

6. Мусаев В.К. Защита нарушенного авторского права (плагиат) в Пушкинском городском, Московском областном и Верховном Судах Российской Федерации. – М.: Российский университет транспорта, 2021. – 874 с.

DOI: 10.25728/iccss.2022.50.37.042

Кацко Д.И., Кацко А.И.

К вопросу о повышении безопасности проектирования природно-технических систем

Аннотация: При строительстве сооружений гидротехнического, гражданского, промышленного назначений, автомобильных и железных дорог возникает задача вероятностного анализа опасностей и их учета при проектировании. В работе показано, что использование экстремальных законов распределения (Вейбулла, Гамма и др.) при оценке устойчивости откосов и склонов может лучше соответствовать эмпирическому распределению, полученному в результате имитационного эксперимента.

Ключевые слова: безопасность, метод Монте-Карло, оползень, откос, закон распределения, метод Феллениуса

Для расчета устойчивости склона в геотехнических программах есть возможность задания законов распределения входных параметров: сцепления, угла внутреннего трения и др., однако остается не понятным, каким законам распределения в таком случае будет подчиняться коэффициент устойчивости [1]. Для ответа на этот вопрос была разработана методика вероятностной оценки устойчивости склона, основанная на имитационном моделировании (метод Монте-Карло) с различными законами распределения.

На примере тестовой задачи проведен имитационный эксперимент [2]. Рассматривался однородный склон с известными геометрическими параметрами склона и физико-механическими свойствами грунта.

Для решения использовался простейший метод Феллениуса (1), расчет которого был перенесен в MS Excel [3] для анализа рисков по методу Монте-Карло [4] с помощью надстройки – @RISK

$$Fs = \frac{\sum(cl + tg\varphi)}{\sum W \sin\alpha} \quad , \quad (1)$$

где c – удельное сцепление; l – длина поверхности скольжения; $tg\varphi$ – угол внутреннего трения; α – угол наклона поверхности; W – вес грунта.

Традиционно одним из признаков однородности данных считается коэффициент вариации (2) [4, 7]

$$V = \sigma/\bar{x}, \quad (2)$$

где σ – среднее квадратическое отклонение; \bar{x} – среднее арифметическое значение (математическое ожидание).

Для проведения имитационного эксперимента рассматривались три уровня c и φ по шкале изменения их коэффициента вариации ($0 < V < 0,3$) при постоянных значениях средних ($c = 15,7$ кПа, $\varphi = 17,9^\circ$). План эксперимента представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Комбинация условий для эксперимента типа 3^2

Факторы	A ₀	A ₁	A ₂
B ₀	00	01	02
B ₁	10	11	12
B ₂	20	21	22

При подгонке распределений использовались бутстреп-метод [5, 6] (тысяча итераций для каждого распределения) и различные характеристики адекватности подгонки распределений. Результаты проведенного имитационного эксперимента в @RISK с нормальными распределениями характеристик прочности грунта и средними квадратическими отклонениями в соответствии с планом приведены в таблице 2 и на рисунке 1 только на уровне A₁B₁, что обусловлено подобием результатов. Конечные итоги на всех уровнях приведены в таблице 3. Результаты проведенного имитационного эксперимента показали, что в зависимости от сочетаний уровней среднеквадратических отклонений и характеристик оценки качества подгонки распределения лучшими являются нормальное распределение и распределение Вейбулла. Причем критерии

отличаются статистически незначимо, то есть коэффициент устойчивости может принимать значения, которые подчиняются закону распределения Вейбулла. В таблице 3 представлены приоритетные законы распределения в соответствии с критериями: усредненный логарифм правдоподобия (Av_LogL) и χ^2 .

Таблица 2 – Результаты эксперимента на уровнях A_1B_1

Распределение	$A_1 B_1$			
	Av_LogL	$P(Fs < 1.05)$	χ^2	$P(Fs < 1.05)$
Эмпирическое		0.042		0.031
Нормальное	0.3634	0.038	23.932	0.036
Вейбулла	0.3579	0.044	33.386	0.035
Лог-логистическое	0.3566	-	31.82	-
Логистическое	0.3565	-	28.398	0.041

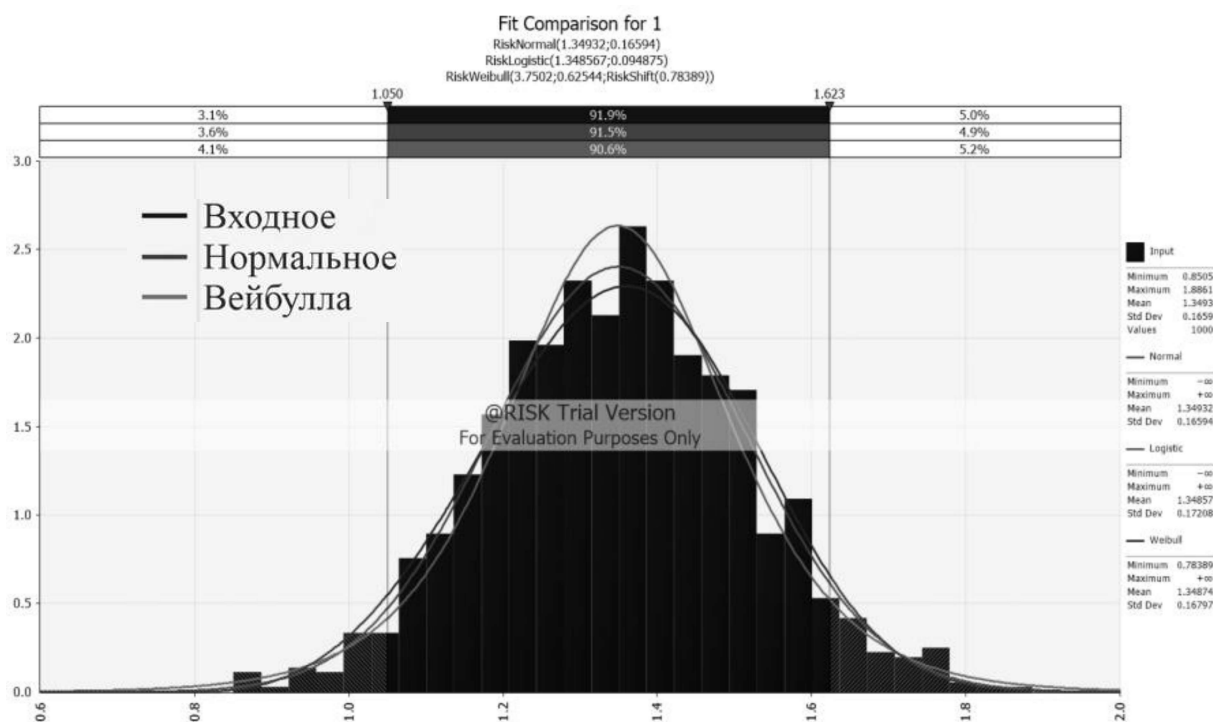


Рисунок 1 – Результаты эксперимента на уровнях A_1B_1 , с критерием χ^2 (хи-квадрат)

Таблица 3 – Законы распределения для эксперимента типа 3^2

Факторы	A_0	A_1	A_2
B_0	Нормальный Вейбулла	Вейбулла Нормальный	Нормальный Лог-логорифмический
B_1	Вейбулла Нормальный	Нормальный Нормальный	Вейбулла Нормальный
B_2	Нормальный Нормальный	Нормальный Вейбулла	Нормальный Вейбулла

Таким образом, в ходе имитационного эксперимента было доказано, что в половине случаев эмпирические наблюдения лучше описываются экстремальными законами распределения [7] (Вейбулла, Лог-логарифмическое), что позволяет точнее оценить вероятность обрушения склона, учесть ее при проектировании и повысить безопасность строительства сооружений в условиях опасных геологических и инженерно-геологических процессов (оползни, осыпи, оплывины, обвалы, линейная и поверхностная эрозия склонов, сейсмические явления и т.д.).

Литература:

1. *Безуглова Е.В., Мацый С.И., Подтелков В.В.* Оползневой риск транспортных природно-технических систем. – Краснодар: КубГАУ, 2015. – 239 с.
2. *Шенон Р.* Имитационное моделирование систем – искусство и наука / Р. Шенон; пер. с англ. – М.: МИР, 1978. – 420 с.
3. *Добров Э.М.* Механика грунтов. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 272 с.
4. *Ивченко Г.И., Медведев Ю.И.* Введение в математическую статистику / 2-е изд., испр. и доп. – М.: Ленанд, 2017. – 608 с.
5. *Клейнен Дж.* Статистические методы в имитационном моделировании / под ред. и с предисл. Ю.П. Адлера, В.Н. Варыгина, пер. с англ. Ю.П. Адлера. – Москва: Статистика, 1978. – Вып. 1 – 222 с. Вып. 2 – 335 с.
6. *Райзер В.Д.* Вероятностные методы надежности в анализе надежности и живучести сооружений. – М.: АСВ, 2018. – 396 с.
7. *Гумбель Э.* Статистика экстремальных значений / Пер. с англ. В. Ю. Татарского, под ред. Д. М. Чибисова, с предисловием Б. В. Гнеденко. – М.: МИР, 1965. – 451 с.