



Прогноз износа металлических мостовых пролетов



Оксана КОС

Oksana I. KOS

Чтобы получить объективную оценку фактического технического состояния моста, строится математическая модель износа искусственного сооружения. На основании проведенного анализа из всех рассмотренных законов распределения в качестве оптимального для функции износа выбирается закон Вейбулла. С помощью модели производится оценка технического состояния и его прогнозирование применительно к эксплуатируемым на железных дорогах искусственным сооружениям. Предлагаемая расчетная схема, используемые графики функций износа мостовых конструкций создают условия, позволяющие обеспечить максимум надежности пролетных строений при минимуме поддерживающих затрат.

Ключевые слова: железная дорога, мостовые сооружения, функция износа, распределение Вейбулла, фактор времени, надежность, прогноз, математическая модель.

Кос Оксана Игоревна — аспирант кафедры «Системы автоматического проектирования» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.

Периодичность ремонтов или замен мостовых элементов определяется обычно на основании среднестатистических данных. Нормативные сроки представлены в «Технических условиях на проведение планово-предупредительных ремонтов инженерных сооружений железных дорог России» [1]. Согласно этому документу замена металлических пролетных строений с опорными частями и самих опор происходит с периодичностью 50—60 лет, а поврежденных элементов с постановкой их на высокопрочные болты и элементов опорных частей — с периодичностью 25—30 лет.

Однако реальные параметры материалов отличаются от среднестатистических, в деталях обнаруживаются дефекты изготовления, последствия отступлений от технологии, условия эксплуатации отличаются от заданных и т. д. То есть фактическое поведение конструкций при действующих внешних нагрузках и природно-климатических факторах не всегда совпадает с расчетной моделью. Срок службы пролетного строения моста прогнозируется поэтому с учетом:

- состояния материала конструкции;
- уровня износа;

– интенсивности и характера нагрузки на участке железной дороги и изменения этих данных во времени;

– предполагаемого уровня грузонапряженности в перспективе;

– географического положения объекта (климатический район).

При таком наборе факторов от управления техническим состоянием моста на основе нормируемых межремонтных сроков целесообразно переходить к управлению по фактическому состоянию. Этим достигается достаточная точность прогноза по каждому из параметров моста, причем для всех его элементов в любой момент времени после начала эксплуатации. Появляется возможность составить график основных работ по поддержанию моста в работоспособном состоянии, опираясь не на усредненные нормы, а на реальные характеристики пролетных строений. Следствием чего станет повышение надежности моста, существенное снижение затрат на его содержание.

МОДЕЛЬ ИЗНОСА КОНСТРУКЦИЙ

Для оценки фактического технического состояния моста построим математическую модель его износа. При этом используем методику, изложенную в нормативном документе «Инструкция по оценке состояния и содержания искусственных сооружений на железных дорогах Российской Федерации» [2]. Износ будем рассчитывать в форме приведенных балльных оценок.

Приведенные балльные оценки состояния $K_{np}^{сост}$ искусственных сооружений определяют вычитанием из базовых оценок соответствующих поправок, учитывающих категорию дефекта и их количество, по следующей формуле:

$$K_{np}^{сост} = K_{баз}^{сост} - (n_I \alpha_I + n_{II} \alpha_{II} + n_{III} \alpha_{III}),$$

где $K_{баз}^{сост}$ – базовая относительная оценка состояния сооружения, определяемая дефектом наибольшей категории по приложению 1 [2] из тех, которые обнаружены при обследовании;

n_I, n_{II}, n_{III} – количество дефектов соответственно I, II, и III категорий без учета дефекта, сформировавшего базовую оценку;

$\alpha_I, \alpha_{II}, \alpha_{III}$ – коэффициенты, учитывающие категорию дефектов по таблице П2.1 [2].

Все искусственные сооружения разделяются методикой по наличию дефектов на четыре категории:

– первая – дефекты отсутствуют;

– вторая – имеются мелкие дефекты, не оказывающие влияния на безопасность;

– третья – дефекты с потенциальной угрозой безопасности;

– четвертая – серьезные дефекты, оказывающие влияние на безопасность и требующие особых условий эксплуатации конструкций вплоть до введения ограничений.

При построении математической модели износа искусственного сооружения необходимо задать функцию износа, которая соответствует функции отказа в теории надежности.

Для выбора функции отказа следует рассмотреть различные законы распределения и выбрать из них такой, чтобы модель износа в наибольшей степени отвечала реальным условиям эксплуатации подобных объектов.

Были взяты следующие типичные законы распределения [3]:

– нормальное

$$P(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{t-T_0}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx;$$

– гамма-распределение

$$P(t) = \int_{t_0}^{\infty} \frac{x^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} dx;$$

– логарифмически-нормальное

$$P(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{\ln t}{\sigma}}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx;$$

– распределение Вейбулла

$$P(t) = e^{-\frac{t}{\beta} t^{\alpha}};$$

– а также экспоненциальное, являющееся частным случаем распределения Вейбулла

$$P(t) = e^{-\lambda t}.$$



Для экспоненциального закона износ элемента на заданном интервале зависит только от длины этого интервала и не зависит от предшествующего времени работы [3], в то время как для элементов металлического пролетного строения износ должен зависеть от срока предшествующей эксплуатации. Следовательно, из дальнейшего рассмотрения экспоненциальный закон можно исключить.

Нормальный закон хорошо моделирует постепенные отказы, которые возникают в результате накапливающихся повреждений [3]. Однако для него коэффициент асимметрии равен нулю, поэтому закон не учитывает резкое увеличение количества отказов и соответственно скорости износа после прохождения математического ожидания, то есть среднего времени функционирования элемента по сравнению с периодом, непосредственно предшествующему этому времени. Кроме того, нормальный закон не берет во внимание наличие внезапных отказов. И значит, в дальнейшем его нет смысла рассматривать.

Для гамма-распределения и логарифмически-нормального коэффициент асимметрии положительный, а моделирование резкого увеличения количества скорости износа после прохождения среднего времени функционирования элемента требует отрицательного коэффициента асимметрии. Поэтому эти законы из дальнейшего рассмотрения тоже исключаем.

В законе распределения Вейбулла — как раз отрицательный коэффициент асимметрии, что соответствует исследуемым процессам старения элементов искусственных сооружений, в частности — резкому увеличению количества отказов, скорости износа после наступления среднего времени функционирования элемента.

Закон Вейбулла помимо накапливающихся отказов моделирует и внезапные отказы, а также учитывает наличие или отсутствие скрытых дефектов [3]. Для элементов с часто встречающимися скрытыми дефектами, которые в течение длительного времени не стареют, опасность отказа высокая в начале эксплуатации, впоследствии же она резко падает. Здесь та ситуация, когда удобен вариант закона Вейбулла с параметром $\alpha < 1$. Если же у элементов скрытые дефекты встречаются редко,

но стареют они быстро, то опасность их отказа монотонно возрастает. Такие элементы лучше моделируются законом Вейбулла с параметром $\alpha > 1$.

Итак, анализ всех рассмотренных законов распределения позволили выбрать в качестве оптимального закон Вейбулла, поскольку именно в нем кривая функции распределения в наибольшей степени соответствует кривой износа в искусственных сооружениях, в том числе она быстрее растет после прохождения точки среднего времени функционирования элемента, чем до этой точки.

ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ

Зависимость износа от времени будем описывать функцией распределения Вейбулла

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha}},$$

где α — параметр формы и β — масштабный параметр. Найдем точку перегиба графика функции. Для этого продифференцируем ее дважды по t , приравняем результат к нулю и получим абсциссу точки перегиба:

$$t = \beta \left(\frac{\alpha - 1}{\alpha} \right)^{\frac{1}{\alpha}}.$$

Подставив абсциссу в функцию износа, определим значение функции распределения в точке перегиба:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{\alpha - 1}{\alpha}\right)}.$$

Проведем через найденную точку перегиба графика функции прямую параллельную оси абсцисс. Ее уравнение будет иметь вид:

$$y = 1 - e^{-\left(\frac{\alpha - 1}{\alpha}\right)}.$$

Посчитаем, что при найденном значении износа $F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{\alpha - 1}{\alpha}\right)}$ в элементе искусственного сооружения наступает отказ. Полученные формулы позволяют вычислять момент отказа при известных коэффициентах α и β . При этом коэффициенты находятся за счет обследования, то есть анализа фактического технического состояния.

Данные обследований искусственных сооружений были предоставлены дорож-

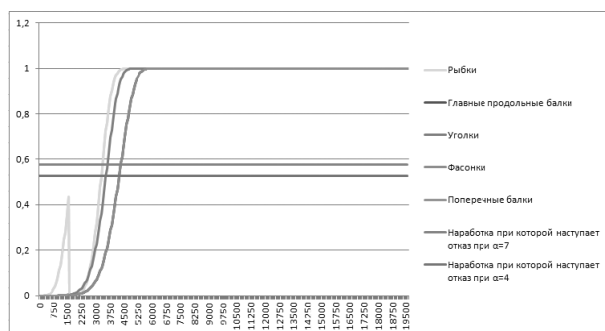


Рис. 1. Зависимость износа от прошедшей нагрузки для элементов металлического клепаного пролетного строения моста через р. Снежить, 375/4 км.

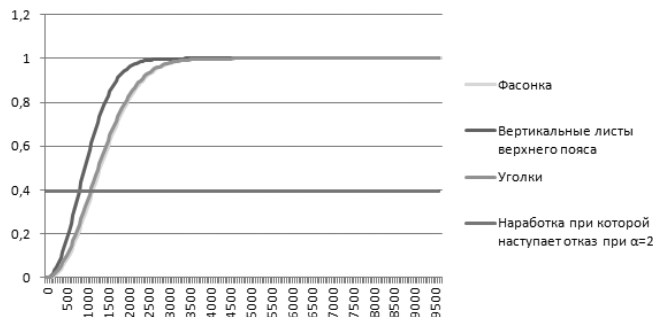


Рис. 2. Зависимость износа от прошедшей нагрузки для элементов металлического клепаного пролетного строения моста через р. Вабля, 42-й км ПК4 участка Унеча–Хутор.

ными центрами диагностики при участии мостовых мастеров путевых частей.

Приведем зависимости износа от времени работы для элементов пролетных строений трех металлических мостов:

1. Через р. Снежить, 375/4 км Брянской дистанции пути. Пролетные строения клепаны по проекту ПСК, изготовлены в 1946 году, установлены в 1947-м под расчетную нагрузку Н-7. Осмотр произведен 22 августа 2007 года.

2. Через р. Вабля, 42-й км ПК4 участка Унеча–Хутор Михайловской Унечской дистанции пути. Осмотр произведен 15 апреля 2009 года.

3. Через р. Нерусса, 478-й км второго пути участка Брянск–Суземка –Брянск Льговской дистанции пути. Осмотр произведен 19–21 мая 2009 года.

На рис. 1 представлены графики функций износа элементов металлического клепаного пролетного строения моста через р. Снежить, в которых были обнаружены дефекты.

Для элемента «рыбка» наработка, при которой наступает отказ, при $\alpha=4$ равна

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{4-1}{4}\right)} \approx 0,5276, \text{ для остальных}$$

элементов наработка, при которой наступает отказ, при $\alpha=7$ равна

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{7-1}{7}\right)} \approx 0,5756. \text{ При заданном износе } F^*(t_0) \text{ в определенный момент времени } t_0 \text{ и при фиксированном } \alpha \text{ коэффициент } \beta \text{ функции Вейбулла находится из уравнения}$$

$$F^*(t_0) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha}.$$

Анализ графиков подводит к следующим выводам. Проектный срок службы для накладок типа «рыбка» составляет $T_n = 30$

лет. Результаты, полученные по предлагаемой модели прогнозирования износа, позволяют продлить фактический срок службы до $T_\phi = 31$ года. Соответственно

для главных продольных балок пролетного строения $T_n = 60$ лет и $T_\phi = 81$ год. Проектный срок службы для

главных продольных балок пролетного строения составляет $T_n = 60$ лет, согласно предлагаемой модели

прогнозирования износа фактический срок



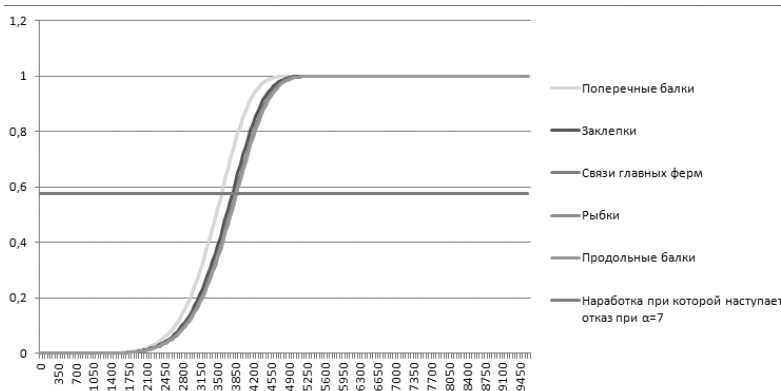


Рис. 3. Зависимость износа от прошедшей нагрузки для элементов металлического клепаного пролетного строения моста через р. Нерусса, 478-й км второго пути участка Брянск–Суземка–Брянск.

службы составит $T_{\phi} = 81$ год. Проектный срок службы для главных продольных балок пролетного строения составляет $T_n = 60$ лет, согласно предлагаемой модели прогнозирования износа фактический срок службы составит $T_{\phi} = 62$ года.

На рис. 2 показаны графики функций износа для элементов металлического клепаного пролетного строения моста через р. Вабля с учетом обнаруженных в них дефектов.

Для исследуемых элементов наработка, при которой наступает отказ, при $\alpha=4$

$$\text{равна } F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{2-1}{2}\right)} \approx 0,3935.$$

Проектный срок службы вертикальных листов верхнего пояса составляет $T_n = 60$ лет, согласно предлагаемой модели прогнозирования износа ожидаемый фактический срок службы $T_{\phi} = 63$ года.

На рис. 3 обозначены графики функций износа для элементов металлического клепаного пролетного строения моста через р. Нерусса, в которых найдены дефекты.

Для исследуемых элементов наработка, при которой наступает отказ, при $\alpha=7$

$$\text{равна } F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{2-1}{2}\right)} \approx 0,5756.$$

Проектный срок службы поперечных балок — $T_n = 60$ лет, согласно предлагаемой модели прогнозирования износа ожидаемый фактический срок службы — $T_{\phi} = 63,4$

года. Проектный срок службы поперечных балок составляет $T_n = 60$ лет, согласно

предлагаемой модели прогнозирования износа фактический срок службы составит $T_{\phi} = 69$ лет. Проектный срок службы поперечных балок составляет $T_n = 60$ лет,

согласно предлагаемой модели прогнозирования износа фактический срок службы составит $T_{\phi} = 57$ лет.

ВЫВОДЫ

Предлагаемая модель прогнозирования износа позволяет обоснованно принимать решения о продлении ресурса искусственных сооружений, сокращении эксплуатационных затрат при условии обеспечения заданной надежности. То есть появляется возможность эксплуатировать мостовые конструкции по критерию «надежность — затраты».

ЛИТЕРАТУРА

1. Технические условия на проведение планово-предупредительных ремонтов инженерных сооружений железных дорог России (ЦП-622) / МПС России. — М.: Транспорт, 1999. — 24 с.
2. Инструкция по оценке состояния и содержания искусственных сооружений на железных дорогах Российской Федерации / Департамент пути и сооружений ОАО «РЖД». — М., 2006. — 120 с.
3. Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. Математические методы в теории надежности. — М., Наука, 1965. — 515 с.
4. Смирнов В. Ю., Кос О. И. Оптимальный интервал предупредительных замен для искусственных сооружений железных дорог // Мир транспорта. — 2013. — № 1. — С. 152–155.
5. Кос О. И., Смирнов В. Ю. Расчет показателей технического состояния искусственных сооружений и их прогнозирование // Транспортное строительство. — М.: Транстростройиздат, 2014. — С. 30–32. ●