

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МОСТОВ

В статье представлен вероятностный подход к оценке технического состояния сталежелезобетонных пролетных строений железнодорожных мостов. Приведен алгоритм расчета вероятности отказа по грузоподъемности сталежелезобетонных пролетных строений.

Действующие нагрузки, как и параметры конструкции (прочность, жесткость), заложенные при проектировании, в процессе эксплуатации не остаются постоянными. Как показывает опыт, с течением времени в конструкции развиваются дефекты и накапливаются повреждения, снижающие ее грузоподъемность и долговечность. Важным критерием эффективности работы конструкции является время, в течение которого она эксплуатируется в исправном виде [1].

Существующие нормы не регламентируют прогнозирование остаточного ресурса и не в полной мере отражают влияние различного рода дефектов на несущую способность эксплуатируемых сооружений. Заложенный в нормах метод предельного равновесия на стадии проектирования является оправданным, позволяя подобрать оптимальный расход материалов из условия одновременного достижения в них соответствующих пределов прочности. Однако происходящие в процессе эксплуатации изменения прочностных свойств материалов, а также геометрических характеристик сечений приводят к тому, что основное условие предельного равновесия вряд ли будет выполнено. Сталежелезобетонные конструкции являются внутренне статически неопределимыми системами, в которых под воздействием внешних нагрузок, а также изменения свойств материалов во времени происходит перераспределение усилий между компонентами (сталью, бетоном и арматурой). Фактическое напряженно-деформированное состояние конструкции на стадии эксплуатации существенно отличается от принятого в действующих нормах распределения усилий по модели предельного равновесия [3].

Таким образом, расчеты по исчерпанию несущей способности (прочности, устойчивости) выполняются по расчетной модели, характеризующей будущее маловероятное напряженное состояние конструкции. При таком расчете неизвестно, каким образом конструкция, обладающая в начальный период определенными показателями, с течением времени теряет несущую способность, а затем выходит из строя. Работа конструкции во время перехода из эксплуатационного состояния (расчет по предельным состояниям второй группы) в предельное, предшествующее разрушению, не определена. Кроме того, определение несущей способности элементов, состоящих из двух и более материалов (например сталежелезобетон) выполняется без учета совместного статистического разброса при расчетных сопротивлениях, соответствующих минимальной прочности. Возможность применения материала с прочностью ниже расчетного сопротивления, меньше 0,001 [1]. Вероятность того, что в железобетонной плите одновременно окажутся арматура и бетон минимальной прочности близка к $2 \cdot 10^{-6}$ [1]. Вследствие этого запроектированные по нормам конструкции обладают значительными запасами прочности, в расчете не учитываемыми.

Внешние воздействия на конструкцию и ее поведение при эксплуатации являются случайными процессами, развертывающимися во времени. Одним из решений проблем надежности и долговечности может быть применение аппарата случайных функций — вероятностного метода расчета. Для того чтобы эффективно применять вероятностный метод, нужно накопить, проанализировать и подвергнуть статистической обработке информацию об изменчивости определяющих факторов: прочности и деформативности материалов, нагрузке и воздействиях окружающей среды, геометрических размерах. Большой ценностью обладает также информация об отказах и их последствиях.

Надежность — сложное свойство системы выполнять свои функции, сохраняя эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемого времени. Надежность характеризуется несколькими показателями. В данной работе рассматривается один из них — безотказность, т.е. свойство системы сохранять работоспособность в течение всего срока эксплуатации [1]. Количественной характеристикой безотказности принята вероятность безотказной работы. Работоспособное состояние конструкции характеризуется способностью основных ее несущих элементов воспринимать усилия от эксплуатационных нагрузок. Отказы, т.е. события, связанные с нарушением работоспособного состояния системы, отождествляются с наступлением предельных состояний первой группы:

- достижение значений предельных напряжений в стальных поясах;
- достижение относительными деформациями в центре тяжести сечения железобетонной плиты предельной величины $\varepsilon_b = 0,0016$.

Условие безотказной работы конструкции в общем виде можно записать следующим образом:

$$P(t) \leq P_n, \quad (1)$$

где $P(t)$ — вероятность отказа в момент времени t ; P_n — нормативная вероятность отказа, обоснованная существующей практикой проектирования и опытом эксплуатации.

В процессе эксплуатации в конструкции происходит необратимое накопление разного рода повреждений и, как следствие, снижение нормируемых качеств (прочности), способности воспринимать изменяющиеся нагрузки и воздействия. То есть пролетное строение и действующая на него нагрузка составляют систему, поведение элементов которой может быть описано некими случайными процессами [1]. Случайные процессы, характеризующие прочностные возможности конструкции $\tilde{R}(t, r)$ и внешние силовые факторы $\tilde{S}(t, s)$, являются случайными функциями во времени. Вероятность отказа в момент t_1 равна вероятности того, что случайная величина $\tilde{s} = \tilde{S}(t_1)$ превысит $\tilde{r} = \tilde{R}(t_1)$ (рис. 1):

$$P(t_1) = P(\tilde{S}(t_1) - \tilde{R}(t_1) > 0) \quad (2)$$

Исходя из рис. 1 условие надежности в детерминированной форме может быть записано так:

$$Z = R_n^o - S_n^o > 0, \quad (3)$$

где S_n^o, R_n^o — характеристические значения сил (N, Q, M) или напряжения (σ, τ) и прочности, вычисляемые следующим образом:

$$S_n^3 = \sum (\bar{S}_{gi} + \bar{S}_{vi}\eta + 1,64\hat{S}_{vi}\eta), \quad (4)$$

$$R_n^3 = \bar{R}_n(1 - 1,64V_R), \quad (5)$$

где $\bar{S}_{gi}, \bar{S}_{vi}$ — среднее значение сил i -х постоянных и временных нагрузок; $\hat{S}_{vi}$ — среднеквадратичное отклонение сил от i -й нагрузки или воздействия; η — коэффициент сочетаний нагрузок и воздействий; $\bar{R}_n$ — среднее значение прочности материала; V_R — коэффициент вариации; $\beta = 1,64$ — коэффициент безопасности, соответствующий обеспеченности не ниже 0,95.

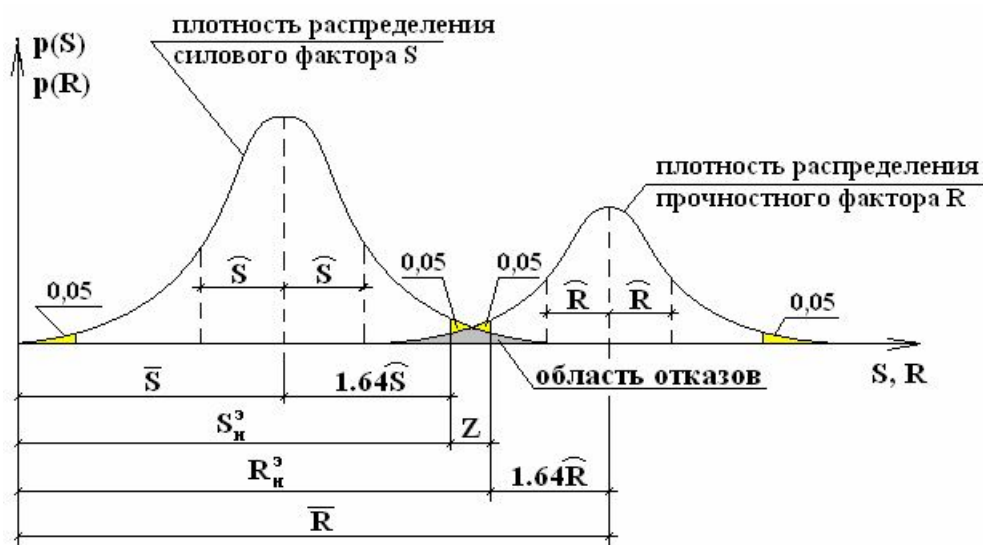


Рис. 1. Плотности распределения силового и прочностного факторов

В связи с тем, что случайные значения нагрузки не зависят от значений прочности, то в какой-то определенный момент времени t_1 при оценке безотказности конструкции в прямой вероятностной постановке, воспользовавшись известными формулами для композиции двух распределений независимых случайных величин, можно вычислить «запас надежности» (рис. 2):

$$\tilde{Z} = \tilde{R} - \tilde{S} > 0. \quad (6)$$

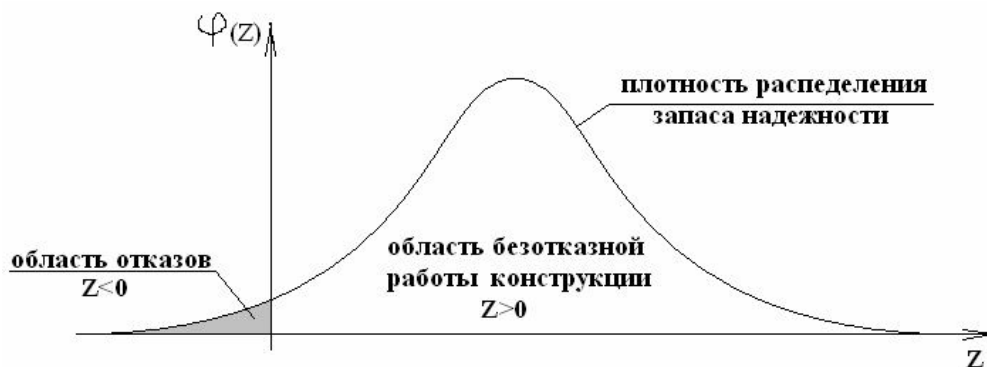


Рис. 2. График плотности распределения запаса надежности

Таким образом, условие (1) примет вид:

$$P(t_1) = P(\tilde{S}(t_1) - \tilde{R}(t_1) > 0) \quad (7)$$

Тогда условие (6) можно записать в виде:

$$\varphi(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} p_s(\tilde{s}) p_r(\tilde{z} + \tilde{s}) d\tilde{s}, \quad (8)$$

где $p_s(\tilde{s})$ и $p_r(\tilde{z} + \tilde{s})$ — плотности вероятности соответственно внешнего силового фактора и прочности конструкции, определенные на момент времени t_1 .

Таким образом, условие (7) вероятности отказа конструкции можно записать следующим образом:

$$P(t_1) = \int_{-\infty}^0 \varphi(\tilde{z}) d\tilde{z}. \quad (9)$$

В результате для определения вероятности безотказной работы конструкции необходимо:

- установить перечень возможных отказов и соответствующие им условия предельных состояний;
- знать законы распределения всех случайных величин и корреляционные связи между ними.

Таким образом, должны быть определены сечения процессов $\tilde{R}(t, r)$ и $\tilde{S}(t, s)$ на момент времени, для которого ведется расчет.

Аналитически вычислить интеграл (9) достаточно трудно, а зачастую и вовсе невозможно, особенно при большом количестве случайных величин, распределенных по разным законам. Поэтому, как правило, для решения поставленной задачи применяют метод имитационного моделирования, генерируя ряд возможных реализаций каждой случайной величины при известных численных характеристиках распределений. Затем выполняют детерминированный расчет, в котором случайные величины представлены каким-либо значением из соответствующего ряда. По результатам расчета получают массив значений запаса надежности $\tilde{f}$. Далее, проведя анализ полученного массива, устанавливают численные характеристики закона распределения $\tilde{f}$ и без особых трудностей вычисляют интеграл (9).

Расчеты грузоподъемности сталежелезобетонных пролетных строений выполняют в сечениях плиты балластного корыта и главных балок согласно указаниям соответствующих нормативных документов.

Оценку грузоподъемности плиты балластного корыта выполняют согласно руководству [4] при фактических значениях прочности бетона плит, толщинах балласта и эксцентриситетах пути. Вопросы оценки влияния состояния мостового полотна с ездой на балласте для железобетонных пролетных строений подробно изучены в диссертационной работе С.С. Прибыткова [5], которым были выработаны предложения по нормированию состояния мостового полотна, предложены предельно допустимые значения толщин балласта под шпалой, размера плеча балластной призмы и величины отклонения оси пути от оси пролетного строения. Эти значения были даны дифференцированно для различных конструкций пролетных строений и пути, и поэтому могут быть применены

и к оценке грузоподъемности плит балластного корыта сталежелезобетонных пролетных строений.

В контексте обозначенной проблемы представляет интерес определение предельно допустимой нагрузки для верхнего и нижнего поясов главных балок, а также бетона омоноличивания швов. При выполнении вероятностного расчета в качестве неопределенных или случайных величин предлагается принять:

- прочностные характеристики бетона омоноличивания швов и арматуры плиты балластного корыта и металла главных балок;
- геометрические характеристики поперечного сечения пролетного строения;
- удельный вес балласта с частями пути;
- интенсивность временной нагрузки.

Параметры мостового полотна (толщину балласта и эксцентриситеты пути) в рамках поставленной задачи будем считать детерминированными величинами.

Закон больших чисел требует очень большого числа этапов расчета для того, чтобы частоты их результатов были практически неотличимы от вероятностей [6]. Для повышения точности моделирования применяют различные имитационные алгоритмы, например LHS (Latin Hypercube Sampling) или DS (Descriptive Sampling) [7, 8]. Для расчета вероятности отказа по грузоподъемности главных балок сталежелезобетонных пролетных строений был создан специальный программный модуль, реализующий метод имитационного моделирования, основанный на алгоритме LHS. Модуль является частью расчетной программы по грузоподъемности, используемой при классификации сталежелезобетонных пролетных строений. Рассмотрим основные положения реализуемой этим модулем методики расчета.

Предельно допустимая временная нагрузка для верхнего пояса стальной балки по нормальным напряжениям определяется по формуле

$$k_{\text{вп.с2с}} = \frac{1}{100\,000 \varepsilon_k n_k \Omega} \left[\left(\tilde{\chi}_3 \tilde{W}_{s2,s} m \tilde{R}_{y2} + \tilde{N}_{br}^k \left(\tilde{Z}_{bs} - \frac{\tilde{\chi}_3}{m_1} \frac{\tilde{W}_{s2,s}}{\tilde{A}_s} \right) \right) - \varepsilon_p (n_1 (P_{st} + P_b + P_3) + n_2 \tilde{P}_{bal}) \Omega \right], \quad (10)$$

где ε_k , ε_p — коэффициенты, учитывающие соответственно долю временной и постоянной нагрузок, приходящихся на одну балку; n_k , n_1 , n_2 — коэффициенты надежности к нагрузкам; Ω — площадь линии влияния изгибающего момента в сечении, м²; $\tilde{\chi}_3$ — случайная величина поправочного коэффициента к моменту сопротивления при расчете прочности стального пояса п. 5.19 [3]; $m = 0,9$ — коэффициент условий работы стальной конструкции принимается согласно п. 4.19* [3]; $\tilde{R}_{y2}$ — случайная величина основного расчетного сопротивления металла листов верхнего пояса, кгс/см²; $\tilde{N}_{br}^k$ — случайная величина нормальной разгружающей силы; $\tilde{m}_1$ — случайная величина коэффициента, учитывающего разгрузку стального верхнего пояса недонапряженным бетоном при достижении напряжений в металле предела текучести; $\tilde{A}_s$, $\tilde{Z}_{bs}$, $\tilde{W}_{s2,s}$ — случайные величины геометрических характеристик расчетного сечения; P_{st} , P_b — постоянные нагрузки от собственного веса части пролетного строения и собствен-

ный вес железобетонной плиты балластного корыта, тс/м; P_3 — постоянные нагрузки от собственного веса перил, тротуаров и других элементов конструкции, монтируемых после включения плиты в совместную работу со стальными балками, тс/м; $\tilde{P}_{bal}$ — случайная величина постоянной нагрузки от веса балласта с частями пути, тс/м.

Предельно допустимая временная нагрузка для нижнего пояса стальной балки определяется по формуле

$$k_{вр.s1s} = \frac{1}{100\,000\,\varepsilon_k n_k \Omega} \left[\left(\tilde{\chi}_3 \tilde{W}_{s1,s} m \tilde{R}_{y1} + \tilde{N}_{br}^k \left(\tilde{Z}_{bs} - \tilde{\chi}_3 \frac{\tilde{W}_{s1,s}}{\tilde{A}_s} \right) \right) - \varepsilon_p (n_1 (P_{st} + P_b) + n_2 \tilde{P}_{bal}) \Omega \right], \quad (11)$$

где $\tilde{R}_{y1}$ — случайная величина основного расчетного сопротивления металла листов нижнего пояса, кгс/см².

Предельно допустимая временная нагрузка для бетона плиты определяется по формуле

$$k_{вр.b} = \frac{1}{100\,000\,\varepsilon_k n_k \Omega} \left[\left(0,0016 \frac{E_s}{\tilde{K}} \tilde{W}_{bs} + \tilde{N}_{br}^k \left(\tilde{Z}_{bs} - \frac{\tilde{W}_{bs}}{\tilde{A}_s} \right) \right) - \varepsilon_p n_2 \tilde{P}_{bal} \Omega \right], \quad (12)$$

где $\tilde{K}$ — случайная величина поправочного коэффициента, учитывающего увеличение деформаций бетона при развитии пластических деформаций в прилегающем к нему стальном верхнем поясе, принимаемая согласно п. 5.19 [3] при случайной величине разгружающей силы $\tilde{N}_{br}^k$, вычисляемой при $\tilde{\sigma}_b = m_b \tilde{R}_b$ и $\tilde{\sigma}_r = m_r \tilde{R}_r$.

Случайную величину коэффициента $\tilde{m}_1$ определяют по формуле

$$\tilde{m}_1 = 1 + \frac{(m_b \tilde{R}_b - \tilde{\sigma}_b)}{m \tilde{R}_y} \cdot \frac{\tilde{A}_b^n}{\tilde{A}_{s2}}, \quad (13)$$

где $\tilde{R}_b$ — случайная величина прочности бетона на сжатие, кгс/см²; $\tilde{\sigma}_b \leq m_b \tilde{R}_b$ — случайная величина текущих напряжений в бетоне, вычисленных в предположении упругой работы материала; $\tilde{A}_b^n$ — случайная величина приведенной площади бетона плиты, включаемой в расчет; $\tilde{A}_{s2}$ — случайная величина площади верхнего пояса балки.

Случайную величину нормальной разгружающей силы вычисляют по формуле

$$\tilde{N}_{br}^k = (\tilde{A}_b^n \tilde{\sigma}_b n_b + \tilde{A}_r \tilde{\sigma}_r) k_{br}^\Phi, \quad (14)$$

где $\tilde{A}_r$ — случайная величина площади арматуры плиты, см²; $\tilde{\sigma}_r \leq m_r \tilde{R}_r$ — случайная величина текущих напряжений в арматуре, вычисленных в предположении упругой работы материала, кгс/см²; $\tilde{R}_r$ — случайная величина расчетного сопротивления арматуры, кгс/см².

Случайную величину напряжений в бетоне определяют по формуле

$$\tilde{\sigma}_b = \frac{\tilde{M}_2}{n_b \tilde{W}_{b, stb}} - \tilde{\sigma}_{b, kr} \leq m_b \tilde{R}_b, \quad (15)$$

где $\tilde{\sigma}_{b, kr}$ — случайная величина напряжений на уровне центра тяжести бетона от его ползучести; $\tilde{M}_2$ — случайная величина изгибающего момента второй стадии работы.

$$\tilde{M}_2 = \left[\varepsilon_p (n_1 P_3 + n_2 \tilde{P}_{bal}) + n_3 \varepsilon_k \tilde{k}_{вр} \right] \Omega, \quad (16)$$

$$\tilde{\sigma}_r = \frac{\tilde{M}_2}{\tilde{W}_{b, stb}} + \tilde{\sigma}_{r, kr} \leq m_r \tilde{R}_r, \quad (17)$$

где $\tilde{\sigma}_{r, kr}$ — случайная величина напряжений в арматуре от ползучести бетона.

Таким образом, расчетным путем устанавливаются случайные величины предельно допустимой нагрузки:

- для верхнего пояса — (10);
- для нижнего пояса — (11);
- для бетона плиты в сечении шва омоноличивания — (12).

Для каждого из трех расчетных случаев определяют соответствующее распределение случайной величины расчетной временной нагрузки в зависимости от длины загрузки λ , равной расчетному пролету. Распределение разности случайных величин — расчетной и предельно допустимой нагрузок — дает распределение запаса надежности в каждом случае.

Отказы по указанным критериям являются независимыми, поэтому вероятность безотказной работы пролетного строения принимается равной минимальному значению из определенных расчетом.

Описанная методика требует большого объема сложных вычислительных операций. Возможности современных ЭВМ позволяют выполнить подобные расчеты. В результате могут быть получены критерии отказов, вероятность возникновения которых является абсолютной оценкой надежности конструкции при тех или иных значениях параметров мостового полотна (толщине балласта, эксцентриситете пути) и швов омоноличивания (прочности и степени разрушения бетона). Это позволит назначить обоснованные с позиций надежности требования к состоянию мостового полотна и швам омоноличивания и определить категории дефектов для выполнения уточненной оценки технического состояния сталежелезобетонных мостов по параметрам надежности, спрогнозировать возможности и условия дальнейшей эксплуатации моста. Представится возможным определение технических и экономических оценок для планирования ремонтных работ, обследований, испытаний, реконструкции, своевременной выработки рекомендации к действию в случае появления состояний, угрожающих безопасной эксплуатации объекта.

Библиографический список

1. Иосилевский Л.И. Практические методы управления надежностью железобетонных мостов. М., 1999. 295 с.
2. Чирков В.П., Ключин В.И., Федоров В.Е., Швидко Я.И. Основы теории проектирования строительных конструкций. Железобетонные конструкции: Учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. М., 1999. 376 с.

3. *СНиП 2.05.03–84**. Мосты и трубы / Минстрой России. М.: ГП ЦПП, 1996. 214 с.
4. *Руководство* по определению грузоподъемности железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов / МПС. М.: Транспорт, 1989. 125 с.
5. *Прибытков С.С.* Обоснование нормативных требований к содержанию мостового полотна на железобетонных пролетных строениях с ездой на балласте: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2006.
6. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей: Учеб. для вузов. 7-е изд. М.: Высш. шк., 2001. 575 с.
7. *Loh, W. L.* On Latin Hypercube Sampling. *The Annals of Statistics* 24: 2058–2080. 1996.
8. *Saliby E.* Descriptive Sampling: A Better Approach to Monte Carlo Simulation. *Journal of the Operational Research Society* 41: 1133–1142. 1990.