



С.А. Соловьев, Д.А. Нагимзянова
 Вологодский государственный университет

КОНТРОЛЬ ИНДЕКСА НАДЕЖНОСТИ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ДЕРЕВЯННЫХ БАЛОК

Индекс надежности элемента строительной конструкции является количественным показателем его безопасности эксплуатации. В статье разработана методика оценки и контроля индекса надежности деревянной балки по критерию прочности нормальных сечений балки. Контролируемыми случайными параметрами являются нагрузка, прочность древесины при изгибе и эксплуатационная влажность древесины. Периодический контроль индекса надежности эксплуатирующей организацией позволит спрогнозировать остаточный ресурс балки до проведения капитального ремонта. Отмечается высокая степень влияния влажности древесины на индекс надежности деревянной балки. Оценку индекса надежности следует проводить как для наиболее нагруженных сечений элемента, так и для сечений, подверженных повышенной влажности при протечках кровли, при разнице температур и т.д.

Надежность, вероятность отказа, деревянная балка, случайные величины, теория надежности, вероятностное проектирование.

Обеспечение надежности строительных конструкций зданий и сооружений является главной задачей при эксплуатации зданий и сооружений. В соответствии с текущими строительными нормами в РФ, надежность строительных конструкций обеспечивается за счет проверки всех нормативных критериев предельных состояний. Однако надежность не обретает количественной оценки, что не позволяет сравнить несколько проектных решений по уровню безопасности. Для количественной оценки надежности может быть использован такой показатель, как индекс надежности β .

Как отмечают авторы исследования [1], «по данным В.В. Большакова, в 1929 г. впервые (не только в СССР, но и за границей) были опубликованы технические условия и нормы проектирования деревянных конструкций (ДК). Обновлялись они довольно часто — в 1931, 1938, 1940 гг., т.е. через 2–7 лет. В последние годы у нас и в технически развитых зарубежных странах новые редакции норм выходили через 8–10 лет». На данный момент в РФ актуальным нормативным документом по расчету деревянных конструкций является Свод Правил СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80» с Изменением № 3, утвержденным и введенным в действие приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России) от 23 декабря 2021 г. № 988/пр с 24.01.2022.

Одним из направлений развития методов проектирования деревянных конструкций является использование вероятностных методов строительной механики и положений теории надежности строительных конструкций. Использование частных коэффициентов надежности без четкого соотношения с

вероятностью безотказной работы может привести к перерасходу материала при проектировании строительных конструкций. Так, в исследовании [2] отмечено, что увеличение коэффициента надежности деревянных конструкций на 10 % в Финляндии 20 лет назад привело бы к увеличению затрат на строительство по меньшей мере в 200 раз по сравнению с получением меньшего ущерба.

Проектированию деревянных конструкций на заданный уровень надежности с использованием вероятностных подходов посвящено несколько фундаментальных исследований [3–6]. Текущей задачей в развитии данных подходов является вероятностный анализ усовершенствованных математических моделей предельного состояния, а также использование новых моделей случайных величин для анализа надежности [7–11].

Для развития деревянного домостроения в Вологодской области в прошлом году утвердили паспорт регионального стратегического проекта «Кластер деревянного домостроения». Его основная задача – увеличить объемы малоэтажного и многоэтажного строительства через ввод новых мощностей и продуктов, привлечение учебной и научной базы региональных высших учебных заведений, расширение внедрения добровольной сертификации и повышение квалификации кадров, использование различных региональных форм поддержки развития индивидуального домостроения. В соответствии с паспортом регионального кластера Вологодской области «Кластер деревянного домостроения» к 2024 году объем ввода жилья, построенного населением, составит 0,279 миллионов квадратных метров, а доля жилья, построенного с применением древесины, от общего объема ввода жилья, построенного населением, составит 81 %.

Математическую модель предельного состояния прочности нормальных сечений балки можно записать в виде:

$$M \leq M_{ult} = R \cdot W_x, \quad (1)$$

где M – максимальный изгибающий момент; M_{ult} – предельно допустимый изгибающий момент из условия прочности нормальных сечений балки; R – расчетное сопротивление древесины; W_x – момент сопротивления сечения балки.

Расчетное сопротивление древесины в Своде Правил СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции» приводится для влажности 12 %. В процессе эксплуатации балки могут возникнуть протечки кровли, нарушения гидроизоляции и прочие дефекты, увеличивающие влажность древесины и снижая ее прочность. Формулу (1) с коррекцией на прочность можно записать в виде:

$$M \leq M_{ult} = \frac{R \cdot W_x}{[1 + 0,04(W - 12)]}, \quad (2)$$

где W – эксплуатационная влажность древесины в месте оценки прочности по нормальным сечениям, %;

Влажность древесины может быть определена неразрушающими методами контроля [12] или путем отбора контрольных образцов по ГОСТ 16588-91 (ИСО 4470-81).

Параметр R в (2) является детерминированной величиной с заданной обеспеченностью. При решении задач на определение индекса надежности и вероятности безотказной работы корректнее использовать показатель предела прочности древесины при изгибе σ_{ult} . Данный параметр будет являться случайной величиной. Определить предел прочности древесины при изгибе можно по результатам лабораторных испытаний контрольных образцов или путем использования методов неразрушающего контроля [13].

Сформируем математическую модель предельного состояния на основе неравенства (2) с учетом наличия в ней случайных величин в виде:

$$\frac{\tilde{M}}{\tilde{\sigma}_{ult} \cdot \sum m_i} [1 + 0,04(\tilde{W} - 12)] \leq W_x, \quad (3)$$

где m_i – коэффициенты условий работы; волнистой линией обозначены случайные величины.

Сформируем функцию предельного состояния g , включающую в себя случайные все величины математической модели предельного состояния (3):

$$\tilde{g} = \frac{\tilde{M}}{\tilde{\sigma}_{ult} \cdot \sum m_i} [1 + 0,04(\tilde{W} - 12)].$$

Индекс надежности по данной функции предельного состояния определяется в виде:

$$\beta = \frac{W_x - m_g}{S_g}, \quad (4)$$

где m_g – математическое ожидание функции g ; S_g – среднее квадратическое отклонение функции g .

Математическое ожидание функции предельного состояния g вычисляется как:

$$m_g = \frac{m_M}{m_\sigma \cdot \sum m_i} [1 + 0,04(m_W - 12)], \quad (5)$$

где m_M , m_σ , m_W – математические ожидания изгибающего момента, предела прочности при изгибе и влажности соответственно.

Среднеквадратическое отклонение функции предельного состояния g вычисляется по формуле:

$$S_g = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial M}\right)^2 S_M^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial \sigma_{ult}}\right)^2 S_\sigma^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial W}\right)^2 S_W^2}, \quad (6)$$

где S_M , S_σ , S_W – среднеквадратические отклонения изгибающего момента, предела прочности при изгибе и влажности соответственно.

В аналитическом виде для данной задачи можно записать:

$$\left(\frac{\partial g}{\partial M}\right)^2 = \frac{(0,04m_W + 0,52)^2}{m_\sigma^2},$$

$$\left(\frac{\partial g}{\partial \sigma_{ult}}\right)^2 = \frac{0,0016 \cdot (m_M)^2}{m_\sigma^2},$$

$$\left(\frac{\partial g}{\partial W}\right)^2 = \frac{(0,04m_W + 0,52)^2 \cdot (m_M)^2}{m_\sigma^4}.$$

Рассмотрим пример. Пусть требуется оценить индекс надежности деревянной балки по критерию прочности нормальных сечений. Балка представляет собой брус 150×150 мм с моментом сопротивления сечения $W_x = 5,625 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$.

Пусть известны следующие статистические параметры про случайные величины: $m_M = 5 \text{ кН} \cdot \text{м}$; $m_\sigma = 15 \text{ МПа}$; $m_W = 17 \text{ \%}$; $S_M = 0,5 \text{ кН} \cdot \text{м}$, $S_\sigma = 2 \text{ МПа}$, $S_W = 1 \text{ \%}$. Также пусть $\sum m_i = 1$.

Параметры функции предельного состояния можно вычислить по формулам (5) и (6):

$$m_g = 4,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3,$$

$$S_g = 6,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3.$$

Тогда индекс надежности по (4) составит $\beta = 2,39$.

Если все случайные величины имеют нормальное распределение вероятностей, то вероятность безотказной работы балки по данному критерию составит 0,9916. С практической точки зрения такая вероятность безотказной работы довольно низкая для зданий и сооружений нормального уровня ответственности. Увеличить индекс надежности можно путем ограничения допустимой нагрузки на балку, повышения прочности древесины, усиления конструкции и других мероприятий.

На рисунке представлен график зависимости индекса надежности от математического ожидания влажности древесины в рассматриваемом сечении.

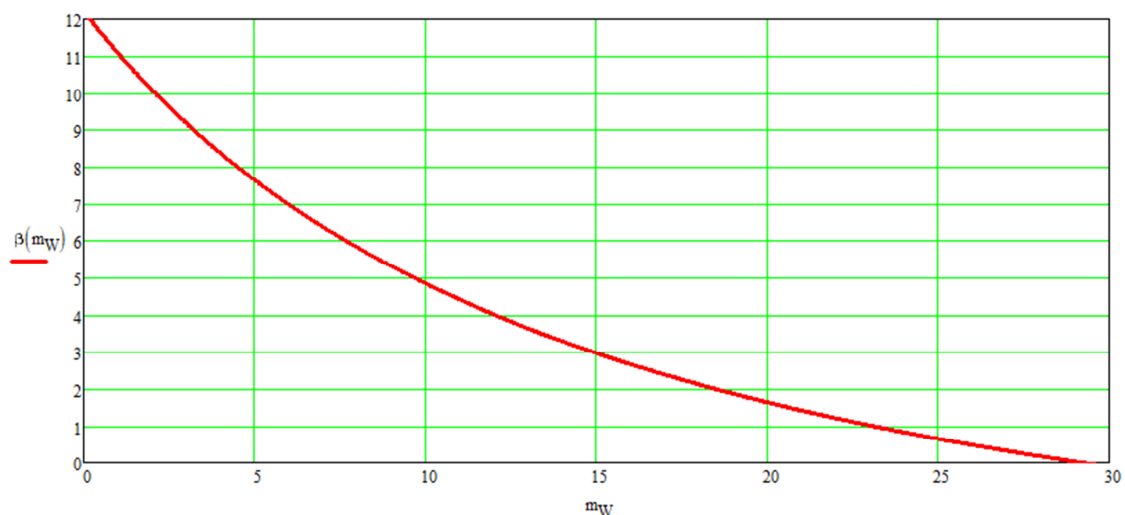


Рис. График зависимости индекса надежности от математического ожидания влажности древесины в рассматриваемом сечении

Как видно из рисунка, рост средней влажности деревянной балки приводит к существенному снижению индекса надежности и вероятности безотказной работы.

Таким образом, при обследовании деревянных конструкций зданий и сооружений, безопасность эксплуатации может быть количественно представлена индексом надежности. На значение индекса надежности существенно влияет значение влажности древесины. Контроль статистических параметров влажности позволит получить более объективную оценку надежности [14].

Литература

1. Строительные нормы проектирования деревянных конструкций. Состояние, проблемы и перспективы / Е. Н. Серов, А. Г. Черных, А. Е. Серов [и др.] // Вестник гражданских инженеров. – 2012. – № 3 (32). – С. 107–114.
2. Ranta-Maunus, A. Theoretical and Practical Aspects of the Reliability Analysis Of Timber Structures / A. Ranta-Maunus // WCTE 2004 conference, Lahti. – 2004. – pp. 1–5.
3. Ranta-Maunus, A. Reliability Analysis of Timber Structures / A. Ranta-Maunus, M. Fonselius, J. Kurkela, T. Toratti. – VTT Technical Research Centre of Finland. – 2001. – 107 p.
4. Köhler, J. Probabilistic Modeling of Timber Structures / J. Köhler, J. D. Sørensen, M. H. Faber // Structural safety. – 2007. – Vol. 29. – No. 4. – pp. 255–267.
5. Sousa, H. S. On the Use of NDT Data for Reliability-based Assessment of Existing Timber Structures / H. S. Sousa [et al.] // Engineering Structures. – 2013. – Vol. 56. – pp. 298–311.
6. Cheng, F. Reliability Analysis of Timber Structure Design of Poplar Lumber with Nondestructive Testing Methods / F. Cheng, Y. Hu // BioResources. – 2011. – Vol. 6. – No. 3. – pp. 3188–3198.
7. 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.
8. 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.
9. Соловьев, С. А. Анализ надежности элементов стальных ферм при интервальной оценке случайных величин / С. А. Соловьев, А. Э. Иньков, А. А. Соловьева // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2022. – № 1 (15). – С. 53–57.
10. Соловьев, С. А. Методы оценки надежности стальных ферм с использованием р-блоков / С. А. Соловьев, А. А. Соловьева. – Вологда : Вологодский государственный университет, 2022. – 143 с. – ISBN 978-5-907606-02-9.
11. 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.
12. Чубинский, А. Н. Физические неразрушающие методы испытания и оценка структуры древесных материалов / А. Н. Чубинский // Дефектоскопия. – 2014. – № 11. – С. 76–84.
13. Прохоров, С. А. Математическая модель зависимости предела прочности древесины от плотности с использованием функции распределения Вейбулла / С. А. Прохоров, М. С. Даниленко // Естественные и технические науки. – 2017. – № 1. – С. 139–144.
14. Сухина, К. Н. Вероятностный анализ ресурса конструкций покрытия промышленного здания с учетом случайного характера снеговой нагрузки / К. Н. Сухина, В. А. Пшеничкина // Инженерный вестник Дона. – 2015. – Т. 38. – № 4–1. – С. 83–95.

S.A. Solovyov, D.A. Nagimzyanova
Vologda State University

CONTROL OF RELIABILITY INDEX OF TIMBER BEAMS BEING EXPLOITED

The reliability index of structural element is a quantitative indicator of its operational safety. The article develops a methodology for evaluating and controlling the reliability index of timber beams by the criterion of normal-sections strength. The controlled random parameters are the load, the wood flexural strength of and the operational humidity. Periodic monitoring of the reliability index by the maintaining organization will make it possible to predict the remaining life of the beam before major repairs. There is a high degree of influence of wood humidity on the reliability index of a timber beam. The reliability index should be evaluated both for the most loaded cross-sections of the element, and for cross-sections exposed to high humidity with roof leaks, temperature differences, etc.

Reliability, probability of failure, timber beam, random variables, reliability theory, probabilistic design.