



## **АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ УЗЛОВ СТАЛЬНЫХ ФЕРМ ИЗ ГСП ПРИ ИНТЕРВАЛЬНОЙ ОЦЕНКЕ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН**

В статье представлен новый подход к анализу надежности узлов стальных плоских ферм, основанный на использовании информации о границах изменчивости (интервалах) случайных величин. В классическом вероятностно-статистическом подходе к анализу надежности на практике зачастую используется ряд неподтвержденных статистических гипотез (о виде распределения, значениях параметров закона распределения и т.д.), что может привести к ошибочным результатам и выводам. В интервальном подходе предлагается базироваться только на интервальных оценках границ изменчивости случайных величин. Информация о надежности узлов фермы является необходимой для комплексного анализа надежности фермы как последовательной механической системы. Аналогично может быть решена обратная задача, например оценка допусков площади поперечного сечения стержней при производстве, исходя из требований заданной надежности (вероятности безотказной работы).

Надежность, вероятность отказа, интервальная оценка, теория выпуклых множеств, ферма, вероятностное проектирование.

Надежность является объективной количественной оценкой безопасности запроектированной или эксплуатируемой конструкции. В соответствии со стандартом Eurocode 0 Basis of Structural Design надежность обычно выражается в вероятностных терминах. Понятие вероятности отказа напрямую связано с понятием риска. Понятие риска, в свою очередь, является ключевым в обеспечении механической безопасности зданий и сооружений по Федеральному Закону РФ № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений». Так, в соответствии с Законом № 384-ФЗ, механическая безопасность – «состояние строительных конструкций и основания здания или сооружения, при котором отсутствует недопустимый риск...».

Как отмечают специалисты НИЦ «Строительство» [1], «В настоящее время в отечественной нормативной базе отсутствует возможность применения риск-ориентированного подхода при расчете строительных конструкций, основанного на методиках расчета строительных конструкций вероятностными методами. В процессе изучения нормативной базы установлено, что в последние два года введен в действие большой массив международных стандартов в виде стандартов ГОСТ Р ИСО по оценке рисков в строительстве. Эти стандарты не входят в перечень норм, требования которых обеспечивают соблюдение требований Федерального закона № 384-ФЗ на обязательной или добровольной основе. Представляется, что применение указанных стандартов в принятом виде с целью оценки рисков на практике будет весьма

затруднительно. С учетом этого необходимой представляется разработка именно методической базы вероятностных расчетов строительных конструкций и оценки рисков в части их практического применения на территории нашей страны с учетом имеющейся специфики отечественного процесса проектирования, строительства и эксплуатации».

Актуальность вероятностных расчетов надежности подтверждает и профессор Ю.В. Краснощечков, отмечая, что «существует тенденция к постепенному переходу к вероятностным методам расчета, поскольку путь обеспечения надежности зависит от огромного числа факторов, связанных с эксплуатацией конструкции и влияние которых невозможно оценить частными коэффициентами метода предельных состояний. К тому же полувероятностный метод предельных состояний, который регламентирует ГОСТ 27751, не дает ответа на вопрос, насколько конструкция надежна» [2].

Одной из тенденций научных исследований в области надежности строительных конструкций последних лет является использование неклассических методов анализа надежности, которые моделируют неопределенность в иной форме, нежели стандартные вероятностно-статистические методы: р-блоки [3–7], теория выпуклых множеств [8–11] и др. В данной работе предлагается рассмотреть подход к оценке надежности узлов стальных плоских ферм при интервальной неопределенности данных, т.к. классические вероятностные методы не позволяют решить данную проблему при таком виде неопределенности.

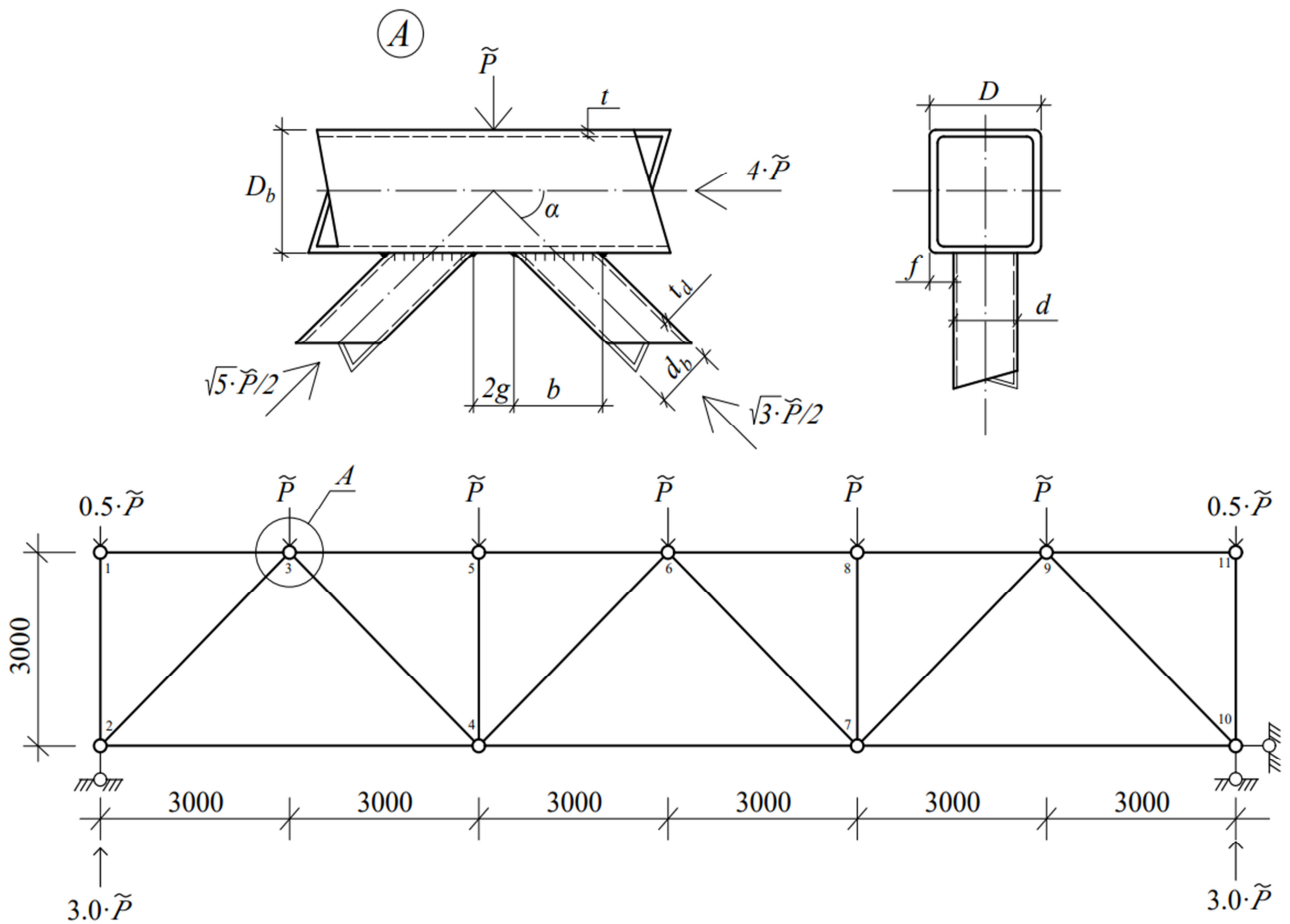


Рис. 1. Пример расчетной схемы фермы и геометрические параметры ее узла

Исследование надежности узлов ферм является актуальной научной задачей вследствие опыта аварий, произошедших из-за отказа узловых соединений ферм. Так, в 1957 году произошло обрушение сварной стропильной фермы в прокатном цехе магнитогорского металлургического комбината при отказе опорных узлов фермы в месте крепления к колонне. В 1955 году произошло обрушение стропильных ферм в прессовом цехе металлургического завода имени Ленина в г. Куйбышеве, в 2005 году произошло обрушение покрытия бассейна «Дельфин» в г. Чусовой.

Расчет узлов ферм из гнутосварных профилей (ГСП) регламентируется стандартом СП 294.1325800.2017 «Конструкции стальные. Правила проектирования».

Например, по п. 14.3.2 СП 294 в случае одностороннего примыкания к поясу двух или более элементов решетки с усилиями разных знаков (рис. 1), а также одного элемента в опорных узлах при  $d/D < 0,9$  и  $g/b < 0,25$  несущую способность стенки пояса следует проверять для каждого примыкающего элемента по формуле:

$$\left( N + \frac{1,5M}{d_b} \right) \frac{(0,4 + 1,8g/b) \cdot f \cdot \sin \alpha}{\gamma_c \cdot \gamma_d \cdot \gamma_D \cdot R_y \cdot t^2 \cdot (b + g + \sqrt{2Df})} \leq 1, \quad (1)$$

где  $N$  – продольная сила;  $M$  – изгибающий момент;  $R_y$  – расчетное сопротивление стали элемента пояса; остальные параметры приведены на рисунке 1.

Основными случайными величинами на первом этапе анализа надежности фермы выделим узловую нагрузку на ферму  $\tilde{P}$  и прочность стали элементов фермы  $\tilde{\sigma}_y$ . Изгибающий момент в узле будем считать величиной малоизменчивой и учитывать в расчете как детерминированную (постоянную) величину. Тогда математическую модель предельного состояния (1) можно записать как:

$$\left( N(\delta\tilde{P}) + \frac{1,5M}{d_b} \right) \frac{(0,4 + 1,8g/b) \cdot f \cdot \sin \alpha}{\gamma_c \cdot \gamma_d \cdot \gamma_D \cdot t^2 \cdot (b + g + \sqrt{2Df})} \leq \tilde{\sigma}_y, \quad (2)$$

где  $\delta$  – коэффициент, зависящий от геометрических размеров фермы [3].

Несущую способность элементов пояса других типов узлов, а также элементов решетки можно определить по схожим формулам, которые в общем виде можно обозначить как:

$$N(\delta\tilde{P})c_1 + c_2 \leq \tilde{\sigma}_y, \quad (3)$$

где  $c_1$  и  $c_2$  – коэффициенты, зависящие от размеров и расположения элементов фермы.

Аналогичные математические модели предельного состояния можно найти, например, в зарубежном стандарте «Design Guide for Rectangular Hollow Section (RHS) Joints under Predominantly Static Loading» [12].

Введем обозначения:  $N(\delta\tilde{P})c_1 + c_2 = S$ ,  $\tilde{\sigma}_y = R$ .

Случайные величины  $S$  и  $R$  будут представлять собой интервалы, которые характеризуют границы их изменчивости. Границы изменчивости прочности стали элемента пояса  $R$  можно получить из допусков по технической документации производителя профиля или по результатам статистического анализа данных при обследовании. Границы изменчивости узловой нагрузки  $\tilde{P}$  получаются путем представления составляющих в интервальной форме и их суммирования.

Для получения интервала изменчивости параметра  $S$  необходимо отметить базовые принципы арифметических действий с интервальными параметрами:

$$\begin{aligned} [a] + [b] &= [\underline{a}, \bar{a}] + [\underline{b}, \bar{b}] = [\underline{a} + \underline{b}, \bar{a} + \bar{b}] \\ [a] - [b] &= [\underline{a}, \bar{a}] - [\underline{b}, \bar{b}] = [\underline{a} - \bar{b}, \bar{a} - \underline{b}] \\ [a] \cdot [b] &= [\min\{\underline{a}\underline{b}, \underline{a}\bar{b}, \bar{a}\underline{b}, \bar{a}\bar{b}\}, \max\{\underline{a}\underline{b}, \underline{a}\bar{b}, \bar{a}\underline{b}, \bar{a}\bar{b}\}] \\ [a]/[b] &= a \cdot [1/\underline{b}, 1/\bar{b}] \text{ для } b \neq 0 \\ [a] + c &= [\underline{a}, \bar{a}] + c = [\underline{a} + c, \bar{a} + c] \end{aligned}$$

Также возможно и аналитическое решение данной задачи. Так, в [13] приводится аналитическая формула для определения вероятности безотказной работы в данном случае:

$$P(A \leq B) = \max \left\{ \frac{\min(A^R - A^L, B^R - A^L) \times [\max(0, B^R - A^L) + \max(0, B^R - A^R)]}{[2 \operatorname{sgn}(0, 5 + \operatorname{sgn}(A^L - B^L))]} \right\}, \quad (5)$$

$$1 - \frac{[\min(A^R - B^L, B^R - B^L) \times (\max(0, A^R - B^L) + \max(0, A^R - B^R))]}{[2(A^R - A^L) \times (B^R - B^L)]}$$

где  $A^L, B^L$  и  $A^R, B^R$  – левая ( $L$ ) и правая ( $R$ ) границы интервалов  $A$  и  $B$ .

После получения границ изменчивости  $S$  и  $R$ , их можно представить в системе координат, как указано на рисунке 2. Плоскость отказа будет характеризоваться зависимостью  $R=S$  и будет откладываться из начала координат под углом  $45^\circ$ . Площадь, отсекаемая плоскостью отказа от прямоугольника, называется областью отказа  $A_{failure}$ . Оставшаяся площадь прямоугольника представляет собой область безотказной работы  $A_{safe}$ . Отношение площади области безотказной работы к общей площади прямоугольника будет представлять собой оценку вероятности безотказной работы:

$$P = \Pr(S \leq R) = \frac{A_{safe}}{A}. \quad (4)$$

Такая задача может быть решена графически, например, в графическом редакторе.

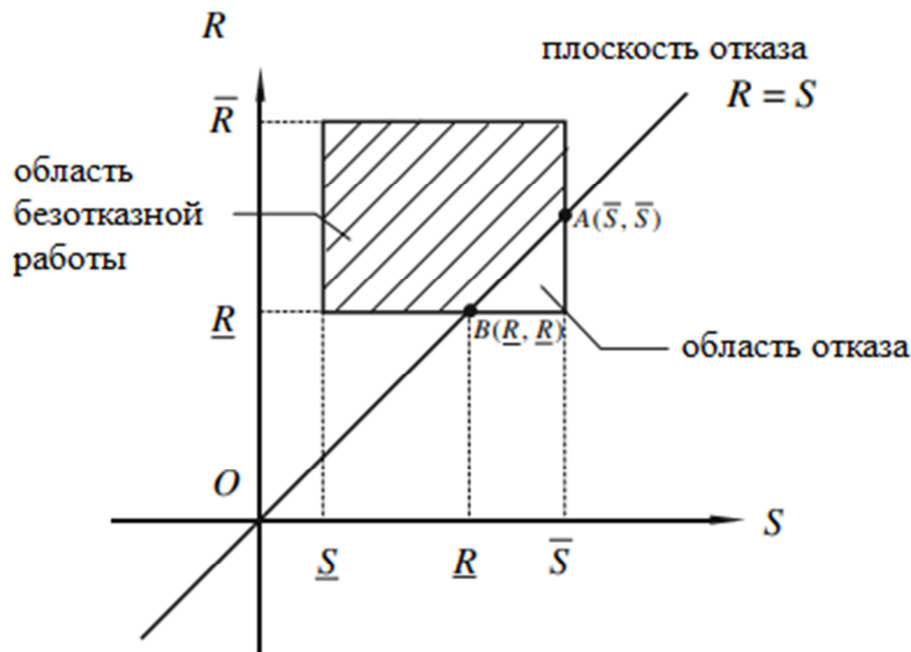


Рис. 2. Графический подход к определению вероятности безотказной работы узла фермы

Для получения расчетной оценки надежности рассматриваемого узла необходимо выполнить анализ надежности по всем критериям предельного состояния для всех элементов узла. Затем, в соответствии с теорией интервального анализа надежности [14], в качестве расчетного значения принимается минимальное значение надежности из подмножества. При наличии значений вероятностей безотказной работы для всех элементов и узлов фермы можно сделать выводы об уровне ее безопасности, а также сравнить различные проектные решения по критерию безопасности эксплуатации.

В статье разработан новый подход к анализу надежности узлов стальных ферм из гнущихся профилей при интервальной оценке случайных параметров. Значения вероятности безотказной работы узлов необходимы для комплексного анализа надежности фермы как последовательной механической системы. Преимуществом подхода является отсутствие необходимости подтверждения статистических гипотез о виде распределения и его параметрах.

#### Литература

1. Зенин, С. А. Исследование и анализ методов выполнения вероятностных расчетов строительных конструкций / С. А. Зенин [и др.] // Вестник НИЦ «Строительство». – 2020. – № 1. – С. 46–53.
2. Краснощеков, Ю. В. Вероятностный расчет строительных конструкций с учетом асимметрии распределения случайных величин и функций / Ю. В. Краснощеков // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2020. – Т. 17. – № 5 (75). – С. 636–650.
3. Соловьева, А. А. Метод оценки надежности элементов плоских ферм на основе р-блоков / А. А. Соловьева, С. А. Соловьев // Вестник МГСУ. – 2021. – Т. 16. – № 2. – С. 153–167.
4. Соловьева, А. А. Исследование развития моделей случайных величин в расчетах надежности строительных конструкций при неполной статистической информации / А. А. Соловьева, С. А. Соловьев // Вестник МГСУ. – 2021. – Т. 16. – № 5. – С. 587–607.

5. Соловьева, А. А. Расчет надежности элементов стальных ферм по критерию устойчивости с использованием р-блоков / А. А. Соловьева, С. А. Соловьев // Строительная механика и расчет сооружений. – 2021. – № 1 (294). – С. 45–53.

6. Соловьева, А. А. Разработка уточненного р-блока как модели случайной величины в задачах анализа надежности строительных конструкций / А. А. Соловьева, С. А. Соловьев // Строительная механика и расчет сооружений. – 2022. – № 1 (300). – С. 20–28.

7. Solovev, S. A. Structural Reliability Analysis Using Evidence Theory and Fuzzy Probability Distributions / S. A. Solovev, A. A. Soloveva // Magazine of Civil Engineering. – 2021. – No. 7 (107). – pp. 10704.

8. A Nonprobabilistic Set Model of Structural Reliability Based on Satisfaction Degree of Interval / H. Z. Huang, Z. L. Wang, Y. F. Li [et al.] // Mechanika. – 2011. – Vol. 17 (1). – pp. 85–92.

9. Ben-Haim, Y. Convex Models of Uncertainties in Applied Mechanics / Y. Ben-Haim, I. Elishakoff. – Amsterdam: Elsevier, 1990. – 240 p.

10. A Non-probabilistic Structural Reliability Analysis Method Based on a Multidimensional Parallelepiped Convex Model / C. Jiang, Q. F. Zhang, X. Han [et al.] // Acta Mechanica. – 2014. – Vol. 225 (2). – pp. 383–395.

11. Straub, D. Probabilistic Modeling of Non-destructive Testing of Steel Structures / D. Straub // Proceedings 4th International PhD Symposium in Civil Engineering, Munich. – 2002. – Vol. 2. – pp. 311–320.

12. Design Guide for Rectangular Hollow Section (RHS) Joints under Predominantly Static Loading / J. A. Packer, J. Wardenier, X.-L. Zhao., G.J. van der Vegte, Y. Kurobane // CIDECT. – 2009. – 149 p.

13. Qi, W. C. Non-probabilistic Reliability-Based Structural Design Optimization Based on Interval Analysis Methods / W. C. Qi, Z. P. Qiu // Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica. – 2013. – Vol. 43 (1). – pp. 85–93.

14. Structural Reliability Analysis Using Non-probabilistic Convex Model / C. Jiang, R. G. Bi, G. Y. Lu, X. Han // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 2013. – Vol. 254. – pp. 83–98.

*A.E. Inkov*

*Vologda State University*

### **RHS STEEL TRUSSES RELIABILITY ANALYSIS BASED ON RANDOM VARIABLES INTERVAL ESTIMATIONS**

The article presents a new approach to reliability analysis of steel trusses based on the data about the variability limits (intervals) of random variables. In the classical probabilistic-statistical approach to reliability analysis, in practice, a number of unconfirmed statistical hypotheses are often used (about the type of distribution, the values of the parameters of the distribution function, etc.), which can lead to erroneous results and conclusions. In the interval approach, it is proposed to be based only on interval estimates of the limits of variability of random variables. The information about the reliability of the truss joints is necessary for a comprehensive analysis of the truss reliability as a sequential mechanical system. Similarly, the inverse problem can be solved, for example, estimating the tolerances of the cross-sectional area of the bars during production, based on the requirements of a given reliability (probability of non-failure).

Reliability, failure probability, interval estimation, convex sets, truss, probabilistic design.