

УДК 614.84

# Оценка и нормирование рисков при эксплуатации сложных технических систем

**Н.А. Махутов**, главный научный сотрудник, руководитель рабочей группы при Президиуме РАН по проблемам безопасности, чл.-корр. РАН, д-р техн. наук

**Д.О. Резников**, ведущий научный сотрудник, канд. техн. наук

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук

e-mail: mibsts@mail.ru, ImashReznikoff@yandex.ru

## Ключевые слова:

социальный риск, нормирование, приемлемый риск, допустимый риск, индекс риска.

В статье представлена сопоставительная оценка подходов к оценке и нормированию рисков, связанных с эксплуатацией сложных технических систем, которые приняты в разных странах. Представлены различные индексы риска, которые могут быть использованы при выборе более предпочтительного с точки зрения безопасности варианта системы.

## 1. Введение

Сложные технические системы характеризуются нелинейностью и недетерминированностью протекающих в них процессов, вероятностным характером зависимостей между параметрами их состояния, наличием бифуркационных режимов и, следовательно, множественностью сценариев развития, ряд из которых катастрофические. В связи с этим эксплуатация сложных технических систем становится невозможной без оценки рисков, выработки нормативных критериев приемлемости рисков и процедур снижения рисков до уровней, с которыми общество готово смириться ради благ, которые обеспечивают данные системы.

## 2. Способы определения понятия риск для сложных технических систем

Для оценки риска эксплуатации сложной технической системы необходимо ответить на следующие вопросы [6]:

- 1) Какие сценарии могут произойти в рассматриваемой системе?
- 2) Каковы вероятности реализации этих сценариев?
- 3) Если эти сценарии произойдут, то какими будут их последствия?

Ответы на эти вопросы получают с помощью специальных графовых моделей, называемых сценарными деревьями. Траекторию в пространстве состояний, описывающую эволюцию системы от исходного состояния  $HC$  до требуемого конечного состояния

$KC_0$ , будем называть сценарием успеха  $S_0$  (рис. 1). В моменты времени  $t_1, t_2, \dots, t_k$  в системе могут произойти инициирующие события ( $ИС_i$ ), которые могут вызвать отклонение заданной траектории сценария  $S_0$ . Тем самым будет запущена последовательность событий, составляющих сценарии отказов  $S_1, S_2, \dots, S_m$ , которые будут приводить к достижению системой соответствующих конечных состояний  $KC_i$ . Каждое из них будет характеризоваться вероятностью достижения и ожидаемыми негативными последствиями [2, 3].

Чтобы ответить на первый вопрос, необходимо построить сценарное дерево, идентифицировав возможные сценарии отказов  $S_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ). Для ответа на второй вопрос надо оценить вероятность  $f_i$  реализации сценариев  $S_i$ . Для ответа на третий вопрос необходимо оценить последствия, соответствующие

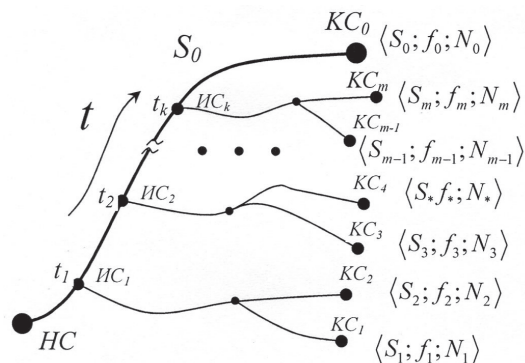


Рис. 1. Дерево сценариев отказов

каждому из сценариев  $S_i$ . Причем последствия могут быть выражены через материальный (экономический) ущерб  $U_i$ , исчисляемый в денежных единицах, или, как это будет сделано в данной работе, через количество жертв  $N_i$  в случае реализации сценария отказа  $S_i$ .

Таким образом, общий ответ на сформулированные три вопроса должен иметь формат триплета вида (1), который предложен в классической работе С. Каплана и Б.Гарика [9]:

$$\langle S_i; f_i; N_i \rangle \quad (1)$$

Причем исчерпывающим ответом на эти вопросы будет полный набор (множество) триплетов, охватывающих все возможные сценарии  $S_i$ . Необходимо отметить, что в число возможных сценариев следует включить также сценарий успешного выполнения системой своих функций (сценарий успеха)  $S_0$ , которому соответствует  $N_0 = 0$ . Тогда ответом на вопрос, с каким риском связана эксплуатация рассматриваемой технической системы, будет полное множество триплетов:

$$R = \{ \langle S_i; f_i; N_i \rangle_c \mid (i = 0, 1, 2, \dots, m) \}, \quad (2)$$

где индекс  $c$  означает полный набор возможных сценариев или, по крайней мере, полный набор важных сценариев;  $m$  — количество сценариев отказов.

Риск, связанный с функционированием рассматриваемой системы, может быть отражен в табличной форме (табл.1). По сути, это развернутое представление триплетного определения риска (2).

Риск, связанный с функционированием рассматриваемой технической системы, также можно представить графически с помощью множества пар точек  $(f_i; N_i)$ , соответствующих различным сценариям отказов  $S_i$ , нанесенных на плоскость «вероятность-последствия» (рис.2).

Для дальнейшего рассмотрения изменим формат представления данных, приведенных в табл.1. При этом использованную ранее нумерацию сценариев  $S_1, S_2, \dots, S_p, \dots, S_m$ , которая была сформирована произвольно при рассмотрении сценарного дерева, нуж-

Таблица 1  
Представление риска в виде листинга сценариев отказа с указанием вероятности их реализации и ожидаемого ущерба

Сценарий	Вероятность реализации	Последствия
$S_0$	$f_0$	$N_0$
$S_1$	$f_1$	$N_1$
$S_2$	$f_2$	$N_3$
.	.	.
.	.	.
$S_m$	$f_m$	$N_m$

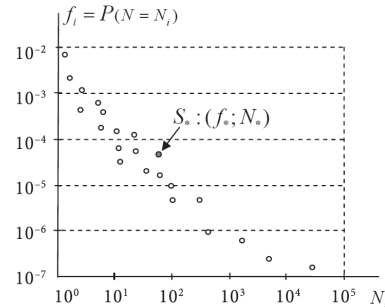


Рис. 2. Представление риска в виде множества пар точек  $(f_i; N_i)$ , соответствующих различным сценариям отказов, нанесенных на плоскость «вероятность-ущерб»

но изменить таким образом, чтобы сценарии были пронумерованы в порядке возрастания тяжести последствий. При новой нумерации сценариев  $S^{(1)}, S^{(2)}, \dots, S^{(j)}, \dots, S^{(m)}$  будут выполняться неравенства:  $N^{(0)} \leq N^{(1)} \leq N^{(2)} \leq \dots \leq N^{(j)} \leq \dots \leq N^{(m)}$ . Кроме того, таблица сценариев будет дополнена еще одной колонкой, в которую для каждого сценария будут занесены значения так называемой вероятности превышения  $F^{(j)}(N) = P(N \geq N^{(j)})$  — вероятность того, что случайная величина ущерба  $N$  окажется больше или равна величине ущерба  $N^{(j)}$  при  $j$ -ом сценарии отказа (табл. 2).

Тогда триплетное определение риска (2) может быть записано в виде:

$$R = \{ \langle S^{(j)}; F^{(j)}; N^{(j)} \rangle_c \mid (j = 0, 1, 2, \dots, m) \} \quad (3)$$

При этом каждый сценарий  $S^{(j)}$  можно рассматривать как точку  $(F^{(j)}; N^{(j)})$  на плоскости «вероятность превышения последствий»  $(F, 0, N)$ . Далее, нанеся на плоскость  $(F, 0, N)$  множество точек  $(F^{(j)}; N^{(j)})$   $j = 0, 1, 2, \dots, m$  и соединив их последовательно, можно построить ступенчатую ломаную линию  $F(N)$ , которая называется  $F-N$  диаграмма. Полученное вероятностное

Таблица 2

Дополненный листинг сценариев			
Сценарий	Вероятность реализации	Последствия	Кумулятивная вероятность
$S^{(0)}$	$f^{(0)}$	$N^{(0)}$	$F^{(0)} = 1$
$S^{(1)}$	$f^{(1)}$	$N^{(1)}$	$F^{(1)} = F^{(2)} + f^{(1)}$
$S^{(2)}$	$f^{(2)}$	$N^{(2)}$	$F^{(2)} = F^{(3)} + f^{(2)}$
.	.	.	.
.	.	.	.
$S^{(j)}$	$f^{(j)}$	$N^{(j)}$	$F^{(j)} = F^{(j+1)} + f^{(j)}$
.	.	.	.
.	.	.	.
$S^{(m-1)}$	$f^{(m-1)}$	$N^{(m-1)}$	$F^{(m-1)} = F^{(m)} + f^{(m-1)}$
$S^{(m)}$	$f^{(m)}$	$N^{(m)}$	$F^{(m)} = f^{(m)}$

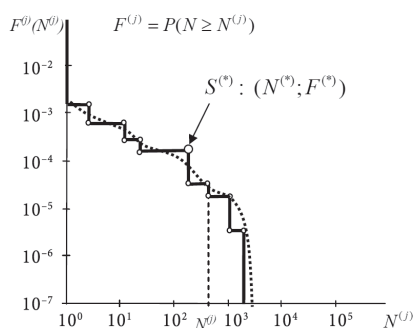


Рис. 3. Представление риска с помощью  $F-N$  диаграммы

распределение величины  $N$  по сценариям отказов достаточно полно характеризует риск, связанный с эксплуатацией рассматриваемой технической системы. Эту характеристику принято называть социальным (или коллективным, групповым) риском системы.

Следует отметить, что при более детальном рассмотрении каждый из сценариев  $S^{(j)}$  является объединением группы весьма близких друг к другу сценариев, различиями между которыми в процессе построения сценарного дерева и исключения малозначимых событий, незначительно влияющих на изменение системы, мы пренебрегли. В случае более подробного проведения сценарного анализа и увеличения количества учитываемых сценариев ступенчатая  $F-N$  диаграмма будет стремиться к плавной линии, называемой  $F-N$  кривой (рис. 3). При этом дискретная случайная величина  $N$ , для удобства математических преобразований, будет условно считаться непрерывной. Вместо дискретной случайной переменной  $N^{(j)}$  будем использовать непрерывную случайную переменную  $n$ . Тогда ее распределение будет характеризоваться функцией плотности вероятности  $f_N(n)$  и функцией распределения  $\Phi_N(n) = P(N < n)$ , а полученная  $F-N$  кривая будет обозначаться как  $F(n)$ . Причем  $F(n) = 1 - \Phi(n)$ , поскольку  $F(n) = P(N \geq n)$ .

Триплеты риска, определяемые выражениями (1)–(3), описывают качественные и количественные аспекты понятия риск. Качественные характеристики риска, которому подвергается рассматриваемая система, задаются сценариями отказов  $S^{(j)}$ ,  $j = 1, 2, \dots, m$ , а количественные аспекты определяются интегральной вероятностью реализации различных сценариев  $F^{(j)}$  и ожидаемыми последствиями  $N^{(j)}$ .

### 3. Нормирование социального риска

Для принятия решений о возможности эксплуатации рассматриваемой системы и определения приоритетов при проведении защитных мероприятий необходимо иметь законодательно установленные ориентиры, с которыми может быть сопоставлена

полученная  $F-N$  диаграмма. С этой целью для различных типов объектов могут быть построены две нормативные критериальные линии: предельная линия пренебрежимо малых рисков  $\langle R_s \rangle$  и линия предельно допустимых рисков  $[R_s]$  (рис. 4).

Согласно нормам [6–8] линия предельно допустимых рисков  $[R_s]$  строится следующим образом. Значение предельно допустимой вероятности превышения при  $N = 1$  принимается равным  $10^{-3}$ . Далее при увеличении  $N$  в 10 раз предельно допустимая вероятность превышения  $F(N)$  будет снижаться в десять раз. Это означает, что при использовании двойных логарифмических координат линия предельно допустимых рисков  $[R_s]$  будет представлять собой прямую, имеющую тангенс угла наклона «-1». Предельная линия пренебрежимо малых рисков  $\langle R_s \rangle$  строится путем параллельного переноса линии  $[R_s]$  на два порядка вниз по шкале вероятности (рис. 5).

Выше была описана практика нормирования рисков эксплуатации сложных технических систем, принятая в странах англо-саксонской традиции (Великобритания, США, Канада, Австралия). Нормативная база Российской Федерации также предусматривает использование двух критериальных линий предельно-допустимых и пренебрежимо малых рисков. Следует отметить, что нормами ряда стран континентальной Европы предусматриваются несколько иные критерии социального риска. В частности, действующими в Нидерландах нормами угол наклона предельной линии приемлемого риска предусматривается равным «-2» [12–14]. Это означает более жесткие требования по снижению вероятности реализации сценариев, при которых имеет место большое количество жертв, чем это принято в Великобритании. Также характерно, что нормативная

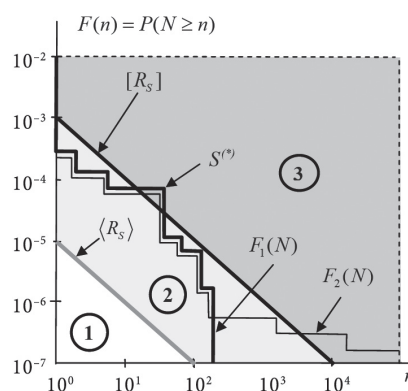
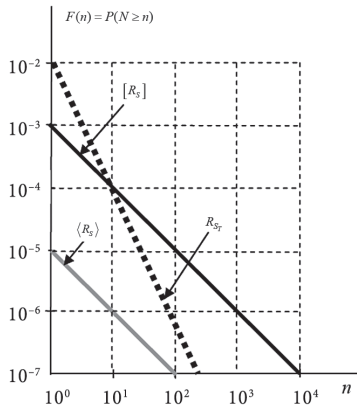


Рис. 4. Критериальные линии социального риска  
 $[R_s]$  – нормативная линия предельно допустимых рисков;  
 $\langle R_s \rangle$  – нормативная предельная линия пренебрежимо малых рисков;  
 1 – область пренебрежимо малых рисков; 2 – область условно приемлемых рисков, которые должны снижаться до уровня практической целесообразности; 3 – область недопустимых рисков



**Рис. 5.**  $[R_s]$  – нормативная линия предельно допустимых рисков;  $\langle R_s \rangle$  – нормативная предельная линия пренебрежимо малых рисков;  $R_{ST}$  – нормативная линия приемлемых рисков (согласно нормам Нидерландов)

база Нидерландов задает лишь одну критериальную линию  $R_{ST}$ , которая разграничивает области приемлемого и неприемлемого риска; промежуточная область при этом не выделяется (рис. 5).

Таким образом, критериальная линия предельно допустимых рисков задается выражением:

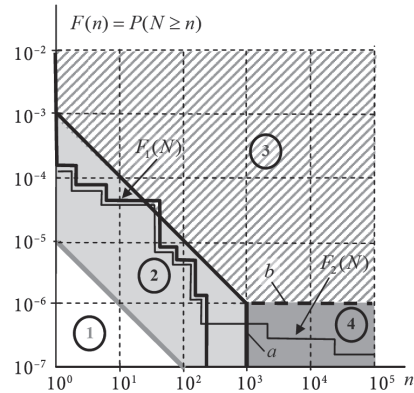
$$[R_s] = \frac{C}{n^\alpha}, \quad (4)$$

где  $C$  – константа, определяемая ординатой точки пересечения критериальной линии  $[R_s]$  с осью ординат;  $\alpha$  – константа, определяемая уровнем неприятия тяжелых последствий. (Нормативная база Великобритании устанавливает  $\alpha = 1$ , нормы Нидерландов определяют  $\alpha = 2$  [14].)

Критериальные линии  $\langle R_s \rangle$  и  $[R_s]$  делят первый квадрант плоскости  $(F; 0; N)$  на три области (рис. 4):

- область 1 – пренебрежимо малых рисков;
- область 2 – приемлемых (оправданных, обоснованных) рисков, которые должны снижаться до уровня практической целесообразности<sup>1</sup>;
- область 3 – недопустимых рисков.

Сценарии  $S^{(j)}$ , попадающие в область 1 пренебрежимо малых рисков, не требуют принятия каких-либо защитных мер, направленных на снижение их вероятности или смягчение тяжести их последствий. Сценарии, попадающие в область 3 недопустимых рисков, требуют незамедлительного вмешательства с целью выхода из этой области путем снижения вероятности реализации этих сценариев или снижения количества жертв. Причем выход из области недопустимых рисков должен быть обеспечен независи-



**Рис. 6.** Выделение дополнительной области экстремальных сценариев отказов

1 – область пренебрежимо малых рисков; 2 – область приемлемых рисков, которые должны снижаться до уровня практической целесообразности; 3 – область недопустимых рисков; 4 – область экстремальных сценариев, относящихся к тяжелым хвостам распределений ( $a$  и  $b$  – соответственно, вертикальная и горизонтальная линии отсечки).

мо от величины необходимых для этого затрат. При оценке сценариев, находящихся в промежуточной области 2 приемлемых рисков, и принятии решений о проведении защитных мероприятий следует исходить из принципа практической целесообразности, который предполагает снижение рисков с учетом того, что подобное снижение не должно быть связано с неоправданно высокими затратами.

Оценка расположения  $F-N$  диаграммы рассматриваемой системы относительно критериальных линий позволяет идентифицировать сценарии отказов, которые попадают в область недопустимых рисков и требуют первоочередных мер, направленных на их парирование. В частности, сценарий  $S^{(c)}$ , который относится к представленному на рис. 4 распределению  $F_1(N)$ , может классифицироваться как наиболее опасный из проектных сценариев аварий, требует безотлагательных действий, направленных на парирование угрозы его реализации.

Условие приемлемости по критерию социального риска может быть записано как:

$$\log F(n) - \log [R_s] < 0 \quad \forall n \in \{1, 2, 3, \dots\} \quad (5)$$

В ряде случаев с помощью вертикальной и горизонтальной линий отсечки (линии  $a$  и  $b$ , рис. 6) выделяют дополнительно область 4, в которую будут попадать экстремальные сценарии отказов с малой вероятностью реализации и тяжелыми последствиями

<sup>1</sup> Точнее эту область было бы называть областью условно приемлемых рисков, поскольку риски, попадающие в нее, признаются приемлемыми только при условии, что они снижены до уровня практической целесообразности

[4]. Введение вертикальной линии отсечки позволяет исключить из категории приемлемых сценарии со значительным числом жертв ( $N > 1000$ ). Введение горизонтальной линии отсечки объясняется тем, что существующие методы не позволяют достаточно точно оценивать вероятность реализации редких сценариев ( $F(N) < 10^{-6}$ ). Применительно к экстремальным сценариям, попадающим в область 4, действующие нормы рекомендуют использовать детерминистский подход к обеспечению безопасности, предполагающий удовлетворение запасов по соответствующим механизмам достижения предельных состояний и построение системы эшелонированной защиты.

Необходимо отметить, что сложным техническим системам свойственны степенные законы распределений. Иными словами, для СТС более характерны не компактные распределения вида  $F_1(N)$ , а распределения с тяжелыми хвостами вида  $F_2(N)$  (рис. 6). Это выражается, прежде всего, в том, что статистика аварий на СТС не позволяет пренебрегать возможностью запроектных аварий. Анализ запроектных сценариев аварий требует привлечения специальных методов моделирования хвостов распределений ущербов с помощью теории экстремальных значений. Следует подчеркнуть, что вопросы анализа и нормирования рисков тяжелых запроектных аварий не нашли своего решения и нуждаются в дальнейшей проработке.

Рассматривая сходства и различия в сфере нормативно-правового регулирования эксплуатации сложных технических систем в различных странах, можно выделить две группы стран [5].

К *первой* группе относятся страны, где используются две предельные критериальные линии, которые делят 1-й квадрант плоскости  $(F; 0; N)$  на три области (пренебрежимо малого, приемлемого и недопустимого риска). Важно, что при этом факта снижения риска до предельного допустимого уровня оказывается недостаточно для того, чтобы избавить организацию,

эксплуатирующую систему, от ответственности в случае аварии. Законодательство требует, чтобы эксплуатирующая организация обеспечила снижение риска до уровня приемлемого, который определяется в соответствии с принципом практической целесообразности. В эту группу входят Российская Федерация, страны Британского Содружества и США.

Ко *второй* группе относится ряд континентальных стран ЕС, законодательство которых базируется на французском гражданском кодексе. В этих странах используется одна критериальная линия приемлемого риска и, следовательно, выделяются две области (приемлемого и неприемлемого риска). При этом законодательство не требует снижения риска ниже приемлемого значения, то есть в этих странах не применяется принцип снижения риска до уровня практической целесообразности.

Как уже было отмечено, построенная для рассматриваемой системы  $F-N$  диаграмма весьма полно представляет комплексное понятие *риск*, которое соответствует триплетному определению (3), и дает возможность оценить целесообразность эксплуатации системы. Кроме того, после перестроения критериальных линий в координатах  $(f; n)$  они могут использоваться для формирования матрицы риска для рассматриваемой системы (рис. 7). При этом присвоение уровней риска каждой из ячеек матрицы осуществляется в соответствии с расположением ячейки относительно критериальных линий: уровни риска 1, 2 и 3 присваиваются ячейкам, расположенным, соответственно, в области пренебрежимо малых, приемлемых и недопустимых рисков.

Однако простое сопоставление  $F-N$  диаграмм часто не позволяет выбрать более предпочтительный вариант системы. Например, если  $F-N$  диаграммы пересекаются (см. рис.8, диаграммы 1 и 2), то простого их сравнения недостаточным для выбора более безопасного варианта системы.

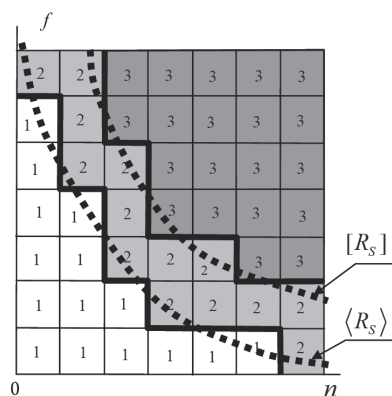


Рис. 7. Использование критериальных линий для формирования матриц риска рассматриваемой системы

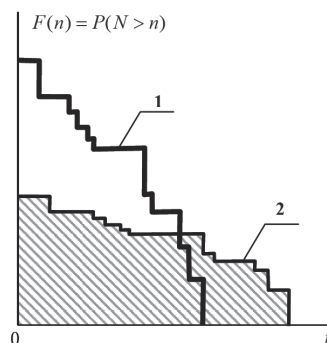


Рис. 8. Сопоставление  $F-N$  диаграмм, соответствующих различным вариантам системы



Значения коэффициента  $\beta$  для различных видов деятельности [11]

$\beta$	Степень добровольности	Заинтересованность в деятельности	Пример
100	Полная добровольность	Прямая заинтересованность	Альпинизм
10	Добровольность	Прямая заинтересованность	Поездка на мотоцикле
1.0	Нейтральный случай	Прямая заинтересованность	Поездка на автомобиле
0.1	Вынужденный случай	Косвенная заинтересованность	Эксплуатация промышленного объекта, обслуживающего жителей района (по отношению к жителю района)
0.01	Вынужденный случай	Отсутствие заинтересованности	Эксплуатация промышленного предприятия, потребители которого не проживают в данном районе (по отношению к жителю района)

#### 4. Индексы социального риска

Следует отметить, что при доведении результатов оценки риска до широкой общественности и до лиц, принимающих решения, бывает полезно выработать сводный показатель риска эксплуатации рассматриваемой технической системы, который может быть сопоставлен с предельно допустимым значением. В связи с этим был разработан ряд индексов социального риска, позволяющих получать количественные оценки и выбирать наиболее оптимальный вариант системы, с точки зрения ожидаемых последствий и их восприятия обществом.

Наиболее простой и широко используемый индексом социального риска — математическое ожидание числа погибших. Этот индекс получил название интегрального индекса риска или риск-интеграла (англ. risk integral):

$$I_E = E\{N\} = \sum_{j=1}^m f^{(j)} N^{(j)} = \int_0^{\infty} n \cdot f_N(n) \cdot dn,$$

где  $f_N(n)$  — функция плотности распределения случайной величины  $N$ .

Легко показать, что площадь  $S_{F-N}$  под  $F-N$  диаграммой (т.е. под кривой  $F(n)$ ) равна  $E\{N\}$ . Действительно,

$$\begin{aligned} S_{F-N} &= \int_0^{\infty} F(n) dn = \int_0^{\infty} (1 - \Phi_N(n)) dn = \int_0^{\infty} \int_n^{\infty} f_N(u) du dn = \\ &= \int_0^{\infty} \int_0^u f_N(u) dn du = \int_0^{\infty} u f_N(u) du = E\{N\}. \end{aligned}$$

Это обстоятельство также обуславливает естественность использования  $E\{N\}$  в качестве индекса социального риска.

Однако следует отметить, что математическое ожидание количества жертв не может служить ис-

черпывающей характеристикой социального риска, поскольку не позволяет учесть неприятие обществом сценариев с большим количеством жертв. Учитывая, что для редких событий среднее квадратичное отклонение случайной величины  $N$  может значительно превосходить величину математического ожидания  $E(N)$ , Вирлинг [13] предложил индекс социального риска, учитывающий первые два момента распределения величины  $N$ :

$$I_{E\sigma} = E(N) + k \cdot \sigma(N),$$

где  $k = 3$  — коэффициент, учитывающий неприятие обществом сценариев с большим количеством жертв. При этом предельно допустимое значение данного индекса записывается в виде:

$$[I_{E\sigma}] = \beta \cdot 100,$$

где  $\beta$  — коэффициент, зависящий от степени добровольности, с которой человек занимается данной деятельностью, и размера получаемых при этом благ для самого человека и общества в целом. Характерно, что коэффициент  $\beta$  варьирует в широких пределах (см. таблицу 3).

Естественным индексом, который позволяет оценивать социальный риск по имеющейся выборке значений количества жертв аварий, имевших место в рассматриваемой (или подобной ей) системе, является квантиль  $n_p$  случайной величины количества жертв<sup>1</sup> [1]:

$$I_p = n_p = \Phi^{-1}(P),$$

где  $\Phi^{-1}(P)$  — так называемая квантильная функция, обратная по отношению к функции распределения  $\Phi(n)^2$ .

<sup>1</sup> Квантилем  $n_p$  случайной величины  $N$  принято называть значение случайной величины, которое соответствует заданной вероятности  $p$  ее непревышения:  $F(n_p) \equiv P(N < n_p) = p$ .

<sup>2</sup> Строго говоря, квантильная функция определяется как обобщенная обратная функция от  $F(x)$ :  $F(p) = \inf \{x \in R, F(x) \geq p\}$ ,  $0 < p < 1$ .

Этот индекс определяет количество жертв, которое с заданной вероятностью  $P$  не будет больше в случае аварии в рассматриваемой системе:

$$I_p = \Phi^{-1}(P).$$

В частности, при оценке социального риска часто используют 95% и 99% квантили:  $I_{0,95}$  и  $I_{0,99}$  представляют собой уровни  $N$ , которые не будут превышены сверхвероятностью соответственно 95% и 99%.

Другой индекс социального риска — математическое ожидание хвоста распределения величины  $N$ .

Этот индекс позволяет оценить потенциальное количество жертв, если величина  $N$  превысит заданное пороговое значение  $u = I_p$ :

$$I_t = E(N | N > I_p).$$

Вопрос о выработке нормативных допустимых значений индексов социального риска для систем различного класса в настоящее время остается в значительной мере открытым и требует дальнейшего рассмотрения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Махутов Н.А., Резников Д.О., Петров В.П. Оценка риска аварий на КВО с учетом возможности реализации экстремальных ущербов//Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. — 2008, №5.
2. Махутов Н.А., Петров В.П., Ахметханов Р.С., Резников Д.О. и др. Безопасность России. Анализ риска и проблемы безопасности. Часть 2. Безопасность гражданского и оборонного комплексов и управление рисков. — М.: МГФ «Знание», 2006. 434 с.
3. Махутов Н.А., Резников Д.О. Оценка уязвимости технических систем и ее место в процедуре анализа риска// Проблемы анализа риска, том 5, 2008, № 3, с.76-89.
4. Bowles, D.S., and L.R. Anderson. — "Risk-informed Dam Safety Decision-Making." ANCOLD Bulletin, Vol. 123, pp. 91-103, 2003.
5. Bowles, D.S. Tolerable risk guidelines for dams: Principles and applications. Risk analysis, Dam Safety, Dam Security and Critical Infrastructure Management- Escuder-Bueno et al. (eds). Taylor & Francis Group. London. 2011.
6. HSE (Health and Safety Executive). Assessing Compliance with the Law in Individual Cases and the Use of Good Practice. 2002. (<http://www.hse.gov.uk/dst/alarp2.htm>).
7. HSE (Health and Safety Executive). Policy and Guidance on Reducing Risks as Low as Reasonably in Design. 2002. (<http://www.hse.gov.uk/dst/alarp3.htm>).
8. HSE (Health and Safety Executive). Principles and Guidelines to Assist HSE in its Judgments that Duty Holders Have Risk as Low as Reasonable Practicable. 2002. (<http://www.hse.gov.uk/dst/alarp1.htm>).
9. Kaplan, S. and Garrick, J. (1981) On the quantitative definition of risk, Risk Analysis 1(1), 11–27
10. USACE (U.S. Army Corps of Engineers). — "ER 1110-2-1156." Draft. 10 July, 2009.
11. Vrijling J. K., W. van Hengel, R. J. Houben. Acceptable risk as a basis for design. Reliability Engineering and System Safety 59. 141–150. 1998
12. Vrijling, J. K. and Van Gwilder, P. H. A. J. M. Societal risk and the concept of risk aversion, Proceedings of ESREL '97, European Safety and Reliability Conference, Lisbon, pp. 45–52. 1997
13. Vrijling, J.K. et al. A Framework for risk evaluation, Journ. of Hazardous materials, 43, p.245–261. 1995
14. VROM. Dutch National Environmental Plan: Premises for risk management. The Hague, The Netherlands: Directorate General for Environmental Protection at the Ministry of Housing, Physical Planning and Environment. 1988–89
15. Vrouwenvelder, T., R. Lovegrove, M. Holicky, P. Tanner and G. Canisius. Risk Assessment and Risk Communication in Civil Engineering. IABSE. Conference Report on Safety, Risk and Reliability — Trends in Engineering, Malta. 2001

## Assessment and Rationing of Risks Connected with Operation of Complex Technical Systems

**N.A. Makhutov**, Doctor of Engineering, Chief research associate, Head of the working group at RAS (Russian Academy of Sciences) Presidium on safety problems, RAS member correspondent.

**D.O. Reznikov**, Ph.D. of Engineering, Leading research associate, Institute of Machines Science named after A.A. Blagovarov of RAS

*Comparative assessment of approaches to estimation and rationing of risks connected with operation of complex engineering systems that are accepted in various countries is presented in this article. Various risk indexes that can be used while choosing the most preferable safety option of the system are presented.*

**Keywords:** social risk; rationing; acceptable risk; admissible risk; risk index.