



ОЦЕНКА ИНДЕКСА НАДЕЖНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ РЕШЕТЧАТЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ТРУБ ТИПА «КИСЛОВОДСК»

В статье представлен подход к определению индекса надежности стальных стержней решетчатых конструкций с помощью генерации случайных величин. На основе предложенного подхода можно выполнить проверку сечений конструктивных элементов на заданный уровень надежности. Для моделирования случайных величин используется метод Монте-Карло, численная реализация которого может быть выполнена на базе простых программ. В отличие от метода предельных состояний, на основе разработанных алгоритмов можно выполнить оптимизацию сечения стального элемента из условия эффективного соотношения критерия безопасности и металлоемкости конструкции.

Надежность, вероятностное проектирование, решетчатые покрытия, вероятность отказа, нормальное распределение, предельное состояние, неопределенность.

Термин надежности описывает способность строительной конструкции выполнять свои функции в течение заданного периода времени при определенных условиях эксплуатации. Обеспечение надежности представляет собой комплексную задачу, требующую соблюдения норм и правил на всех этапах жизненного цикла объекта.

Надежность строительных конструкций является ключевым показателем при проектировании, строительстве и эксплуатации зданий и сооружений. Согласно текущим нормам проектирования строительных конструкций надежность строительного объекта считается обеспеченной, если выполняются требования (критерии) для всех учитываемых предельных состояний при действии наиболее неблагоприятных сочетаний расчетных нагрузок в течение расчетного срока службы. Количественный показатель надежности в нормах на текущий момент не присутствует.

В рамках теории надежности строительных конструкций как фундаментальной науки [1, 2] предлагается измерять надежность в виде вероятности отказа P_f или индекса надежности β . Вычисление этих показателей требует использования полных вероятност-

ных расчетов в проектировании строительных конструкций [3–6].

В таблице 1 приведены целевые индексы надежности β в соответствии с Eurocode 0 «Basis of structural design».

Таблица 1

Рекомендуемые минимальные значения β по Eurocode 0

Класс надежности Reliability class	Минимальные значения для β Minimum values for β	
	годовой базовый период Annual base period	50-летний базовый период 50-year base period
RC3	5,2 (>0,99999)	4,3 (0,99998)
RC2	4,7 (0,99999)	3,8 (0,99993)
RC1	4,2 (0,99998)	3,3 (0,99950)

Покрытие типа «Кисловодск» представляет собой пространственную решетчатую конструкцию, образованную стержнями трубчатого сечения. Рассмотрим наиболее распространенную разновидность с размерами в плане 30×30 метров, структурная плита которой опирается на четыре колонны. Расчетная схема приведена на рисунке 1.

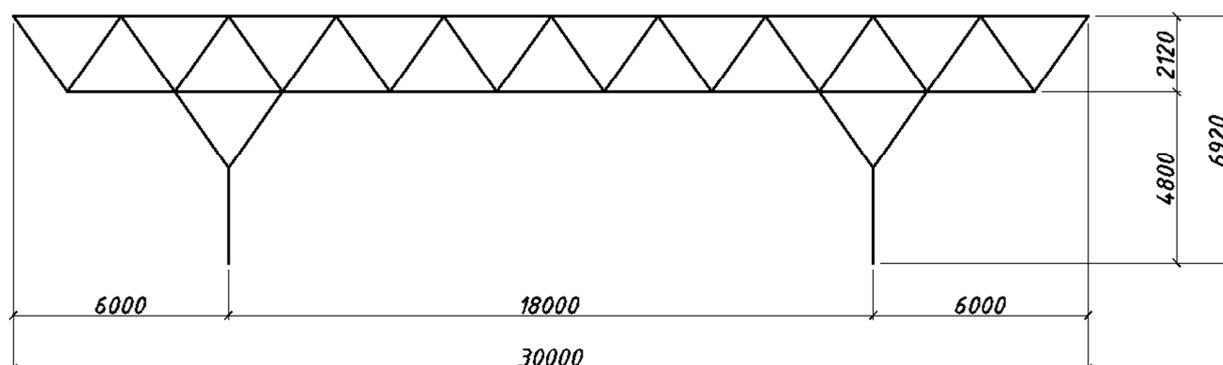


Рис. 1. Расчетная схема пространственной решетчатой конструкции типа «Кисловодск»

Параметры случайных величин

Параметр	Распределение	Параметры
Площади поперечных сечений стержней	Равномерное	В пределах допусков по ГОСТ 8732-78
Плотность стали	Равномерное	$[7700; 7900]$ кг/м ³
Расчетное сопротивление стали	Нормальное	$m_R = 275$ МПа; $S_R = 15$ МПа
Нагрузка от веса покрытия	Нормальное	$m_p = 117,7$ кг/м ² ; $S_p = 7,8$ кг/м ²
Нагрузка от веса снегового покрова	Гумбеля	$\alpha = 117$ кг/м ² , $\beta = 47$ кг/м ²

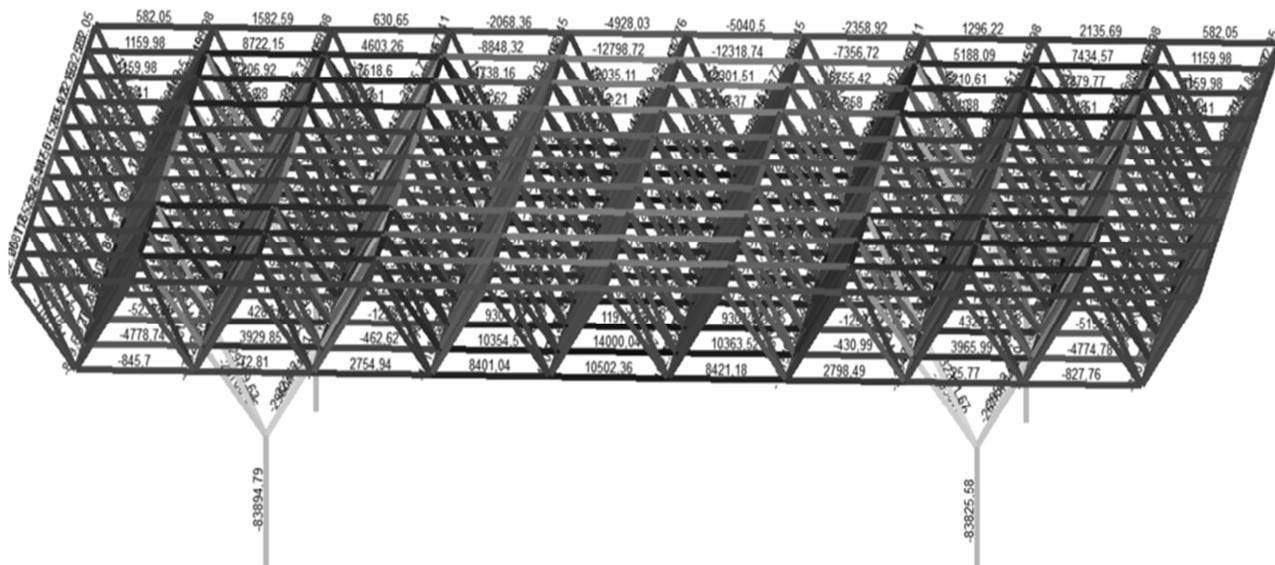


Рис. 2. Распределение усилий в элементах конструкции от комбинации загрузжений

Диаметр и толщина стенки стержней определяется силовыми и габаритными характеристиками. В данной конструкции используется пять типоразмеров труб. Для каждого типоразмера в соответствии с ГОСТ допустимы предельные отклонения геометрических характеристик.

Внешние нагрузки, действующие на конструкцию покрытия, также имеют случайный характер в связи с неоднородностью материалов покрытия и изменчивостью климатических условий.

Основной подход к анализу надежности строительных конструкций и численному моделированию случайных величин основывается на генерации случайных чисел методами Монте-Карло. Данный метод удобно использовать в связи с простыми моделями отказов, небольшим числом случайных параметров и простой программной реализацией в распространенных математических комплексах.

Для генерации случайных величин и вероятностного анализа необходима исходная статистическая информация о случайных величинах, представленная в таблице 2.

В ГОСТ 8732-78 «Трубы стальные бесшовные горячедеформированные» учитываются предельные отклонения наружного диаметра и толщины стенки. В данном случае они составляют $\pm 1,0$ и $\pm 12,5$ % соответственно. Принимая границы изменчивости плотности стали и площади поперечных сечений стержней, представленные в таблице, получаем возможное допустимое изменение собственного веса стержней, которое также учитывается в расчетной схеме.

Моделирование методом Монте-Карло нуждается в генераторах случайных чисел. Генерация случайных величин по основным законам распределения вероятностей (нормальный, равномерный и т.д.) выполнена в программной среде MathCAD.

Расчет конструкции выполним в программном комплексе SCAD Office. В данном методе используем 20 комбинаций для расчета конструкции. Каждая комбинация представляет собой генерацию собственного веса стержней, веса покрытия и веса снегового покрова.

Снеговая нагрузка является одним из главных факторов отказов. При высоком случайном значении веса снегового покрова происходит отказ сразу нескольких элементов конструкции. Наилучшим образом для аппроксимации климатических параметров нагрузок зарекомендовало себя распределение Гумбеля, которое хорошо подходит для вероятностного моделирования снеговой нагрузки. Статистические данные годовых максимумов запаса воды в снеге были рассмотрены по метеостанции 27026 Коробово (вблизи г. Вологды) за период с 1966 по 2018 год. В программном комплексе MATLAB были подобраны параметры для распределения Гумбеля: $\alpha = 117$ кг/м², $\beta = 47$ кг/м². При генерации данных получаем заданное количество годовых максимумов снеговой нагрузки, в данном исследовании 20. Использовать полученные значения годовых максимумов в комбинациях загрузжений будет не совсем объективно, поскольку в процессе генерации могут получиться как высокие, так и низкие значения, которые окажут ма-

лое влияние на конструкцию. В таблице 1 приведены целевые индексы надежности на годовой и 50-летний базовые периоды эксплуатации зданий и сооружений в соответствии с Eurocode 0. Для более объективной оценки надежности для каждой расчетной комбинации нагрузжений прогнозируем максимальное значение снеговой нагрузки за 50-летний период и применим его в расчете.

В таблице 3 приведен принцип генерации значений годовых максимумов снеговой нагрузки.

Также значение годового максимума за определенный период эксплуатации можно получить с помощью формулы распределения вероятностей Гумбеля:

$$F(s) = \exp \left[- \exp \left(\frac{\alpha - s + \beta \ln n}{\beta} \right) \right], \quad (1)$$

где n – количество лет эксплуатации конструкционного элемента (количество моделируемых годовых максимумов);

$$\beta = 0,78 \cdot \sigma_S,$$

где σ_S – среднее квадратическое отклонение годовых максимумов;

$$\alpha = m_S - 0,45\sigma_S,$$

где m_S – математическое ожидание годовых максимумов.

Выполнив расчет в программном комплексе SCAD Office, были получены усилия N в стержнях конструкции от расчетных комбинаций нагрузжений. При деформации растяжения или сжатия в сечениях стержня возникают нормальные напряжения σ [МПа].

Продольная сила N связана с нормальным напряжением σ зависимостью:

$$\sigma = \frac{N}{A}, \quad (2)$$

где A – площадь поперечного сечения стержня.

Формула (2) требуется для расчета растянутых элементов на прочность. Сжатые элементы рассчитываются на устойчивость по формуле:

$$\sigma = \frac{N}{\varphi \cdot A}, \quad (3)$$

где φ – коэффициент устойчивости при центральном сжатии.

Стержни исследуемой пространственной конструкции были рассчитаны по условию прочности. Полученные значения нормального напряжения для стержней конструкции представлены в таблице 4.

Рассчитав среднее значение и стандартное отклонение напряжения в стержне, можно оценить его индекс надежности. Индекс надежности определяется как:

$$\beta = \frac{m_R - m_\sigma}{\sqrt{S_\sigma^2 + S_R^2}}, \quad (4)$$

где m_σ и m_R – среднее значение напряжения в стержне и расчетного сопротивления стали соответственно;

S_σ и S_R – стандартное отклонение напряжения в стержне и расчетного сопротивления стали соответственно.

Из полученных значений индекса надежности по формуле (4) в таблице 5 и на рисунке 3 представлены пять стержней с минимальными значениями индекса надежности и пять стержней с максимальными значениями.

Таблица 3

Генерации значений годовых максимумов снеговой нагрузки

№ генерации данных	Значение годового максимума снеговой нагрузки, кг/м ²				Максимальное значение, кг/м ²
	1	2	[3...49]	50	
1	90,274	107,629	–	115,118	319,916
2	76,332	248,478	–	98,842	248,478
...	–	–	–	–	–
20	83,916	70,137	–	83,751	245,817

Таблица 4

Генерации значений годовых максимумов снеговой нагрузки

№ стержня	Напряжение в стержне σ , МПа				Среднее значение, МПа, m_σ	Стандартное отклонение, МПа, S_σ
	№ генерации данных					
	1	2	[3...19]	20		
1	42,476	46,247	–	37,302	40,146	9,231
2	46,188	50,291	–	40,567	43,61	10,176
...	–	–	–	–	–	–
818	11,706	14,313	–	9,747	11,801	1,974

Таблица 5

Результаты расчета

Минимальные значения		Максимальные значения	
№ стержня в расчетной схеме	значение индекса надежности	№ стержня в расчетной схеме	значение индекса надежности
327	2,427	642	18,278
361	2,441	218	18,302
309	2,449	222	18,306
393	2,451	231	18,313
394	2,463	236	18,324

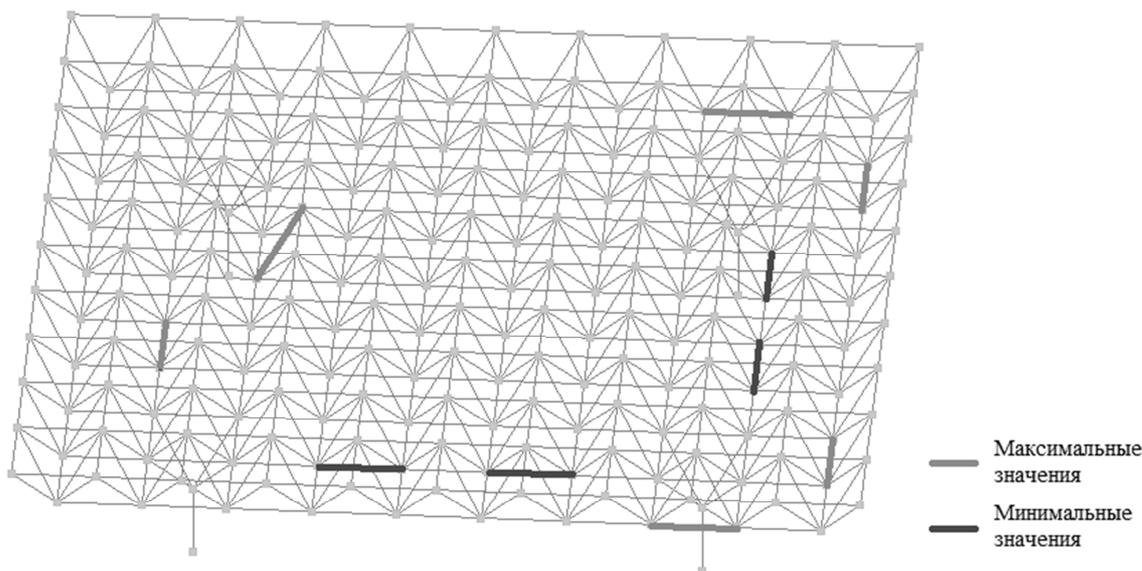


Рис. 3. Расположение стержней с максимальным и минимальным индексом надежности

Индекс надежности – это способ количественно оценить надежность системы и отдельных ее элементов. На основе предложенной методики можно проанализировать индекс надежности стержней пространственного решетчатого покрытия и выполнить соотношение критерия безопасности и металлоемкости конструкции.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что для стержней с низким индексом надежности необходимо увеличить площадь поперечного сечения для повышения их надежности. Для стержней с высоким значением индекса надежности, наоборот, возможно снижение площади поперечного сечения в целях снижения металлоемкости.

Литература

1. Соловьева, А. А. Вероятностные модели случайных величин в строительном проектировании / А. А. Соловьева, С. А. Соловьев. – Вологда : Вологодский государственный университет, 2024. – 144 с.

2. Structural reliability analysis on the basis of small samples: An interval quasi-Monte Carlo method / H. Zhang, H. Dai, M. Beer, W. Wang // Mechanical

Systems and Signal Processing. – 2013. – Vol. 37, № 1–2. – P. 137–151.

3. Soloveva, A. A. Reliability Analysis of RHS Steel Trusses Joints Based on the P-Boxes Approach / A. A. Soloveva, S. A. Solovev // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2021. – Vol. 17, № 1. – P. 87–97.

4. Соловьев, С. А. Вероятностная оценка промышленной безопасности при неполной статистической информации / С. А. Соловьев // Безопасность труда в промышленности. – 2020. – № 9. – С. 88–93.

5. Zhang, H. Structural analysis with probability-boxes / H. Zhang, R. L. Mullen, R. L. Muhanna // International Journal of Reliability and Safety. – 2012. – Vol. 6, № 1–3. – P. 110–129.

6. Соловьева, А. А. Вероятностный анализ надежности ферм статистическим генерированием данных / А. А. Соловьева, С. А. Соловьев // Строительная механика и расчет сооружений. – 2023. – № 5(310). – С. 2–11.

7. Соловьев, С. А. Неклассические методы анализа надежности строительных конструкций / С. А. Соловьев. – Вологда : Вологодский государственный университет, 2022. – 135 с.

О.Е. Копекин

Vologda State University

EVALUATION OF RELIABILITY INDEX OF SPATIAL LATTICE STRUCTURES MADE OF “KISLOVODSK” TYPE PIPES

The article presents an approach to determining the reliability index of steel rods of lattice structures using random variable generation. Based on the proposed approach, it is possible to check the sections of structural elements for a given reliability level. The Monte Carlo method is used to model random variables, the numerical implementation of which can be performed on the basis of simple programs. Unlike the limit state method, based on the developed algorithms, it is possible to optimize the section of a steel element from the condition of an effective ratio of the safety criterion and the metal content of the structure.

Reliability, probabilistic design, lattice coatings, failure probability, normal distribution, limit state, uncertainty.