

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ АВАРИИ С УЧЕТОМ ОШИБОК УЧАСТНИКОВ СТРОИТЕЛЬСТВА

А.Х. Байбурун

Рассматривается соотношение между теоретической и фактической вероятностью аварии зданий и сооружений с учетом ошибок участников строительства. Установлено, что фактический риск превышает теоретическое значение в 10 раз и более. Предлагается учитывать этот факт при проектировании объектов.

Ключевые слова: риск аварии, здание, сооружение, человеческие ошибки, конструкционная безопасность.

Обеспечение безопасности искусственной среды обитания на фоне увеличения рисков природного и техногенного характера является актуальной строительной задачей. Современные исследования [1–3] показывают, что человеческие ошибки вносят значительный вклад в общий риск аварии зданий и сооружений, снижая их конструкционную безопасность. Однако численное выражение указанного вклада исследовано недостаточно.

Исследования причин строительных аварий показывают [3]:

- 1) аварии в строительстве всегда связаны с ошибками людей;
- 2) частота аварий намного превышает теоретическое значение, вычисленное без учета грубых ошибок;
- 3) чаще всего причиной аварии являются сразу несколько ошибок участников строительства;
- 4) ошибки обнаружены и в тех конструкциях, которые не отказали.

Установлено, что человеческие ошибки возникают гораздо чаще, чем большие отклонения прочности материалов или величин нагрузок. Исходя из перечисленных предпосылок, исследуем вклад человеческого фактора в общий риск аварии зданий и сооружений.

Жизненный цикл здания может быть представлен как последовательность процессов изысканий, проектирования, поставок материалов, производства работ, эксплуатации, ремонта и сноса. В составе каждого процесса предусмотрены процедуры контроля, поэтому ошибки на каждой стадии проявля-

ются только совместно с ошибками контроля. Кроме того, необходимо учитывать вероятность случайного отклонения прочности материалов, нагрузок и условий эксплуатации зданий. Вероятности появления ошибок и отклонений, оцененные для Европы и России, приведены в табл. 1.

Вероятности ошибок для России получены по обобщенным результатам анализа различных источников [4, 7, 8].

На основании изложенных положений за критерий аварии (отказа конструкций) примем

$$m + n \geq 3, \quad (1)$$

где m – количество человеческих ошибок, n – число неучтенных отклонений.

Основанная на статистических данных модель (1) описывает отказ конструкции как наложение событий в виде случайных отклонений характеристик материалов, нагрузки и человеческих ошибок.

Ошибки архитектора, проектировщика и строителя могут проявляться лишь в случае, если допущена ошибка контролера. Ошибки независимы, поэтому: $P(AI) = 0,15 \cdot 0,1 = 0,015$; $P(CI) = 0,56 \cdot 0,1 = 0,056$; $P(EI) = 0,09 \cdot 0,1 = 0,009$.

Тогда вероятности комбинации ошибок:

$$P(AI \cap CI \cap EI) = P(AI) \cdot P(CI) \cdot P(EI) = 0,015 \cdot 0,056 \cdot 0,009 = 7,56 \cdot 10^{-6};$$

$$P(AI \cap EI) = P(AI) \cdot P(EI) \cdot (1 - P(CI)) = 0,015 \cdot 0,009 \cdot (1 - 0,056) = 127 \cdot 10^{-6};$$

$$P(AI) = P(AI) \cdot (1 - P(CI)) \cdot (1 - P(EI)) = 0,015(1 - 0,056)(1 - 0,009) = 14\,033 \cdot 10^{-6}.$$

Таблица 1

Вероятность появления ошибок и отклонений

Опасное событие	Вероятность	
	Европа	Россия
A – ошибка проектирования	0,40	0,15
C – ошибка при производстве работ	0,50	0,56
E – ошибка эксплуатации	нет данных	0,09
I – ошибка контрольных операций	0,10	0,10
S – отклонения нагрузок	0,02	0,02
M – дефекты материалов	0,02	0,16
U – отклонения условий эксплуатации	0,02	0,02

Эмпирические оценки вероятностей совместного появления ошибок приведены в табл. 2.

Поясним числа, указанные в строках таблицы. В строке 9 имеем:

$$\begin{aligned}
 P(n=0) &= (1 - P(S)) \cdot (1 - P(M)) \cdot (1 - P(U)) = \\
 &= (1 - 0,02) \cdot (1 - 0,16) \cdot (1 - 0,02) = 0,806736; \\
 P(n = 1) &= P(S) \cdot (1 - P(M)) \cdot (1 - P(U)) + \\
 &+ P(M) \cdot (1 - P(S)) \cdot (1 - P(U)) + \\
 &+ P(U) \cdot (1 - P(S)) \cdot (1 - P(M)) = \\
 &= 0,02 \cdot (1 - 0,16) \cdot (1 - 0,02) + 0,16 \cdot (1 - 0,02) \cdot (1 - 0,02) + \\
 &+ 0,02 \cdot (1 - 0,02) \cdot (1 - 0,16) = \\
 &= 0,016464 + 0,153664 + 0,016464 = 0,186592; \\
 P(n = 2) &= P(S) \cdot P(M) \cdot (1 - P(U)) + \\
 &+ P(S) \cdot P(U) \cdot (1 - P(M)) + P(M) \cdot P(U) \cdot (1 - P(S)) = \\
 &= 0,02 \cdot 0,16 \cdot (1 - 0,02) + 0,02 \cdot 0,02 \cdot (1 - 0,16) + \\
 &+ 0,16 \cdot 0,02 \cdot (1 - 0,02) = 0,003136 + \\
 &+ 0,000336 + 0,003136 = 0,006608; \\
 P(n = 3) &= P(S) \cdot P(M) \cdot P(U) = 0,02 \cdot 0,16 \cdot 0,02 = 0,000064.
 \end{aligned}$$

Например, в строке 3 имеем
 $P(AI \cap EI) \cdot P(n = 0) = 127 \cdot 10^{-6} \cdot 0,806736 = 103 \cdot 10^{-6}$,
 $P(AI \cap EI) \cdot P(n = 1) = 127 \cdot 10^{-6} \cdot 0,186592 = 24 \cdot 10^{-6}$,
 $P(AI \cap EI) \cdot P(n = 2) = 127 \cdot 10^{-6} \cdot 0,006608 = 0,8 \cdot 10^{-6} \approx 1 \cdot 10^{-6}$,
 $P(AI \cap EI) \cdot P(n = 3) = 127 \cdot 10^{-6} \cdot 0,000064 = 0,008 \cdot 10^{-6} \approx 0$.

Третья строка соответствует появлению двух человеческих ошибок. По условию отказа (1) конструкция отказывает, когда реализуется хотя бы одно отклонение $n \geq 1$. Полная частота отказов $(24+1) \cdot 10^{-6} = 25 \cdot 10^{-6}$ – сумма отказов справа от жирной линии, которая ограничивает условие аварии (1).

Таким образом, вероятность отказа при отсутствии грубых человеческих ошибок мала по сравнению с полной вероятностью отказа – 59/857.

Отказ без учета ошибок весьма мал и сравним с заложенным в нормы уровнем надежности конструкции $59 \cdot 10^{-6}$. При ошибках людей вероятность отказа увеличивается в $857/59 = 14,53 \approx 15$ раз и составляет уже около $9 \cdot 10^{-4}$.

Сравним полученные данные с величинами вероятности аварий для объектов, построенных в СССР [5], приведенными в табл. 3.

Из данных табл. 3 следует, что фактическая вероятность отказа с учетом человеческих ошибок превышает теоретическое значение риска зданий в 8...70 раз.

Допустимые значения риска в табл. 3 рассчитаны по формуле [3]

$$P_{adm} = 10^{-5} \xi_s T / L, \tag{2}$$

где ξ_s – коэффициент социальной значимости объекта: 0,005 для мест собрания людей и плотин; 0,05 – для объектов массового промышленного и гражданского строительства; 0,5 – для мостов; 5 – для башен, мачт и сооружений на морском шельфе; T – расчетный срок службы сооружения; L – среднее число людей, находящихся внутри сооружения или в непосредственной близости от него в течение периода, для которого оценивался риск.

Выводы по результатам анализа

1. Концепция «достаточной надежности», заложенная в нормах, на практике не реализуется. Фактическая вероятность аварии с учетом человеческих ошибок превышает теоретическое значение примерно в 40 раз по оценкам европейских ученых, в 15 раз для России и 8...70 раз по данным опыта эксплуатации объектов в СССР.

Таблица 2

Эмпирические оценки вероятностей совместного появления ошибок $\times 10^{-6}$

Событие	$n = 0$	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$	Общая	Отказ
1. $AI \cap CI \cap EI$	6	1	0	0	7	1
2. $AI \cap CI$	672	155	6	0	832	161
3. $AI \cap EI$	103	24	1	0	127	25
4. $EI \cap CI$	400	93	3	0	496	96
5. AI	11 321	2618	93	0	14 032	93
6. CI	44 099	10 200	361	4	54 664	365
7. EI	6751	1562	55	1	8369	56
8. Нет ошибок	743 384	171 939	6 089	59	921 471	59
9. Общая	806 736	186 592	6 608	64	1 000 000	–
10. Отказы	6	273	519	59	–	857

Таблица 3

Значения риска аварий для объектов СССР

Значение риска	Для сооружений	Для зданий	
		одноэтажных	многоэтажных
1. Теоретическое	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
2. Фактическое	$2 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-5} \dots 7 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$
3. Допустимое	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-6} \dots 1 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-6}$
4. Превышение 2/1	200	8...70	50

2. Полученные для России значения риска $(1...9) \cdot 10^{-4}$ близки к фактической вероятности отказов по европейским данным – $3,06 \cdot 10^{-4}$ [3] и данным по объектам СССР – $(2...5) \cdot 10^{-4}$ [5].

3. Наиболее опасны ошибки строителей в сочетании с неучтенными отклонениями свойств материала и условий эксплуатации.

4. В нормах по проектированию ошибки людей не учитываются. Система коэффициентов надежности, применяемая в нормах, задает допустимый уровень риска аварии $10^{-5}...10^{-6}$, но в результате ошибок он неизбежно снижается на порядок и более и превышает допустимое значение $5 \cdot 10^{-5}$ [6].

5. В нормах следующего поколения необходимо учесть человеческий фактор, например, введением дополнительного коэффициента надежности, оценивающего эффективность системы управления риском и блокирования человеческих ошибок.

Литература

1. *Снижение рисков в строительстве при чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера: науч. изд. / А.Г. Тамразян, С.Н. Булгаков, И.А. Рахман, А.Ю. Степанов. – М.: Изд-во АСВ, 2012. – 304 с.*

2. Мельчаков А.П. О безопасности застраиваемых территорий / А.П. Мельчаков, Д.А. Байбурун, Е.В. Шукутина // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура»*. – 2014. – Т. 14, № 1. – С. 14–18.

3. Аугусты, Г. Вероятностные методы в строительном проектировании / Г. Аугусты, А. Баратта, Ф. Кашиати; пер. с англ. Ю.Д. Сухова. – М.: Стройиздат, 1988. – 584 с.

4. Байбурун, А.Х. Качество и безопасность строительных технологий: моногр. / А.Х. Байбурун, С.Г. Головнев. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. – 453 с.

5. *Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий / под ред. В.А. Котляревского, А.В. Забегаева. – М.: Изд-во АСВ, 2001. – Кн. 5. – 416 с.*

6. ГОСТ 31937-2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния.

7. *Аварии зданий и сооружений на территории Российской Федерации в 1998–2002 / Росархстройнадзор.*

8. Добромислов, А.Н. Анализ аварий промышленных зданий и инженерных сооружений / А.Н. Добромислов // *Промышленное строительство*. – 1990. – № 9. – С. 9–10.

Байбурун Альберт Халитович, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология строительного производства», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), abayburin@mail.ru

Поступила в редакцию 27 октября 2014 г.

Bulletin of the South Ural State University
Series “Construction Engineering and Architecture”
2015, vol. 15, no. 1, pp. 10–13

CONSTRUCTION ACCIDENTS PROBABILITY ESTIMATE TAKING INTO ACCOUNT ERRORS OF CONSTRUCTION PARTICIPANTS

A.Kh. Baiburin, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, abayburin@mail.ru

The correlation between theoretical and actual probability of construction accidents at buildings and structures, taking into account errors of construction participants, is considered. It is stated that the actual risk value is 10 times greater than the theoretical one. It is proposed to take into account this fact for objects design.

Keywords: accident risk, building, structure, human errors, structural safety.

References

1. Tamrazyan A.G., Bulgakov S.N., Rakhman I.A., Stepanov A.Yu. *Snizhenie riskov v stroitel'stve pri chrezvychaynykh situatsiyakh prirodnoy i tekhnogennoy kharaktera: nauchnoye izdanie* [Risks Reducing in Construction Engineering due Natural and Technogenic Hazards: scientific publication]. Moscow, ASV Publ., 2012. 304 p.

2. Mel'chakov A.P., Bayburin D.A., Shukutina E.V. [About Urban Territories Safety]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction engineering and architecture*, 2014, vol. 14, no. 1, pp. 14–18.

3. Augusti G., Baratta A., Kashiati F. *Veroyatnostnye metody v stroitel'nom proektirovanii* [Probabilistic Methods in Structural Engineering]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1984. 584 p.
4. Bayburin A.Kh., Golovnev S.G. *Kachestvo i bezopasnost' stroitel'nykh tekhnologiy: monografiya* [Quality and Safety in Construction Industry Technologies: monography]. Chelyabinsk, South Ural State University Publ., 2006. 453 p.
5. Kotlyarevskiy V.A., Zabegaev A.V. *Avarii i katastrofy. Preduprezhdenie i likvidatsiya posledstviy. Kniga 5* [Accidents and Disasters. Prevention and mitigation. Book 5]. Moscow, ASV Publ., 2001. 416 p.
6. GOST 31937-2011. *Zdaniya i sooruzheniya. Pravila obsledovaniya i monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya* [National Standart of Russian Federation 31937-2011. Buildings and constructions. Rules of technical condition evaluation and monitoring].
7. *Avarii zdaniy i sooruzheniy na territorii Rossiyskoy Federatsii v 1998–2002* [Buildings and Constructions Accidents in Russian Federation Territory in 1998–2002]. *Rosarkhstroynadzor* [Architectural and construction engineering supervision in Russian Federation].
8. Dobromyslov A.N. [Industrial Buildings and Constructions Accidents Analysis]. *Promyshlennoe stroitel'stvo* [Industrial and civil engineering], 1990, no. 9, pp. 9–10 (in Russ.).

Received 27 October 2014