

УДК 625.7+519.2+519.85

**Майстренко Игорь Юрьевич**

кандидат технических наук, доцент

E-mail: [igor\\_maystr@mail.ru](mailto:igor_maystr@mail.ru)

**Зиннуров Тагир Альмирович**

кандидат технических наук, доцент

E-mail: [leongar@mail.ru](mailto:leongar@mail.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

**Майстренко Татьяна Игоревна**

специалист по промышленной безопасности

E-mail: [maystrenko1496@mail.ru](mailto:maystrenko1496@mail.ru)

**Егорова Ирина Юрьевна**

техник-проектировщик

E-mail: [risha9210@gmail.com](mailto:risha9210@gmail.com)

**ООО Научно-производственный центр «Строй-Экспертиза»**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Калинина, д. 48, офис 506А

### **Оценка безопасности эксплуатации мостов с учетом статистического анализа отказов и первоначальных повреждений**

#### **Аннотация**

*Постановка задачи.* Цель исследования состоит в разработке алгоритма оценки оперативной вероятности отказов, позволяющего количественно оценивать безопасность эксплуатации мостов по изменчивости показателей надежности системы.

*Результаты.* Основные результаты исследования состоят в разработке концепции практического использования накопленных статистических данных об отказах конструктивных систем и первоначальных повреждениях элементов мостовых конструкций, применительно к определенным видам расчетов и стадиям жизненного цикла по предположительно значимому признаку, связанному с причинами возникновения отказа.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в возможности ранжирования технических систем по фактическому уровню надежности и оптимизации процедур принятия решений на реконструкцию мостовых сооружений.

**Ключевые слова:** безопасность, мост, статистический, анализ, отказ, распределение, доверительный интервал, параметр.

#### **Введение**

Для оценки ресурса безопасной эксплуатации мостовых сооружений требуется оценить нормальный и предельно-допустимый уровень опасности невыполнения технической системой возложенных на неё функций. Если принять в качестве меры надежности вероятность отказа, то решение этой задачи сводится к оценке правой части неравенства [1-4]:

$$Q\Omega(t) \leq [Q(t)], \quad (1)$$

где  $Q\Omega(t)$  – вероятность опасных отказов по предельному состоянию с условием  $\Omega$ ;  
 $[Q(t)]$  – допустимое значение вероятности рассматриваемого отказа.

#### **Теоретические исследования.**

В данной работе рассмотрен новый подход к оценке оперативной вероятности отказа на основе статистического анализа отказов, характеризующей степень приспособленности технических систем к выполнению возложенных функций. Оперативная вероятность отказа [1, 4] понимается как условная вероятность, действительная только при выполнении целого комплекса предположений, например, о типах распределений для базисных переменных.

Будем считать, что конструктивная система считается работоспособной, если за время применения характеристики эффективности не выйдут за нижний допустимый

предел, при котором будет иметь место частичное или полное невыполнение возложенных функций. При этом следует принимать во внимание, что для мостовых конструкций предусмотрена комбинированная система технического обслуживания и ремонта, позволяющая устранить потенциальные опасности, выявившиеся за время применения конструктивной системы.

Следовательно, выполнение конструктивной системой возложенных функций есть сложное событие  $S$ , которое можно записать в виде:

$$S=A+\bar{A}B, \quad (2)$$

где  $A$  – событие, состоящее в том, что за время  $t$  не возникнут потенциальные опасности, которые могут привести к частичному или полному невыполнению системой возложенных функций;  $\bar{A}$  – событие, являющееся дополнением к событию  $A$ ;  $B$  – событие, состоящее в том, что выявившиеся за время применения потенциальные опасности будут своевременно устранены.

Вероятность события  $S$ , как вероятность суммы двух несовместных событий может быть определена по формуле:

$$R(S)=R(A)+R(\bar{A}B). \quad (3)$$

Перепишем формулу (3) в виде:

$$R_S(t)=R_a(t)+[1-R_a(t)]\cdot R_b(t), \quad (4)$$

где  $R_a(t)$  – вероятность того, что за промежуток времени  $[0,t]$  не возникнут потенциальные опасности, которые могут привести к частичному или полному невыполнению системой возложенных функций;  $R_b(t)$  – вероятность того, что выявившиеся за время применения системы потенциальные опасности будут своевременно устранены.

Учитывая, что с увеличением объема статистических данных частота появления отказов за промежуток времени  $[0,t]$  приближенно равна вероятности появления отказов  $F_i(t)$ , формула для вычисления вероятности  $i$ -го события имеет вид:

$$R_i(t)=1-F_i(t)\approx 1-\frac{m_i(t)}{n}, \quad \text{при } n\rightarrow\infty, \quad (5)$$

где  $1-\frac{m_i(t)}{n}$  – вероятность  $i$ -го события, вычисленная при условии, что за промежуток времени  $[0,t]$  имело место некоторое число отказов  $m_i(t)$  из общего числа использованных статистических данных  $n$ .

### Практическая реализация предлагаемого подхода.

Для определения соответствующих вероятностей событий  $A$  и  $B$  будем использовать статистические выборочные данные об отказах конструктивных систем и первоначальных повреждениях элементов мостовых конструкций. Эти данные были получены из материалов открытой печати, а также средств массовой информации, включая профильные Интернет-порталы [5-8], и, в последующем, систематизированы и идентифицированы авторами.

Число наблюдаемых отказов, которые были идентифицированы удовлетворительно, составило 307 эпизодов (группа I), а число возможных отказов, которые косвенно свидетельствуют о наличии потенциального риска условно однотипных элементов и систем, представлены 2266 эпизодами (группа II). Результаты статистического исследования, представленные в табл. 1, позволяют выполнить оценку оперативной вероятности отказа по предположительно значимому признаку, связанному с причинами возникновения отказа.

Очевидно, что случайная величина оперативной вероятности отказа имеет определенную изменчивость, для оценки которой можно использовать два известных способа, основанных на методе доверительных интервалов предлагаемом в ГОСТ Р 50779.10-2000 (ИСО 3534-1-93) «Статистические методы. Вероятность и основы статистики. Термины и определения».

Однако применение неравенства Чебышева в общем виде может иногда давать тривиальную оценку, а применение распределения Стьюдента при законе распределения случайной величины отличного от нормального закона, может привести к очевидным ошибкам. Учитывая эти ограничения, запишем наиболее невыгодные соотношения

между доверительным интервалом, который покрывает неизвестный показатель, и заданной доверительной вероятностью:

$$P\{\bar{F}_i - \varepsilon_{\text{inf}} < F_i(t) < \bar{F}_i + \varepsilon_{\text{sup}}\} = \beta, \text{ при } \bar{F}_i - \varepsilon_{\text{inf}} \geq 0, \bar{F}_i + \varepsilon_{\text{sup}} \leq 1, \quad (6)$$

где  $\varepsilon_{\text{inf}}$  и  $\varepsilon_{\text{sup}}$  – соответственно точность оценки усиливающей и ослабляющей границы доверительного интервала.

Таблица 1

### Систематизированные выборочные данные по причине возникновения отказов

№ п/п	Причина возникновения отказа	$m_{i,I}(t)$	$m_{i,II}(t)$	$\frac{\bar{F}_{i,I}}{\bar{F}_{i,II}}$	$\frac{\bar{F}_i}{S_i}$
1.	Недоучет ветровой нагрузки и аэродинамическая неустойчивость	17	23	$\frac{0,045213}{0,006855}$	$\frac{0,000248}{0,000258}$
2.	Потеря устойчивости элементов	11	20	$\frac{0,029255}{0,005961}$	$\frac{0,000118}{0,000178}$
3.	Ошибки в технологии ведения строительно-монтажных и ремонтных работ	52	407	$\frac{0,138298}{0,121311}$	$\frac{0,015161}{0,002001}$
4.	Перегрузка несущих конструкций	57	627	$\frac{0,151596}{0,186885}$	$\frac{0,033722}{0,002955}$
5.	Влияние резонанса колебаний и явления усталости	15	19	$\frac{0,039894}{0,005663}$	$\frac{0,000189}{0,000225}$
6.	Деградация расчетных элементов в результате неблагоприятного воздействия эксплуатационной среды	54	855	$\frac{0,143617}{0,254844}$	$\frac{0,060479}{0,003902}$
7.	Недостаточная надежность и расстройство соединений	6	73	$\frac{0,015957}{0,021759}$	$\frac{0,000451}{0,000348}$
8.	Несоблюдение установленных габаритов перевозимых грузов и ударов подвижной нагрузки	22	30	$\frac{0,058511}{0,008942}$	$\frac{0,000417}{0,000334}$
9.	Появление дополнительных усилий и деформаций из-за геологических, гидрологических, оползневых и сейсмических явлений	68	353	$\frac{0,180851}{0,105216}$	$\frac{0,013251}{0,001872}$
10.	Отсутствие технического надзора	17	44	$\frac{0,045213}{0,013115}$	$\frac{0,000361}{0,000311}$
11.	Навал судов на опоры мостов	40	878	$\frac{0,106383}{0,261699}$	$\frac{0,062725}{0,003970}$
12.	Другие причины	17	26	$\frac{0,045213}{0,007750}$	$\frac{0,000260}{0,000264}$
	$n =$	<b>376<sup>1)</sup></b>	<b>3355<sup>1)</sup></b>		

Примечания: <sup>1)</sup> – число отказов с учетом наличия нескольких причин отказа в отдельных эпизодах;  $\bar{F}_{i,I}$ ,  $\bar{F}_{i,II}$  – среднее арифметическое значений признака, принадлежащих соответствующей группе;  $\bar{F}_i$  – среднее арифметическое групповых средних, взвешенных по объемам групп;  $S_i$  – оценка среднего квадратического отклонения распределения.

Для примера выполним оценку показателей надежности мостовых конструкций по критерию прочности. Поступим следующим образом.

Вначале проанализируем статистические выборочные данные, приведенные в табл. 1, и выделим в качестве предположительно значимого признака – отказ по причине перегрузки несущих конструкций. Определим по формулам (5) и (6) вероятность того, что за промежуток времени  $[0, t]$  не возникнут потенциальные опасности, которые могут привести к частичному или полному невыполнению системой возложенных функций по

причине перегрузки несущих конструкций. Полученные результаты для принятой доверительной вероятности 0,95 сведены в табл. 2.

Таблица 2

**Вероятность возникновения потенциальной опасности отказа**

Предположительно значимый признак	Оцениваемый критерий	Границы изменчивости			
		вероятности отказа		вероятности безотказной работы	
		$F_a^{inf}$	$F_a^{sup}$	$R_a^{inf}$	$R_a^{sup}$
Перегрузка несущих конструкций	Прочность несущих конструкций	0,027930	0,046724	0,953276	0,972070

Аналогичным образом оценим вероятность того, что выявившиеся за время применения системы потенциальные опасности будут своевременно устранены. Принимаем в качестве предположительно значимых признаков: в период приработки – отказ по причине ошибок в технологии ведения строительно-монтажных и ремонтных работ; в период нормальной эксплуатации – отказ по причине отсутствия технического надзора; в период интенсивного изнашивания – отказ по причине деградации расчетных элементов в результате неблагоприятного воздействия эксплуатационной среды. Полученные результаты сведены в табл. 3.

Таблица 3

**Вероятность своевременного устранения потенциальной опасности отказа**

Предположительно значимый признак	Оцениваемый критерий	Границы изменчивости			
		вероятности отказа		вероятности безотказной работы	
		$F_b^{inf}$	$F_b^{sup}$	$R_b^{inf}$	$R_b^{sup}$
Ошибки в технологии ведения строительно-монтажных и ремонтных работ	Своевременное устранение потенциальных опасностей	0,011239	0,023965	0,976035	0,988761
Отсутствие технического надзора		0,000000	0,001729	0,998271	1,000000
Деградация расчетных элементов в результате неблагоприятного воздействия эксплуатационной среды		0,052831	0,077648	0,922352	0,947169

Далее по формуле (4) определим вероятность выполнения конструктивной системой возложенных функций по критерию прочности. Полученные результаты сведены в табл. 4.

Таблица 4

**Вероятность выполнения конструктивной системой возложенных функций**

Стадия жизненного цикла системы	Границы изменчивости			
	вероятности отказа		вероятности безотказной работы	
	$F_s^{inf}$	$F_s^{sup}$	$R_s^{inf}$	$R_s^{sup}$
Период приработки	0,000314	0,001120	0,998880	0,999686
Период нормальной эксплуатации	0,000000	0,000081	0,999919	1,000000
Период интенсивного изнашивания	0,001476	0,003628	0,996372	0,998524

Учитывая, что для предельных состояний широкого класса отказ наступает в том случае, когда внешние нагрузки в первый раз превысят уровень внутреннего сопротивления конструкции, в качестве критической выберем модель оперативной вероятности отказа системы по наиболее невыгодным границам изменчивости [9-11]. На рис. приведены результаты оценки оперативной вероятности отказа по критерию прочности по основным стадиям жизненного цикла системы.

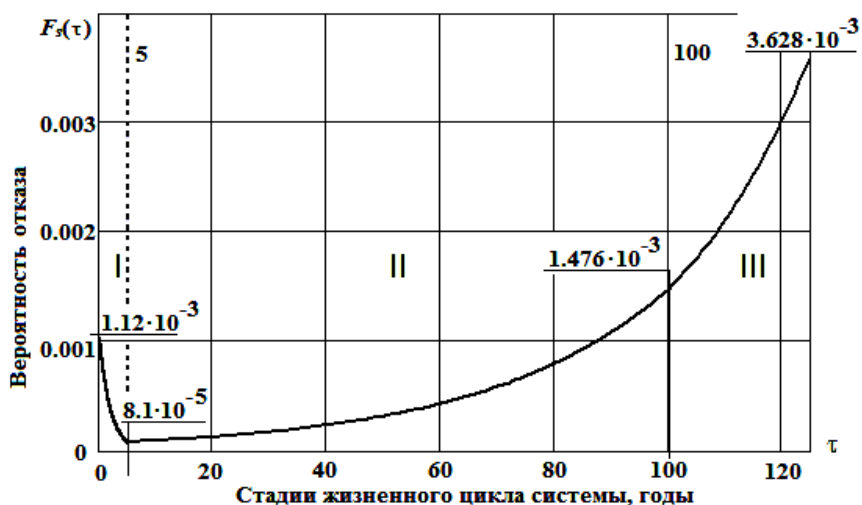


Рис. Результаты оценки оперативной вероятности отказа по критерию прочности по основным стадиям жизненного цикла системы:  
 I – стадия приработки, II – стадия нормальной эксплуатации,  
 III – стадия интенсивного изнашивания (иллюстрация авторов)

График, изображенный на рис., построен с  $F_s(t)$  помощью кусочно-экспоненциальной модели вида:

$$F_s(t) = e^{\lambda \cdot (\tau + m)}, \tag{7}$$

позволяющей выполнить прогноз оперативной вероятности отказа системы в определенный момент времени  $\tau$ , исходя из интенсивности отказа  $\lambda$  и параметра масштаба  $m$  для соответствующей стадии жизненного цикла системы:

$$F_s(t) = \begin{cases} e^{-0.525 \cdot (\tau + 12.934)}, & \exists 0 \leq \tau < 5; \\ e^{0.031 \cdot (\tau - 313.340)}, & \exists 5 \leq \tau < 100; \\ e^{0.036 \cdot (\tau - 281.199)}, & \exists 100 \leq \tau \leq 125. \end{cases} \tag{8}$$

По результатам проведенного статистического исследования установлено, что представленный подход позволяет количественно оценивать безопасность эксплуатации мостов по изменчивости показателей надежности системы применительно к определенным видам расчетов и стадиям жизненного цикла.

### Заключение

Статистический анализ отказов мостовых сооружений по ограниченной выборке, показал, что предложенная концепция оценки показателей надежности на основе расчета оперативной вероятности отказа, позволяет выделять предположительно значимые признаки и вероятные сценарии возникновения отказов, а также давать им интервальную оценку.

Проведенное статистическое исследование доказало возможность эффективного использования имеющейся и перспективной статистической информации об отказах конструктивных систем и первоначальных повреждениях элементов мостовых конструкций, при проектировании новых и реконструкции существующих технических систем, исходя из фактически необходимого уровня надежности на соответствующих стадиях их жизненного цикла.

Полученные результаты позволяют оптимизировать процедуры принятия решений на реконструкцию мостовых сооружений, включая ранжирование технических систем по их фактическому уровню надежности.

**Список библиографических ссылок**

1. Манапов А. З. Расчет надежности и ресурса строительных конструкций методом статистического моделирования. Казань : КГАСУ, 2010. 131 с.
2. Кельтон В. Д., Лоу А. М. Имитационное моделирование. СПб. : Питер, 2004. 847 с.
3. Димов Э. М., Маслов О. Н., Трошин Ю. В. Снижение неопределенности выбора управленческих решений с помощью метода статистического имитационного моделирования // Информационные технологии. 2014. № 6. С. 51–57.
4. Шпете Г. Надежность несущих строительных конструкций. М. : Стройиздат, 1994. 288 с.
5. Майстренко И. Ю., Овчинников И. И., Овчинников И. Г., Кокодеев А. В. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 1 // Транспортные сооружения. 2017. № 4. 39 с.
6. Овчинников И. Г., Овчинников И. И., Майстренко И. Ю., Кокодеев А. В. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 2 // Транспортные сооружения. 2017. № 4. 35 с.
7. Майстренко И. Ю., Овчинников И. И., Овчинников И. Г., Успанов А. М. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 3 // Транспортные сооружения. 2018. № 1. 41 с.
8. Овчинников И. И., Майстренко И. Ю., Овчинников И. Г., Успанов А. М. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 4 // Транспортные сооружения. 2018. № 1. 25 с.
9. Bignon P. G., Riera J. D. Verification of Methods for Soft Missile Impact Problems // Nucl. Engng. and Des. 1980. Vol. 60. P. 311–326.
10. Birbraer A. N., Roleder A. J., Arhipov S. B. Probabilistic Assessment of NPP Building Structures Strength under Aircraft Impact. Paper № 1644 / Trans. 16<sup>th</sup> International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 16), Washington DC, Aug. 2001.
11. Birbraer A. N., Roleder A. J., Arhipov S. B. Probabilistic Assessment of NPP Building Vibrations Caused by Aircraft Impact. Paper № 1645 / Trans. 16<sup>th</sup> International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 16), Washington DC, Aug. 2001.

**Maystrenko Igor Iurevich**

candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [igor\\_maystr@mail.ru](mailto:igor_maystr@mail.ru)

**Zinnurov Tagir Almirovich**

candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [leongar@mail.ru](mailto:leongar@mail.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

**Maystrenko Tatyana Igorevna**

specialist on industrial safety

E-mail: [maystrenko1496@mail.ru](mailto:maystrenko1496@mail.ru)

**Egorova Irina Iurevna**

project technician

E-mail: [rish9210@gmail.com](mailto:rish9210@gmail.com)

**LTD Scientific and production center «Stroy-Expertiza»**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Kalinina st., 48, off., 506A

**The bridges estimated safety maintenance  
with a glance of statistical failure analysis and initial damage****Abstract**

*Problem statement.* The purpose of the study is to develop an algorithm for assessing the operational probability of failures, which allows us to quantify the safety of exploitation of bridges by the variability of the system reliability indicators.

*Results.* The main results of the research are the development of the concept of practical use of the accumulated statistical data on the failures of structural systems and the initial damage to the elements of bridge structures, with respect to certain types of calculations and life cycle stages for a supposedly significant feature related to the causes of the failure.

*Conclusions.* The significance of the results obtained for the design and reconstruction of road bridges is the ability to rank technical systems at the actual level of reliability and optimize decision-making procedures for the reconstruction of bridge structures.

**Keywords:** security, bridge, statistical, analysis, renouncement, distribution, confidence interval, parameter.

### References

1. Manapov A. Z. Calculation of reliability and life of building structures by statistical modeling. Kazan : KGASU, 2010. 131 p.
2. Kelton V. D., Loy A. M. Imitation modeling. SPb. : Piter, 2004. 847 p.
3. Dimov Ia. M., Maslov O. N., Troshin Y. V. Reduction of uncertainty in the choice of management decisions using the method of statistical simulation // *Informacionnye tehnologii*. 2014. № 6. P. 51–57.
4. Spethe G. Reliability of load-bearing building structures. M. : Stroyizdat, 1994. 288 p.
5. Maystrenko I. Y., Ovchinnikov I. I., Ovchinnikov I. G., Kokodeev A. V. Failures and collapses of bridge constructions, analysis of their causes. Part 1 // *Transportnye sooruzheniya*. 2017. № 4. 39 p.
6. Ovchinnikov I. G., Ovchinnikov I. I., Maystrenko I. Y., Kokodeev A. V. Failures and collapses of bridge constructions, analysis of their causes. Part 2 // *Transportnye sooruzheniya*. 2017. № 4. 35 p.
7. Maystrenko I. Y., Ovchinnikov I. I., Ovchinnikov I. G., Uspanov A. M. Failures and collapses of bridge constructions, analysis of their causes. Part 3 // *Transportnye sooruzheniya*. 2018. № 1. 41 p.
8. Ovchinnikov I. I., Maystrenko I. Y., Ovchinnikov I. G., Uspanov A. M. Failures and collapses of bridge constructions, analysis of their causes. Part 4 // *Transportnye sooruzheniya*. 2018. № 1. 25 p.
9. Bignon P. G., Riera J. D. Verification of Methods for Soft Missile Impact Problems // *Nucl. Engng. and Des.* 1980. Vol. 60. P. 311–326.
10. Birbraer A. N., Roleder A. J., Arhipov S. B. Probabilistic Assessment of NPP Building Structures Strength under Aircraft Impact. Paper № 1644 / *Trans. 16th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 16)*, Washington DC, Aug. 2001.
11. Birbraer A. N., Roleder A. J., Arhipov S. B. Probabilistic Assessment of NPP Building Vibrations Caused by Aircraft Impact. Paper №1645 / *Trans. 16<sup>th</sup> International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 16)*, Washington DC, Aug. 2001.