

Вероятностный анализ ресурса конструкций покрытия промышленного здания с учетом случайного характера снеговой нагрузки

К.Н. Сухина, В.А. Пшеничкина

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

Аннотация: В статье приведены результаты исследований в вероятностной постановке остаточного ресурса несущих конструкций покрытия основного корпуса Р-1 ОАО "Волгайр-Пром" как многоэлементной резервированной системы. Получена функция вероятности превышения расчетных значений снеговой нагрузки за время эксплуатации здания на основе статистических данных распределения ее годовых максимумов. Получена вероятность отказа системы "подстропильная ферма - стропильная ферма" с учетом снижения резерва прочности и вероятность превышения снеговой нагрузкой заданный уровень во времени.

Ключевые слова: остаточный ресурс, резерв прочности, характеристика безопасности, закон распределения, показатели надежности, многоэлементные системы, вероятность безотказной работы.

Проблема оценки остаточного ресурса производственных зданий и сооружений чрезвычайно актуальна в связи с массовой выработкой расчетного ресурса и невозможностью в ближайшие годы осуществить их плановую замену. Вместе с тем многие здания и сооружения имеют еще существенный фактический резерв прочности. Поэтому остро стоит вопрос о продлении срока их службы при обеспечении безопасной эксплуатации.

В настоящее время расчет остаточного ресурса строительных объектов в инженерной практике преимущественно основан на детерминистических моделях. Однако задача прогнозирования ресурса является вероятностной, что обусловлено не только отсутствием начальной исчерпывающей информации о проектируемом объекте, но и разбросом показателей долговечности, чувствительным к условиям эксплуатации, ошибкам, упущениям при инженерных изысканиях и проектировании, дефектам строительства. Показатель ресурса должен определяться двумя характеристиками: временной T (календарным временем) и вероятностью $P(T)$, с которой эта временная характеристика должна быть обеспечена.

Ресурс определяется случайной величиной начальной несущей способности конструкции и интенсивностью ее изменения в конкретных условиях эксплуатации [1].

Перспективным направлением развития теории безопасности и ресурса строительных объектов является метод анализа рисков. Применяемые в настоящее время, как в РФ, так и за рубежом методы оценки риска носят, в основном, качественный характер, основываются на использовании экспертных оценок и направлены на оценку вероятности возникновения аварийной ситуации и возможных ее последствий [2, 3].

Количественные методы оценки безопасности и ресурса строительных объектов, в основу которых положена вероятностная концепция, применение вероятностных моделей и методов теории надежности, не имеют еще широкого распространения в практических исследованиях. Это связано со сложностью проведения вероятностных расчетов, не разработанностью инженерных методик, а главное – с устойчивым мнением об отсутствии статистического материала. Вместе с тем, задачи оценки остаточного ресурса с достаточной для практики точностью могут быть решены в корреляционном приближении, что не требует существенного увеличения объема информации.

Рассмотрим результаты решения задачи оценки остаточного ресурса, полученные методами теории надежности, для несущих конструкций покрытия основного корпуса Р-1 ОАО «ВОЛТАЙР-ПРОМ», расположенного в Волгоградской области. Здание было введено в эксплуатацию в 1964 году. Имеются результаты 4-х технических обследований конструкций здания, проводившихся в 1964, 1989, 1997 и 2005 гг [4]. Принимается модель сложной системы, элементами которой являются стропильные и подстропильные фермы покрытия.

1. Построение функции снижения резерва прочности во времени для отдельных элементов системы.

По результатам каждого i -го обследования ($i=1, 2, 3, 4$) на основе фактических данных оценивается резерв прочности

$$\tilde{S}_i = \tilde{R}_i - \tilde{F}_i \quad (1)$$

и характеристика безопасности (индекс надежности)

$$\beta_i = \frac{m_{R_i} - m_{F_i}}{\sqrt{A_{R_i}^2 m_{R_i}^2 + A_{F_i}^2 m_{F_i}^2}} \quad (2)$$

на момент времени обследования.

Параметры в формулах (1) и (2):

\tilde{S} , \tilde{R} , \tilde{F} – случайные величины резерва прочности, несущей способности и нагрузочного эффекта;

m_R , m_F , A_R , A_F – математические ожидания и коэффициенты вариации случайных величин \tilde{R} и \tilde{F} .

На рис. 1 приведен график функции $\beta(T)$, построенный по эмпирическим данным для стропильных ферм. Значения функции для подстропильных ферм были приведены в [5].

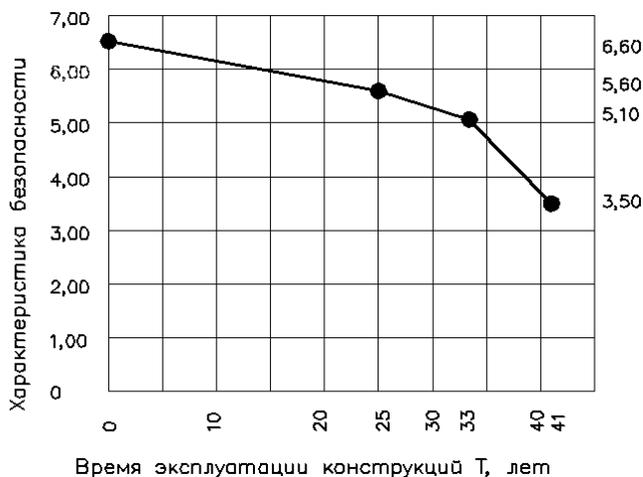


Рис. 1. – График изменения характеристики безопасности β во времени T стропильных ферм

Полученные функции $\beta(T)$ были аппроксимированы кубической параболой [5] для подстропильных ферм и стропильных ферм соответственно:

$$\beta(T) = -3,667 \cdot 10^{-4} \cdot T^3 - 0,241T^2 + 2,167T + 854,57, \quad (3)$$

$$\beta(T) = -1,872 \cdot 10^{-4} \cdot T^3 - 0,287T^2 + 2,669T + 961.83. \quad (4)$$

Следует отметить чрезвычайную важность для оценки показателей остаточного ресурса и составления корректного прогноза о сроках дальнейшей безаварийной эксплуатации конструкций определение индивидуального ресурса объекта, реализованного при его возведении. Начальный индивидуальный ресурс не может отождествляться с назначенным ресурсом (теоретической надежностью), который обеспечивается методом предельных состояний. При отсутствии данных о начальном ресурсе построить функцию износа и обосновать срок сверхнормативной эксплуатации конструкций можно только на основании данных не менее чем 2-х предыдущих обследований [6, 7].

2. Построение закона распределения времени безотказной работы элементов системы.

Приняв закон распределения случайных величин \tilde{R} и \tilde{F} нормальным, получим плотность вероятности времени безотказной работы для элементов системы [8, 9]:

$$p(T) = \begin{cases} 0.5 - \Phi \left[\frac{\xi(T) - 1}{A_R^2(T)\xi^2(T) + A_F^2(T)} \right], & T = 0 \\ \frac{A_R^2(T)\xi^2(T) + A_F^2(T)\xi'(T)}{\sqrt{2\pi} [A_R^2(T)\xi^2(T) + A_F^2(T)]^{3/2}} \exp \left[-\frac{(\xi(T) + 1)^2}{2(A_R^2(T)\xi^2(T) + A_F^2(T))} \right], & 0 < T < \infty \end{cases}, \quad (5)$$

где $\xi(T) = \frac{m_R(T)}{m_F(T)}$ - обобщенный коэффициент запаса; $\xi'(T)$ - производная по

времени функции $\xi(T)$; $\Phi \left[\frac{\xi(T) - 1}{A_R^2(T)\xi^2(T) + A_F^2(T)} \right]$ - функция Лапласа.

Полученные по формуле (5) результаты стропильных ферм представлены графически на рис.2. Результаты подстропильных ферм были рассмотрены в [5].

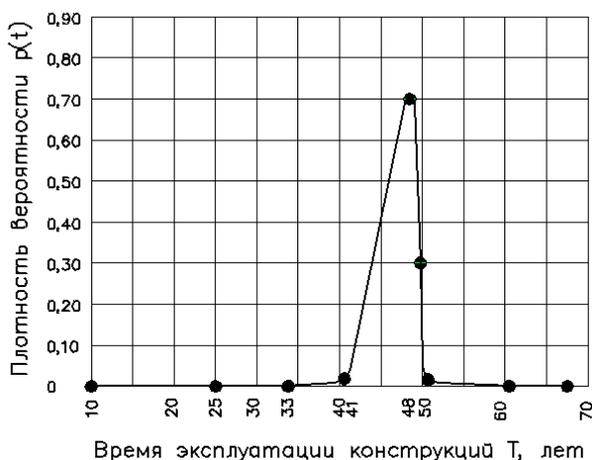


Рис. 2. – График плотности вероятности времени безотказной работы стропильных ферм

3. Нахождение показателей надежности системы по известным показателям надежности ее элементов.

Для того чтобы сделать заключение о показателях безотказности и долговечности объекта в целом, недостаточно знать только показатели отдельных ее элементов. В зависимости от схемы загрузки стропильные фермы покрытия были разбиты на 7 типов. Каждый тип в свою очередь был разбит еще на 3 категории эксплуатационного состояния: 1 категория – снижение проектного расчетного сопротивления на 0%, 2 категория – на 6%, 3 категория – на 12%. Затем каждый из 21 варианта, согласно чертежам, был рассчитан на заданные 4 схемы технологической узловой нагрузки. Подстропильные фермы корпуса Р-1 были рассмотрены в [5].

Характер взаимодействия подсистем «подстропильная ферма» – «стропильная ферма» позволяет принять схему последовательного их соединения в систему [10]. Полученная схема представляет собой систему резервирования с числом элементов $N=2$ и кратностью резервирования $m=2$.

На основании выбранной схемы поэлементного резервирования с постоянно включенным резервом были определены основные количественные характеристики надежности системы [11, 12]: вероятность безотказной работы в течение времени T равна произведению вероятностей ее элементов; частота отказов; интенсивность отказов; среднее время безотказной работы.

4. Исследование изменения уровня безопасности системы на действие снеговой нагрузки.

Проведем расчет безотказности системы с учетом вероятности превышения расчетного значения снеговой нагрузки и снижения резерва прочности элементов системы за время ее эксплуатации [13, 14].

Уровень обеспеченности нормативного значения снеговой нагрузки для каждого района формируется на основании результатов статистических данных маршрутной снегосъемки о запасе воды в снежном покрове в виде последовательности ежегодных максимумов, моделируемых в виде независимых случайных величин, распределенных по закону Гумбеля. При этом вес снежного покрова на поверхности земли в кг/м² численно равен величине запаса воды в снежном покрове в мм.

На основании статистических данных Федерального государственного бюджетного учреждения «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ» о годовых максимумах запаса воды в снеге, полученных на метеостанции «Камышин», расположенной в Волгоградской области, за последние 28 лет, была найдена вероятность превышения фактической снеговой нагрузкой расчетного значения в рассматриваемом районе.

Значения статистических данных годовых максимумов запаса воды в снеге, полученные на метеостанции «Камышин», представлены в таблице 1.

Таблица № 1

Годичные максимумы запаса воды в снеге по данным маршрутной снегосъемки метеостанции «Камышин»

Год наблюдения	Запасы воды в снеге, мм	Год наблюдения	Запасы воды в снеге, мм
1986	75	2000	124
1987	84	2001	57
1988	75	2002	48
1989	71	2003	89
1990	65	2004	34
1991	60	2005	19
1992	67	2006	70
1993	31	2007	74
1994	83	2008	69
1995	124	2009	81
1996	83	2010	132
1997	51	2011	65
1998	63	2012	105
1999	71	2013	52

Используя представленные в таблице данные, найдем основные статистические характеристики последовательности ежегодных максимумов снеговой нагрузки:

1. математическое ожидание – 72,2 кг/м²
2. дисперсия – 670,89 (кг/м²)²
3. стандарт – 25,9 кг/м²
4. коэффициент вариации – 0,65

Находим параметры закона Гумбеля:

$$\left. \begin{aligned} a_s &= \frac{1.28255}{\sigma_s}, \\ u_s &= m_s - \frac{0.577216}{a_s}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Плотность распределения и функцию распределения максимумов вычисляем по формулам:

$$p(S) = a_s \exp\{-a_s(S - u_s) - \exp[-a_s(S - u_s)]\}. \quad (7)$$

$$F(S) = \exp\{-\exp[-a_s(S - u_s)]\}. \quad (8)$$

Согласно СП 20.13320.2011 «Нагрузки и воздействия», значение нормативной снеговой нагрузки следует принимать как превышаемый в среднем один раз в 25 лет ежегодный максимум веса снегового покрова, определяемый на основе данных маршрутных снегосъемок о запасе воды на защищенных от прямого воздействия ветра участках за период не менее 20 лет. Таким образом, среднее значение периода повторяемости нормативной снеговой нагрузки m_{T0} принимаем равной 25 лет. Используя соотношение между средним периодом повторяемости последовательности независимых случайных величин и функцией их распределения

$$m_{T_0} = \frac{1}{1 - F(S_0)}, \quad (9)$$

найдем обеспеченность нормативной снеговой нагрузки S_0 :

$$F(S_0) = 1 - \frac{1}{m_{T_0}} = 1 - \frac{1}{25} = 0.96. \quad (10)$$

Функция распределения максимумов для закона Гумбеля равна

$$F(S_0) = \exp\{-\exp[-a_s(S_0 - u_s)]\} = 0.96. \quad (11)$$

Из формулы (11) получаем значение нормативной снеговой нагрузки:

$$S_0 = u_s - \frac{1}{a_s} \ln\{-\ln[F_s(S_0)]\}. \quad (12)$$

Вес снегового покрова на поверхности земли, превышаемый в среднем один раз в 25 лет, вычисленный для района метеостанции «Камышин» составляет $S_0=125.7$ кг/м². Расчетное значение снеговой нагрузки согласно табл.10.1 СП 20.13320.2011 «Нагрузки и воздействия» составляет 180 кг/м². Вероятность превышения снеговой нагрузкой уровень 180 кг/м² составляет $1 - F_S(180) = 0.0028$.

Зная фактические и расчетные значения снеговой нагрузки в рассматриваемом районе можно легко найти вероятность превышения значения наибольшей нагрузки за период 25, 50, 75 лет.

Вероятность того, что фактическая нагрузка не превысит расчетную на протяжении 25 лет находится по формуле

$$F_k(S) = [F(S)]^k = \exp\{-k \exp[-a_s(S - u_s)]\}. \quad (13)$$

Тогда искомая вероятность будет равна

$$P(S > 180) = 1 - F_k(180) = 1 - 0.93 = 0.07. \quad (14)$$

Значения вероятностей отказа системы «подстропильная ферма – стропильная система» и превышения снеговой нагрузкой заданный уровень во времени представлены в таблице 2 и графически на рис. 3.

Таблица № 2

Значения вероятностей

Год, T лет	Вероятность отказа системы «подстропильная ферма – стропильная ферма» $Q_c(T)$	Вероятность превышения снеговой нагрузки $P(S > 180)$
25	0.055	0.069
33	0.121	0.09
41	0.21	0.11
50	0.325	0.133

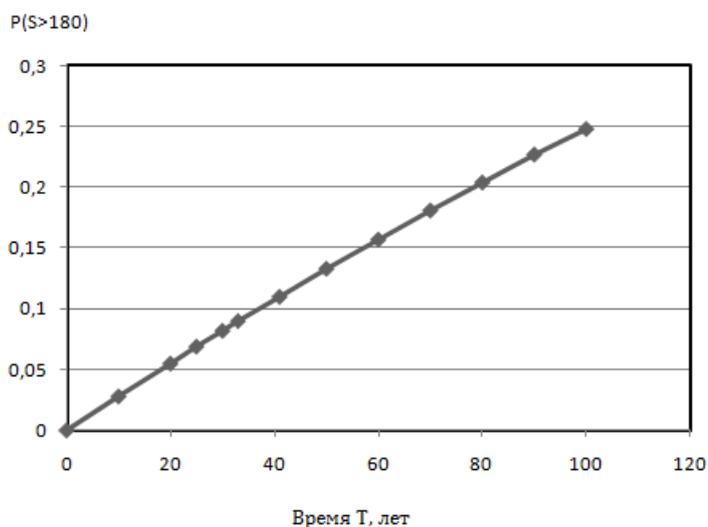


Рис. 3. – График изменения вероятности превышения снеговой нагрузкой заданный уровень 180 кг/м² во времени.

Заключение. (Основные выводы).

Для повышения достоверности оценки остаточного ресурса, как отдельных конструкций, так и всего здания в целом необходимо проведение целого комплекса мероприятий. Основным условием обеспечения высокой вероятности прогноза времени безопасной эксплуатации является знание закона снижения резерва прочности исследуемого объекта. Вывести такой закон можно путем регулярного проведения технического освидетельствования основных несущих конструкций здания. При этом минимальное количество обследований должно быть не менее трех после ввода здания в эксплуатацию. Оценка ресурса должна проводиться не поверочным расчетом, а аналитическими или экспертными методами теории надежности. Полученное значение индивидуального остаточного ресурса должно быть обязательно занесено в паспорт здания (сооружения).

Показано, что методы теории надежности могут успешно быть использованы в инженерной практике. При этом определяющие характеристики остаточного ресурса – вероятность безотказной работы и среднее время безотказной работы системы могут быть получены с

использованием только первых двух статистических моментов расчетных параметров – математического ожидания и коэффициентов вариации, что не требует наличия обширных статистических данных. Они могут быть получены в результате проведения стандартного инструментального освидетельствования конструкций эксплуатируемого здания.

Литература

1. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. М.: Машиностроение, 1984. С. 31-34
2. Raizer V.D. Theory of Reliability in Structural Desing. – Journal of Applied Mechanics Reviews, USA, 2004. – Vol.57. – Nol. – pp. 1-21.
3. Raizer V.D. Reliability of Structures. Analysis and Applications, Backbone Publishing Company. – New York, USA, 2009. – 146 p.
4. Лужин О.В. Обследование и испытание сооружений. М.: Стройиздат, 1987. С.91-150
5. Пшеничкина В.А., Сухина К.Н. Методика оценки остаточного ресурса подстропильных ферм основного корпуса Р-1 ОАО «ВОЛГАЙР-ПРОМ» //Вестник ВолгГАСУ. 2014. №35. С.85-89
6. Бандурин М.А. Проблемы определения остаточного ресурса технического состояния закрытых водосбросов низконапорных гидроузлов // Инженерный вестник Дона. 2014. №1. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_71_bandurin.pdf_2279.pdf
7. Бандурин М.А. Проблемы оценки остаточного ресурса длительно эксплуатируемых водопроводящих сооружений // Инженерный вестник Дона. 2012. №3. URL: ivdon.ru/uploads/article/doc/статья.doc_891.doc
8. Острейковский В.А. Теория надежности. М.: Издательство Высшая школа, 2003. С.127-132
9. Ржаницын А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. – М.: Стройиздат, 1978. С.285

10. Болотин В.В. Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. М.: Стройиздат, 1971. С.158-161
11. Половко А.М. Основы теории надежности. М.: Издательство «Наука», 1964. С. 187-191, 269-274
12. Райзер В.Д. Методы теории надежности в задачах нормирования расчетных параметров строительных конструкций. – М.: Стройиздат, 1986. С.385
13. Райзер В.Д. Теория надежности сооружений. Научное издание. – М.: Издательство АСВ, 2010. С.384
14. Шпете Г. Надежность несущих строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1994. С. 288 – перевод изд.: Gerhard Spaethe. – Die Sicherheit tragende Bankonstruktionen. – ISBN.5-274-01208-6.

References

1. Bolotin V.V. Prognozirovanie resursa mashin i konstrukcij. [Predicting resource of machines and structures]. М.: Mashinostroenie, 1984. pp 31-34
 2. Raizer V.D. Journal of Applied Mechanics Reviews, USA, 2004. Vol.57. Nol. pp 1-21
 3. Raizer V.D. [Reliability of Structures. Analysis and Applications, Backbone Publishing Company]. New York, USA, 2009. 146 p
 4. Luzhin O.V. Obsledovanie i ispytanie sooruzhenij. [Inspection and testing facilities]. М.: Strojizdat, 1987. pp 91-150
 5. Pshenichkina V.A., Suhina K.N. Vestnik VolgGASU. 2014. №35. pp 85-89
 6. Bandurin M.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus). 2014. №1. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_71_bandurin.pdf_2279.pdf
 7. Bandurin M.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus). 2012. №3. URL: ivdon.ru/uploads/article/doc/stat'ja.doc_891.doc
-



8. Ostrejkovskij V.A. Teorija nadezhnosti. [Reliability theory]. M.: Izdatel'stvo Vysshaja shkola, 2003. pp 127-132
9. Rzhanicyn A.R. Teorija rascheta stroitel'nyh konstrukcij na nadezhnost'. [Theory of design of structures for reliability]. M.: Strojizdat, 1978. 285 p
10. Bolotin V.V. Primenenie metodov teorii verojatnostej i teorii nadezhnosti v raschetah sooruzhenij. [Application of probability theory and the theory of reliability analysis of structures]. M.: Strojizdat, 1971. pp 158-161
11. Polovko A.M. Osnovy teorii nadezhnosti. [Basic theory of reliability]. M.: Izdatel'stvo «Nauka», 1964. pp 187-191, 269-274
12. Rajzer V.D. Metody teorii nadezhnosti v zadachah normirovanija raschetnyh parametrov stroitel'nyh konstrukcij. [Methods of reliability theory in problems of rationing design parameters of building structures]. M.: Strojizdat, 1986. 385 p
13. Rajzer V.D. Teorija nadezhnosti sooruzhenij. Nauchnoe izdanie. [Reliability theory structures. Scientific publication]. M.: Izdatel'stvo ASV, 2010. 384 p
14. Shpete G. Nadezhnost' nesushhih stroitel'nyh konstrukcij. [Reliability bearing structures]. M.: Strojizdat, 1994. p 288 perevod izd: Gerhard Spaethe. Die Sicherheit tragende Bankonstruktionen. ISBN.5-274-01208-6