которые широко обсуждаются, она в целом вполне подробна и соответствует общепринятой классической методологии оценки риска. Но в то же время практика ее применения показывает, что остаются некоторые вопросы, относящиеся не столько к самой методике, сколько к используемому в ней классическому методологическому подходу как к инструменту, с помощью которого нужно получить адекватную оценку состояния защищенности производственных объектов в терминах, установленных законодательством о пожарной безопасности. На одном из таких вопросов или парадоксов остановимся в настоящей статье.

Рассмотрим известный упрощенный пример, наглядно демонстрирующий механизм определения количественных показателей риска [8].

Пусть гипотетический опасный производственный объект размещен в городской черте (или в новых терминах технического регламента [6]: «в жилой зоне, общественно-деловой зоне или зоне рекреационного назначения»). Зону вокруг объекта разобьем на концентрические круговые области. Каждую область поделим на 4 одинаковых сегмента по возможным направлениям ветра, получив в итоге 16 областей: от СВ 1 до СВ 4, от СЗ 1 до СЗ 4, от ЮЗ 1 до ЮЗ 4 и от ЮВ 1 до ЮВ 4. На схеме (рис. 1) отмечено число людей, проживающих в каждой из областей, например в СВ 1 проживает 10 чел., а в ЮВ 4 — 10 тыс.



▲ Рис. 1. Схема распределения людей в зоне аварии

Предположим, что на объекте возможен выброс взрывопожароопасных веществ. Их рассеяние и дрейф формируют облако с топливовоздушной смесью, пожар или взрыв которой может привести к гибели людей. Пусть такой выброс возникает раз в 100 тыс. лет (т.е. частота  $1 \cdot 10^{-5}$  в год). На рис. 1 для каждой области

приведена условная вероятность гибели людей (в процентах) при соответствующем направлении ветра (например, в области СВ 1 погибнут все люди, если ветер дует в северо-восточном направлении); отмечена гипотетическая (предложенная нами) вероятность того или иного направления ветра, а именно ветер в северо-восточном направлении возникает с вероятностью  $1/2$ , в юго-восточном —  $1/16$ , в юго-западном —  $1/4$  и в северо-западном —  $1/8$ . С вероятностью  $1/16$  предположим, что погибших среди населения не ожидается, так как газовое облако не будет рассеиваться.

Определим индивидуальный риск для людей в области СВ 1.

Гибель человека в данной области происходит, когда одновременно выполняются следующие условия: произошли выброс, рассеяние и дрейф взрывопожароопасного газа с последующим пожаром (взрывом); ветер дует в северо-восточном направлении; на человека оказано воздействие опасных факторов пожара, приведшее к его гибели. Поскольку частота выброса  $1 \cdot 10^{-5}$  в год, вероятность соответствующего направления ветра  $1/2$  и условная вероятность гибели 1, то индивидуальный риск человека, находящегося в области СВ 1:  $10^{-5} \cdot 0,5 \cdot 1 = 5 \cdot 10^{-6}$ . Аналогично можно определить индивидуальный риск и для остальных областей (табл. 1).

В итоге получили, что сценарий с ожидаемым числом погибших 10 человек происходит с частотой  $5 \cdot 10^{-6}$ , с ожидаемым числом погибших 20 человек —  $1,25 \cdot 10^{-6}$ , 30 человек —  $2,5 \cdot 10^{-6}$ , 40 человек —  $6,25 \cdot 10^{-7}$ . Чтобы найти социальный пожарный риск, нужно просуммировать частоты возникновения сценариев, приводящих к гибели не менее определенного числа человек. Таким образом, определяя функцию  $F(x)$  как частоту реализации сценариев с гибелью не менее  $x$  человек, получаем:

$$F(40) = 6,25 \cdot 10^{-7};$$

$$F(30) = 6,25 \cdot 10^{-7} + 2,5 \cdot 10^{-6} = 3,125 \cdot 10^{-6};$$

$$F(20) = 6,25 \cdot 10^{-7} + 2,5 \cdot 10^{-6} + 1,25 \cdot 10^{-6} = 4,375 \cdot 10^{-6};$$

$$F(10) = 6,25 \cdot 10^{-7} + 2,5 \cdot 10^{-6} + 1,25 \cdot 10^{-6} + 5 \cdot 10^{-6} = 9,375 \cdot 10^{-6}.$$

Надо отметить, что наш гипотетический объект не удовлетворяет требованиям пожарной безопасности<sup>1</sup>, изложенным в техническом регламенте [6]. Превышены значения как индивидуального, так и социального риска для производственного объекта, расположенного в жилой, общественно-деловой или рекреационной зоне. В соответствии с требованиями технического регламента [6] индивидуальный пожарный риск в результате воздействия опасных факторов пожара на производственном объекте для людей, находящихся в жилой зоне

<sup>1</sup> Не рассматриваем случай, предусмотренный частью 4.1 статьи 93 технического регламента [6], в котором возможно увеличение значений допустимого риска в 100 раз: на рассматриваемом гипотетическом объекте нет никакой специфики функционирования технологических процессов.

Таблица 1

Область	Число людей	Частота события	Вероятность направления ветра	Условная вероятность гибели	Индивидуальный риск	Ожидаемое число погибших
<b>Ветер дует в северо-восточном направлении: частота сценария <math>5 \cdot 10^{-6}</math>, ожидаемое число погибших 10 человек</b>						
СВ 1	10	$1 \cdot 10^{-5}$	0,5000	1	$5,00 \cdot 10^{-6}$	10
СВ 2	0			$1 \cdot 10^{-1}$	$5,00 \cdot 10^{-7}$	0
СВ 3	0			$1 \cdot 10^{-2}$	$5,00 \cdot 10^{-8}$	0
СВ 4	0			$1 \cdot 10^{-3}$	$5,00 \cdot 10^{-9}$	0
<b>Ветер дует в северо-западном направлении: частота сценария <math>1,25 \cdot 10^{-6}</math>, ожидаемое число погибших 20 человек</b>						
СЗ 1	10	$1 \cdot 10^{-5}$	0,1250	1	$1,25 \cdot 10^{-6}$	10
СЗ 2	100			$1 \cdot 10^{-1}$	$1,25 \cdot 10^{-7}$	10
СЗ 3	0			$1 \cdot 10^{-2}$	$1,25 \cdot 10^{-8}$	0
СЗ 4	0			$1 \cdot 10^{-3}$	$1,25 \cdot 10^{-9}$	0
<b>Ветер дует в юго-западном направлении: частота сценария <math>2,5 \cdot 10^{-6}</math>, ожидаемое число погибших 30 человек</b>						
ЮЗ 1	10	$1 \cdot 10^{-5}$	0,2500	1	$2,50 \cdot 10^{-6}$	10
ЮЗ 2	100			$1 \cdot 10^{-1}$	$2,50 \cdot 10^{-7}$	10
ЮЗ 3	1000			$1 \cdot 10^{-2}$	$2,50 \cdot 10^{-8}$	10
ЮЗ 4	0			$1 \cdot 10^{-3}$	$2,50 \cdot 10^{-9}$	0
<b>Ветер дует в юго-восточном направлении: частота сценария <math>6,25 \cdot 10^{-7}</math>, ожидаемое число погибших 40 человек</b>						
ЮВ 1	10	$1 \cdot 10^{-5}$	0,0625	1	$6,25 \cdot 10^{-7}$	10
ЮВ 2	100			$1 \cdot 10^{-1}$	$6,25 \cdot 10^{-8}$	10
ЮВ 3	1000			$1 \cdot 10^{-2}$	$6,25 \cdot 10^{-9}$	10
ЮВ 4	10000			$1 \cdot 10^{-3}$	$6,25 \cdot 10^{-10}$	10

вблизи объекта, не должен превышать  $1 \cdot 10^{-8}$  в год, а социальный пожарный —  $1 \cdot 10^{-7}$  в год.

Изменим условия задачи, упростив ее. Пусть во всех областях, кроме СВ 4, люди отсутствуют, а в СВ 4 находятся 9999 человек. Результаты расчетов представлены в табл. 2 (ветер дует в северо-восточном направлении: частота сценария  $5 \cdot 10^{-6}$ , ожидаемое число погибших 9,999 человек). В этом случае объект стал удовлетворять требованиям технического регламента [6]. В самом деле, для людей в селитебной зоне индивидуальный риск не превышает нормативного значения  $5 \cdot 10^{-9} < 10^{-8}$ , а социальный пожарный риск  $F(10) = 0!!!$  Но удивительно в данном случае следующее. Если в области СВ 4 находятся не 9999, а 10 001 чел. (разница всего 2 чел. — это вполне может быть статистической ошибкой), то ожидаемое число погибших становится равным 10,001 и социальный пожарный риск оказывается не только не нулевым, но и значительно превышает установленный техническим регламентом [6] критерий:  $F(10) = 5 \cdot 10^{-6} \gg 10^{-7}!$  Полученный результат явно противоречит здравому смыслу.

В чем же дело? Неправильно выбран критерий? Не совсем так. Проблема слишком очевидна, чтобы

за историю развития науки о риске никто о ней не задумывался. Количественная оценка риска в своем классическом виде содержит ряд неопределенностей. Например, допустим, 100 чел. находятся в одинаковой зоне опасности, известно, что ожидаемое число погибших при аварии составляет 10 человек. В классической методологии именно эти 10 человек и выносятся в качестве порогового значения для аргумента функции социального риска. Но очевиден вопрос, если могут погибнуть 10 человек, то не могут ли погибнуть 11, 12 или 20 человек из 100 при реализации того же сценария аварии. Разумеется, могут. Даже беглое знакомство с теорией вероятностей позволяет прийти к выводу, что случайная величина характеризуется не только математическим ожиданием (например, ожидаемым числом погибших при аварии), но и как минимум дисперсией. В нашем примере дисперсия числа погибших при реализации сценария СВ 4 прямо пропорциональна числу рискующих. Поэтому, когда в зону действия поражающих факторов попадает значительное число людей, оценка социального риска по методике МЧС будет давать результаты, далекие от правдоподобных.

Могут ли неопределенности такого рода быть учтены и описаны? Вообще говоря, да. Каждый

Таблица 2

Область	Число людей	Частота события	Вероятность направления ветра	Условная вероятность гибели	Индивидуальный риск	Ожидаемое число погибших
СВ 1	0	$1 \cdot 10^{-5}$	0,5	1	$5 \cdot 10^{-6}$	0
СВ 2	0			$1 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-7}$	0
СВ 3	0			$1 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-8}$	0
СВ 4	9999			$1 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-9}$	9,999

сценарий развития аварии индуцирует случайную величину числа погибших при его реализации. Таким образом, задачу можно свести к описанию данной величины. Например, в нашем случае, когда события гибели каждого из членов группы области СВ 4 являются условно независимыми при реализации аварии по сценарию с ветром, дующим в северо-восточном направлении, можно говорить о том, что случайная величина числа погибших подчинена биномиальному распределению с  $N$  степеней свободы (где  $N$  — число людей в области СВ 4). Тогда условную вероятность гибели определенного числа людей  $k$  из  $N$  можно определить по формуле Бернулли<sup>1</sup>, используемой в теории вероятностей и позволяющей находить вероятность события при независимых испытаниях. Тогда случайная величина числа погибших при реализации сценария (ветер дует в северо-восточном направлении) примет следующий вид ( $p$  — условная вероятность гибели при реализации сценария):

Число погибших .....	0	1	...
Вероятность .....	$(1-p)^N$	$Np(1-p)^{N-1}$	...
Число погибших .....	$k$		$N$
Вероятность .....	$C_N^k p^k (1-p)^{N-k}$		$p^N$

При этом ожидаемое число погибших будет  $Np$ , что вполне согласуется с классической методологией.

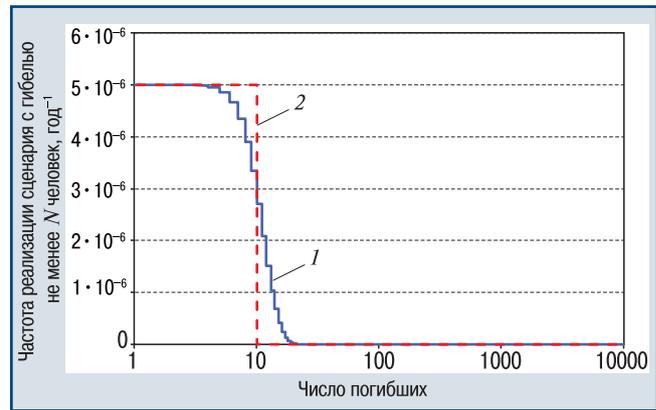
В частности условная вероятность гибели ровно 10 человек для случая, когда в области СВ 4 находятся 9999 чел., равна  $\frac{9999!}{10! \cdot 9989!} \cdot 0,001^{10} \cdot 0,999^{9989} = 0,125$ ,

а когда 10 001 чел. — 0,124. Как видим, значения отличаются лишь незначительно. Социальный риск:  $F(10) = 10^{-5} \cdot 0,5 \cdot 0,542 = 2,71 \cdot 10^{-6}$  — для случая 9999 чел. и  $10^{-5} \cdot 0,5 \cdot 0,5423 = 2,711 \cdot 10^{-6}$  — для случая 10 001 человек. Данные значения уже не выглядят столь парадоксально, как полученные ранее, а построенная  $F/N$ -кривая полностью отражает специфику распределения числа погибших (рис. 2). Кроме того, видно, что и для случая с 9999 чел. в области СВ 4 социальный пожарный риск уже превышает значение, установленное законом [6].

В то же время следует отметить, что и предложенный подход далек от универсальности. Необходимое условие его применения — условная независимость событий гибели людей — может нарушаться в случае нестационарного (непостоянного во времени) распределения людей. Тогда данный подход требует детальных сведений о характере такой нестационарности и наложения дополнительных условий.

В завершение необходимо отметить тот факт, что, вообще говоря, верификация методического аппарата вероятностной оценки риска — задача трудная, но выполнимая. В самом деле, подсчитав риск аварии на том или ином объекте, мы не в состоянии

<sup>1</sup> Напомним теорему, в соответствии с которой, если вероятность  $p$  наступления события  $A$  в каждом испытании постоянна, то вероятность  $P_{k,n}$  того, что событие  $A$  наступит  $k$  раз в  $n$  независимых испытаниях, равна:  $P_{k,n} = C_n^k p^k q^{n-k}$ , где  $q = 1 - p$ .



▲ Рис 2.  $F/N$ -кривая социального риска:  
1 — с учетом всех возможных вариантов последствий;  
2 — с учетом только значения ожидаемого числа погибших

убедиться в правдивости полученных результатов на практике, поскольку для этого потребовалось бы эксплуатировать данный объект сотни тысяч лет в одних и тех же условиях. Но тем не менее, такая задача может быть успешно решена методами имитационного моделирования. И хотя данные методы требуют кропотливых исследований для каждого объекта и значительных вычислительных мощностей, их результаты будут превосходить по точности результаты, полученные аналитически в условиях недоопределенности модели.

### Список литературы

1. Eckberg C.R. WS-133B Fault tree analysis program plan. — Seattle: The Boeing Company, 1964. — 100 p.
2. Hixenbaugh A.F. Fault Tree for Safety. — Seattle: The Boeing Company, 1968. — 30 p.
3. Vrijlinga J.K., P.H.A.J.M. van Geldera, Ouwerkerka S.J. Criteria for acceptable risk in the Netherlands// Infrastructure Risk Management Processes: Natural, Accidental, and Deliberate Hazards. — Reston: American Society of Civil Engineers, 2006. — P. 145–157.
4. Code of Federal Regulations, Title 40, Protection of Environment. — Pt. 68. — Washington: Environmental Protection Agency, 1999. — 72 p.
5. National Code of Practice for the Control of Major Hazard Facilities (NOHSC:2016). — Canberra: Australian Government Publishing Service, 1996. — 48 p.
6. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: Федер. закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ: принят Гос. Думой Федер. Собр. Рос. Федерации 4 июля 2008 г.: одобрен Советом Федерации Федер. Собр. Рос. Федерации 11 июля 2008 г.// Рос. газ. — № 163. — 2008. — 1 авг.
7. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах: утв. приказом МЧС России от 10 июля 2009 г. № 404// Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти. — 2009. — № 37.
8. Kumamoto Hiromitsu. Satisfying safety goals by probabilistic risk assessment. — London: Springer-Verlag London Limited, 2007. — 253 p.

ddv@safety.ru