

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 504.05+614.8

ЕДИНАЯ МЕТОДОЛОГИЯ АНАЛИЗА РИСКА ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ ТЕХНОГЕННОГО И ПРИРОДНОГО ХАРАКТЕРА

А.А. Александров, В.И. Ларионов, С.П. Сушков

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

e-mail: rector@bmsu.ru; lar@esrc.ru; esrc@esrc.ru

Приведено описание единых методических подходов к оценке возможного ущерба и рисков для человека и объектов техносферы в чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера. Сформулированы основные понятия теории риска. Выявлена причинно-следственная связь воздействия поражающих факторов на объект и сопротивления объектов этому воздействию. Предложена и обоснована методическая база прогнозирования последствий чрезвычайных ситуаций. Проанализировано влияние различных факторов на вероятное разрушение элементов риска и поражение людей. Получены зависимости, составляющие единую научно-методическую базу, на основе которой можно разработать методики анализа риска для конкретных чрезвычайных ситуаций техногенного и природного характера.

Ключевые слова: чрезвычайная ситуация, анализ риска, уязвимость, законы разрушения, законы поражения, модели воздействия, поражающий фактор.

UNIFORM METHODOLOGY OF THE RISK ANALYSIS OF EMERGENCY SITUATIONS OF TECHNOGENIC AND NATURAL CHARACTER

A.A. Aleksandrov, V.I. Larionov, S.P. Sushchev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

e-mail: rector@bmsu.ru; lar@esrc.ru; esrc@esrc.ru

The description of uniform methodical approaches to the estimation of possible damage and the estimation of risks for the person and technosphere objects in emergency situations of natural and technogenic character is given. The risk theory basic concepts are formulated. The authors revealed causal relationships of striking factors influence on object and its resistance to this influence. The methodical base for forecasting of emergency situations consequences is offered and justified. Influence of various factors on probable destruction of risk elements and people injuries is analyzed. The article covers the dependences forming uniform scientific and methodical base from which it is possible to develop techniques of the risk analysis for concrete emergencies of technogenic and natural character.

Keywords: emergency, risk analysis, vulnerability, damage rule, destruction law, influence model, striking factor.

Прогнозирование последствий чрезвычайных ситуаций (ЧС) основано на тесной связи двух процессов — воздействия поражающих факторов на объект и сопротивления самих объектов (элементов риска) этому воздействию. Эти процессы носят ярко выраженный случайный

характер. Например, в силу того, что невозможно заранее достоверно определить, какая интенсивность колебаний поверхностных слоев Земли при землетрясении будет наблюдаться в районе расположения объекта или какое давление на фронте воздушной ударной волны будет действовать на сооружение, эти поражающие факторы с разной вероятностью могут принимать различные значения.

Кроме того, даже при воздействии одинаковой нагрузки на сооружения, будет существовать некоторая вероятность их разрушения или получения повреждений разной степени тяжести. На вероятность разрушения элементов риска также влияет разброс прочности материалов, отклонение строительных элементов от проектных размеров, различие условий изготовления элементов и другие факторы.

Поражение людей будет зависеть как от перечисленных факторов, так и от других случайных событий. В частности, от вероятности размещения людей в зоне риска, плотности распределения персонала в пределах объекта и вероятности поражения обломками при получении зданиями той или иной степени повреждения.

Предлагаемая в статье методология анализа риска ЧС позволяет разработать методы оценки рисков практически всех техногенных аварий и природных катастроф, в том числе взрывов, пожаров, химических и радиационных аварий, разрушений плотин, землетрясений, ураганов, наводнений и т.п., и включает в себя три этапа.

Этап 1. Обоснование модели воздействия, включая оценку поражающих факторов ЧС с использованием существующих методик [1–6].

Этап 2. Обоснование законов разрушения (поражения).

Этап 3. Сопряжение моделей воздействия и законов разрушения (поражения).

Введем основные понятия к рассмотрению проблемы анализа риска.

1. *Чрезвычайная ситуация* — совокупность условий и обстоятельств, создающих опасную для жизнедеятельности человека обстановку и возникающих в результате совершившейся аварии или катастрофы.

2. *Риск* — вероятностная мера опасности, установленная в виде возможного ущерба за заданное время.

3. *Поражающие факторы* при расчете последствий ЧС — воздействия, вызывающие основные разрушения и поражения.

4. *Модели воздействия* — зависимости, позволяющие определить размеры полей потенциальной опасности (негативного воздействия), интенсивность поражающих факторов в каждой точке поля и частоту события.

5. *Законы¹ разрушения сооружения и поражения людей (функции уязвимости)* — зависимости вероятностей повреждения здания или поражения человека от интенсивности поражающего фактора, характеризующие сопротивление элементов риска воздействию поражающих факторов.

Поражающие факторы ЧС. Поражающие факторы и их основные определяющие параметры приведены в табл. 1. Воздействие поражающих факторов при авариях и катастрофах характеризуется моделями воздействия.

Таблица 1

Поражающие факторы и их основные параметры

Виды ЧС	Поражающий фактор	Параметр
Землетрясения	Обломки зданий сооружений	Интенсивность землетрясения
Взрывы	Воздушная ударная волна	Избыточное давление во фронте воздушной ударной волны
Пожары	Тепловое излучение	Плотность теплового потока
Цунами	Волна цунами	Давление гидравлического потока
Разрушение плотин	Волна прорыва	
Радиационные аварии	Радиоактивное заражение	Дозы облучения
Химические аварии	Токсичные нагрузки	Токсодоза

Модели воздействия. Поля потенциальной опасности можно описать в виде аналитических, табличных или графических зависимостей. Эти зависимости позволяют определить интенсивность поражающих факторов той или иной ЧС в рассматриваемой точке поля негативного воздействия. Модели воздействия характеризуют интенсивность, масштаб воздействий и частоту события.

Рассмотрим методические подходы к формированию моделей воздействия для анализа риска. Расчетные случаи можно свести к четырем типам моделей воздействия [7].

Модель воздействия 1-го типа основана на факте свершившегося события (ЧС), используется для организации оперативного реагирования. С этой целью проводится оперативное прогнозирование обстановки в чрезвычайных ситуациях.

Характерные параметры этой модели — координаты центра очага, интенсивность или мощность воздействия, время.

Моделирование полей воздействия поражающих факторов проводится с помощью известных методик оценки последствий:

¹Эти термины являются основными при прогнозировании последствий ЧС.

- аварий на взрывоопасных объектах [1, 2];
- аварий на химически опасных объектах [3];
- разрушительных землетрясений [4];
- разрушения гидротехнических сооружений [5].

Рассматриваемая модель воздействия также используется для единичной реализации события при проведении заблаговременных расчетов по ожидаемым последствиям и оценке рисков.

Модель воздействия 2-го типа задана функцией распределения плотности вероятности случайной величины Φ $f(x, y, \Phi)$ (рис. 1, а). В качестве случайных величин Φ рассматриваются параметры поражающих факторов, вызывающих основные разрушения и поражения (см. табл. 1).

Модель воздействия 3-го типа определена функцией распределения $F(x, y, \Phi)$ случайной величины Φ , характерной для рассматриваемой ЧС (рис. 1, б).

Основное свойство функции распределения плотности вероятности $f(x, y, \Phi)$ — равенство единице площади, заключенной между кривой, описываемой этой функцией и осью Φ (см. рис. 1, а) [8].

Функция распределения $F(x, y, \Phi)$ случайной величины интенсивности воздействия поражающего фактора, характерной для рассматриваемой ЧС, — вероятность того, что случайная величина Φ в точке с координатами x, y примет значение не выше заданного значения Φ_3 : $F(x, y, \Phi) = P(\Phi \leq \Phi_3)$.

При построении функции распределения $F(x, y, \Phi)$ необходимо учитывать ее свойства: $F(x, y, \Phi)$ — функция неубывающая; $F(-\infty) = 0$; $F(+\infty) = 1$.

Функции $f(x, y, \Phi)$ и $F(x, y, \Phi)$ природных опасностей получают на основе статистической обработки результатов наблюдений за опасными событиями. Для примера рассмотрим функции распределения интенсивности землетрясений $f(I)$ и $F(I)$ для Алтае-Саянского и Прибайкальского регионов (рис. 2).

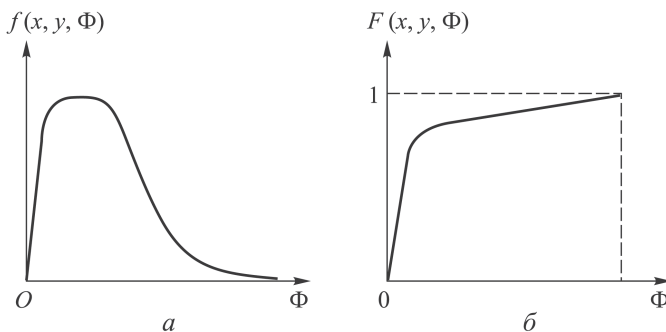


Рис. 1. Законы распределения поражающих факторов Φ в точке с координатами x, y :

a — функции распределения плотности вероятностей; *б* — функции распределения

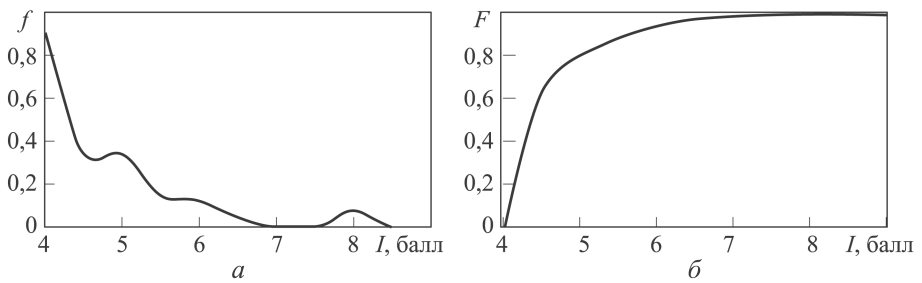


Рис. 2. Плотность вероятности (а) и функция распределения интенсивности землетрясения (б) для Алтае-Саянского и Прибайкальского регионов

Масштабы распространения ожидаемых полей опасности при авариях на предприятиях с образованием топливовоздушных смесей определяются с учетом возможного дрейфа облаков [9]. В этом случае для построения функции распределения плотности вероятности поражающих факторов $f(x, y, \Phi)$ можно использовать следующий алгоритм.

1. Определение повторяемости различных скоростей ветра. В качестве примера приведены статистические данные (табл. 2), полученные в районе Калининской АЭС (г. Удомля).

Таблица 2

Повторяемость, %, различных скоростей ветра по направлениям за год

Скорость ветра, м/с	Направление ветра							
	с	с-в	в	ю-в	ю	ю-з	з	с-з
0...1	3	2,2	1,7	1,6	2	3,3	3,4	3,3
2...5	6	5,3	4	4,6	5,1	9,3	9,1	7,9
6...9	2	1,9	1,4	2,1	3	4,7	3,4	2,9
10...13	0,4	0,3	0,2	0,5	0,9	1,3	0,6	0,5
14...17	0,1	0,1	0,1	0	0,4	0,7	0,3	0,2
Повторяемость по направлениям	11,5	9,8	7,4	8,8	11,4	19,3	16,8	14,8

2. Деление территории объекта на элементарные площадки размером $\Delta x \times \Delta y$. Площадки представляют точкой в центре с координатами x, y .

3. Расчет поражающего фактора (дозы облучения, токсодозы или избыточного давления в воздушной ударной волне) для фиксированного направления ветра и минимальной скорости ветра в рассматриваемой точке.

4. Определение значений поражающих факторов и их частоты до тех пор, пока не будут проведены расчеты для всех возможных скоростей ветра рассматриваемого направления, после изменения скорости ветра с определенным шагом.

5. Умножение полученных значений частот на повторяемость заданного направления и определение следующего шага по направлению ветра.

6. Вычисление значений поражающих факторов и их частоты в соответствии с предыдущими пунктами по всем возможным направлениям.

7. Построение гистограммы на основе полученной выборки, включающей в себя значения поражающих факторов и частоты их появления.

8. Расчет функции распределения плотности вероятности $f(x, y, \Phi)$ поражающего фактора Φ для точки с координатами x, y на основе гистограммы.

Модели воздействия 2-го и 3-го типа используются для проведения заблаговременных расчетов по прогнозированию обстановки в ЧС и оценке риска.

Модель воздействия 4-го типа (обобщенная модель) получается на основе статистической обработки материалов наблюдений и эмпирических данных. Обычно эти модели приводятся в виде таблиц и карт, например, опасность наводнений (табл. 3), сильных ветров, лесных пожаров.

Пример модели 4-го типа — карта общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-97 [10]. Комплект состоит из трех карт, соответствующих 10 %- (А), 5 %- (В) и 1 %-ной (С) вероятностям превышения расчетной интенсивности для времени $t = 50$ лет, т.е. период повторяемости расчетных сотрясений

Таблица 3

Повторяемость наводнений на р. Оке

Город	Отметка нуля поста (балтийская система высот), м	Уровни относительно нуля поста с различной обеспеченностью, см		
		1 % (1 раз в 100 лет)	4 % (1 раз в 25 лет)	10 % (1 раз в 10 лет)
Орел	146,31	1009	965	925
Белев	127,35	1390	1330	1275
Калуга	116,72	1660	1530	1395
Кашира	103,82	1310	1180	1105
Коломна	100,26	985	945	900
Рязань	93,41	830	750	706
Касимов	82,79	1110	1030	980
Муром	73,27	1045	993	944
Горбатов	67,21	1070	1017	967

(в баллах) на рассматриваемой площадке составляет один раз в 500, 1000 и 5000 лет соответственно.

В настоящее время разработаны атласы природных опасностей и рисков ЧС для территории Российской Федерации, включающие в себя более 100 карт опасностей и описания к ним [11].

Законы разрушения сооружений. Законы разрушения характеризуют уязвимость сооружений. Если эта зависимость от расстояния, то закон называют *координатным законом разрушения*. Когда зависимость получают от поражающего фактора, закон называют *параметрическим законом разрушения*. При оценке последствий ЧС предлагается применять параметрические законы разрушения.

Законы разрушения сооружений получают на основе анализа и обобщения статистических материалов по разрушению промышленных, общественных и жилых зданий от воздействий поражающих факторов. В качестве поражающих факторов могут рассматриваться избыточное давление во фронте волны, давление гидравлического потока, интенсивность землетрясения.

Находят применение законы разрушения двух типов (рис. 3): 1) вероятности наступления не менее определенной степени разрушения (повреждения) сооружения $P_{Ai}(\Phi)$; 2) вероятности наступления определенной степени разрушения (повреждения) сооружений $P_{Bi}(\Phi)$.

Для построения кривой, аппроксимирующей вероятности наступления не менее определенной степени разрушения (повреждения) сооружений, обычно используется нормальный закон. При этом учитывается, что для одного и того же сооружения может рассматриваться не одна, а несколько степеней разрушения.

Значения вероятностей $P_{Ai}(\Phi)$ вычисляют по формуле нормально-го распределения случайных величин

$$P_{Ai}(\Phi) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \int_0^{\Phi} e^{-\frac{(\bar{\Phi} - M_i)^2}{2\sigma_i^2}} d\bar{\Phi}, \quad (1)$$

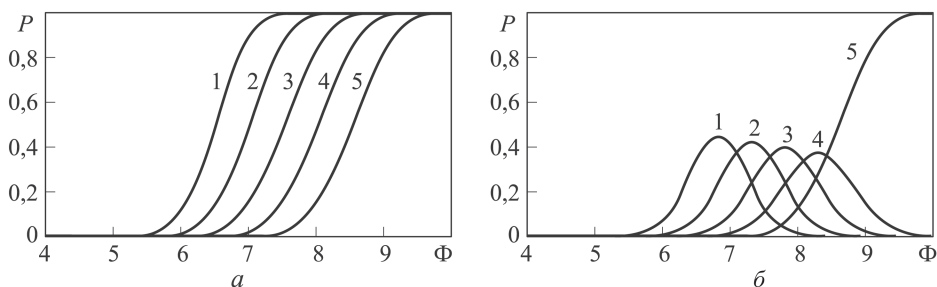


Рис. 3. Общий вид законов разрушения сооружений – вероятности возникновения не менее определенных (а) и определенных (б) степеней разрушения сооружений:

1–5 – степени разрушения (повреждения) сооружения

где Φ — заданное значение случайной величины; $\bar{\Phi}$ — переменная интегрирования случайной величины; M_i, σ_i — математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение случайной величины для i -й степени разрушения сооружений, определяемые на основании статистической обработки результатов экспериментов и натурных данных.

Оценки параметров закона (M, σ) можно получить, используя функцию правдоподобия

$$L(M, \sigma) = \prod_{j=1}^n L_j(\Phi_j, M, \sigma), \quad (2)$$

где n — общее число элементов выборки, подвергнутых воздействию поражающего фактора интенсивностью Φ ; Φ_j — j -е опытное значение интенсивности поражающего фактора; $L_j(\Phi_j, M, \sigma)$ — вероятность разрушения здания, если при воздействии поражающего фактора Φ_j оно получило не менее заданной степени повреждения (событие A), либо вероятность его неразрушения, если при том же значении Φ_j оно получило степень повреждения менее заданной или не получило повреждений вовсе (событие \bar{A}); M — математическое ожидание случайной величины Φ ; σ — среднее квадратическое отклонение случайной величины Φ .

Функция $L_j(\Phi_j, M, \sigma)$ определяется по формуле

$$L_j(\Phi_j, M, \sigma) = \begin{cases} P_A(\Phi_j, M, \sigma); \\ 1 - P_A(\Phi_j, M, \sigma), \end{cases} \quad (3)$$

причем L_j принимает верхнее значение, если наступило событие A , нижнее значение, — если событие \bar{A} ; значения вероятностей $P_A(\Phi_j, M, \sigma)$ находятся по формуле (1).

В качестве математического ожидания M и среднего квадратического отклонения σ принимаются такие их значения, которые дают максимум функции правдоподобия $L(M, \sigma)$ (2). Параметры M и σ определяются путем решения системы уравнений

$$\frac{\partial L(M, \sigma)}{\partial M} = 0; \quad \frac{\partial L(M, \sigma)}{\partial \sigma} = 0.$$

Для практических расчетов предлагается следующий алгоритм.

1. Разделение рассматриваемых выборок (случайных величин) на два массива: в массив X_1 включаются опыты с событиями A , в которых конструкции получили не менее чем заданную степень повреждения, в массив X_2 — опыты с событием \bar{A} , в которых конструкции получили менее заданной степени повреждения.

2. Задание минимального (M_{\min}) и максимального (M_{\max}) значений математического ожидания случайной величины, минимального (σ_{\min})

Здесь $P_{A1}(\Phi)$, $P_{A2}(\Phi), \dots, P_{Ai}(\Phi)$, $P_{Ai+1}(\Phi)$ – вероятности наступления не менее 1, 2, ..., i -й, $(i + 1)$ -й степени разрушения (повреждения) сооружений.

В настоящее время такие законы разрушения получены авторами для промышленных и жилых зданий при воздействии воздушной ударной волны и сейсмическом воздействии разрушительных землетрясений [12, 13].

Законы поражения людей. Законы поражения людей характеризуют уязвимость людей в зонах ЧС. Под законом поражения людей будем понимать зависимость вероятности поражения людей от интенсивности поражающего фактора.

Параметрические законы поражения людей, находящихся в зданиях, получены на основании теоремы о полной группе событий. В расчетах учитывается, что событие C_j (общие, безвозвратные, санитарные потери) может произойти при получении сооружением одной из степеней повреждения (при одной из гипотез B_i), образующих полную группу несовместных событий. Расчеты проводятся по формуле

$$P(\Phi) = \sum_{i=1}^n P_{Bi}(\Phi)P(C_j|B_i), \text{ где } P(\Phi) \text{ – вероятность поражения лю-}$$

дей от воздействия поражающего фактора Φ ; $P_{Bi}(\Phi)$ – вероятность наступления i -й степени повреждения сооружения при заданном значении поражающего фактора (закон разрушения); $P(C_j|B_i)$ – вероятность получения людьми j -й степени поражения при условии, что наступила i -я степень повреждения здания; n – рассматриваемое число степеней повреждения здания.

Значения $P(C_j|B_i)$ определяют на основе обработки материалов последствий аварий и стихийных бедствий. В качестве примера на рис. 4 приведен общий вид законов поражения населения.

Авторами получены законы поражения для людей, находящихся в промышленных и жилых зданиях, при воздействии воздушной ударной волны и сейсмическом воздействии разрушительных землетрясений [12, 13].

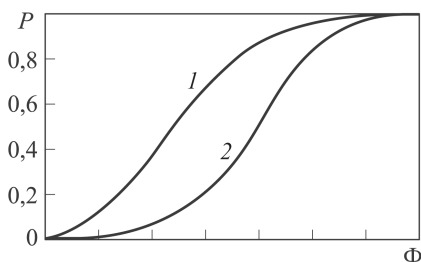


Рис. 4. Общий вид законов поражения населения при общих (1) и безвозвратных (2) потерях

Примером законов поражения людей может служить пробит-функция [6]:

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Pr} 5^{-t^2/2} dt.$$

Верхний предел интегрирования – количественная мера воздействия на человека поражающего фактора, например,

избыточного давления и импульса давления при аварийных взрывах, количества тепловой энергии, токсодозы, дозы радиоактивного облучения.

Прогнозирование объемов разрушений на площадных и линейных объектах. Задача по прогнозированию последствий крупных аварий и катастроф на объектах техносферы и в населенных пунктах может быть решена с использованием моделей воздействия и законов разрушения (поражения). Для проведения расчетов объект разбивается на элементарные площадки, а их координаты представляются точкой, расположенной в центре площадки. Шаг сетки назначается в зависимости от точности расчета.

Для каждой площадки подготавливаются исходные данные, включающие в себя:

- конструктивные решения и прочностные свойства зданий;
- плотность зданий на единицу площади;
- пространственное размещение зданий относительно источника воздействия.

Начало координат расчетной схемы выбирается произвольно на плане или принимается в системе координат карты, на которой рассматривается территория.

За объемы разрушений принимаются математические ожидания показателей, характеризующие разрушение сооружений. Такими показателями могут быть число зданий, получивших ту или иную степень повреждения.

Случай 1. Математическое ожидание числа сооружений, получивших степень повреждения d в пределах площадки при заданной интенсивности поражающего фактора, будет равно $M[V_d(x, y)] = P_d(\Phi_3)\varphi(x, y)\Delta x \Delta y$, где $P_d(\Phi_3)$ — вероятность получения сооружениями степени повреждения d при условии воздействия заданной интенсивности поражающего фактора. Значение $P_d(\Phi_3)$ получают из закона разрушения.

Суммируя число поврежденных сооружений по каждой площадке и, переходя к пределу, вычисляют математическое ожидание числа сооружений со степенью повреждения d в пределах всего объекта или рассматриваемой территории: $M(V_d) = \iint_S P_d(\Phi_3)\varphi(x, y) dx dy$, где S — площадь объекта.

Случай 2. При вероятностной модели воздействия весь возможный диапазон интенсивностей воздействия поражающего фактора делится на интервалы $d\Phi$. Затем для каждого интервала решается задача с учетом одновременного наступления двух событий: 1) события, состоящего в том, что сооружения получают степень повреждения d

при значении поражающего фактора из этого интервала; 2) события, заключающегося в том, что в пределах рассматриваемой площадки объекта будет действовать поражающий фактор с интенсивностью из рассматриваемого интервала. Вероятность одновременного наступления двух событий равна $P_d(\Phi_3) = P_d^*(\Phi_3)f(x, y, \Phi_3)\Delta\Phi$, где $P_d^*(\Phi_3)$ — вероятность получения сооружениями степени повреждения d при интенсивности поражающего фактора, заданного на середине интервала $\Delta\Phi$; $f(x, y, \Phi_3)$ — значение функции плотности распределения вероятностей при заданной интенсивности поражающего фактора Φ_3 ; произведение $f(x, y, \Phi_3)\Delta\Phi$ — величина, определяющая вероятность того, что интенсивность поражающего фактора будет находиться в пределах интервала $\Delta\Phi$.

Вероятность получения сооружениями степени повреждения d в пределах рассматриваемой площадки с учетом возможного воздействия поражающего фактора различной интенсивности составит $P_d(x, y) = \int_{\Phi_{\min}}^{\Phi_{\max}} P_d(\Phi)f(x, y, \Phi_3)d\Phi$, где Φ_{\min} , Φ_{\max} — минимально и максимально возможные значения поражающего фактора.

Математическое ожидание числа сооружений со степенью повреждения d в пределах площадки с координатами x, y при вероятностной модели воздействия определяется по формуле

$$M[V_d(x, y)] = \int_{\Phi_{\min}}^{\Phi_{\max}} P_d(\Phi)f(x, y, \Phi)\varphi(x, y)\Delta x\Delta y d\Phi.$$

Суммируя математическое ожидание числа поврежденных сооружений на каждой площадке и переходя к пределу, получают математическое ожидание числа поврежденных сооружений со степенью d в целом по объекту $M(V_d) = \iint_S \int_{\Phi_{\min}}^{\Phi_{\max}} P_d(\Phi)f(x, y, \Phi_3)\varphi(x, y) d\Phi dx dy$. За площадь разрушенной части объекта принимается территория, в пределах которой сооружения получили тяжелые, частичные разрушения и обвалы ($d = 3, 4, 5$). При заданной интенсивности поражающего фактора площадь, км², определяется по формуле

$$S = \frac{1}{\varphi} \sum_{d=3,4,5} \iint_S P_d(\Phi_3) \varphi(x, y) dx dy,$$

а при вероятностной модели воздействия — по формуле

$$S = \frac{1}{\varphi} \sum_{d=3,4,5} \iint_S \int_{\Phi_{\min}}^{\Phi_{\max}} P_d(\Phi) f(x, y, \Phi) \varphi(x, y) d\Phi dx dy,$$

где φ — средняя плотность рассматриваемых сооружений на площадке, здание/км².

Основы методики прогнозирования числа пострадавших людей. Математическое ожидание числа пострадавших людей при авариях на объекте — основной показатель (критерий) при анализе риска.

Вероятность поражения людей в пределах рассматриваемой площадки с учетом возможности воздействия поражающего фактора различной интенсивности составляет

$$P(x, y) = \int_{\Phi_{\min}}^{\Phi_{\max}} P(\Phi) f(x, y, \Phi) d\Phi, \quad (4)$$

где $P(\Phi)$ — параметрический закон поражения людей; $f(x, y, \Phi)$ — функции плотности распределения интенсивности поражающего фактора в пределах площадки с координатами x, y .

Математическое ожидание потерь людей в пределах всего объекта определяется по формуле

$$M(N) = \int_{\Phi_{\min}}^{\Phi_{\max}} P(\Phi) f(x, y, \Phi) \psi(x, y) d\Phi dx dy.$$

Здесь $\psi(x, y)$ — плотность функции распределения людей в пределах рассматриваемой площадки (принимается в качестве исходных данных).

Математическое ожидание потерь людей (общих, безвозвратных, санитарных) и структура по тяжести поражения могут быть определены с учетом вероятности нахождения людей в течение суток в зоне риска:

$$M(N) = \iiint_S \int_0^{24} \int_{\Phi_{\min}}^{\Phi_{\max}} P(\Phi) f(x, y, \Phi) \psi(x, y) f(t) d\Phi dt dx dy, \quad (5)$$

где $f(t)$ — функция плотности вероятностей распределения нахождения людей в зданиях в зависимости от времени суток, получаемая на основе статистического анализа материалов по миграции персонала объектов и населения в течение суток (временной фактор).

При заблаговременном определении математического ожидания потерь на объектах с учетом дрейфа облаков необходимо учитывать

повторяемость направления ветра в течение года (розу ветров). В этом случае потери можно определить по выражению

$$M(N) = \iint_S \int_0^{2\pi} \int_0^{L_{\max}} P(x, y) \psi(x, y) f(L) \varphi(V) dL dV dx dy, \quad (6)$$

где $P(x, y)$ — вероятность поражения людей, определяемая по формуле (4); $f(L)$ и $\varphi(V)$ — функции плотности распределения вероятностей дрейфа облака и повторяемости направлений ветра за год.

Отметим, что такие расчеты следует провести для людей, находящихся в зданиях и на открытой местности.

Методология оценки рисков. При обосновании мероприятий по предупреждению аварий, катастроф и смягчению их последствий за риск обычно принимают интегральный показатель, включающий в себя как вероятность наступления нежелательного события за год, так и связанный с ним ущерб [14].

В зависимости от решаемых задач риск можно представить в виде:

- 1) математического ожидания ущерба определенного рода за год;
- 2) частоты наступления неблагоприятного события за год.

В первом случае риск R , ущерб/год, определяется по формуле

$$R = HU, \quad (7)$$

где H — частота наступления чрезвычайной ситуации (аварий, катастроф) за год; U — потенциальный ущерб от чрезвычайной ситуации.

Во втором случае риск R_e , 1/год, находится из соотношения

$$R_e = HP, \quad (8)$$

где P — вероятность наступления неблагоприятного события при условии, что случилась ЧС.

Наиболее приемлемым критерием оценки степени опасности для жизни персонала объектов и находящегося в зоне риска населения может служить *индивидуальный риск*, определяемый как вероятность смертельного исхода на объекте за год в результате аварии или стихийного бедствия. Этот показатель включает в себя сочетание частоты ЧС и их последствий. Для оценки возможных масштабов ЧС служит *коллективный риск*, определяемый как математическое ожидание числа пораженных за год.

Рассмотрим методологию оценки индивидуального и коллективного рисков, ориентированную на применение ГИС-технологий. Важными элементами этой методологии являются приведенные выше модели воздействия, законы разрушения и законы поражения.

Частота возникновения ЧС природного или техногенного характера H принимается в соответствии с моделями воздействия. Вероятность P наступления неблагоприятного события для жизни человека или для жизни и его здоровья при условии, что произошла ЧС, может быть определена с учетом математического ожидания числа пострадавших

$$P = \frac{M(N)}{N}, \quad (9)$$

где N — общая численность персонала на объекте и находящегося в зоне риска населения; $M(N)$ — математическое ожидание числа погибших в результате аварии.

Тогда формула (8) для определения индивидуального риска примет вид

$$R_e = \frac{H}{N} \iiint_S \int_0^{24} \int_{\Phi_{\min}}^{\Phi_{\max}} P(\Phi) f(x, y, \Phi) \psi(x, y) f(t) d\Phi dt dx dy. \quad (10)$$

Здесь использованы те же обозначения, что и в формулах (5), (8), (9).

При подстановке в формулу (10) параметрических законов поражения людей $P(\Phi)$, характеризующих безвозвратные потери при ЧС техногенного и природного характера, получим значение индивидуального риска для жизни людей, а при подстановке параметрического закона поражения людей $P(\Phi)$, характеризующего общие потери, — значения индивидуальных рисков для жизни и здоровья людей.

При проведении оценок риска с учетом дрейфа облаков при различной скорости ветра и повторяемости направления в течение года (розы ветров) индивидуальный риск может быть определен по формуле

$$R_e = \frac{H}{N} \iiint_S \int_0^{2\pi} \int_0^{L_{\max}} P[\Phi(x, y)] \psi(x, y) f(L) \varphi(V) dL dV dx dy$$

(использованы такие же обозначения, как и в формулах (6) и (7)).

Коллективный риск, определяемый как ожидаемое число пораженных (со смертельным исходом или потерей здоровья) от возможной аварии или стихийного бедствия за год, вычисляется по выражению $R = R_e N$, где N — число людей, находящихся в зоне риска.

Выводы. 1. Приведены теоретические основы единой методической базы анализа риска ЧС техногенного и природного характера. В основу методической базы прогнозирования последствий ЧС положена причинно-следственная связь двух случайных процессов: воздействия поражающих факторов на объект и сопротивления самих объектов (элементов риска) этому воздействию.

2. Изложены методологические подходы к получению моделей воздействия и законов разрушения (поражения). Модели воздействия и законы разрушения (поражения) являются основными “кирпичиками”, из которых с помощью процедур сопряжения на основе ГИС-технологий получают требуемые прогнозы и показатели риска.

3. Получены единые закономерности, основанные на применении моделей воздействия и законов поражения для определения основных показателей, характеризующих последствия (объемы разрушений и число пораженных людей).

4. Указанные закономерности позволяют унифицировать методический подход к анализу риска, что обеспечивает возможность разработать комплексные методики анализа риска с применением ГИС-технологий на пожаровзрывоопасных объектах, химически и радиационно опасных объектах, в зонах катастрофического затопления, при разрушительных землетрясениях и других авариях и катастрофах.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий*; под общ. ред. В.А. Котляревского и А.В. Забегаева. М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 1998. Кн. 4. 203 с.
2. *Моделирование пожаров и взрывов*; под ред. Н.Н. Брушлинского, А.Я. Корольченко. М.: Изд-во “Пожнаука”, 2000. 492 с.
3. *Методика оценки последствий химических аварий (Методика “токси”)*. М., 2000. 53 с.
4. *Методика прогнозирования последствий землетрясений // Сб. методических документов, применяемых до первичной оценки рисков в области пожарной безопасности, гражданской обороны и защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций*; под ред. Н.А. Махутова. М.: Поллимаг, 2003. С. 544–569.
5. *Зонирование территорий по затоплению при разрушении гидротехнических сооружений. Энциклопедия безопасности: строительство, промышленность, экология. В 3 т. Т. 3. Сейсмостойкость и теплозащита сооружений*. М.: АСВ, 2010. С. 185–200.
6. *Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах // Сб. документов. М.: Госгортехнадзор России, НТЦ “Промышленная безопасность”. 2000. Сер. 27. Вып. 2. 220 с.*
7. *Ларионов В.И.* Теоретические основы реагирования на чрезвычайные ситуации. Оперативное прогнозирование инженерной обстановки в чрезвычайных ситуациях; под общ. ред. С.К. Шойгу. М.: “Папирус”, 1998. С. 7–21.
8. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. М.: Высш. шк., 1999. 576 с.
9. *Александров А.А.* Обеспечение безопасности эксплуатации объектов хранения углеводородных топлив. М.: Наука, 2007. 149 с.
10. *Комплект карт ОСР-97-А, В, С и другие материалы для Строительных норм и правил. СНиП “Строительство в сейсмических районах”*. М.: ОИФЗ, 1998. 33 с.
11. *Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций. Российская Федерация*; под общ. ред. С.К. Шойгу. М.: Дизайн. Информация. Картография, 2010. 696 с.
12. *Котляревский В.А., Ларионов В.И., Суцев С.П.* Энциклопедия безопасности: строительство, промышленность, экология. В 3 т. Т. 2. Законы поражения. Прочность и динамика сооружений. М.: АСВ, 2008. 640 с.

13. *Котляревский В.А., Ларионов В.И., Суцев С.П.* Энциклопедия безопасности: строительство, промышленность, экология. В 3 т. Т. 3. Сейсмостойкость и теплозащита сооружений. М.: АСВ, 2010. 640 с.
14. *Ларионов В.И.* Научно-методические основы определения рисков чрезвычайных ситуаций. Безопасность России. Анализ риска и проблем безопасности. В 4 ч. Ч. I. Основы анализа и регулирования безопасности. М.: МГФ “Знание”, 2006. С. 353–389.

REFERENCES

- [1] Kotlyarevskiy V.A., Zabegaev A.V., eds. *Avarii i katastrofy. Preduprezhdenie i likvidatsiya posledstviy* [Accidents and disasters. Prevention and liquidation of consequences]. Moscow, Assotsiatsiya stroitel'nykh vuzov Publ., 1998. 203 p. (vol. 4).
- [2] Brushlinskiy N.N., Korol'chenko A.Ya., eds. *Modelirovanie pozharov i vzryvov* [Modeling of fires and explosions]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2000. 492 p.
- [3] *Metodika otsenki posledstviy khimicheskikh avariy (metodika “toksi”)* [Estimation techniques of chemical accident consequence (procedure “toksi”)]. Moscow, GUP “Nauchno-tehnicheskiiy tsentr po bezopasnosti v promyshlennosti Gosgortekhnadzora Rossii” Publ., 2000. 53 p.
- [4] Makhutov N.A., eds. *Technique of forecasting of earthquakes consequences. Sb. metodicheskikh dokumentov, primenyaemykh do pervichnoy otsenki riskov v oblasti pozharnoy bezopasnosti, grazhdanskoy oborony i zashchity naseleniya i territoriy ot chrezvychaynykh situatsiy* [Collection of methodical documents, applied to the primary risk assessment in the field of fire safety, civil defense and protection of population and territories against emergency situations]. Moscow, Pollimag Publ., 2003, pp. 544–569 (in Russ.).
- [5] *Zonirovanie territoriy po zatopeniyu pri razrushenii gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Zoning of territories on flooding at the destruction hydraulic structures]. In book: Kotlyarevskiy V.A., Larionov V.I., Sushchev S.P. *Entsiklopediya bezopasnosti: stroitel'stvo, promyshlennost', ekologiya. V 3 t. T. 3. Seysmostoykost' i teplozashchita sooruzheniy* [Encyclopedia of safety: construction, industry, ecology. In 3 vol. Vol. 3. Seismic stability and thermal protection facilities]. Moscow, Nauka Publ., 2010. 633 p. (pp. 185–200).
- [6] *Metodiki otsenki posledstviy avariy na opasnykh proizvodstvennykh ob'ektakh. Sb. Dokumentov* [Estimation techniques of accident consequence at hazardous production facilities. Collection of documents]. Moscow, GUP “Nauchno-tehnicheskiiy tsentr po bezopasnosti v promyshlennosti Gosgortekhnadzora Rossii” Publ. Ser. 27, iss. 2, 2001. 224 p.
- [7] Larionov V.I. *Teoreticheskie osnovy reagirovaniya na chrezvychaynye situatsii* [Theoretical fundamentals of emergency response]. In book: Shoygu S.K., Sakov G.P., Tsivilev M.P., Polyakov I.S., eds. *Operativnoe prognozirovanie inzhenernoy obstanovki v chrezvychaynykh situatsiyakh* [Operational forecasting of engineering environment at emergencies]. Moscow, Papirus Publ., 1998. 166 p. (pp. 7–21).
- [8] Venttsel' E.S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1999. 576 p.
- [9] Aleksandrov A.A. *Obespechenie bezopasnosti ekspluatatsii ob'ektov khraneniya uglevodorodnykh topliv* [Ensuring of safe operation for storage objects of hydrocarbon fuels]. Moscow, Nauka Publ., 2007. 149 p.
- [10] *Komplekt kart OSR-97-A, V, S i drugie materialy dlya SNIp “Stroitel'stvo v seysmicheskikh rayonakh”* [Card set General Seismic Zoning (GSZ) – 97 (A, B, C) and other materials for Construction Norms and Rules (CNR) “Construction in seismic regions”]. Moscow, OIFZ Publ., 1998. 33 p.

- [11] Shoygu S.K., Puchkov V.A., Faleev M.I., Shaposhnikov S.V., eds. Atlas prirodnykh i tekhnogennykh opasnostey i riskov chrezvychaynykh situatsiy. Rossiyskaya Federatsiya [Atlas of natural and technogenic dangers risks and emergencies. RF]. Moscow, “Dizayn. Informatsiya. Kartografiya” Publ., 2010. 696 p.
- [12] Kotlyarevskiy V.A., Larionov V.I., Sushchev S.P. Entsiklopediya bezopasnosti: stroitel'stvo, promyshlennost', ekologiya. V 3 t. T. 2. Zakony porazheniya. Prochnost' i dinamika sooruzheniy [Encyclopedia of safety: construction, industry, ecology. In 3 vol. Vol. 2. Destruction law. Resistibility and dynamics of structures]. Moscow, Nauka Publ., 2008. 632 p.
- [13] Kotlyarevskiy V.A., Larionov V.I., Sushchev S.P. Entsiklopediya bezopasnosti: stroitel'stvo, promyshlennost', ekologiya. V 3 t. T. 3. Seysmostoykost' i teplozashchita sooruzheniy [Encyclopedia of safety: construction, industry, ecology. In 3 vol. Vol. 3. Seismic stability and thermal protection facilities]. Moscow, Nauka Publ., 2010. 633 p.
- [14] Larionov V.I. Nauchno-metodicheskie osnovy opredeleniya riskov chrezvychaynykh situatsiy [Scientific and methodological basis for risk determining of emergencies]. In book: Vorob'ev Yu.L., Laverov N.P., Frolov K.V. Bezopasnost' Rossii. Analiz riska i problem bezopasnosti. V 4 ch. Ch. I. Osnovy analiza i regulirovaniya bezopasnosti [Security of Russia. Analysis of the risk and security problems. In 4 parts. Part. I. Fundamentals of analysis and regulation for security]. Moscow, Znanie Publ., 2006, 640 p. (cited pp. 353–389).

Статья поступила в редакцию 02.10.2014

Александров Анатолий Александрович — д-р техн. наук, профессор, ректор МГТУ им. Н.Э. Баумана, заведующий кафедрой “Экология и промышленная безопасность” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области ресурсо- и природосбережения при хранении и транспортировке жидкого углеводородного топлива с использованием криогенной техники, теории рисков, механики разрушения, промышленной безопасности и эксплуатации опасных производственных объектов. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Aleksandrov A.A. — Dr. Sci. (Eng.), professor, Rector of the Bauman Moscow State Technical University, head of “Ecology and Industrial Safety” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 100 publications in the field of resources and nature conservation during storage and transportation of liquid hydrocarbon fuel using cryogenic technology, theory of risks, fracture mechanics, industrial safety and exploitation of dangerous production objects.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Ларионов Валерий Иванович — д-р техн. наук, профессор, заместитель директора Научно-образовательного центра исследований экстремальных ситуаций МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ в области теории рисков и промышленной безопасности потенциально опасных объектов.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Larionov V.I. — Dr. Sci. (Eng.), professor, deputy director of the Scientific and Educational Center Extreme Situations Research of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 200 publications in the field of theory of risks and industrial safety of potentially dangerous objects.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Сушев Сергей Петрович — д-р техн. наук, профессор кафедры “Экология и промышленная безопасность” МГТУ им. Н.Э. Баумана, генеральный директор Центра исследований экстремальных ситуаций (ООО “ЦИЭКС”). Автор более 100 научных работ в области теории рисков, механики разрушения, промышленной безопасности и эксплуатации опасных производственных объектов.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Sushchev S.P. — Dr. Sci. (Eng.), professor of “Ecology and Industrial Safety” department of the Bauman Moscow State Technical University, chief director of the Extreme Situation Research Center (ESRC). Author of more than 100 publications in the field of risk theory, fracture mechanics, industrial safety and exploitation of dangerous production objects.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Вниманию авторов журнала

“Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия “Естественные науки”

Редакция журнала принимает к рассмотрению статьи, оформленные в соответствии с действующими правилами, по следующей тематике.

Математика

- Вещественный, комплексный и функциональный анализ
- Дифференциальные уравнения, динамические системы и оптимальное управление
- Математическая физика
- Теория вероятностей и математическая статистика
- Математическая логика, алгебра и теория чисел
- Вычислительная математика
- Дискретная математика и математическая кибернетика

Механика

- Теоретическая механика
- Механика деформируемого твердого тела
- Механика жидкости, газа и плазмы
- Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры
- Биомеханика

Физика

- Приборы и методы экспериментальной физики
- Теоретическая физика
- Радиофизика
- Оптика
- Акустика
- Физика конденсированного состояния

- Физика плазмы
- Физика магнитных явлений
- Электрофизика, электрофизические установки
- Теплофизика и теоретическая теплотехника
- Физика и технология наноструктур, атомная и молекулярная физика
- Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества
- Кристаллография, физика кристаллов
- Лазерная физика

Химия

- Неорганическая химия
- Органическая химия
- Физическая химия
- Электрохимия
- Высокомолекулярные соединения

Информатика, вычислительная техника и управление

- Системный анализ, управление и обработка информации
- Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана

Сдано в набор 15.12.2014
Формат 70 × 108/16
Заказ

Подписано в печать 23.01.2015
Усл.-печ. л. 11,55 Уч.-изд. л. 12,35

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана