

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ РАСЧЕТОВ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

УДК: 624.21

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЧНОГО ИЗНОСА СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ПРОЛЁТНОГО СТРОЕНИЯ АВТОДОРОЖНОГО МОСТА

**А.И. Лантух-Лященко, профессор, д.т.н., К.В. Медведев, профессор, к.ф.-м.н.,
Национальный транспортный университет, г. Киев**

***Аннотация.** Представлен новый подход к определению предельного износа сталежелезобетонных пролетных строений автодорожных мостов. Главная цель этой статьи заключается в моделировании износа элементов мостов численным параметром надежности. В модели параметр служит количественной оценкой граничного износа элементов. В системе эксплуатации мостов модель даст количественный критерий интегральной оценки и прогноза технического состояния элементов.*

***Ключевые слова:** граничный износ, модель оценки граничного износа, характеристика безопасности, автодорожные мосты*

ДО ПИТАННЯ ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЧНОГО ЗНОСУ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННОЇ ПРОГОНОВОЇ БУДОВИ АВТОДОРОЖНЬОГО МОСТА

**А.І. Лантух-Лященко, професор, д.т.н., К.В. Медведєв, професор, к.ф.-м. н.,
Національний транспортний університет, м. Київ**

***Анотація.** Представлено новий підхід до визначення граничного зносу сталезалізобетонних прогонових будов автодорожніх мостів. Головна мета цієї статті полягає в моделюванні зносу елементів мостів числовим параметром надійності. В моделі параметр служить кількісною оцінкою граничного зносу елементів. У системі експлуатації мостів модель дає кількісний критерій інтегральної оцінки і прогнозу технічного стану елементів.*

***Ключові слова:** граничний знос, модель оцінки граничного зносу, характеристика безпеки, автодорожні мости.*

TO PROBLEM OF DETERMINATION OF LIMIT WEAR OF COMPOSITE ROAD BRIDGES SUPERSTRUCTURE

**A. Lantuh-Lyaschenko, Professor, Doctor of Technical Science,
K. Medvedev, Professor, Candidate of Physical and Mathematical sciences,
National Transport University, Kyiv**

***Abstract.** The paper presents a new approach to the definition of the wear limit of composite road bridges superstructures. The focus of this paper is on the wear modeling of highway bridge elements by a numerical parameter of reliability. In the model, the parameter serves as, a quantitative estimation of limit service-life of elements. In the system of bridges exploitation, the model will give a criterion of integral estimation and prognosis of elements technical state.*

***Key words:** limit wear, model of the limit wear, reliability index, road bridges.*

Введение

Исследование, основные положения которого приводятся ниже, выполнено в рамках научно-исследовательской работы по подготовке новой редакции нормативного документа оценки и прогнозирования технического состояния автодорожных мостов ДСТУ-Н Б.В.2.3-23:2009 «Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів» [1]. Рассматриваемая проблема является частью принципов оценки технического состояния элементов мостов. Речь идет о теоретическом базисе контроля износа элементов в процессе эксплуатации.

Анализ публикаций

В последнее время значительно возросло количество морально и физически устаревших железобетонных автодорожных мостов, проектный срок службы которых должен составлять 80–100 лет. Как показывает анализ данных Аналитической экспертной системы управления мостами Укравтодора (АЕСУМ) [2], сегодня реальный средний срок службы автодорожных мостов составляет всего лишь 45–50 лет. Резко возросло количество мостов, ожидающих капитального ремонта или реконструкции.

В этих условиях для безаварийной эксплуатации и стратегического планирования ремонта и реконструкции сооружений возрастает потребность в уточнении научных и методических подходов в оценке технического состояния элементов мостов, в расширении исследований по обоснованию критериев уровня надежности, рисков и алгоритмов прогнозирования остаточного ресурса элементов.

Принципы оценки технического состояния мостов изложены в работе [3] в 1999 году, где была предложена новая феноменологическая модель деградации элементов мостов, основанная на идеях марковского дискретного процесса с непрерывным временем. Впоследствии модель была принята как нормативная в документе [4] и практически не претерпела изменений в нормативе 2009 года ДСТУ-Н [1].

За 10 лет с момента принятия модели как инструмента оценки и прогнозирования остаточного ресурса системы модель успешно

апробирована. Однако проявились и слабые места. Это прежде всего граничные уровни износа, основанные на опыте эксплуатации мостов, директивно установленные в нормах [1]. Настало время для дальнейшего развития модели, научного поиска критериев граничного износа элементов мостов. Один из возможных подходов, базирующийся на параметре надежности, изложен в этой статье.

Цель и постановка задачи

Итак, главной целью исследования является построение модели оценки граничного износа сталежелезобетонного пролетного строения моста. Пролетные строения этого типа, с точки зрения надежности, следует рассматривать как отдельный класс. Спецификой конструкции является необходимость учета влияния анкерных устройств в определении надежности объединённой системы сталь – бетон.

Сами анкерные устройства представляют собой последовательно-параллельную систему, надежность которой определяется не только типом анкерных устройств и геометрией их взаимного расположения, но и корреляционными связями с характеристиками железобетона и внешней нагрузки.

В теоретическом плане оценка надежности композитного сечения – весьма сложная задача и была предметом исследования большого количества ученых. Достаточно полный обзор работ можно найти в фундаментальной монографии Семко А.В. [5].

В нашем исследовании прибегнем к упрощенной формулировке надежности композитного сечения. Для оценки граничного износа воспользуемся классическим определением характеристики безопасности [6]. Основная формула, при условии нормального распределения и отсутствии корреляции между нагрузкой и элементами составного сечения, имеет вид

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}, \quad (1)$$

где μ_R – математическое ожидание обобщенного сопротивления элемента; μ_S – математическое ожидание обобщенной нагрузки; σ_R – среднее квадратическое отклонение

(стандарт) обобщенного сопротивления элемента; σ_S – среднее квадратическое отклонение (стандарт) обобщенной нагрузки.

В действительности корреляция между нагрузкой и составным сечением балки есть. Она вызвана податливостью связей между элементами сечения. Однако податливость связей в сталежелезобетонных балках мостов незначительна, ее влияние на несущую способность сечения есть величина второго порядка малости. Тем не менее, в нашем исследовании есть попытка учесть корреляцию введением коэффициента неопределенности модели, понижающего надежность композитного сечения.

В такой постановке получаемую оценку граничного износа следует рассматривать как первое приближение.

С другой стороны, оправданием приближенной постановки задачи служит то, что цель исследования есть чисто утилитарная – получение экспертной скалярной оценки надежности элемента сооружения, и ее точность при принятых теоретических предположениях всегда будет значительно выше точности физико-механических эксплуатационных характеристик реального объекта.

Исследование базируется на таких гипотезах. А. Критерием граничного износа служит характеристика безопасности, при условии равенства характеристических значений обобщенных сопротивления и нагрузочного эффекта $R_n = S_n$ в первом граничном состоянии.

Б. Обобщенное сопротивление элемента R_n уменьшается в процессе эксплуатации, нагрузочный эффект от постоянных нагрузок и подвижного состава $S_n = S_{n1} + S_{n2}$ принимается постоянным.

Случай переменного во времени нагрузочного эффекта S_n должен рассматриваться отдельно и не является предметом этого исследования.

Гипотеза А $R_n = S_n$ означает, что рассматривается состояние, когда исчерпаны все коэффициенты надежности, как со стороны обобщенного сопротивления, так и со стороны обобщенного нагрузочного эффекта, и принимается за предельный износ. Другими

словами – это состояние, в котором реальная несущая способность элемента равна проектному нагрузочному эффекту без коэффициентов надежности.

Гипотеза Б относительно постоянства нагрузочного эффекта здесь принимается как условие того, что оценка износа элемента выполняется относительно временных нагрузок, принятых при проектировании моста.

Критерий граничного износа

Трансформируем формулу (1) к форме, в которой характеристика безопасности выражается через математические ожидания обобщенного коэффициента запаса и обобщенные коэффициенты вариации сопротивления и нагрузки

$$\gamma_0 = \frac{\mu_R}{\mu_S}; \quad (2)$$

$$V_R = \sigma_R / \mu_R; \quad V_S = \sigma_S / \mu_S. \quad (3)$$

Здесь γ_0 – математическое ожидание обобщенного коэффициента запаса; V_R – обобщенный коэффициент вариации сопротивления; V_S – обобщенный коэффициент вариации нагрузки.

После подстановки (2) и (3) в формулу (1) и после несложных преобразований формула (1) приводится к виду

$$\beta = \frac{\gamma_0 - 1}{\sqrt{V_R^2 \gamma_0^2 + V_S^2}}. \quad (4)$$

В действующих нормативных документах характеристические значения граничного усилия в сечении элемента и нагрузки (несущей способности R_n и нагрузочного эффекта S_n) отличаются от соответствующих математических ожиданий. Они принимаются смещенными относительно математических ожиданий: влево смещено характеристическое значение обобщенного сопротивления

$$\mu_R = R_n \frac{1}{(1 - v_R V_R)}, \quad \mu_R > R_n \quad (5)$$

и вправо – характеристическое значение обобщенной нагрузки S_n

$$\mu_S = S_n \frac{1}{(1 + v_S V_S)}, \quad \mu_S < S_n, \quad (6)$$

где R_n , S_n – характеристические значения; v_R , v_S – значения стандартов, отделяющие переменную от ее математического ожидания.

Чаще всего принимается $v_R = v_S = 1,64$, что отвечает обеспеченности характеристических значений сопротивления сечения $U_R = 0,95$ и нагрузки $U_S = 0,05$.

Формулы (5) и (6) преобразуем, вводя обозначения

$$B_R = \frac{1}{(1-1,64V_R)}; B_S = \frac{1}{(1+1,64V_S)}. \quad (7)$$

С учетом обозначений (7) математические ожидания обобщенных сопротивления R_n и нагрузки S_n выражаются формулами

$$\mu_R = R_n B_R, \quad (8)$$

$$\mu_Q = S_n B_S, \quad (9)$$

где R_n – характеристическое значение обобщенного сопротивления; S_n – характеристическое значение обобщенной нагрузки.

В обозначениях (8) та (9) математическое ожидание обобщенного коэффициента запаса будет иметь вид

$$\gamma_0 = \frac{R_n B_R}{S_n B_S}. \quad (10)$$

С учетом гипотезы А математическое ожидание (10) обобщенного коэффициента запаса выразится так

$$\gamma_0 = \frac{B_R}{B_S}. \quad (11)$$

Для получения числовых значений характеристики безопасности следует задать средние значения коэффициентов вариации обобщенных сопротивления элемента V_R и нагрузки V_S .

Коэффициент вариации обобщенного сопротивления элемента V_R в формулах (4) та (7) определяется общей формулой квадратического отклонения суммы взаимно-независимых величин

$$V_R = \sqrt{\sum_{i=1}^n V_{Ri}^2 + \sum_{j=1}^n V_{Ri}^2 V_{Rj}^2 + V_M^2};$$

$$i = 1, 2, \dots, n, j = i - 1, \dots, n - 1, \quad (12)$$

где V_{Ri} , V_{Rj} – коэффициенты вариации материалов, из которых составлено сечение; n – количество материалов в составе сечения (тех материалов, прочностные характеристики которых входят в выражение для характеристического значения обобщенного сопротивления R_n). В формулу (12) внесен также коэффициент вариации V_M^2 , призванный учесть неопределенность модели.

Аналогично записывается формула коэффициента вариации обобщенного нагрузочного эффекта

$$V_S = \sqrt{\sum_{i=1}^n V_{Si}^2 + \sum_{j=1}^n V_{Si}^2 V_{Sj}^2},$$

$$i = 1, 2, \dots, n, j = i - 1, \dots, n - 1, \quad (13)$$

где n – количество типов характеристических нагрузок, входящих в выражение для вычисления характеристического значения обобщенного нагрузочного эффекта V_S (например: первая часть постоянной нагрузки + вторая часть постоянной нагрузки + полосовая нагрузка АК + тандем АК + толпа, $n = 5$).

Статистическая модель обобщенного сопротивления объединенного сталежелезобетонного сечения приведена в табл. 1; статистическая модель обобщенной нагрузки принята в соответствии с нормами з ДСТУ-Н [1].

Таблица 1 Статистические параметры модели сопротивления

Случайный фактор	V_S
Момент сопротивления поперечного сечения элемента	0,030
Арматура железобетонной плиты композитного сечения	0,030 – 0,110
Прочность бетона при условии природного твердения в зависимости от класса $R_{b,28}$ 30 – 70 МПа	0,051 – 0,105
Прокат стальной балки	0,030 – 0,080
Коэффициент неопределенности модели	0,020
Примечание: данные таблицы взяты из [5] и [7].	

Вычислив по формулам (12), (13) коэффициенты вариации обобщенных сопротивления элемента и нагрузки, получим по формуле (4) значение характеристики безопасности, соответствующей граничному износу сталежелезобетонного элемента пролетного строения моста.

Результаты

Граничное значение характеристики безопасности (формула (4)) является функцией большого количества факторов: типа нагрузки, длины линии влияния, конструкции пролетного строения, типа арматуры, прочности бетона и пр. При этом коэффициенты вариации в некоторых случаях различаются на порядок [1]. Поэтому численные результаты в этом исследовании получены путем перебора возможных минимальных и максимальных значений коэффициентов вариации сопротивления и нагрузки элемента.

Вычисленное по формуле (11) математическое ожидание обобщенного коэффициента запаса γ_0 и критерий граничного износа β – по формуле (4) при всех возможных комбинациях коэффициентов вариации сопротивления элемента V_R и нагрузочного эффекта V_S приведены в табл. 2.

Таблица 2 Экстремальные значения критерия граничного износа

Значение коэффициентов вариации	Обобщенный коэффициент запаса γ_0	Критерий граничного износа β
$\min V_S = 0,287$: $\min V_R = 0,074$	1,675	2,156
$\max V_S = 0,453$: $\max V_R = 0,137$	2,248	2,278
$\min V_S = 0,287$: $\max V_R = 0,137$	1,959	2,319
$\max V_S = 0,453$: $\min V_R = 0,074$	1,984	2,066

Как видно из табл. 2, критерий граничного износа β , в зависимости от принятых к расчету значений коэффициентов вариации сопротивления и нагрузки элемента, лежит в границах [2,319 – 2,066]. Сравнивая эти значения с нормативами ДСТУ-Н [1], приходим к выводу, что полученный критерий по величине характеристики безопасности практически совпадает с верхней границей 4-го экс-

плуатационного состояния ($\beta = 2,05$; надежность $P_i = 0,9798$), но является несколько более осторожным, чем принятое нормативное значение. Записанное в ДСТУ-Н [1] обобщенное определение 4-го состояния: «можливе часткове порушення вимог першої групи граничних станів» – в нашем случае означает исчерпание запасов надежности. Другими словами, полученный критерий соответствует уменьшению несущей способности элемента на величину

$$\delta = \frac{R - R_n}{R} \times 100\%, \quad (14)$$

где R – расчетное значение сопротивления элемента; R_n – характеристическое значение сопротивления элемента.

Величина δ , очевидно, зависит от типа конструкции, типа бетона, армирования, характеристик стального проката, типа анкерных устройств, расчетной нагрузки. Варьирование всех этих параметров охватывается приведенными выше границами критерия β .

Сравнение полученного критерия с нормой ДСТУ-Н [1] ($\beta = 1,74$; надежность $P_i = 0,9583$) для 5-го эксплуатационного состояния подтверждает необходимость эксплуатационных мероприятий по усилению конструкции или ее замене.

Выводы

Можно полагать, что полученный теоретический критерий граничного износа элементов сталежелезобетонного пролетного строения достаточно близко совпадает с нормативными ограничениями ДСТУ-Н [1] на уровне 4-го эксплуатационного состояния. Следовательно, в проекте нового нормативного документа эта оценка износа корректировке не подлежит.

Литература

1. Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів: ДСТУ-Н Б.В.2.3-23:2009. – К.: Мінірегіонбуд України, 2009.
2. Лантух-Лященко А.І. До розробки галузевої аналітичної експертної системи управління мостами / А.І. Лантух-Лященко // Автомобільні дороги і до-

- рожне будівництво: зб. наук. пр. – 2004. – Вип. 69. – С. 120–126.
3. Лантух-Лященко А.І. Оцінка надійності споруди за моделлю марковського випадкового процесу з дискретними станами / А.І. Лантух-Лященко // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: зб. наук. пр. – 1999. – Вип. 57. – С. 183–188.
4. Мости та труби. Оцінка технічного стану мостів, що експлуатуються: ВБН В.3.1-218-174-2002. – К.: Державна служба автомобільних доріг України, 2002. – 74 с.
5. Семко О.В. Імовірнісні аспекти розрахунку сталезалізобетонних конструкцій: монографія / О.В. Семко. – Полтава: ПолтНТУ імені Ю. Кондратюка, 2004. – 320 с.
6. Ржаницын А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность / А.Р. Ржаницын. – М.: Стройиздат, 1978. – 240 с.
7. Рекомендации по оценке и обеспечению надежности транспортных сооружений. – М.: Научно-исследовательский институт транспортного строительства, 1989.
- Рецензент: Е.Б. Угненко, профессор, д.т.н., ХНАДУ
- Статья поступила в редакцию 6 сентября 2012 г.
-