

УДК 614.8.084

МОДЕЛЬ «ВОСЬМИГРАННАЯ ПРИЗМА». ОЦЕНКА ИНТЕГРАЛЬНОГО РИСКА ВОЗНИКНОВЕНИЯ НЕСЧАСТНОГО СЛУЧАЯ ИЛИ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ЗАБОЛЕВАНИЯ В СИСТЕМЕ

А. В. Будовский, Ю. В. Есипов

Донской государственный технический университет (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Аннотация. Изучение проблемы рисков на производстве особенно актуально. В первую очередь, это связано с тем, что количественная оценка является универсальным инструментом Системы управления охраной труда (СУОТ), который позволяет адекватно оценивать и эффективно управлять качеством производственной среды. В статье рассмотрен подход к оценке риска в рамках геометрической модели вида «Призма». Впервые продемонстрирована модель «Призма» для комплексной оценки риска системы «субъект — объект — факторы — защита». Цель работы — создание унифицированного метода оценки интегрального риска возникновения происшествия. Предложен подробный алгоритм расчёта интегрального риска. Рассмотренная модель оценки демонстрирует возможность получения материальной и стоимостной форм интегрального риска для дальнейшего проведения сравнительного анализа, обоснования способов и мер защиты и охраны труда.

Ключевые слова: интегральный риск, оценка, анализ, модель «Призма», факторы, ущерб, вероятность.

OCTAHEDRAL PRISM. INTEGRAL RISK ASSESSMENT OF AN ACCIDENT OR OCCUPATIONAL DISEASE IN THE SYSTEM

Aleksandr V. Budovskiy, Yuriy V. Esipov

Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Abstract. The study of the problem of risks in production is especially relevant. First of all, this is due to the fact that quantitative assessment is a universal tool of the Occupational Health and Safety Assessment System (OHSAS), which allows you to adequately assess and effectively manage the quality of the production environment. The article considers an approach to risk assessment within the framework of a geometric model of the "Prism" type. For the first time, the "Prism" model for a comprehensive risk assessment of the "subject — object — factors — protection" system has been demonstrated. The work objective is to create a unified method for assessing the integral risk of an accident. A detailed algorithm for calculating the integral risk is proposed. The considered assessment model demonstrates the possibility of obtaining material and cost forms of integral risk for further comparative analysis, justification of methods and measures of protection and labor protection.

Keywords: integral risk, assessment, analysis, "Prism" model, factors, damage, probability.

Введение. Ежедневно в России около 150 человек получают травмы¹. Из них, по статистике, 23 человека в итоге оказываются с разной степенью инвалидности, а девять погибают. Ежегодные финансовые издержки из-за несоответствия рабочих мест санитарно-гигиеническим нормативам, требованиям охраны труда и промышленной безопасности составляют более двух

¹Вступительный доклад МОТ: Достойный труд — безопасный труд. Женева: Международное бюро труда, 2006. — 56 с.

триллионов рублей. Их можно сократить с помощью внедрения и продвижения методов эффективного управления охраной труда. Одним из основных инструментов такой работы является оценка интегрального риска системы и управления им. А общий вид такой системы — это «субъект — объект — факторы — защита».

По самым строгим требованиям интегральный риск определяют:

- полной группой несовместных происшествий и неблагоприятных исходов;
- ожидаемых значений вероятностей их возникновения;
- оцениваемых значений последствий и ущербов.

В такой постановке задача оценки интегрального риска является сложной и громоздкой. В статье предлагается более простой способ оценки и анализа риска путём введения геометрической модели вида «Призма», где важным этапом является учёт вероятных исходов и их наглядное представление на основе полной группы возможных состояний в системе «субъект — объект — факторы — защита».

Материалы и методы. Ранее в [1–3] и в [4–6] были предложены способы оценки, основанные как на «объективной» вероятности исходов, так и на «субъективной» вероятности или нечеткой мере исходов происшествий. Первый способ предполагает использование понятий и операций теории вероятности. Второй способ чаще всего основан на теории и методах нечетких множеств или на методах экспертных оценок.

В недавних работах [7–8] интегральный риск системы определяется с единой позиции логического и параметрического описания как множества возможных происшествий, так и их составляющих в форме неблагоприятных исходов. При этом количественная мера в виде вероятности или возможности реализации элементарного исхода определяется на основе параметрической модели «воздействие — ослабление — восприимчивость», а также с помощью критерия «воздействие больше восприимчивости».

Выберем восемь видов факторов, действие которых в простейшем случае обуславливает два вида происшествий или исходов.

Требуется оценить интегральный риск системы с восемью факторами и двумя видами происшествий.

Первоначально для оценки интегрального риска рассматривали частный случай призмы — куб. Пусть правильный многогранник, имеющий своими гранями квадраты, является материальным объектом и представляет собой систему, которая была описана раньше. Подкидывание и падение куба на какую-либо грань можно сравнить с появлением одного из исходов (состоянием) в системе: несчастный случай, профессиональное заболевание, авария, катастрофа. Привязывая к элементам куба различные параметры и характеристики (длина, цвет, значение грани, её ущерб или цена), мы получаем возможность реальной оценки технологических систем.

Основным недостатком данного метода является ограниченность и монотонность вариантов исходов. Как правило, система получает одинаковый исход потому, что по свойствам куба все грани равны, следовательно, имеют одинаковые площади. А значит, вероятность падения на одну из них постоянна и равна $1/6$. В таком случае возникновение ситуаций не будет иметь неопределённости исхода, так как расчёт таким способом противоречит основному определению риска.

Учитывая несостоятельность возможностей модели «Куб», можно рассмотреть более совершенную модель — модель «Параллелепипед». В качестве примера возьмём прямую четырёхугольную призму. По аналогии с предыдущей моделью (кубом) данной призме можно задавать параметры, характерные для особенностей системы. Основанием данной призмы

является прямоугольник, следовательно, вариантов возможных исходов становится больше, так как рёбра имеют разные величины. Возникновение исходов возможно оценить статистической частотой по формуле:

$$p_i = \beta_i / \Sigma B, \quad (1)$$

где β_i — значение площадей граней;

ΣB — суммарная площадь граней призмы.

Воспользовавшись Национальным стандартом РФ «Характеристика факторов внешнего воздействия. Общая классификация» (ГОСТ Р 56257-2014)², выделим восемь основных факторов, приводящих к происшествию (несчастный случай или профессиональное заболевание), где фактор риска — это признак, который каким-то образом связан в будущем с возникновением происшествия (рис. 1).



Рис. 1. Общая классификация опасных факторов

Однако и у данной модели есть недостатки. Так как призма имеет шесть граней, то она может принять лишь шесть характеристик, а при полноценном расчёте и анализе необходимо учитывать все восемь опасных факторов, свойственных производственным системам.

Проанализировав преимущества и недостатки предыдущих моделей, можно утверждать, что оценить систему «субъект — объект — факторы — защита» со всеми свойственными ей опасными факторами и в которой возможны два исхода (несчастный случай или профессиональное заболевание, авария или катастрофа) можно при помощи новой модели — шестиугольной призмы. Шестиугольная призма представляет собой многогранник с 18 рёбрами и 12 вершинами. Также она имеет два вида граней (выпадение на шестиугольную или прямоугольную грань). А общее количество граней равно восьми, что помогает без сложностей описать систему основными факторами.

Рассмотрим алгоритм расчёта интегрального риска системы.

Рёбра призмы — a и b ; её грани — $ab_1, ab_2, ab_3, ab_4, ab_5, ab_6, ((3\sqrt{3})/2 a^2)7, ((3\sqrt{3})/2 a^2)8$.

Обозначим грани множеством:

$$\Gamma = \{\gamma_i\}, \quad (2)$$

где $i=1, 2, 3 \dots 8$ — количество граней.

²ГОСТ Р 56257-2014. Национальный стандарт РФ. «Характеристика факторов внешнего воздействия. Общая классификация» / Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: [сайт]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200118630> (дата обращения: 29.03.2023).

Обозначим площади граней множеством:

$$V = \{\beta_i\}. \quad (3)$$

Найдём суммарную площадь граней призмы в виде:

$$\Sigma V = \Sigma(\beta_i). \quad (4)$$

При однократном подкидывании шестиугольной призмы вероятность реализации исхода можно оценить с помощью статистической:

$$p_i = \beta_i / \Sigma V.$$

Введем факторы — ущерб (успех) от выпадения на каждую грань призмы в виде стоимости c_i (у. е.).

Множество стоимостей ущерба (успеха) представим в виде

$$Z = \{c_i\}. \quad (5)$$

Интегральный успех (риск ущерба) системы в модели шестиугольной призмы запишем в виде:

$$\Omega = \Sigma(p_i \times c_i). \quad (6)$$

Максимальный ущерб (успех) ω_{\max} от однократного бросания

$$\omega_{\max} = \max(p_i \times c_i). \quad (7)$$

Минимальный ущерб (успех)

$$\omega_{\min} = \min(p_i \times c_i). \quad (8)$$

С точки зрения планирования процесса управления рисками наиболее важными являются предельные характеристики риска [9]. Минимальное значение задаёт порог убытков, а максимальное значение величины ущерба дает нам знание того, какие убытки понесет предприятие в самом худшем случае. Это важно для стратегического планирования и устойчивого развития.

Результаты исследования. Пример 1. Данные о количестве пострадавших и погибших на объектах химической промышленности в 2010–2019 гг. приведены в таблице 1.

Таблица 1

Число пострадавших и погибших на объектах химической промышленности (составлено авторами)

Год	Численность персонала, чел.	Количество пострадавших при н/с, чел.	Со смертельным исходом, чел.	Численность пострадавших из расчёта на 1000 человек персонала	Численность погибших из расчёта на 1000 человек персонала
2010	415709	815	21	1,96	0,05
2011	410925	694	16	1,69	0,04
2012	382242	600	25	1,57	0,07
2013	387614	477	19	1,23	0,05
2014	380664	459	18	1,21	0,05
2015	382837	441	18	1,15	0,05
2016	387454	444	26	1,15	0,07
2017	317604	307	19	0,97	0,06
2018	327849	332	21	1,01	0,06
2019	329879	340	13	1,03	0,04

Судя по данным таблицы, за 2010–2019 годы произошло снижение количества пострадавших по рассматриваемому виду деятельности. Однако практически неизменным остаётся количество летальных исходов при несчастных случаях.

Смоделируем ситуацию, подобную той, что произошла 20 марта 2012 года в Азовском районе Ростовской области (тогда в цехе по фасовке и рафинированию подсолнечного масла отравились аммиаком восемь человек, два из которых погибли)³. В данной ситуации действует один лимитирующий фактор.

В цехе занята рабочая смена, состоящая из восьми человек. Стаж каждого — четыре года. Концентрация аммиака в воздухе составляет $18,5 \text{ мг/м}^3$ (при предельно допустимой концентрации в воздухе рабочей зоны производственных помещений — 20 мг/м^3).

В данную полную группу исходов входят несчастный случай и профессиональное заболевание.

Так как несчастный случай — это происшествие, связанное, как правило, с кратковременным и однократным воздействием на человека опасного фактора, то его достаточно описать одним параметром, а именно численным значением действия фактора, и предусмотрительно расположить его в основании призмы, потому что площадь шестиугольника, а как следствие, вероятность выпадения, зависит тоже лишь от одного параметра — его стороны.

Профессиональное заболевание — происшествие, связанное с длительным и многократным воздействием на человека опасных и (или) вредных факторов. Поэтому его целесообразно расположить на боковой грани призмы и описать двумя параметрами: численным значением действия фактора и временем действия.

Обобщая, получим: ребро $a=18,5 \text{ мг/м}^3$; ребро $b=5937 \text{ ч}$. (рис. 2).

Что касается ущерба, возьмём размер единовременной выплаты при несчастном случае и профзаболевании (рубли). Расчёт и результаты представлены в таблице 2.

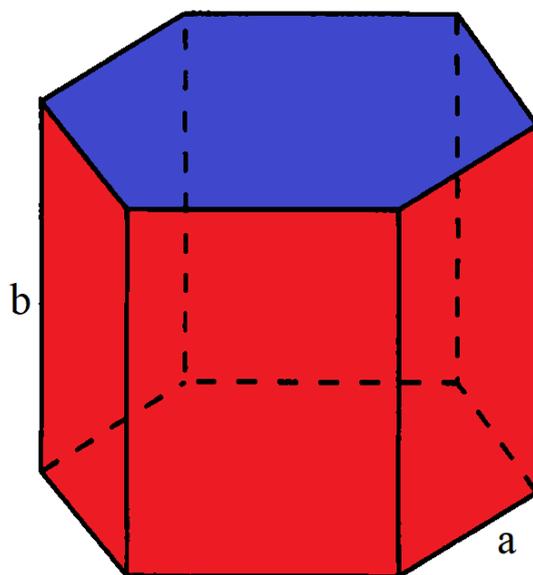


Рис. 2. Модель «Призма»

³Кочеткова С. Два человека погибли, шесть пострадали от отравления аммиаком на Дону / Юга.ру — новости Краснодара, Краснодарского края и Адыгеи: [сайт]. URL: <https://www.yuga.ru/news/256971/> (дата обращения: 09.04.2022).

Таблица 2

Итоговые значения расчёта ущерба (составлено авторами)

№ грани п/п	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8
Вид грани	ab_1	ab_2	ab_3	ab_4	ab_5	ab_6	$(\frac{3\sqrt{3}}{2}a^2)_7$	$(\frac{3\sqrt{3}}{2}a^2)_8$
Ущерб	108601	108601	108601	108601	108601	108601	94018	94018
Площадь грани	109834,5	109834,5	109834,5	109834,5	109834,5	109834,5	889,2	889,2
Сумма площадей	660785,4							
Частота выпадения	0,1662	0,1662	0,1662	0,1662	0,1662	0,1662	0,0013	0,0013
Диф. риск	18051,4	18051,4	18051,4	18051,4	18051,4	18051,4	126,5	126,5
Мах. риск	18051,4							
Мин. риск	126,5							
Интегр. риск	108561,8							

Анализируя результаты расчёта при помощи данной модели, можно увидеть, что значение интегрального риска системы принадлежит отрезку $[126,5; 108561,8]$. Минимальный порог убытков от возникновения аварийной ситуации для предприятия составит 126,5 руб. Максимальный ущерб от возникновения аварии составит 108561,8 руб. (это та сумма, которая пойдёт на выплаты компенсаций работникам).

Пример 2. По определению, оценка интегрального риска предполагает выявление всего комплекса комбинаций исходов ещё до учёта значимости их последствий (ожидаемого ущерба или успеха).

Рассмотрим ситуацию, когда факторы действуют комбинированно [10].

Представим работника на предприятии по выращиванию зерновых культур, который на своём рабочем месте постоянно подвержен двум и периодически шести факторам опасности. Первым делом следует собрать данные об уровне промышленного травматизма и профессиональных заболеваний на этом предприятии (относительные показатели). Необходимые статистические данные представлены в таблице 3.

Таблица 3

Относительные показатели количества случаев промышленного травматизма и профессиональных заболеваний на предприятии по выращиванию зерновых культур и по стране в целом за 2016–2020 гг. (составлено авторами)

Год	Численность пострадавших с утратой трудоспособности на один рабочий день и более и со смертельным исходом в расчете на 1 тыс. работающих, К _ч		Из них со смертельным исходом в расчете на 1 тыс. работающих, К _л		Число дней нетрудоспособности у пострадавших с утратой трудоспособности на 1 рабочий день и более и со смертельным исходом в расчете на 1 пострадавшего, К _т	
	при выращивании зерновых культур	по РФ	при выращивании зерновых культур	по РФ	при выращивании зерновых культур	по РФ
2016	1,8	1,3	0,148	0,062	45,7	49
2017	1,9	1,3	0,108	0,056	48,1	48,7
2018	1,4	1,2	0,1	0,054	50,8	49,3
2019	1,2	1,2	0,127	0,053	53,3	50,6
2020	1	1	0,097	0,045	56,9	49,9

Два наиболее влияющих на работника фактора необходимо расположить в основании призмы. Это так, потому что в случае реализации исхода, зависящего от этих факторов, ущерб в условных единицах будет наибольшим. Остальные шесть факторов — по боковым граням (ущерб будет незначительный).

Далее следует задать основные параметры призме. Грань а отвечает за категорию профессионального риска. А если конкретнее, то грань а равна преобразованному значению класса условий труда и профессиональному риску (рис. 3). Грань b отвечает за показатель частоты травматизма на предприятии. И рассчитывается по формуле:

$$K_{ч}=1000*n/N, \quad (9)$$

где n — общее число пострадавших за определенный период времени;

N — среднесписочная численность работников за период времени.

Класс условий труда по ФЗ «О специальной оценке условий труда» ⁴	Категория профессионального риска	Значение грани а
1	Риск отсутствует	1
2	Пренебрежительно малый (переносимый) риск	2
3.1	Малый (умеренный риск)	3
3.2	Средний (существенный) риск	4
3.3	Высокий (непереносимый риск)	5
3.4	Очень высокий (непереносимый) риск	6
4	Сверхвысокий риск	7

Рис. 3. Значения грани призмы по категории профессионального риска по ФЗ «О специальной оценке условий труда»

Ущерб от реализации факторов зададим в условных единицах, но при этом будем помнить о том, что наиболее влияющие факторы принесут и больший ущерб.

Итак, грань $a=4$, грань $b=1.1$. Исходные данные и результаты расчёта приведены в таблице 4.

Таблица 4

Итоговые значения расчёта (составлено авторами)

№ грани п/п	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8
Вид грани	ab_1	ab_2	ab_3	ab_4	ab_5	ab_6	$(\frac{3\sqrt{3}}{2} a^2)_7$	$(\frac{3\sqrt{3}}{2} a^2)_8$
Ущерб	100	500	1000	1500	2000	2500	5000	10000
Площадь грани	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	41,57	41,57
Сумма площадей	109,54							
Частота выпадения	0,0402	0,0402	0,0402	0,0402	0,0402	0,0402	0,3795	0,3795
Диф. риск	4,02	20,08	40,17	60,25	80,34	100,42	1897,47	3795
Мах.риск	3795							
Мин. риск	4,02							
Интегр. риск	5997,7							

По результатам расчёта при помощи данной модели снова можно увидеть, что значение интегрального риска системы принадлежит отрезку $[4,02; 5997,7]$. Минимальный порог убытков от возникновения аварийной ситуации для предприятия составит 4,02 условные единицы.

⁴Федеральный закон «О специальной оценке условий труда» от 28.12.2013 № 426-ФЗ / КонсультантПлюс: [сайт]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_156555/ (дата обращения: 10.04.2022).

Максимальное количество ущерба от возникновения аварии составит 5997,7 условные единицы (руб.).

Из-за того, что влияющие на человека факторы не соответствуют друг другу по значимости, демонстрация вероятности выпадения или реализации исхода тоже различна [11]. Основная цель эксперта — включить в полную группу все известные или выявленные им исходы⁵.

Обсуждение и заключения. В статье предложен простой способ оценки и анализа риска путём введения геометрической модели вида «Восьмигранная призма», где важным этапом является учёт вероятных исходов и их наглядное представление на основе полной группы возможных состояний в системе «субъект — объект — факторы — защита». Были выбраны отдельно взятые восемь видов факторов, действие которых в простейшем случае обуславливает два вида происшествий или исходов.

На основании решения задач по оценке риска организационно-технических систем предлагаемый подход позволяет хотя и приближенно, но унифицировано оценить ущерб, нанесенный системе или качеству объекта. Кроме того, рассмотренные модели оценки демонстрируют возможности получения «материальной» и «стоимостной» форм интегрального риска для дальнейшего проведения сравнительного анализа, обоснования способов и мер защиты и охраны труда.

Библиографический список

1. Tremblay, A. Assessment of occupational health and safety performance evaluation tools: State of the art and challenges for small and medium-sized enterprises / A. Tremblay, A. Badri // *Safety Science*. — 2018. — Vol. 101. — P. 260–267.
2. Tengilimoglu, D. The Effect of Safety Culture on Safety Performance: Intermediary Role of Job Satisfaction / D. Tengilimoglu, E. Celik, A. Guzel // *Journal of Economics, Management and Trade*. — 2016. — Vol. 15. — Iss. 3. — P. 1–12. DOI: [10.9734/BJEMT/2016/29975](https://doi.org/10.9734/BJEMT/2016/29975)
3. Махутов, Н. А. Оценка и нормирование рисков при эксплуатации сложных технических систем / Н. А. Махутов, Д. О. Резников // *Безопасность в техносфере*. — 2012. — Т. 1, № 5. — С. 3–9.
4. Есипов, Ю. В. Мониторинг и оценка риска систем «защита — объект — среда» / Ю. В. Есипов, Ф. А. Самсонов, А. И. Черемисин. — Москва : Изд-во ЛКИ, 2013. — 136 с.
5. Есипов, Ю. В. Модели и показатели техносферной безопасности : монография / Ю. В. Есипов, Ю. С. Мишенькина, А. И. Черемисин. — Москва : ИНФРА-М, 2018. — 154 с. ISBN: 978-5-16-106506-8.
6. Махутов, Н. А. Системный подход к оценке и управлению рисками / Н. А. Махутов, Р. С. Ахметханов // *Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций* : научный информационный сборник. — 2012. — № 5. — С. 56–69.
7. Киреев, В. Э. Оценка профессионального заболевания на основе полной линейки исходов «отравление аммиаком — удушье — летальный исход» / В. Э. Киреев, Ю. В. Есипов, А. В. Будовский // *Безопасность труда в промышленности*. — 2022. — № 8. — С. 48–54. DOI: <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2022-8-48-54>
8. Есипов, Ю. В. Способ оценки интегрального риска на примере системы «предприятие GL2Z — опасные и вредные факторы — работники» / Ю. В. Есипов, Б. Э. Бухезна,

⁵Расследование и учет аварий и несчастных случаев: сб. док. Сер. 29. Вып. 1. 14-е изд., испр. Москва: ЗАО НТЦ ПБ, 2010. 220 с.

М. С. Джиляджи // Безопасность труда в промышленности. — 2021. — № 10. — С. 77–81.
DOI: <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2021-10-77-81>

9. Махутов, Н. А. Нормирование и управление рисками, связанными с эксплуатацией опасных производственных объектов / Н. А. Махутов, Д. О. Резников, М. В. Лисанов // Безопасность труда в промышленности. — 2020. — № 12. — С. 85–91.
DOI: <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2020-12-85-91>

10. Sansakorn, P. Development of Risk Assessment and Occupational Safety Management Model for Building Construction Projects / P. Sansakorn, M. An // International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering. — 2015. — Vol. 9. — № 9. — P. 1248–1255.

11. Попов, В. М. Критерии риска травматизма / В. М. Попов // Безопасность труда в промышленности. — 2012. — № 2. — С. 62–65.

Об авторах:

Будовский Александр Владимирович, студент кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), k55355396@gmail.com.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4836-2214>.

Есипов Юрий Вениаминович, профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, yu-yesipov5@yandex.ru.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6018-5391>.

About the Authors:

Aleksandr V. Budovskiy, student of the Life Safety and Environmental Protection Department, Don State Technical University (1, Gagarina sq., Rostov-on-Don, RF, 344003), k55355396@gmail.com.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4836-2214>

Yuriy V. Esipov, professor of the Life Safety and Environmental Protection Department, Don State Technical University (1, Gagarina sq., Rostov-on-Don, RF, 344003), Dr. Sci. (Eng.), professor, yu-yesipov5@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6018-5391>