

Прогноз и анализ деградационных процессов применительно к мостовым сооружениям в г. Москве

д.т.н. Бродский Г.С., AGA Group, Inc.,
107 Monadnock Rd., Chestnut Hill, MA, 02467, USA, gbrodski@againc.com

Ю.А.Пономарев и Ю.А.Енютин, ГУП «Гидромост»,
24-1 ул.Мясницкая, 101852 Москва, Россия, yenyutin@gidromost.ru

Краткий обзор: Адекватное описание деградации конструкций и их элементов очень важно для эффективного использования Системы оптимального менеджмента Гидротехнических и Мостовых сооружений (СОМ «Гидромост»). В ходе эксплуатации Московской СОМ, процессы деградации изучались с использованием результатов стандартных инспекций 1059 сооружений. Анализ показывает, что для структурных СЭ ухудшение прочностных свойств практически не имеет места или носит случайный характер. В большинстве случаев, деградация относится, главным образом, к износу материалов, который в большой степени зависит от качества их изготовления и мер защиты от внешних воздействий. Кроме того, при прогнозе ресурса совокупности СЭ следует учитывать их взаимное влияние. Предложена методология корректировки деградационных моделей для различных СЭ, изначально принятая на основании экспертных оценок.

Основная цель СОМ «Гидромост» – обеспечение плановых ремонтов и реабилитационной активности и формирование бюджета для них. В большинстве аналогичных систем эта цель достигается с использованием деградационных моделей, которые описывают износ конструкций и их элементов с течением времени в количественных терминах, используя как вероятностный (Thompson & Shepard, 1993), так и детерминистский (Кузнецов и др., 2003) методы прогнозирования. Как правило, большинство систем рассматривают только один тип деградационной модели для структурных элементов. В СОМ «Гидромост» деградация каждого СЭ изначально описывалась в форме экспоненциальной зависимости износа от времени:

$$I = e^{\lambda t} - 1 \quad (1)$$

где t - время и λ = нормировочный коэффициент, определяемый для каждого СЭ на основании граничного условия:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_c} \quad (2)$$

T_c -представляет собой средний срок службы данного СЭ, назначенный на основании исторических данных по мониторингу мостов. [3].

Для целей инспекции непрерывная функция заменяется ступенчатой, так как состояние СЭ оценивается на базе 5-ти ступенчатой шкалы [4]. Визуальные признаки износа, соответствующие определенным категориям состояния, даны в генеральном каталоге СОМ для каждого СЭ.

Так как состояние каждого СЭ известно, можно определить индекс технического состояния всей конструкции следующим образом (Shepard & Johnson, 1999):

$$H_{brg} = \frac{\Sigma(H_{ej} q_j C_j)}{\Sigma(q_j C_j)} \quad (3)$$

$$H_{ej} = \frac{\Sigma(k_s q_{js})}{\Sigma(q_{js})}, \quad (4)$$

$$k_s = 0.5(3 - s), \quad (5)$$

где q_j = количество (в единицах измерения) стандартных элементов моста с серийным номером «j»; C_j = стоимость полной реабилитации «j»-го стандартного элемента; s = индекс категории состояния; q_{sj} = количество (в единицах измерения) «j»-х стандартных элементов, находящихся в состоянии «s». При равном распределении общего количества СЭ между всеми категориями состояния $H_{ej} = 0.5$.

В г.Москве автоматизированная система эксплуатации мостовых сооружений была внедрена в 2002 году. С тех пор было проинспектировано 1059 сооружений (мосты, тоннели, пешеходные мосты, набережные и т.д.), содержащих в общей сложности более 17 миллионов СЭ 215 различных типов. Накопление этих экспериментальных данных позволяет подтвердить адекватность деградационных моделей, первоначально принятых в качестве регулярных на основании экспертных оценок.

Первоначально анализ результатов инспекции показал отсутствие существенной зависимости между возрастом данного объекта и его индексом технического состояния. (Рисунок 1).

Zhang и др. (2003), который тоже заметил подобный эффект, связывает отсутствие такой взаимосвязи с принятым представлением структуры деградации в форме Марковских процессов, в которых интенсивность износа СЭ зависит только от их текущего состояния и не зависит от их истории (Ventzel & Ovcharov, 2000). Мы, однако, полагаем, что полученные результаты должны быть объяснены тем фактом, что выборочная ремонтная активность компенсирует различную степень износа мостов, которая существенно зависит от трех следующих главных факторов:

- Качество изготовления элемента/моста;
- Специфические особенности конструкции, предопределяющие совместную работу СЭ и их влияние друг на друга;
- Степень защиты конструкции от внешних воздействий.

Таким образом, текущая ремонтная активность, которая изменяет либо качество элементов (замену старых СЭ на новые), либо условия эксплуатации (такие, как устройство гидроизоляции), также влияет на интенсивность износа и, соответственно, на параметры деградационных моделей.

Для проверки этого допущения, которое приводит к значительной модификации процедуры корректировки деградационной модели, мы произвели анализ тренда состояний множеств СЭ различных типов с течением времени.

Закон изменений состояния определен как тренд для набора точек на графике $COND_{med} = F(t)$, где $COND_{med}$ – средняя категория состояния СЭ в рассматриваемый момент времени t_i . Предполагается, что отправной точкой является год постройки или реконструкции моста, если таковая имеется.

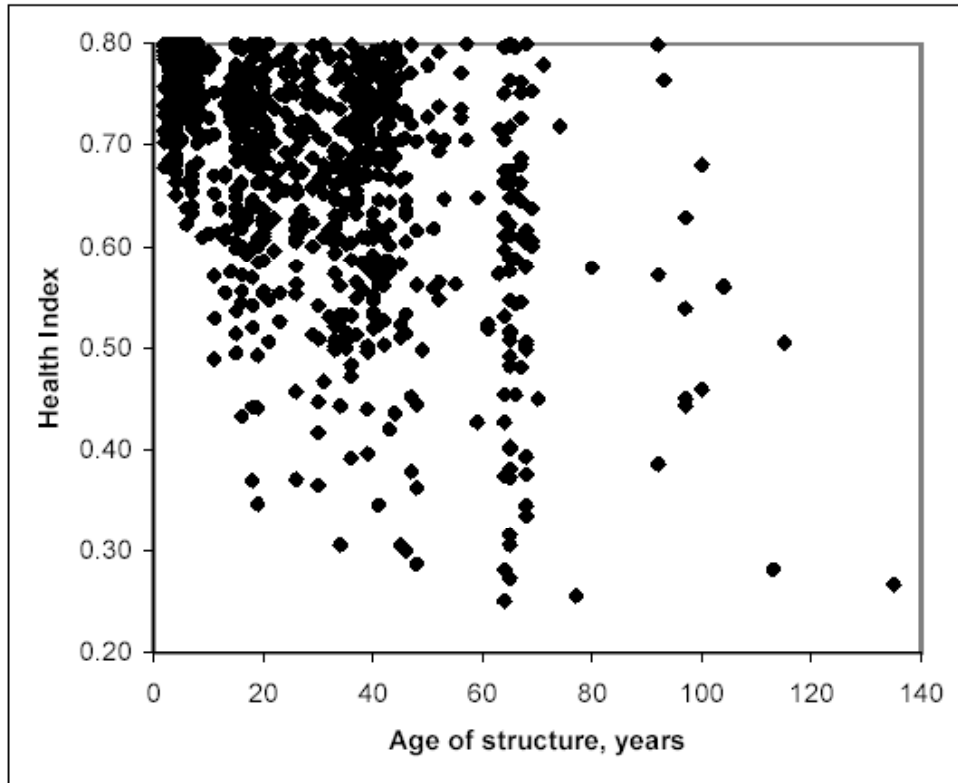


Рисунок 1. Величина индекса технического состояния для мостов в зависимости от возраста (данные для 1059 сооружений в г.Москве)

Средняя категория состояния определяется следующим образом:

$$COND_{med} = \frac{\sum (COND_i N_i)}{\sum (N_i)}, \quad (6)$$

где $COND_i$ = категория состояния для i -го СЭ; N_i = номер СЭ.

Каждый массив СЭ принадлежит конкретному мосту. Соответственно, число проанализированных массивов может определяться как произведение количества мостов и количества типов СЭ.

Реальное значение λ_{real} определено в соответствии с процедурой корректировки его начальной величины вычислением остаточного ресурса до полного разрушения и соответствующих нормировочных коэффициентов, полученных в ходе специальной инспекции COM, по следующей формуле:

$$\lambda_j = \frac{\ln(0.4 * Cond_{medi} + 0.7)}{(t_j - T_{0j})} \quad (7)$$

$$T_{life,j} \geq k_r T_{life,j0} \quad (8)$$

Вычисленный таким образом предполагаемый износ каждого СЭ, проанализирован с помощью методов математической статистики путем определения среднего значения, установленных интервалов, коэффициентов вариации и т.д.. Кроме того, рассмотрены случаи выхода параметров износа за пределы установленных интервалов.

Полученные результаты позволяют сделать заключение о том, что ухудшение прочностных свойств (усталость) большинства несущих или каркасных конструкций не проявляется даже за периоды, сравнимые или превышающие срок службы, установленный регулярными (экспоненциальными) деградационными моделями (рисунок 2, нижняя кривая). В подавляющем большинстве случаев деградация несущих конструкций вызвана износом материала из-за коррозии армированного бетона или стали, который приводит к ослаблению их рабочего сечения. Представленный разброс категорий состояния определяется, в основном, различиями свойств материалов и их защитного покрытия. (Рисунок 2, средняя кривая). Другой тип разброса может быть отнесен к стохастическим, редким или непредсказуемым аварийным ситуациям, таким как столкновения автомобилей с мостовыми конструкциями, ошибки проектирования или несовершенство разработанных норм и стандартов (Рисунок 3).

Для СЭ, причисленных к конструкционным материалам, разброс категорий состояния значительно более отчетливый (Рисунок 4). Это можно объяснить различием параметров отдельных материалов (в случае СЭ «Железобетон» - различными степенями прочности, морозостойкости и герметичности), их начальными свойствами, зависящими от качества изготовления, так и тем, что темп деградации, очевидно, существенно зависит от качества дополнительной защиты в конкретных рабочих условиях. Вообще, при нерегулярном разбросе точек труднее найти зависимость между степенью износа и временными параметрами. Но разброс для каждого массива существенно меньше, поэтому, чтобы избежать значимых ошибок в прогнозе, деградационные модели для таких элементов должны корректироваться применительно к каждому объекту с учетом экспериментальных данных, полученных при инспекции.

Для элементов с ограниченным сроком службы, например, для протяженных балок, регулярные деградационные модели весьма близки к реальным (Рисунок 5).

Резюмируя полученные результаты, мы можем подразделить все стандартные элементы на 4 группы (Таблица 1):

- СЭ, деградационные модели которые могут быть приняты на основе средних значений, полученных в процессе работы моста без учета специфических конструктивных особенностей или специфических условий региона, например, таких как СЭ «наполненный деформационный шов». Такая модель может быть определена как «Экспоненциальная»;
- СЭ, деградационные модели которые могут быть приняты на основе средних значений, полученных в процессе работы моста, но должны быть скорректированы с учетом специфических конструктивных особенностей моста и/или специфических условий региона, например, СЭ «Железобетонный уступ» и большинство материалов типа «Сталь» или «Железобетон». Деградационная модель для таких СЭ определена как «Веерная» в соответствии с ее графическим представлением;
- СЭ, деградация которых зависит от широкого спектра факторов, которые не могут быть специфицированы на основании существующих представлений. Поведение таких СЭ, например, «Железобетонная колонна», наилучшим образом описывает «Стохастическая модель», характеризуемая вероятностями перехода (Thomson & Shepard, 1993);
- СЭ, деградация которых не проявляется за время, сравнимое со сроком службы сооружений, и отказы которых связаны с аварийными ситуациями, например «стальное жесткое ограждение» или «служебная лестница». Поведение таких элементов следует описывать так называемой «нулевой» деградационной моделью.

Как видно из Таблицы 1, экспертная оценка, опираясь на «степень долговечности», для большинства СЭ была чересчур пессимистична и соответствовала минимальному значению в пределах срока службы, полученного на основании инспекционных наблюдений. Это может быть объяснено осторожностью экспертов, стремящихся к заведомо безопасной оценке из соображений психологической комфортности. Реальная долговечность СЭ Московских мостов, установленная на основании проведенных инспекций, превышает оценочную почти вдвое (в среднем 87%). Таким образом, использование экспертных оценок при прогнозировании, очевидно, приводит к необоснованному завышению планируемых затрат на содержание и ремонт сооружений.

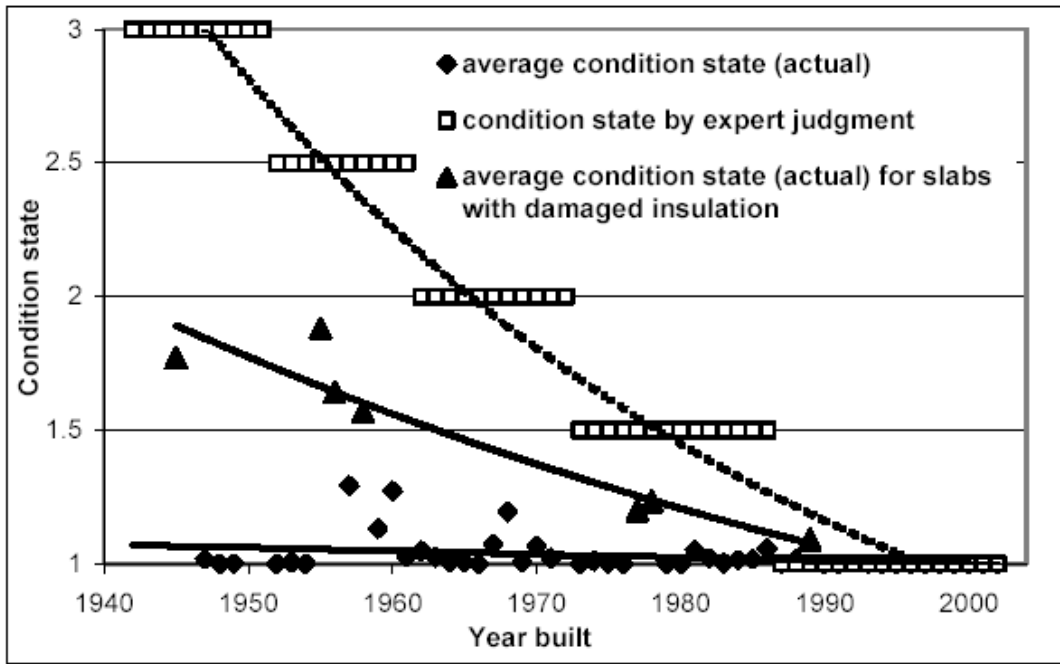


Рисунок 2. Дegradация стандартного элемента 6060 “железобетонная плита”

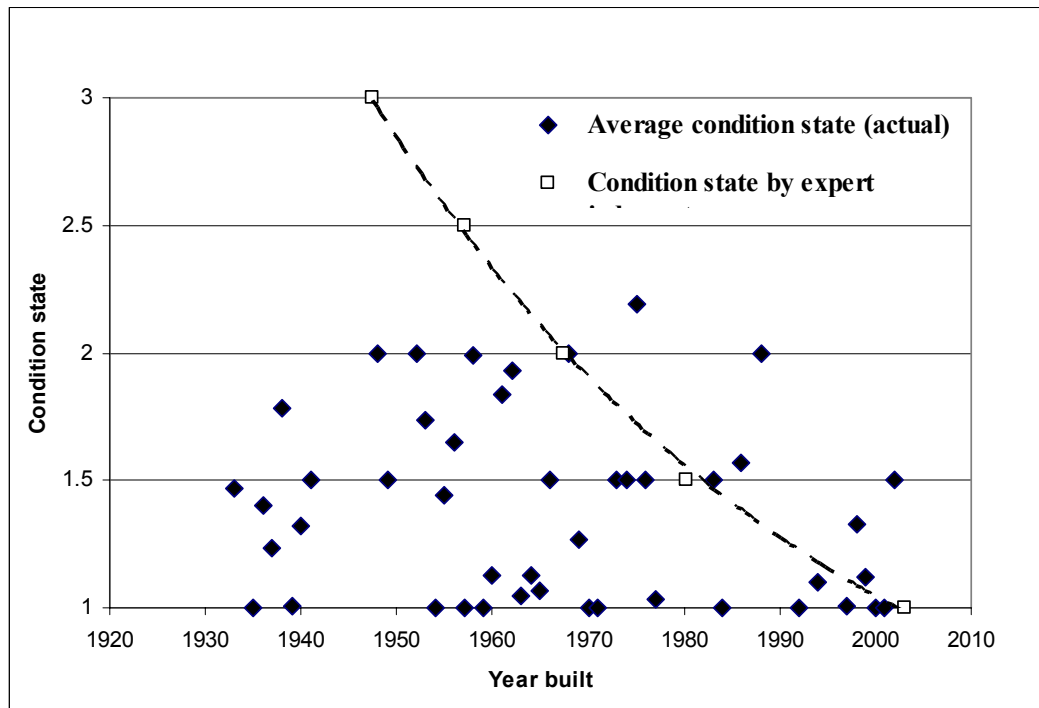


Рисунок 3. Дegradация стандартного элемента 4050 “Каменный парапет”

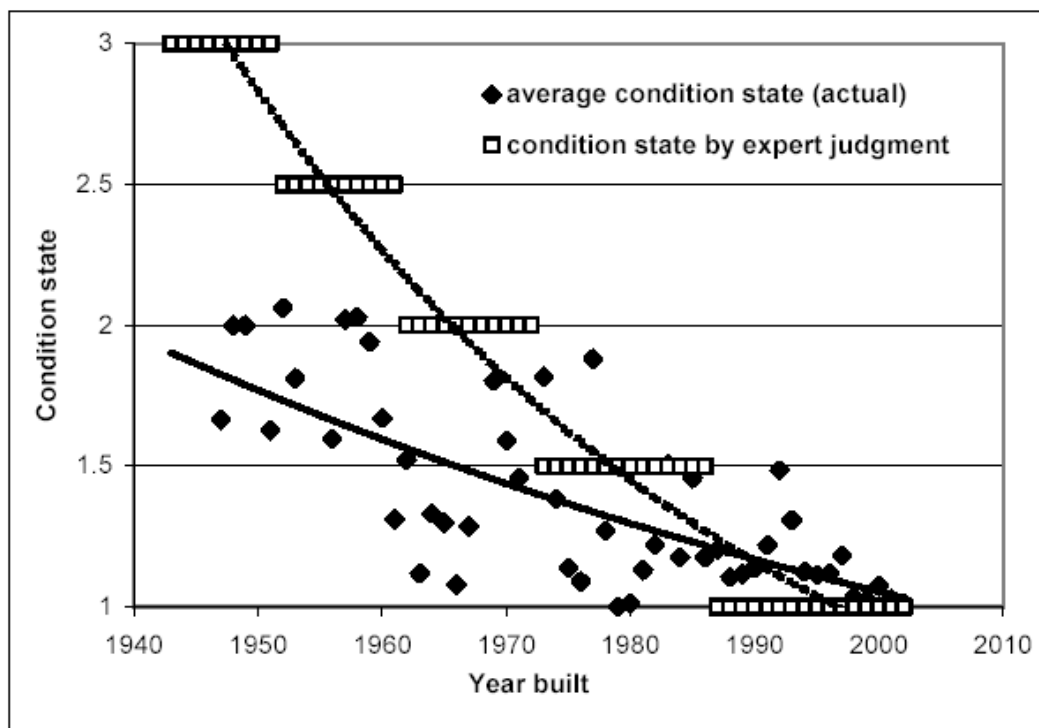


Рисунок 4. Дegradация стандартного элемента 1020 “Железобетон”

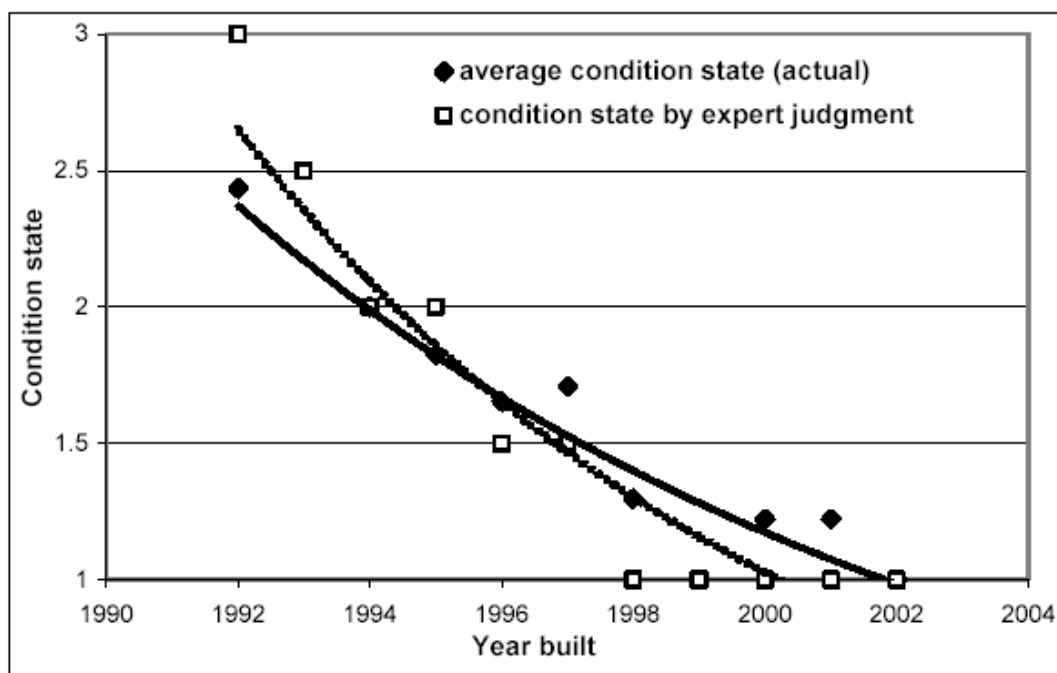


Рисунок 5. Дegradация стандартного элемента 4200 “Закрытый деформационный шов”

Для получения относительно надежного прогноза, в случае веерной деградационной модели, параметры следует назначать индивидуально для каждого СЭ с учетом его качества и взаимного влияния соседних элементов.

Эту задачу можно решить, применяя для каждого СЭ специальный нормировочный коэффициент, равный:

$$\lambda_i = k_{qi} k_{infj} \lambda_{oi} \quad (9)$$

где λ_i = коэффициент нормировки для i-го СЭ,
 k_{qi} = коэффициент качества для i-го СЭ,
 k_{infj} = коэффициент влияния для i-го СЭ,
 λ_{oi} = коэффициент нормировки (сохраненный в каталоге СУМ) для рассматриваемого СЭ.

Этот коэффициент назначается в соответствии со средним сроком службы, как описано процедурой замены начальных данных, базирующихся на результатах инспекции.

В ходе замены будет вычислено среднее значение коэффициента нормировки для всех взаимозависимых СЭ конкретного типа, принадлежащих всей мостовой сети.

Таблица 1. Срок службы некоторых стандартных элементов

| Стандартный элемент | Возраст по экспертной оценке, лет | Возраст по расчету лет | K_{var} | Тип деградационной модели |
|---------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------|-----------|---------------------------------|
| Бетонное покрытие | 10 | 29 | 0.00 | Веерная |
| Торец железобетонного ригеля | 30 | 60 | 0.22 | |
| Подферменник | 40 | 59 | 0.19 | |
| Набережная | 75 | 98 | 0.03 | |
| Ступени | 20 | 39 | 0.32 | |
| Торец железобетонной балки | 30 | 58 | 0.23 | |
| Торец железобетонной плиты | 30 | 54 | 0.21 | |
| Железобетонный лестничный марш | 30 | 49 | 0.19 | |
| Железобетонный карниз | 30 | 55 | 0.26 | |
| Железобетон | 60 | 90 | 0.23 | |
| Железобетонная плита | 60 | 110 | 0.31 | |
| Железобетонная балка | 80 | 133 | 0.12 | |
| Железобетонная поперечная балка | 80 | 127 | 0.06 | |
| Сталь | 100 | 169 | 0.28 | |
| Стальная балка | 100 | 184 | 0.22 | |
| Стальная колонна | 100 | 188 | 0.34 | |
| Стальная поперечная балка | 100 | 125 | 0.03 | |
| Стальная продольная балка | 100 | 115 | 0.15 | |
| Стальная плита | 100 | 132 | 0.13 | |
| Ворота | 20 | 29 | 0.00 | |
| Дверь | 20 | 34 | 0.18 | |
| Железобетонные перила | 30 | 67 | 0.13 | |
| Открылок | 60 | 75 | 0.09 | |
| Фасад железобетонной плиты | 20 | 43 | 0.27 | |
| Крыша | 60 | 69 | 0.06 | |
| Архитектурный элемент | 50 | 90 | 0.20 | |
| Чугун | 100 | 151 | 0.14 | Нулевая |
| Брызговик | 20 | 48 | 0.17 | |
| Стальное жесткое ограждение | 30 | 44 | 0.00 | |

| | | | | |
|---------------------------------|-----|-----|------|------------------|
| Парапет | 20 | 35 | 0.29 | |
| Тротуарный блок | 30 | 60 | 0.06 | |
| Экран | 50 | 64 | 0.12 | |
| Пластик | 30 | 61 | 0.10 | |
| Служебная лестница | 30 | 44 | 0.00 | |
| Брекчия | 20 | 41 | 0.17 | Стохастическая |
| Сухой стык | 60 | 81 | 0.01 | |
| Навесная облицовка | 30 | 48 | 0.30 | |
| Барьер | 20 | 43 | 0.29 | |
| Железобетонный цоколь | 20 | 35 | 0.37 | |
| Каркас | 50 | 66 | 0.11 | |
| Парапет бордюра | 30 | 63 | 0.11 | |
| Железобетонная нижняя плита | 60 | 57 | 0.30 | |
| Свод | 80 | 117 | 0.13 | |
| Смотровая тележка | 15 | 51 | 0.08 | |
| Бетон | 80 | 118 | 0.21 | Экспоненциальная |
| Керамика | 20 | 32 | 0.20 | |
| Древесина | 15 | 29 | 0.00 | |
| Заполненный шов | 20 | 38 | 0.33 | |
| Металлизация | 30 | 48 | 0.14 | |
| Лакокрасочное покрытие | 10 | 21 | 0.33 | |
| Защитное покрытие | 10 | 18 | 0.34 | |
| Штукатурка | 10 | 19 | 0.33 | |
| Бордюра | 30 | 68 | 0.22 | |
| Бетонная плитка | 20 | 40 | 0.32 | |
| Лоток | 15 | 31 | 0.36 | |
| Откосный лоток | 25 | 69 | 0.06 | |
| Дренажная труба | 20 | 28 | 0.23 | |
| Стальной карниз | 60 | 85 | 0.37 | |
| Железобетонная продольная балка | 80 | 98 | 0.24 | |
| Стена лестничного схода | 60 | 92 | 0.36 | |
| Укрепление откосов | 30 | 52 | 0.18 | |
| Облицовка (керамика, мрамор) | 30 | 55 | 0.25 | |
| Железобетонный ригель | 60 | 68 | 0.10 | |
| Бетонный стык | 80 | 109 | 0.15 | |
| Прежнатенный железобетон | 100 | 143 | 0.27 | |
| Оболочка стальная | 60 | 118 | 0.03 | |
| Каменный карниз | 60 | 150 | 0.08 | |
| Чугунные перила | 80 | 174 | 0.12 | |
| Железобетонная арка | 80 | 113 | 0.26 | |
| Дренаж | 20 | 37 | 0.35 | |
| Преднатенная плита | 100 | 281 | 0.09 | |

Коэффициент качества (k_{qi}) характеризует те индивидуальные свойства элемента, которые влияют на его срок службы. Он определяется как отношение фактического остаточного срока службы, оцененного на основании результатов инспекции, к начально определенному сроку службы, установленному в каталоге деградационных моделей:

$$k_{qi} = \frac{\lambda_{0i}}{\lambda_{real}} \quad \text{at } k_{inf,j}=1 \quad (10)$$

Если значение k_{qi} лежит за границами среднестатистического разброса, рассматриваются два возможных варианта, т.е. либо может иметь место инспекционная ошибка, либо конструктивное окружение может влиять как положительно (например, влияние плиточного покрытия на элементы железобетона), так и отрицательно (например, нарушение герметичности, повреждение протяженных балок и т.д.).

Если инспекция проведена качественно, то идентифицируются взаимовлияющие элементы и коэффициент влияния для пары “j-i” СЭ закладывается в расчетные модели. Этот коэффициент вычисляется следующим образом:

$$k_{inf,j} = \frac{k_{qi}}{k_{q\ med}} \quad (11)$$

где k_{qi} = коэффициент качества данного элемента; и

$k_{q\ med}$ = среднее значение коэффициента качества СЭ того же типа для данного моста, попадающий в область среднестатистического разброса.

Коэффициент качества может быть использован не только для выявления специфических свойств данного СЭ или объективности данной инспекции, но также как критерий для предписания определенной ремонтной активности, например, обеспечение защитного покрытия или замена элемента новым, но улучшенного качества.

Заключение

На основании анализа результатов стандартной инспекции могут быть сделаны следующие выводы:

1. Как правило, экспертная оценка срока службы занижена и находится в пределах нижней границы среднестатистического разброса. Для большинства СЭ такое приближение необосновано и приводит, по большей части, к ошибочным результатам, что влечет за собой необходимость корректировки параметров деградационных моделей, согласующуюся с полученными инспекционными данными.
2. Ухудшение свойств несущих конструкций мостовых сооружений происходит, в основном, за счет износа материалов. Силовой деградации практически не наблюдается, или она имеет случайный характер.
3. Применение основных принципов, установленных мировой практикой для описания деградации мостовых сооружений и их компонентов (стандартных элементов) плавной монотонной кривой, оказалось неверным, что следует из результатов стандартных инспекций, проведенных в процессе работы мониторинга Московских мостов. В связи с этим, для описания поведения всей совокупности стандартных элементов предлагается 4 типа деградационных моделей: экспоненциальная, веерная, стохастическая и нулевая. Веерная модель должна пересчитываться для каждого СЭ с учетом качества изготовления и влияния конструктивного окружения. С этой целью СЭ, дополнительно к метрическим параметрам, должны характеризоваться показателями качества. Кроме того, массив СЭ должен характеризоваться показателями взаимовлияния соседних элементов. Такие параметры должны определяться в каждом конкретном случае на основании инспекционных данных.

Литература

1. Енютин Ю. , Шестериков В. 2003. *Система Управления Мостами для г.Москвы – 9-я*
2. *Международная Конференция по Мониторингу Мостовых Сооружений*, Орландо, Флорида, США, стр. 96-101.
3. Кузнецов В., Цейтлин Г., Хитров В., Зайчик Г., Бродский Г., Бродская Е., Енютин Ю. , Шестериков В. 2003 . *Система Управления Мостами для г.Москвы – 9-я*
4. *Международная Конференция по Мониторингу Мостовых Сооружений*, Орландо, Флорида, США, стр. 96-101.

5. Shepard, R.W. & M.B. Johnson 1999. *California Bridge Health Index, IBMC-005, California Department of Transportation // International Bridge Management Conference, Denver, Colorado, Preprints, Volume II, K1.*
6. Thompson, P.D.& Shepard, R.W. 1993. *Pontis. Characteristics of Bridge Management Systems. 7th Conference on Bridge Management, , TX, USA, p.p. 35-42.*
7. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. 2000. *Теория случайных процессов и ее инженерное приложение, Москва, 383 стр.*
8. Екимов В. , Федосеев В., Енютин Ю., Бродский Г., Сапронов И. 2003 . *Процедура и опыт стандартной инспекции мостов – Наука и технология дорожного строительства, №4, Москва.*
9. Zhang, Z.& Sun, X. & Wang, X. 2003. *Determination of bridge deterioration matrices with state national bridge inventory data – 9th International Bridge Management Conference, Orlando, Florida, USA, p.p. 207-218*
10. Определение и прогноз износа элементов автодорожных мостов в Краснодарском крае, Россия, 2001. РДН218.05.14-2000. Москва-Краснодар.