

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ДЕГРАДАЦИИ КОНСТРУКЦИЙ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЕМ МОСТОВЫХ СООРУЖЕНИЙ

Енютин Ю. А., Власова М. С. (ГУП «Гормост»)

к.т.н. Бродский Г.С., к.т.н. Музыкин Р.М., Бродская Е.С. («AGA, Inc.» ,США)

Главная задача Систем управления эксплуатацией мостовых сооружений (СУМ) состоит в оптимальном планировании ремонтно-реабилитационной активности и соответствующего бюджета. В структуре известных СУМ эта задача решается на основе так называемых деградационных моделей, количественно описывающих ухудшение состояния конструкций и их элементов с течением времени, причем используются как вероятностный [1], так и детерминистский [2] методы прогнозирования.

Очевидно, что во всех случаях ключевым вопросом построения деградационной модели является обоснованное определение интенсивности старения стандартных элементов (СЭ), а значит - и реальных сроков службы конструкций.

В СУМ г. Москвы для описания деградации каждого СЭ принята экспоненциальная зависимость износа во времени (кривая А, рис. 1), в виде:

$$I = e^{\lambda \cdot t} - 1$$

где t – время,

λ - коэффициент нормировки, определяемый для каждого СЭ по граничному условию:

$$\lambda = \ln 2 / T_c \quad (2)$$

Здесь T_c – средний срок службы данного СЭ, принимаемый по экспертным оценкам на основании опыта эксплуатации мостовых сооружений России [3].

Для обеспечения эффективного инспектирования сооружений целесообразна замена непрерывной функции ступенчатой (кривая Б, рис. 1), поскольку оценка состояния СЭ производится по пятибалльной системе. Три целые (базовые) градации при этом соответствуют основным видам ремонтных работ - предупредительный, текущий и капитальный ремонт. Такой подход позволяет инспектору оценивать износ по принципу анкеты – «да, нет, может быть», что снижает субъективизм, поскольку наиболее спорные оценки характерны для промежуточных градаций - между однозначно хорошим и однозначно плохим состоянием элемента. В данном случае такое спорное или неопределенное состояние выражается одной целой «2», а также двумя дробными «1,5» и «2,5» категориями. Последние соответствуют случаям, когда имеющиеся повреждения конструкций в своем развитии еще не достигли признаков базовых категорий. С точки зрения планирования ремонтов категория «1,5» соответствует необходимости осуществления профилактических работ, а категория «2,5» является нижней границей допустимого износа и сигналом для включения объекта в план первоочередных капитальных работ.

В таблице 1 приведена классификация категорий состояний по различным критериям, а визуальные признаки соответствия износа тому или иному состоянию содержатся в генеральном каталоге СУМ для каждого СЭ.

Зная состояния всех СЭ, можно определить индекс технического состояния (ИТС) сооружения в целом в виде [6]:

$$H_{brg} = \Sigma(H_{ej} * q_j * C_j) / \Sigma(q_j * C_j)$$

$$H_{ej} = \Sigma(k_s * q_{js}) / \Sigma(q_{js})$$

$$k_s = (n - s) / (n - 1)$$

Здесь q_j - количество [единиц измерения] стандартного элемента с серийным номером « j », имеющиеся на мосту; C_j – стоимости полного восстановления для стандартного элемента с серийным номером « j »; s –

индекс категории состояния; q_{sj} - количество [единиц измерения] элемента с серийным номером «j», находящееся в s-ом состоянии; n – количество категорий состояния. При равном распределении количества элементов по всем категориями состояния $N_{ej} = 0.5$.

Таблица 1. Классификация категорий состояний

Категория состояния	Оценка внешнего вида	Износ	Вид требуемого ремонта
1	хороший	менее 20%	Уборка, регламентные работы
1,5	не очень хороший	20-40%	Профилактические работы
2	плохой	40-60%	Текущий (локальный) ремонт
2,5	очень плохой	60-80%	капитальный ремонт
3	никуда негодный	80-100%	Замена или поддерживающий ремонт

Примечание: в таблице износ указан в процентах от допустимой величины износа для данного элемента, которая составляет от 60 до 80 процентов от предельного (опасного с точки зрения работоспособности сооружения) износа.

СУМ г. Москвы эксплуатируется ГУП «Гормост» с января 2002 года. За это время, с использованием прежних наработок и архивных материалов, была проведена паспортизация и стандартная инспекция 1059 сооружений (мосты, тоннели, пешеходные переходы, набережные и т.п.) содержащих, в общей сложности, более 500000 различных СЭ. Накопление столь значительного объема экспериментальных результатов позволило приступить к проверке адекватности деградационных моделей, принятых в качестве «нормативных» на основании экспертных оценок.

Прежде всего, анализ инспекционных данных указывает на отсутствие существенной корреляции между возрастом сооружения и индексом технического состояния (рис. 2). Авторы статьи [5], также отметившие подобный эффект, считают его подтверждением обоснованности представления деградации конструкций в виде Марковского процесса, при котором скорость старения СЭ зависит только от его состояния в настоящем и не зависит от «истории» [7, 1]. Однако на наш взгляд объяснение полученных результатов следует искать в том, что избирательная ремонтная активность компенсирует различную скорость износа сооружений, которая существенно зависит от трех основных факторов:

- качества изготовления элемента/сооружения;
- конструктивных особенностей сооружения, обуславливающих различное взаимное влияние СЭ друг на друга;
- степени защиты конструкции от воздействий окружающей среды.

Для проверки данного положения, принятие которого приводит к необходимости существенной модификации процедуры адаптации деградационных моделей в процессе эксплуатации СУМ, был проведен анализ изменений величин категорий состояния различных СЭ во времени.

Закон изменения состояния определялся по виду и параметрам линии тренда, вписанной в набор точек на графике $COND_{med} = F(t)$, где $COND_{med}$ – средняя категория состояния рассматриваемого СЭ на

момент времени эксплуатации t_i . При этом за «нулевой» год принимался год постройки сооружения, или его реконструкции, если таковая имела место.

Средняя категория состояния определялась по формуле

$$COND_{med} = \Sigma(COND_i * N_i) / \Sigma(N_i), \text{ где}$$

$COND_i$ – категория состояния i -того СЭ, N_i – его количество. Выборка СЭ на каждый год эксплуатации составляет от 5 до 50 тыс. элементов.

Фактические значения λ_{real} определялись в соответствии с процедурой адаптации исходных данных в процессе эксплуатации СУМ. Суть ее сводится к вычислению, по результатам инспекций, реального остаточного срока службы до отказа и соответствующего коэффициента нормировки.

Полученные результаты позволяют заключить, что силовая деградация (усталость) большинства несущих или ограждающих конструкций практически не проявляется, в том числе в течение периодов, сопоставимых или даже превосходящих срок службы, определенный нормативными деградационными моделями (рис. 3). При этом, правда, необходимо иметь в виду, что для выявления усталостных повреждений в их начальной стадии развития требуются, как правило, специальные методы обследования и средства доступа, не применяемые во время стандартной инспекции.

Таким образом, методами стандартной инспекции выявлено, что в подавляющем большинстве случаев деградация несущих и ограждающих конструкций, вызвана, прежде всего, износом материала вследствие коррозионных повреждений железобетона или стали и, как следствие, ослабления их рабочего сечения, а имеющийся разброс в категориях состояния обусловлен, главным образом, вариациями свойств материала и его защиты (иллюстрируется рис. 3.д, на примере железобетонных плит с нарушенной гидроизоляцией и рис. 3 е-ж, на примере железобетонных карнизов). Другой причиной разброса являются редкие, не прогнозируемые форс-мажорные обстоятельства, такие, как наезды автотранспорта на конструкции, проектные ошибки или несовершенство норм проектирования.

Для стандартных элементов, описывающих строительные материалы (рис. 4.а-д), характерен более значительный разброс в категориях состояния, обусловленный различными параметрами самого материала (на примере бетона: разные марки по прочности, морозостойкости и водонепроницаемости), его начальными свойствами, определяемыми особенностями изготовления, а также качеством вторичной защиты в данных условиях эксплуатации. Последнее наиболее актуально для СЭ «Сталь». В целом же при таком разбросе точек весьма затруднительно выразить зависимость износа во времени какой-либо функцией. По-видимому, деградационные модели для подобных СЭ целесообразно принимать для каждого конкретного сооружения, либо на основании детального прогноза, осуществляемого в ходе приемочных испытаний, либо с использованием опытных данных, полученных на конструктивно аналогичных объектах. Применение обобщенных деградационных моделей для подобных СЭ допустимо в тех случаях, когда приемлема значительная погрешность прогнозирования.

Для элементов с ограниченным сроком службы, например, для деформационных швов, нормативные деградационные модели весьма близки к действительности (рис. 5).

Анализ полученных данных позволяет утверждать, что для большинства СЭ экспертные оценки «нормативной долговечности» оказались излишне пессимистичными и соответствует минимальным значениям в диапазоне сроков службы, полученных по результатам инспекции (табл. 2). Оценка долговечности по «нижнему пределу» заметно отразилась на объективности прогноза при эксплуатации СУМ. Естественно, особенно велики оказались ошибки прогноза долговечности СЭ, не доступных для осмотра. Для них категория состояния определялась программными средствами СУМ с учетом параметров деградационных моделей, назначенных экспертами, что привело к появлению в планах ремонтных работ неоправданных затрат.

Таблица 2.

Срок службы некоторых СЭ

Стандартный элемент	Срок службы по результатам инспекции, лет		Срок службы по экспертным оценкам, лет
	средний	минимальный	
Железобетонный парапет	121	27	20
Каменный парапет	262	112	60
Железобетонный карниз	104	12	30
Железобетонная балка	219	100	80
Стальная балка	306	182	100
Преднапряженная балка	180	123	100
Железобетонная плита	203	111	60
Преднапряженная плита	233	217	100
Железобетонная колонна	218	131	60
Железобетонная домкратная балка	205	80	30
Торец железобетонной балки	82	34	30
Железобетонный лестничный марш	96	39	30
Железобетон	151	77	60
Сталь	234	148	100
Гидроизоляция	79	30	30
Лакокрасочное покрытие	18	9	10
Закрытый деформационный шов	24	8	10
Заполненный деформационный шов	25	9	10

Обобщая полученные результаты, можно подразделить все СЭ на 4 группы

- a. СЭ, деградационные модели которых могут быть приняты на основании усредненных данных опыта эксплуатации, без учета конкретных конструктивных особенностей или специфики региона, например, СЭ «Заполненный шов»;
- b. СЭ, деградационные модели которых могут быть приняты на основании усредненных данных опыта эксплуатации, но должны быть уточнены с учетом конкретных конструктивных особенностей сооружения и/или специфики региона, а также условий эксплуатации, например, СЭ «Карниз железобетонный»;
- c. СЭ, деградация которых обусловлена только случайными (аварийными) ситуациями, и затраты на ремонт которых нужно прогнозировать, исходя из вероятности аварийных отказов – СЭ «Балка стальная»;
- d. СЭ, деградация которых столь существенно зависит от конкретных конструктивных особенностей сооружения, либо конструктивного окружения, что их деградационные модели должны назначаться при составлении инспекционной схемы, а не задаваться автоматически в зависимости только от вида СЭ, например, СЭ «Торец железобетонной балки», СЭ «Сталь», СЭ «Железобетон».

Таким образом, в целях получения более или менее достоверного прогноза необходим, как минимум, учет качества СЭ, а также взаимного влияния конструктивного окружения.

Учет качества всего набора стандартных элементов и особенностей их конструктивного окружения представляется весьма сложной математической задачей. Однако в рамках СУМ эта задача может быть решена достаточно простыми средствами, при использовании индивидуальных для каждого СЭ деградационных моделей, с коэффициентом нормировки равным

$$\lambda_i = k_{qi} * k_{inf,j} * \lambda_{0i},$$

где λ_i – коэффициент нормировки для i -того СЭ,

k_{qi} - коэффициент качества i -того СЭ,

$k_{inf,j}$ - коэффициент влияния j -того СЭ,

λ_{0i} – исходный коэффициент нормировки (хранящийся в каталоге) рассматриваемого типа СЭ; принимается по среднему сроку службы в соответствии с процедурой адаптации исходных данных по результатам инспекции.

Коэффициент качества (k_{qi}) характеризует индивидуальные свойства элемента, влияющие на срок его службы. Он определяется отношением фактического остаточного срока службы, получаемого по результатам инспекции к исходному, заложенному в Каталоге деградационных моделей:

$$k_{qi} = \lambda_{real} / \lambda_{0i} \text{ при } k_{inf,j} = 1$$

Если значения k_{qi} выходят за пределы среднестатистического разброса, то рассматривается два возможных варианта: ошибка инспекции и наличие влияния конструктивного окружения, которое может быть, как позитивным (например, влияние облицовки на железобетон), так и негативным (нарушение гидроизоляции, выход из строя деформационных швов и т.п.).

Если инспекция выполнена качественно, то определяется элемент влияния, и в расчет вводится коэффициенты влияния, который принимается в зависимости от соотношения коэффициентов качества на данном сооружении и состояния элемента влияния

$$k_{inf,j} = f(k_{qi} / k_{q,med}; COND_j),$$

где k_{qi} – коэффициент качества рассматриваемого элемента;

$k_{q,med}$ – среднее значение коэффициентов качества однотипных СЭ на данном сооружении, входящих в пределы среднестатистического разброса.

Помимо учета индивидуальных свойств рассматриваемого СЭ и контрольных функций объективности инспекции, коэффициент качества может быть принят, как критерий назначения того или иного ремонтного воздействия, например, устройства защитного покрытия, или замены элемента более качественным.

Рассмотрим в качестве примера фрагмент железобетонной плиты проезжей части на одном из московских мостов. Плита рассматривается как совокупность стандартных элементов: СЭ-6060 «Плита железобетонная», СЭ-1020 «Железобетон», СЭ-3020 «Гидроизоляция». Оценка значений параметров деградационных моделей по результатам инспекции приведена в табл.3.

Таблица 3.

Результаты инспекции

Средние значения по всем сооружениям									
3020		$T_0 =$	79			$L =$	0,00877	$D_{cu} =$	2002
1020		$T_0 =$	151				0,00459		
6060		$T_0 =$	203				0,00341		
Значения по конкретному сооружению									
			№	N	COND	Tre	Kqi	Kqi,med	Kinf,j
3020	Гидроизоляция		107	9	3	47	1,56	1	1
1020	Железобетон		107	9	2,5	47	2,46	1	2,46
6060	Железобетонная Плита		107	9	1,5	47	1,63	1	1,63

Для данных стандартных элементов характерен более интенсивный, чем среднестатистический износ вследствие низкого качества изоляции ($k_{q3020} > 1$). Для «железобетона» и «плиты железобетонной» значения k_q также велики ($k_{q1020} > 2$, $k_{q6060} > 1.6$), что указывает на негативное влияние состояния соответственно «гидроизоляции» и «железобетона».

На рис. 6 показаны графически проиллюстрированы деградационные модели компонентов конструкции с учетом и без учета их качества и влияния друг на друга. Как видно из рисунка, отказ

конструкции плиты при отсутствии ремонта может наступить на 74-й год эксплуатации, в то время как по среднестатистическому прогнозу без учета влияния состояния железобетона и изоляции – на 200-й год.

В случае принятия стратегии ремонта «ничего не делать» на период до отказа конструкции плиты и ее последующей замены межремонтный срок для плиты составит 55-75 лет в зависимости от качества изоляции и железобетона (рис. 7).

Напротив, если на 30-й год эксплуатации, при появлении первых признаков выхода из строя изоляции (COND=2) своевременно выполнять ее замену на более качественную, то потребность повторного ее ремонта и санации железобетона возникнет на 115-й год (рис.8). Таким образом, за счет оптимизации стратегии ремонта с учетом взаимного влияния стандартных элементов, срок службы конструкции плиты может быть увеличен более, чем вдвое (147-175 лет). При этом существенно снижаются затраты на содержание сооружения (рис. 9). Результаты расчета затрат, приведенных к первому году срока службы (планируемого периода), по формуле:

$$Z_{np} = Z * (1+f)^{n-k}$$

где Z – абсолютная величина затрат, f – ставка кредитования, n, k – соответственно номера последнего года планируемого периода и года, в котором производится ремонт, приведены в табл.4

Табл. 4 Затраты на ремонт железобетонной плиты, приведенные к первому году эксплуатации

f	Нулевая стратегия		Оптимальная стратегия	
	абсолютные затраты, руб/м ²	удельные затраты, руб/(м ² *год)	абсолютные затраты, руб/м ²	удельные затраты, руб/(м ² *год)
0.00%	825.00	4.85	351.50	2.06
3.00%	7125.06	41.91	841.87	4.95
5.00%	42370.88	249.24	4173.86	24.55

Выводы

Основываясь на обработке результатов стандартной инспекции, можно сделать следующие выводы:

1. Экспертные оценки чаще всего дают заниженный прогноз состояния, соответствующий нижней границе среднестатистического разброса сроков службы. Для большинства СЭ такой подход не оправдывается и дает существенно неверные результаты, что делает необходимым корректировку параметров деградационных моделей по результатам инспекций.
2. Деградация несущих и ограждающих конструкций автодорожных транспортных сооружений в основном обусловлена износом их материала. Силовая деградация практически не проявляется или имеет случайный характер.
3. Интенсивность износа строительных и защитных материалов во многом определяется их индивидуальным качеством, конкретным влиянием конструктивного окружения и степенью их защищенности от агрессивного воздействия. Недоучет этих факторов приводит к заметным погрешностям в прогнозе состояния элементов сооружения.
4. Применимость общего принципа описания деградации транспортных сооружений и их составных частей (стандартных элементов) плавной монотонной кривой, принятого в мировой практике, не подтверждается результатами стандартных инспекций, проведенных при эксплуатации СУМ г. Москвы. Представляется целесообразным описание деградации СЭ с учетом их физической природы, качества изготовления и взаимного влияния в конструктивном окружении. С этой целью СЭ, помимо своих метрических параметров, должен характеризоваться показателями качества, а набор СЭ – показателями взаимного влияния. Эти параметры должны определяться индивидуально по результатам инспекций.

Фактические показатели качества могут быть также использованы для оценки объективности инспекции и в виде критерия для принятия решений по виду и объемам ремонтных воздействий.

5. Прогнозирование деградации конструкций с учетом качества и взаимного влияния компонентов (СЭ) друг на друга может служить основой выбора оптимальных ремонтных стратегий, позволяющих обеспечить значительное снижение затрат на содержание сооружений..

Литература

1. Thompson P.D., Shepard R.W. Pontis. Characteristics of Bridge Management Systems. 7th Conference on Bridge Management, 1993, TX, USA, p.p. 35-42.
2. V. M. Kuznetsov, G. Tseitlin, V. Hitrov, J. Zaitchik, G. Brodski, E. Brodskaia, Y. Enutin, V, Shesterikov. "Bridge Management System for City of Moskow" – 9th International Bridge Management Conference, Orlando, Florida, USA, 2003, p.p. 96-101.
3. Определение и прогнозирование износа элементов мостовых сооружений на автомобильных дорогах Краснодарского края. РДН218.05.14-2000. Москва-Краснодар, 2001
4. В. К. Екимов, В. Н. Федосеев, Ю. А. Енютин (ГУП «Гормост»), к.т.н. Г. С. Бродский ("AGA, Inc." США), к.т.н. И. М. Сапронов (ООО «Сервис-Мост»). «Методика и опыт проведения стандартной инспекции мостов» - Наука и техника в дорожной отрасли, №4, Москва, 2003 г.
5. Zhang Z., Sun X., Wang X. Determination of bridge deterioration matrices with state national bridge inventory data – 9th International Bridge Management Conference, Orlando, Florida, USA, 2003, p.p. 207-218
6. R.W. Shepard and M.B. Johnson. California Bridge Health Index, IBMC-005, California Department of Transportation // International Bridge Management Conference, Denver, Colorado, 1999, Preprints, Volume II, K1.
7. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения, М, 2000, 383 с.