

ДЕГРАДАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ОСТАТОЧНЫЙ РЕСУРС ДОЛГОВЕЧНОСТИ МОСТОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Васильев Александр Ильич, д-р. техн. наук, проф.,
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, 655178@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается влияние деградационных процессов на грузоподъёмность несущих мостовых конструкций с целью оценки остаточного ресурса их долговечности. Исследованы характер и темпы коррозионного и усталостного износа конструкций, а также влияние на снижение запасов грузоподъёмности возрастающих во времени эксплуатационных автомобильных нагрузок. Построено вероятностное распределение воздействий автомобильных нагрузок на мосты, аппроксимированное нормальным законом (распределение Гаусса). Введено понятие *обеспеченности предельного состояния*, как величины превышения грузоподъёмностью среднего значения эксплуатационных нагрузок, исчисленной в средних квадратических отклонениях. В качестве критерия предельного коррозионного износа для всего срока эксплуатации моста выбрано нормативное значение обеспеченности первого предельного состояния. Момент снижения фактической обеспеченности до нормативного уровня определяет ресурс долговечности конструкции. Долговечность по признаку усталостного износа оценивается на основе линейной теории накопления усталостных повреждений.

Ключевые слова: автомобильная нагрузка, грузоподъёмность, износ, коррозия, мост, обеспеченность, предельное состояние, ресурс долговечности конструкции, усталость.

DEGRADATION PROCESSES AND RESIDUAL RESOURCE DURABILITY OF BRIDGE ELEMENTS

Vasilyev Alexander I., Dr. Sc., professor,
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, 655178@mail.ru

Abstract. The article considers the impact of degradation processes on the load capacity of load-bearing bridge structures in order to assess the residual life of their durability. The nature and rates of corrosion and fatigue wear of structures, as well as the impact of increasing operational vehicle loads on the reduction of load capacity stocks are studied. A probabilistic distribution of the effects of operational automobile loads on bridges is constructed, approximated by the normal law (Gauss distribution). The concept of non-exceedance probability of the limit state is introduced, as the value of exceeding the load

capacity of the average operating loads, calculated in average square deviations. The standard value of the non-exceedance probability of the first limit state is selected as a criterion for limiting corrosion wear for the entire life of the bridge. The moment when the actual non-exceedance probability is reduced to the standard level determines the durability resource of the structure. Durability due to fatigue wear is estimated based on the linear theory of fatigue damage accumulation.

Keywords: bridge, corrosion, durability resource of the structure, fatigue, limit state, live load, non-exceedance probability, probability, wear.

Введение

Проблема снижения грузоподъёмности и долговечности мостовых сооружений (далее – мостов) вследствие физического износа несущих конструкций не перестаёт быть актуальной в течение десятилетий.

Чтобы более-менее успешно противостоять деградационным процессам, обуславливающим износ конструкций, необходимо понимать их природу и уметь оценивать их интенсивность и влияние на грузоподъёмность и долговечность мостов.

Кроме того, при оценке остаточного ресурса долговечности мостовых элементов необходимо учитывать рост во времени эксплуатационных нагрузок от транспортных средств.

В настоящей статье рассматриваются два наиболее опасных деградационных процесса:

- **коррозионный** износ конструкций, который зависит от климатических условий, а также характера и степени вредных техногенных воздействий;

- **усталостный** износ, который является результатом переменных по величине воздействий подвижных эксплуатационных нагрузок.

Оба деградационных процесса протекают во времени на фоне возрастания эксплуатационных нагрузок, что ускоряет темпы износа. Поэтому для оценки остаточного ресурса долговечности мостовых элементов необходимо, кроме изучения указанных выше процессов,

исследовать также воздействия подвижных эксплуатационных нагрузок на мосты, как функции времени.

1. Анализ воздействий на мостовые элементы нагрузок от тяжёлых автотранспортных средств

Статистический анализ воздействий на мостовые элементы нагрузок от тяжёлых автотранспортных средств проведён на базе данных, использованных при обосновании нормативной нагрузки А14 [1], а также результатов наблюдений за составом автомобильного движения на дорогах федерального значения. Исследования выполнялись в следующем порядке:

- проведение статистического анализа параметров движения на указанных выше участках дорог и по сумме всех данных;
- моделирование случайной автомобильной колонны;
- загрузка случайными автомобильными колоннами линий влияния усилий различной длины и формы;
- построение вероятностного распределения усилий в мостовых элементах и определения параметров этого распределения (среднего значения \bar{K} и среднего квадратического отклонения $\sigma = \mu \cdot \bar{K}$), выраженных в классах нагрузки АК.

С целью формализации параметров грузового автомобильного движения состав грузового автомобильного парка структурирован в виде схем условных автомобилей в зависимости от числа осей (от двух до шести). При этом, исходя из анализа структуры автомобильного движения на дорогах высших категорий, определены доли (вероятности появления на мосту) каждой схемы (табл. 1).

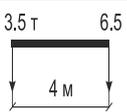
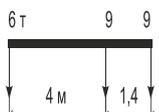
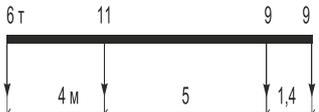
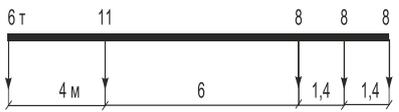
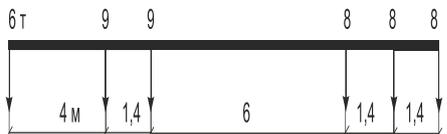
Эта процедура выполнена как для современного парка (2020 год), так и для перспективного (2120 год) с учётом вероятного роста масс и осевых нагрузок автотранспортных средств со скоростью порядка 0,3% в год.

Указанная скорость определена экстраполяцией результатов

ретроспективного анализа состава автомобильного парка за период с 1950 по 2000 годы.

Таблица 1

Схемы условных автомобилей и их доли на 2020 год

Тип	Наименование схемы	Схемы условных автомобилей	База, м	Полная масса, т	Доля %
2	Схема двухосных грузовых автомобилей		4	10	42
3	Схема трёхосных автомобилей		5,4	24	38
4	Схема четырёхосных автотранспортных средств		10,4	35	10
5	Схема пятиосных автотранспортных средств		12,8	41	8
6	Схема шестиосных автотранспортных средств		14,2	48	2

Примечание. Для конкретных объектов при наличии необходимой информации доли каждой схемы могут быть уточнены.

Загружение поверхностей влияния различной длины случайными автомобильными колоннами с двух полос движения производилось перебором всех возможных вариантов с помощью специальной компьютерной программы «ЗАЛИВ», разработанной канд. техн. наук М. Л. Хазановым. Принималось соотношение вкладов в усилие первой и второй колонн 1:0,5.

Состав колонны определяется случайными комбинациями различных типов условных автомобилей.

Вероятность $P(A)$ проезда по мосту колонны «А» из m автомобилей, в составе которой m_i машин каждого i -го типа ($\sum m_i = m$) в соответствии с [2] определяется формулой

$$P(A) = m! \cdot \prod \frac{\mu_i^{m_i}}{m_i!} \quad (1)$$

где m_i – число автомобилей в колонне «А» i -го типа, ($\sum m_i = m$);

μ_i – вероятность появления автомобиля i -го типа, ($\sum \mu_i = 1$).

Спектр воздействий на мостовые элементы нагрузок от тяжёлых автотранспортных средств, вследствие одновременного совокупного влияния на величину воздействий разных случайных параметров (состав колонны, расстояния между автомобилями, их загруженность) аппроксимируется нормальным распределением (распределение Гаусса) [2]. Это, в частности, видно из примера загрузки поверхности влияния протяжённостью 100 м треугольного очертания с вершиной в середине (рис. 1).

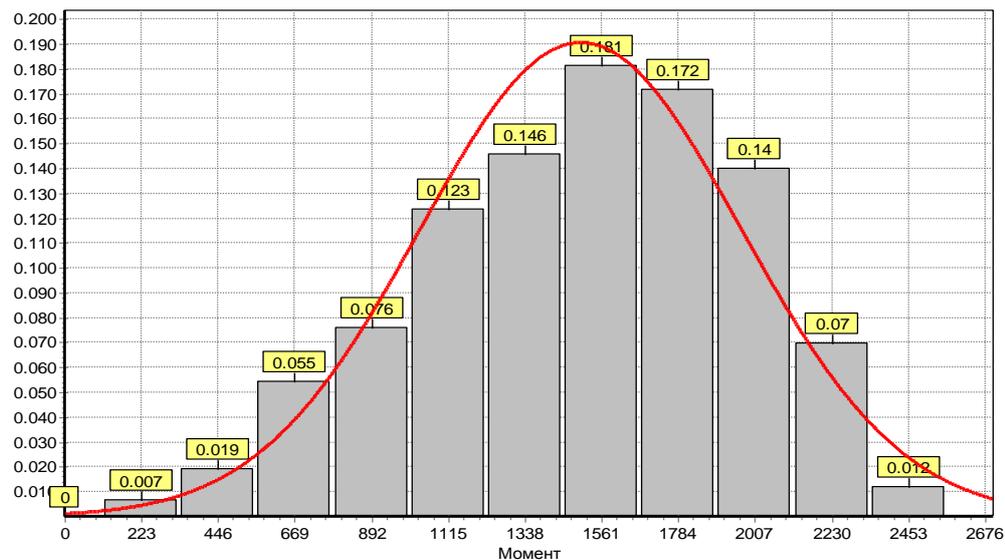


Рис. 1. Плотность распределения вероятностей усилий при загрузке поверхности влияния протяжённостью 100 м треугольного очертания с вершиной в середине

Результаты загрузок характерных поверхностей влияния показаны в табл. 2.

Параметры распределения усилий от случайных автомобильных нагрузок

Длина поверхно сти влияния, м	Усилие от нагрузк и А1, тм	Параметры распределения усилий, тм/класс			
		Среднее	Стандарт	Коэф-т вариации	Первое предельное состояние $\gamma_1 = 3,0$
По состоянию на 2020 год					
30	30,9	234/7,6	70	0,30	444/14,4
60	95,6	673/7,0	201	0,30	1276/13,3
100	222,6	1473/6,6	453	0,30	2832/12,7
По состоянию на 2120 год					
30	30,9	283/9,2	75	0,26	508/16,4
60	95,6	840/8,8	233	0,28	1539/16,1
100	222,6	1817/8,2	549	0,30	3464/15,6

Анализ полученных результатов даёт возможность обобщить и формализовать параметры распределений усилий в следующем виде:

Среднее значение класса автомобильной нагрузки $\bar{K}(t)$ для всех длин загрузки на 2020 год равно 7; на 2120 год – 9.

Таким образом, на момент t имеем $\bar{K}(t) = 7 + 0,02t$. Отсчёт времени при этом ведётся от 2020 года, как на будущее, так и ретроспективно.

Во всех случаях значения коэффициентов вариации η близки и варьируются от 0,25 до 0,30. в течение срока эксплуатации. В запас надёжности можно принять – $\eta = 0,30$.

Это позволяет рассматривать полученное распределение воздействий от автомобильных нагрузок, как нормативное, не зависящее от длины и формы поверхности влияния.

2 Коррозионный износ

2.1. Определения

При изложении метода оценки коррозионного износа приняты следующие определения:

- *коррозионный износ конструкций* – относительное снижение их грузоподъёмности вследствие коррозионного процесса;
- *эксплуатационная нагрузка* – нагрузка от грузовых автотранспортных средств при нормальных условиях движения;
- *грузоподъёмность несущего элемента моста (G)* – максимальное допустимое усилие в этом элементе от воздействия эксплуатационных нагрузок;
- *проектная грузоподъёмность несущего элемента моста (K)* – расчётная автомобильная нагрузка (с учётом коэффициента надёжности);
- *предельное состояние* – состояние, при котором усилия от эксплуатационных нагрузок (S) достигают грузоподъёмности, то есть, $S \geq G$;
- *обеспеченность предельного состояния (γ)* – величина превышения грузоподъёмностью среднего значения эксплуатационных нагрузок, исчисленная в средних квадратических отклонениях (стандартах, σ);
- *проектная обеспеченность предельного состояния ($\gamma_{пр} = 3$)* – обеспеченность расчётной нагрузки на конец срока службы моста.

Фактическая обеспеченность предельного состояния не должна быть ниже проектной обеспеченности в течение всего срока службы моста.

2.2 . Скорость коррозионного износа

В настоящей статье анализируется коррозионный износ металла вследствие хлоридной коррозии. Другие виды коррозии менее опасны для мостовых конструкций.

В металлических пролётных строениях коррозионный износ характеризуется изменением размеров сечений элементов и, соответственно, их геометрических характеристик (площадь, момент инерции, момент сопротивления). Ввиду многообразия конструктивных форм (балки, коробки, металлическая или железобетонная плита проезжей части) вывести какую-либо общую зависимость между износом и грузоподъёмности не представляется возможным. Она определяется в каждом конкретном случае.

Для железобетонных пролётных строений применительно к работе на изгиб такая оценка возможна. Действительно, коррозионный износ арматуры практически линейно влияет на снижение несущей способности, а значит, и грузоподъёмности конструктивного элемента.

Коррозия металла в мостовых конструкциях, как правило, начинается через некоторое время после ввода моста в эксплуатацию (срок «приработки», термин Росдорнии). На основе имеющегося опыта среднее время до начала коррозии можно принять для открытых стальных конструкций – от 3 до 7 лет; для арматуры железобетонных конструкций – от 5 до 15 лет.

Коррозионный износ обусловлен вредными воздействиями солесодержащих выбросов автотранспортных средств, антигололёдными реагентами на основе солей хлорной кислоты, а также агрессивным влиянием атмосферы.

Все эти факторы удобно формализовать в виде коэффициентов к средней скорости коррозии стали \bar{V} (в зоне нормальной влажности, для городских условий и средней категории агрессивности атмосферы).

Таким образом, скорость коррозии для *стальных конструкций* ($V_{ст}$) определяется (2):

$$V_{ст} = \bar{V} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3, \quad (2)$$

где \bar{V} – средняя скорость коррозии стали (в зоне нормальной влажности, для городских условий и средней категории агрессивности атмосферы), принимается равной 20 мкм/год [3];

k_1 – коэффициент, учитывающий условия влажности [4] – от 0,9 до 1,1;

k_2 – коэффициент, учитывающий условия местности (сельская, городская, промышленная, морская), от 0,5 до 2,0 [3];

k_3 – коэффициент, учитывающий агрессивность атмосферного воздействия [5] – от 0,1 до 4,0.

Оценка скорости коррозии *железобетонных конструкций* ($V_{жб}$) требует введения дополнительных коэффициентов (3):

$$V_{жб} = V_{ст} \cdot k_4 \cdot k_5 \cdot k_6. \quad (3)$$

Здесь k_4 – коэффициент, учитывающий пониженную скорость коррозии арматуры железобетонных конструкций по сравнению со стальными конструкциями;

$k_5 = 35/B$ – коэффициент, учитывающий класс бетона по прочности, принимается для класса бетона В35 равным 1,0;

$k_6 = 8/W$ – коэффициент, учитывающий марку бетона по водонепроницаемости принимается для W8 равным 1,0.

Поскольку в процессе эксплуатации характер агрессивного воздействия на мосты практически не меняется, скорость коррозии можно считать постоянно и коррозионный процесс – линейным

Скорость коррозии арматуры после появления коррозионных трещин раскрытием 0,3 мм возрастает. Можно для определенности принять в этом случае скорость коррозии в два раза выше, чем на предыдущей стадии.

Экспериментальная оценка скорости коррозии металла в процессе обследования мостовых конструкций производится по двум базовым точкам: на момент начала коррозии и на момент обследования. Глубина коррозии определяется при обследовании непосредственным измерением оставшейся толщины корродируемого элемента или толщины продукта коррозии, которая примерно в 2,5 – 3 раза превышает толщину корродированного металла.

При наличии *коррозионных трещин* в защитном слое бетона оценку глубины коррозии арматуры возможно оценивать по ширине раскрытия трещины, используя геометрическую интерпретацию механизма её образования [6]. Зависимость между глубиной коррозии и шириной раскрытия трещины при этом описывается эмпирической формулой (4)

$$h = \frac{\delta \cdot l}{8H}, \quad (4)$$

где h – глубина коррозии;

δ – ширина раскрытия трещины, измеряется при обследовании;

l – длина участка отслоения выпираемого бетона;

H – толщина защитного слоя бетона.

Все размеры даются в мм.

Для наиболее распространённого случая ($l = 100$ мм и $H = 25$ мм) эта зависимость примет простой вид (формула 5):

$$h = 0,5 \delta. \quad (5)$$

Эта зависимость вполне корректно коррелируется с результатами исследований видного испанского учёного К. Andrade [7].

2.3 . Критерий предельного состояния

В начале эксплуатации запасы по грузоподъёмности и по обеспеченности достаточно велики за счёт норм автомобильной нагрузки, учитывающих перспективное возрастание эксплуатационных грузов, а также вследствие отсутствия физического износа.

Однако со временем фактическая грузоподъёмность уменьшается, а эксплуатационные нагрузки возрастают (рис. 2). Вследствие этого обеспеченность также является убывающей функцией времени – $\gamma(t)$.

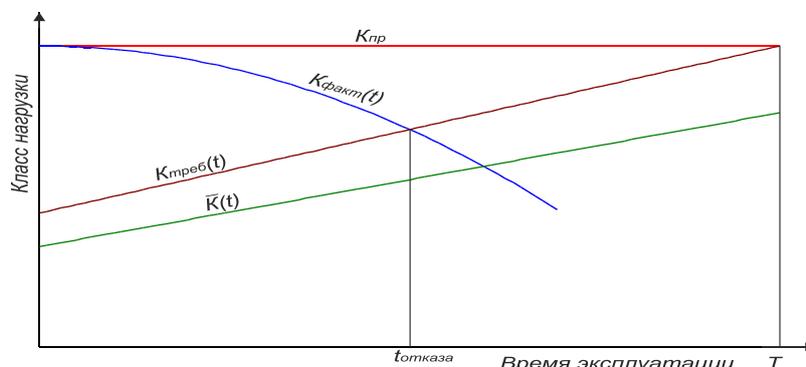


Рис. 2. Изменение в процессе эксплуатации фактической грузоподъёмности и реальных автомобильных нагрузок

$K_{пр}$ – проектная грузоподъёмность, соответствующая сроку службы моста T ;

$\bar{K}(t)$ – среднее значение эксплуатационной нагрузки на момент (t) ;

$K_{факт}(t)$ – фактическая грузоподъёмность на момент (t) ;

$K_{треб}(t)$ – требуемая минимальная грузоподъёмность на момент (t) из условия проектной обеспеченности $\gamma_{пр} = 3$ от предельного состояния;

$t_{отказа}$ – момент наступления предельного состояния.

Когда значение $\gamma(t)$ сравнивается с проектной величиной (рис. 2) наступает предельное состояние. Естественно, при этом возникает необходимость восстановительного ремонта.

Таким образом, критерием предельной величины износа в момент (t) является условие равенства обеспеченности фактической грузоподъёмности на этот момент проектному значению $\gamma_{пр} = 3$, или, что то же самое, должно выполняться равенство (6)

$$K_{факт}(t) = K_{треб}(t), \quad (6)$$

Поскольку для железобетонных конструкций износ пропорционален потере сечения арматурных стержней, то для оценки фактической грузоподъёмности $K_{факт}(t)$ может быть применена формула (7)

$$K_{\text{факт}}(t) \approx K_{\text{пр}} \cdot \left(1 - (1 + \alpha) \cdot \frac{(4V \cdot t)}{d}\right), \quad (7)$$

где V – скорость коррозии (мм/год);

$\alpha = S_{\text{пост}} / S_{\text{вр}}$ – соотношение воздействий от проектных постоянной $S_{\text{пост}}$ и временной $S_{\text{вр}}$ нагрузок;

d – диаметр рабочей арматуры (мм).

3. Усталостный износ стальных конструкций

При изложении метода оценки усталостного износа приняты следующие определения:

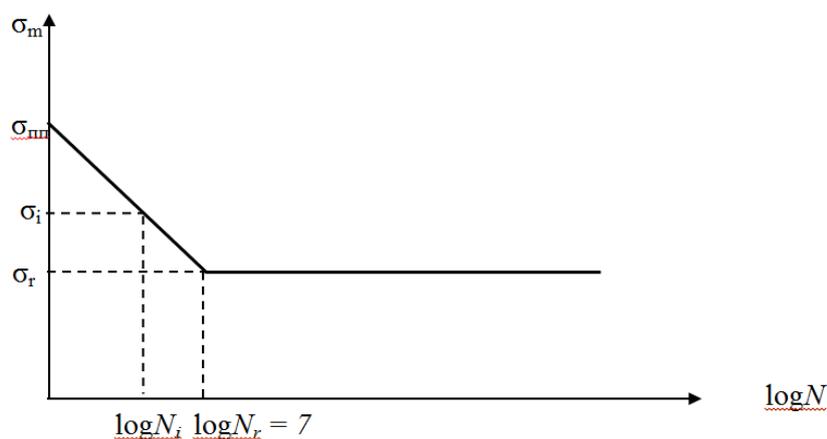
- **усталостный износ конструкции** – накопление в этой конструкции усталостных повреждений;
- **мера усталостного повреждения D** ($0 \leq D \leq 1$) – определяется на основе теории линейного накопления усталостных повреждений [8]. Значение $D = 1$ соответствует моменту усталостного разрушения, то есть, появлению усталостной макротрещины;
- **предельное число циклов загрузений N** – для каждого уровня максимальных напряжений соответствует моменту усталостного разрушения;
- **коэффициент асимметрии $\rho = \sigma_{\text{min}} / \sigma_{\text{max}}$** – отношение возникающих в цикле загрузения напряжений, минимального (по абсолютной величине) к максимальному;
- **предел выносливости** – значение напряжения σ_{max} , при напряжениях ниже которого усталостных повреждений не наступает.

Оценка усталостного износа

Оценка усталостного износа базируется на формализованной кривой Вёллера (рис. 3).

Характерной точкой на этом графике является точка перелома, соответствующая пределу выносливости.

В европейских нормах [9] принято, что функция усталости на участке от 1 цикла до $5 \cdot 10^6$ циклов убывает по кривой третьей степени, а при более $5 \cdot 10^6$ циклов – по кривой пятой степени. Исходя из этого положения, можно принять применительно к мостовым конструкциям, что предел выносливости соответствует 10^7 циклам, поскольку при большем количестве циклов снижение соответствующих напряжений незначительно.



*Рис.3. Формализованная кривая усталости
ось σ_m – шкала максимальных напряжений;
ось $\log N$ – логарифмическая шкала предельных циклов нагружений;
 σ_{mn} – предел прочности стали;
 σ_r – предел выносливости.*

Зависимость между пределом выносливости $\sigma_{\text{вын}}$, коэффициентом асимметрии ρ и пределом прочности σ_{mn} можно представить формулой (10) Джонсона – Гудмана [10]

$$\sigma_{\text{вын}} = \frac{0,5\sigma_{mn}}{1 - 0,5\rho} \quad (8)$$

Оценка снижения долговечности мостовых конструкций в результате усталостного износа

Расчет мостовых конструкций на выносливость заключается в оценке их долговечности по признаку усталости, которая, в свою очередь, оценивается *мерой усталостного повреждения* D ($0 \leq D \leq 1$),

Усталостное микроповреждение от одного цикла загрузки с уровнем напряжений σ_{\max} и коэффициентом асимметрии ρ определится формулой (9):

$$\Delta D = 1 / N(\sigma_{\max}, \rho_i) \quad (9)$$

В процессе эксплуатации моста в течение некоторого промежутка времени, например, одного года, происходит определенное число n загрузений данного элемента автомобильной нагрузкой. В зависимости от структуры автомобильного движения на данном участке дороги эти n загрузений распределяются в виде гистограммы по уровням возникающих напряжений σ_i . Тогда приращение меры усталостного повреждения ΔD за этот год согласно линейной теории накопления усталостных повреждений определится по формуле

$$\Delta D(n) = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i(\sigma_i, \rho_i)}, \quad (10)$$

где k – число участков гистограммы;

n_i – число загрузений, при которых в элементе возникает

напряжение σ_i ; при этом $\sum_{i=1}^k n_i = n$.

С допустимым приближением можно считать, что величина приращение меры усталостного повреждения $\Delta D(j)$ за j -й год является линейной функцией времени.

Долговечность элемента по признаку усталости $t_{уст}$ определяется из условия $D(t_{уст}) = 1,0$ (рис. 4)

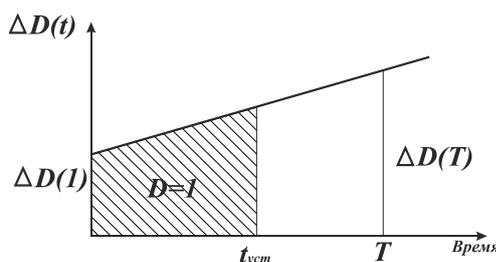


Рис. 4. Оценка долговечности элемента по признаку усталости

Поскольку расчёт на усталость относится к расчётам по первой группе предельных состояний, к полученному значению $T_{уст}$ вводится коэффициент надёжности $n_{уст} = 0,9$.

Для эксплуатируемых мостов средняя автомобильная нагрузка на начало эксплуатации определяется линейной экстраполяцией по базовым точкам – 2020 год и 2120 год.

Все остальные параметры и процедуры остаются такими же, как и для новых мостов.

Выводы

1. Наиболее существенными деградационными процессами, снижающими грузоподъёмность и долговечность мостов, являются коррозионный износ и накопление усталостных повреждений. Для оценки остаточного ресурса долговечности мостовых элементов необходимо исследовать указанные деградационные процессы, также воздействия подвижных эксплуатационных нагрузок на мосты, как функции времени.

2. Воздействия на мосты эксплуатационных нагрузок от грузовых автотранспортных средств носят вероятностный характер и распределены по нормальному закону.

Возрастание эксплуатационных нагрузок во времени может быть описано линейной функцией $\bar{K}(t) = 7 + 0,02t$, где $t = 0$ принято для 2020 года.

Параметры нормального распределения, выраженные в классах схемы АК, в любой момент времени одинаковы для всех длин загрузки. Коэффициент вариации этого распределения может быть принят равным 0,3 для всего срока службы моста.

3. Коррозионный износ обусловлен вредными воздействиями соледержащих выбросов автотранспортных средств, антигололёдными реагентами на основе солей хлорной кислоты, а также агрессивным влиянием атмосферы.

Вероятностным критерием предельной величины износа в момент (t) является условие равенства обеспеченности фактической грузоподъемности на этот момент проектному значению $\gamma_{пр} = 3$.

Замедление темпов коррозионного износа и увеличение ресурса долговечности мостовых конструкций достигается устройством эффективной антикоррозионной защиты.

4. Мера усталостного износа D определяется на основе линейной теории накопления усталостных повреждений в конструкции как потеря доли её усталостной прочности.

Критерием предельной степени усталостного износа является равенство $D = 1$.

Для новых мостов рекомендуется на стадии проектных расчётов производить проверку конструкций на усталость, учитывая вероятностное распределение эксплуатационных нагрузок от грузовых автотранспортных средств и прогноз возрастания нагрузок во времени.

Для эксплуатируемых мостов в случае, если мера усталостного износа достигает в сечении несущего элемента значения $D = 0,8$, рекомендуется выполнить усиление этого элемента.

Литература

1. Васильев, А.И. Новые нормативные автомобильные нагрузки на мосты / А. И. Васильев // Вестник мостостроения. - 2002.- №3-4.
2. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. - М. Изд-во Istitia, 2018.
3. Янин, Е.П. Коррозия металлов и металлических конструкций как источник загрязнения окружающей среды / Е.П. Янин // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. – 2007. - № 6. - с. 46–92.
4. Свод правил СП 131.13330. 2018 Строительная климатология.
5. ГОСТ ISO 9223-2017 Коррозия металлов и сплавов. Коррозионная агрессивность атмосферы. Классификация, определение и оценка
6. Васильев, А.И. Стадии коррозии арматуры в защитном слое бетона мостовых конструкций / А.И. Васильев, А.М. Подвальный // Мир мостов. - - 2008. - №35.

7. Андраде, К. Поверхностные трещины и величина коррозии арматуры. Ремонт, восстановление и коррозия бетона. Лондон. – 1996. - стр.263-273.
8. Болотин, В.В. Статистические методы в строительной механике / В.В. Болотин. - М.: Стройиздат, 1965.
9. EN 1993-1-9 (2005) (английский): Еврокод 3: Проектирование стальных конструкций-часть 1-9: усталость [орган: Европейский Союз в соответствии с регламентом 305/2011, директива 98/34 / ЕС, директива 2004/18 / ЕС].
10. Корчинский И.Л. Прочность строительных материалов при динамических нагрузениях / И.Л. Корчинский. - М.: Издательство литературы по строительству, 1966.

References

1. Vasiliev A.I. *Vestnik mostostroenya*, 2002, no. 3-4.
2. Wentzel E.S. *Teorya veroyatnostey (Probability theory)*. Moscow, Izdatelstvo Istitia, 2018.
3. Yanin E. P. *Problemy ocrudgausthey sredi I prirodnyh resursov*, 2007, no. 6, pp. 46-92.
4. Constructivnaya klimatologiya. Svod pravil SP 131.13330. 2018 (Constructivny klimatology. The code of rules SP 131.13330. 2018).
5. Corrozia metallov I splavov. Korroziya metallov i splavov. Korroziionnaya agressivnost' atmosfery. Klassifikaciya, opredelenie i ocenka, GOST ISO 9223-2017 (Corrosion of metals and alloys. Corrosive aggressiveness of the atmosphere. Classification, Definition and Evaluation, GOST ISO 9223-2017).
6. Vasiliev A.I., Podvalny A.M. *Mir mostov*, no. 35, 2008.
7. Andrade K. and other. *Poverkhnostnyye treshchiny i velichina korrozii armatury. Remont, vosstanovleniye i korroziya betona* (Cover Cracking and Amount of Rebar Corrosion. Concrete Repair, Rehabilitation and Corrosion), London, 1996, 263-273 pp.
8. Bolotin V.V. *Statistisheskie metodi v stroitelnoy mehanice* (Statistical methods in construction mechanics), Moscow, Stroyizdat, 1965.
9. EN 1993-1-9 (2005) (English): Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-9: Fatigue [Authority: The E uropean Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC].
10. Corchinsriy I.L. *Prochnjst stroitrlnih materialov pri dinamicheskikh nagrudgeniyah* (Strength of building materials under dynamic loads), Stroyizdat, Moscow, 1966.

Рецензент: В.М. Фридкин, д-р техн. наук, проф., МИИТ.