

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2022, №2, Том 14 / 2022, No 2, Vol 14 <https://esj.today/issue-2-2022.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/55SAVN222.pdf>

Ссылка для цитирования этой статьи:

Васильев, А. И. Длительные деградиционные процессы, влияющие на снижение грузоподъемности и долговечности мостовых сооружений в период их эксплуатации / А. И. Васильев, Ш. Н. Валиев, В. С. Шмидт, И. Г. Овчинников // Вестник евразийской науки. — 2022. — Т. 14. — № 2. — URL: <https://esj.today/PDF/55SAVN222.pdf>

For citation:

Vasilyev A.I., Valiev Sh.N., Schmidt V.S., Ovchinnikov I.G. Long-term degradation processes affecting the reduction of load capacity and durability of bridge structures during their maintenance. *The Eurasian Scientific Journal*, 14(2): 55SAVN222. Available at: <https://esj.today/PDF/55SAVN222.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.)

Васильев Александр Ильич

ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет», Москва, Россия
ООО «Научно-исследовательский институт мостов и гидротехнических сооружений», Москва, Россия

Профессор

Доктор технических наук, профессор

E-mail: 655178@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2135-7311>

Валиев Шерали Назаралиевич

ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет», Москва, Россия

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия

ООО «Малое инновационное предприятие «Научно-Инженерный Центр Мостов и Сооружений»,

Москва, Россия

Генеральный директор, доцент

Кандидат технических наук, профессор

E-mail: mosti.madi@mail.ru

Шмидт Вольдемар Сергеевич

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия

Магистрант базовой кафедры АО «Мостострой-11»

E-mail: mosti.madi@mail.ru

Овчинников Игорь Георгиевич

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Саратов, Россия

Профессор

Доктор технических наук, профессор

E-mail: bridgesar@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0617-3132>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=2922

Publons: <https://publons.com/researcher/2611921/igor-g-ovchinnikov/>

Длительные деградиционные процессы, влияющие на снижение грузоподъемности и долговечности мостовых сооружений в период их эксплуатации

Аннотация. В статье рассматривается влияние длительных деградиционных процессов, влияющих на грузоподъемность и долговечность несущих конструкций мостовых сооружений в процессе их эксплуатации. Проблема снижения грузоподъемности и долговечности мостовых сооружений вследствие физического износа несущих конструкций не перестаёт быть

актуальной в течение десятилетий. Объективно физический износ мостовых конструкций неизбежен. Полностью исключить его невозможно, но защитные меры могут его замедлить. В настоящей статье рассматриваются следующие наиболее опасные деградиационные процессы, серьёзно влияющие на грузоподъёмность и долговечность мостов: коррозия и усталость стальных конструкций и арматуры. 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. Наиболее существенными деградиационными процессами, снижающими грузоподъёмность и долговечность мостов, являются коррозионный износ и накопление усталостных повреждений. Для оценки остаточного ресурса долговечности мостовых элементов необходимо исследовать указанные деградиационные процессы, также воздействия подвижных эксплуатационных нагрузок на мосты, как функции времени. Воздействия на мосты эксплуатационных нагрузок от грузовых автотранспортных средств носят вероятностный характер и распределены по нормальному закону. 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.

Ключевые слова: автомобильная нагрузка; грузоподъёмность; износ; коррозия; мостовое сооружение; обеспеченность; предельное состояние; ресурс долговечности конструкции; усталость; вероятность; выносливость; износ; коррозия; деградация

Введение

Физический и моральный износ мостовых сооружений приводит к снижению грузоподъёмности и сокращению долговечности мостов, поэтому перед исследователями стоит весьма важная задача прогнозирования снижения грузоподъёмности и сокращения долговечности, а также разработки специальных защитных мероприятий с тем, чтобы избежать наступления аварийных ситуаций.

Очевидно, что физическому износу в той или иной мере подвержены все конструкции, в том числе и мостовые сооружения, поэтому избежать физического износа невозможно, но можно управлять его скоростью с помощью специальных защитных мер.

В настоящей статье анализируются такие процессы, вызывающие деструкцию материала мостовых сооружений и приводящие к снижению грузоподъёмности и долговечности, как *коррозионные повреждения и усталость стальных конструкций, а также коррозионные повреждения металлической арматуры в железобетонных мостовых конструкциях.*

Коррозионный износ стальных мостовых конструкций зависит агрессивности окружающей техногенной среды, климатических условий, а также напряженного состояния¹.

В результате переменного нагружения мостовых конструкций от подвижных обращающихся нагрузок, действия ветра возникает усталостный износ, также приводящий к снижению грузоподъемности и долговечности.

Очевидно, что для эффективного противодействия деградационным процессам в конструкциях мостов нужно изучать природу этих процессов, интенсифицирующие их факторы и уметь расчетным путем моделировать их влияние на такие потребительские свойства, как грузоподъемность и долговечность [4–6].

1. Критерии физического износа мостовых конструкций

Ключевым моментом в понимании и правильной оценке упомянутых процессов является выбор критериев предельной величины физического износа.

Эти критерии можно находить, учитывая такие две позиции:

- экономическая эффективность проведения восстановительного ремонта, целесообразность его проведения;
- снижение потребительских свойств (например, грузоподъемности) до опасного уровня.

Критерий экономической эффективности и целесообразности восстановительного ремонта в свое время был предложен профессором В.И. Шестериковым, и внедрен в ряде методических документов, разработанных под эгидой Росавтодора.

Представленный в настоящей статье подход опирается на требование обеспечения максимальной безопасности людей и конструкций в соответствии с Федеральным законом № 384 ФЗ (Технический регламент о безопасности зданий и сооружений) и Техническим регламентом Таможенного союза ТР ТС 014/2011 (Безопасность автомобильных дорог) с последующими корректировками.

Долговечность несущих элементов мостовых конструкций может быть связана со степенью снижения их несущей способности, и её логично интерпретировать как интервал времени до реализации соответствующего предельного состояния, а условие реализации предельного состояния полагать в качестве критерия предельной величины износа [1; 6].

В качестве критерия усталостного износа элемента можно полагать уровень накопления усталостных повреждений в этом элементе, приводящий к появлению усталостной трещины.

2. Предельные состояния по грузоподъемности

Как известно, уже довольно длительное время расчёты строительных конструкций в России ведутся с использованием методики предельных состояний, согласно которой предельное состояние реализуется при равенстве напряжений и/или деформаций, которые могут появиться в конструктивных элементах мостов, и нормируемых величин таких параметров. В методе предельных состояний левая и правая части этого равенства нормируются с определённой надёжностью, так как имеют вероятностную природу.

¹ СП 131.13330. 2018 Строительная климатология.

При анализе грузоподъёмности пролетных строений следует рассматривать два предельных состояния.

Во-первых, это обычное предельное состояние первой группы, при реализации которого возрастает опасность выхода из строя рассматриваемого несущего элемента, при этом может потребоваться разработка мер с целью предотвратить разрушение этого элемента (например, путем снижения нагрузки на него или вообще исключения его из работы).

Во-вторых, представляется целесообразным при проектировании и исследованиях мостов ввести соответствующее «критическое» предельное состояние, которое может быть чревато обрушением мостового сооружения. Расчёт на «критическое» предельное состояние по сути дела аналогичен методу расчёта «на разрушающую нагрузку».

Методика расчёта «по разрушающей нагрузке» использовалась при проектировании мостов в нашей стране с 1938 года до 1955 года. В последующий период она была вытеснена расчётом по допускаемым напряжениям и затем — по предельным состояниям. Отметим, что эта методика до 1970 года использовалась в нормах проектирования мостов в США.

Возвращение к анализу «критического» предельного состояния мостовых сооружений объясняется довольно резким изменением характера движения транспорта на дорогах общего пользования, появлением большого количества автотранспортных средств, весовые параметры которых превосходят величины нагрузок на мосты, которые регламентировались нормативными документами.

В самом деле, в последнее время грузооборот автомобильного транспорта растёт очень быстро, а тяжёлые фуры самопроизвольно формируются в колонны, в результате чего появляются нагрузки, заведомо превышающие их расчётные значения, и в результате конструкции приводятся к их «критическому» предельному состоянию. И, хотя, можно полагать, что это событие достаточно редкое, но его необходимо учитывать. Понятно, что расчёт с учетом такого предельного состояния должен проводиться при нормативных значениях величин сопротивления материалов, а коэффициенты надёжности по нагрузке и динамические коэффициенты следует принимать равными 1 [3].

Учитывая характер автомобильного движения в любой момент времени t в рассматриваемый период эксплуатации, спектр воздействий нагрузок от тяжёлых автотранспортных средств на элементы мостовых сооружений, отвечающие за грузоподъёмность моста, из-за по сути одновременного совокупного присутствия ряда случайных параметров, включающих структуру движения, интервалы между автомобилями, загруженность автомобилей, следует описывать с использованием нормального распределения (распределения Карла Гаусса), что и подтверждается при загрузении поверхностей влияния усилий в мостовых элементах от действующих эксплуатационных автомобильных нагрузок (рис. 1).

Очевидно, что в таком распределении его параметрами являются: среднее значение приложенной эксплуатационной автомобильной нагрузки $\bar{K}(t)$, выраженное в классах схемы АК, а также среднее квадратическое отклонение (стандарт) $\sigma(t)$, которое характеризует разброс действующих эксплуатационных нагрузок.

Стандарт $\sigma(t)$ может определяться по известной формуле:

$$\sigma(t) = \eta \cdot \bar{K}(t), \quad (1)$$

где η — коэффициент вариации нагрузки.

Введем такое понятие, как *обеспеченность предельного состояния* (γ), исчисляемую в стандартах (σ) величины отклонения нормируемой нагрузки от её среднего значения в сторону увеличения.

При расчете по первому предельному состоянию проектная обеспеченность для расчётной автомобильной нагрузки обычно принимается $\gamma_1 = 3,0$. В этом случае риск наступления такого предельного состояния (так называемый «недопустимый» риск) равен 0,0014.

Учитывая особую опасность критического предельного состояния, целесообразно принимать проектную обеспеченность $\gamma_0 = 5,0$, при этом риск наступления такого предельного состояния (то есть «критический» риск) равен 0,00001, а критическая нагрузка превышает расчётную АК на 25–30 %.

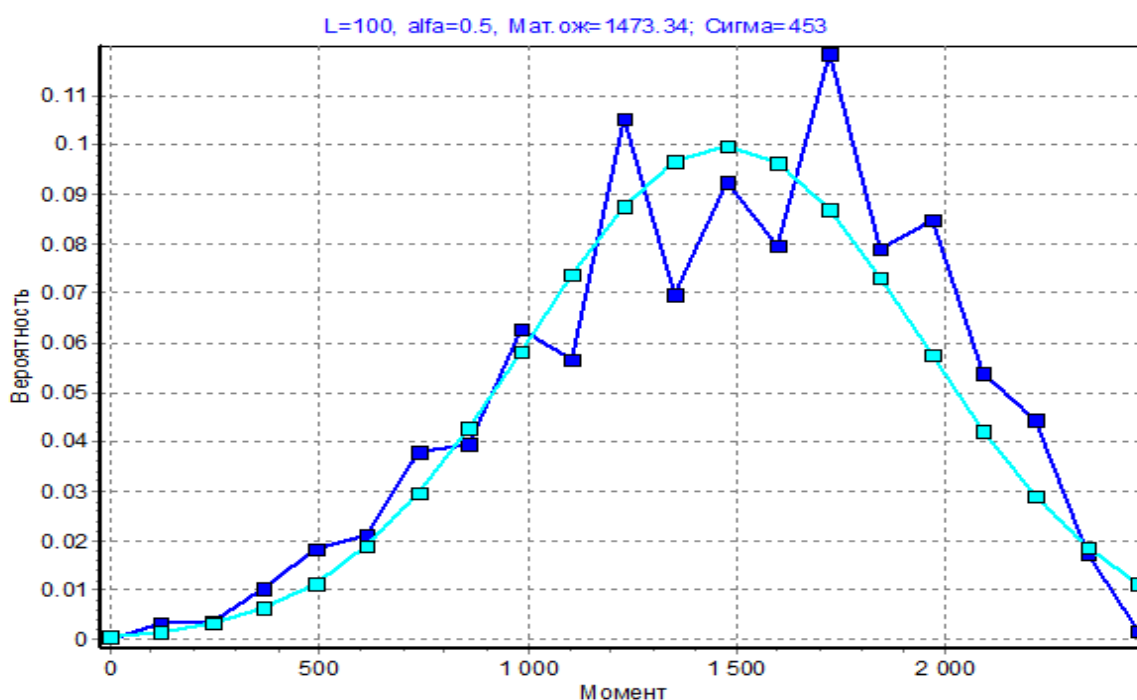


Рисунок 1. График плотности распределения вероятностей усилий при загрузке поверхности влияния изгибающих моментов в пролётом строении длиной 100 м с продольными сечениями треугольного очертания, с вершиной в середине пролёта при соотношении коэффициентов поперечной установки 1:0,5 [3]

3. Исследование воздействий нагрузок от тяжёлых автотранспортных средств на мостовые элементы

Был проведен статистический анализ воздействий нагрузок от тяжёлых автотранспортных средств на мостовые конструкции как с использованием данных, полученных во время обоснования нормативной нагрузки А14, так и данных полученных при исследовании состава автомобильного движения на федеральных дорогах РФ.

По результатам исследований были обобщены и формализованы параметры распределений усилий от эксплуатационных нагрузок в пролётах до 100 м, которые можно представить в следующем виде:

Среднее значение класса автомобильной нагрузки во всём диапазоне пролётов:

- на 2019 год — 7;
- на 2120 год — 9.

Таким образом, оценивая рост эксплуатационных нагрузок линейно, для времени t получим

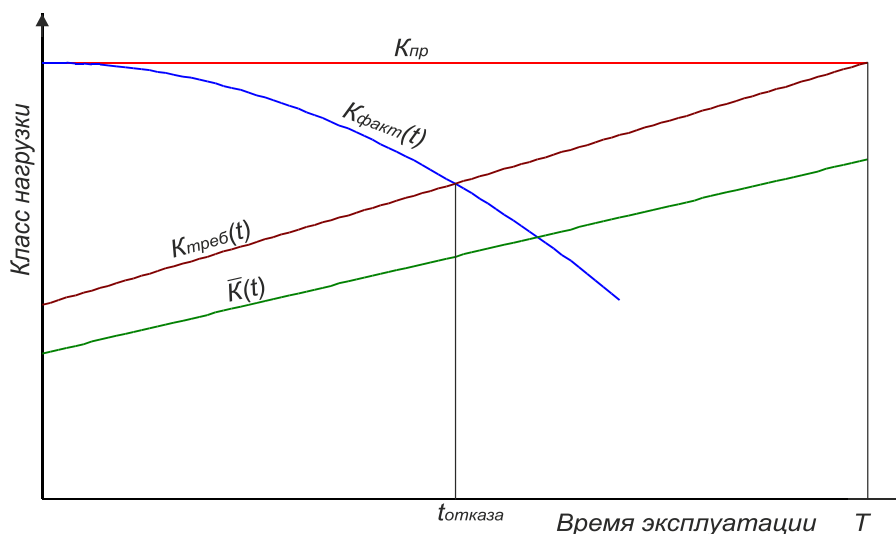
$$\bar{K}(t) = \bar{K}(0) + 0,02t. \quad (2)$$

При этом коэффициент вариации распределения усилий полагается постоянным и во всём диапазоне пролётов равным $\eta = 0,3$ в течение срока эксплуатации.

В процессе исследований установлено, что практически для всех пролётов и в рассматриваемое время, и в отдалённой перспективе критическая нагрузка больше расчётной на 25–30 %.

4. Критерии безотказной работы и установление прогнозируемого срока проведения первого ремонта

Применительно к правильно и рационально запроектированной мостовой конструкции проектное значение нормируемой автомобильной нагрузки, которое соответствует предельному состоянию, записанному в классах нагрузки АК, представляет собой грузоподъёмность.



$K_{пр}$ — проектная грузоподъёмность, к концу срока эксплуатации моста T

$\bar{K}(t)$ — среднее значение эксплуатационной нагрузки в момент времени t

$K_{факт}(t)$ — фактическая грузоподъёмность в момент времени t

$K_{треб}(t)$ — требуемая минимальная грузоподъёмность в момент t , определяемая из условия проектной обеспеченности $\gamma_{пр}$ от предельного состояния

$t_{отказа}$ — время наступления предельного состояния

Рисунок 2. Кинетика изменения фактической грузоподъёмности и реальных автомобильных нагрузок в процессе эксплуатации [4]

Очевидно, что в самом начале эксплуатации сооружения запасы и по грузоподъёмности и по обеспеченности довольно велики из-за учета нормами автомобильной нагрузки, перспективного увеличения эксплуатационной нагрузки, и из-за фактического отсутствия физического износа. Но очевидно, что с течением времени фактическая грузоподъёмность

мостового сооружения уменьшается, а действующие на него эксплуатационные нагрузки увеличиваются. Поэтому обеспеченность $\gamma(t)$ очевидно, уменьшается с течением времени.

Естественно принять, что для обоих упомянутых предельных состояний в течение всего срока службы моста их обеспеченность должна быть не ниже проектной (γ_{np}).

Когда значение $\gamma(t)$ сравнивается с проектной величиной γ_{np} , возникает необходимость восстановительного ремонта (рис. 2).

Таким образом, факторами, определяющими запасы грузоподъемности мостов, являются, с одной стороны, рост эксплуатационных нагрузок, а с другой — деграционные процессы, обуславливающие физический износ несущих конструкций.

5. Коррозионный износ металлических пролетных строений

Влияние коррозии *металлических пролетных строений* на их грузоподъемность логично учитывать путем уменьшения и размеров поперечных сечений элементов пролетных строений и их геометрических характеристик (площадей, моментов инерции, моментов сопротивления) [1; 4; 7; 13; 14–19; 21–23].

При работе на изгиб *железобетонных пролетных строений* коррозия арматуры приводит к практически линейному снижению несущей способности, и грузоподъемности.

Можно предположить, что в процессе эксплуатации характер воздействия коррозионной среды на мостовые сооружения практически не меняется, и потому скорость коррозии не меняется и коррозионный процесс разворачивается линейно во времени. При этом коррозия развивается не сразу, но после существенного ослабления антикоррозийной защиты. Для открытых металлических поверхностей этот срок (срок «приработки») составляет от 5 до 7 лет, для арматуры — от 10 до 15 лет.

Скорость коррозии V мкм/год зависит от интенсивности агрессивных техногенных и атмосферных воздействий, каждое из которых оценивается коэффициентами условий работы:

$$V = \bar{V} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \cdot k_6, \quad (3)$$

где \bar{V} — средняя скорость коррозии элемента при нормальной влажности в городских условиях при средней категории агрессивности атмосферы);

k_1 — коэффициент, учитывающий влажность среды и по СП 50.13330.2020, Приложение В, равный 1,2 для влажной, 1,0 для средней и 0,8 для сухой зон;

k_2 — коэффициент, учитывающий условия местности (для сельской местности — 0,5, для городской — 1,0, для промышленной — 1,5, для приморской — 2,0);

k_3 — коэффициент, учитывающий категорию агрессивности атмосферного воздействия принимаемый равным 0,1 для категории С1 (по ГОСТ ISO 9223 очень низкая агрессивность), 0,5 — С2 (низкая агрессивность), 1,0 — С3 (средняя агрессивность), 1,5 — С4 (высокая агрессивность), 2,0 — С5 (очень высокая агрессивность), 4,0 — С6 (экстремально высокая агрессивность);

— только для железобетонных конструкций:

$k_4 = 0,8$ — коэффициент, учитывающий более низкую скорость коррозии арматуры в железобетоне по сравнению с открытыми стальными конструкциями;

$k_5 = 35/B$ — учитывает класс бетона по прочности В, принимается равным 1,0 для бетона класса В35;

$k_6 = 8/W$ — учитывает марку бетона по водонепроницаемости W и принимается равным 1,0 для $W8$.

Приведённые выше величины средней скорости и значения коэффициентов подтверждаются рядом натуральных исследований. Так оказалось, что среднее значение скорости коррозии балок пролётных строений для 21 моста в Московской области (в зоне нормальной влажности, в сельской местности и при средней категории агрессивности атмосферы) равно 9,3 мкм/год, а расчетная оценка дала 8 мкм/год.

Экспериментальная оценка скорости коррозии металла мостовых конструкций производилась путем измерения оставшейся толщины корродируемого элемента или толщины продукта коррозии (примерно в 2,5 раза превышающей глубину пораженного коррозией слоя металла) и деления ее на прошедшее время коррозионного процесса [4; 7; 13–19].

В железобетонных конструкциях нередко вдоль корродирующей арматуры появляются коррозионные трещины, создаваемые давлением продуктов коррозии арматуры на защитный слой бетона (рис. 3) [13–19].



Рисунок 3. Появление коррозионной трещины в защитном слое ребра балки пролетного строения (фото авторов)

В этом случае оценка степени коррозии арматуры может производиться по ширине раскрытия коррозионной трещины [4; 7; 15; 16]:

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

где h — глубина коррозионного поражения элемента;

δ — измеренная при обследовании ширина раскрытия трещины в бетоне;

l — протяженность зоны отслоения бетона;

H — толщина защитного слоя бетона.

Все размеры в (4) даются в миллиметрах.

Например, в случае, если $l = 100$ мм и $H = 25$ мм, то формула (4) дает $h = 0,5 \delta$.

Таким образом, определив скорость коррозионного износа конкретного несущего мостового элемента и, следовательно, его фактическую грузоподъемность как функцию времени, а также темпы возрастания эксплуатационных нагрузок с заданной обеспеченностью, мы имеем возможность построить графики этих процессов на шкале времени (рис. 2). Точка

пересечения этих графиков определяет момент наступления предельного состояния по грузоподъёмности, когда возникает необходимость восстановительного ремонта.

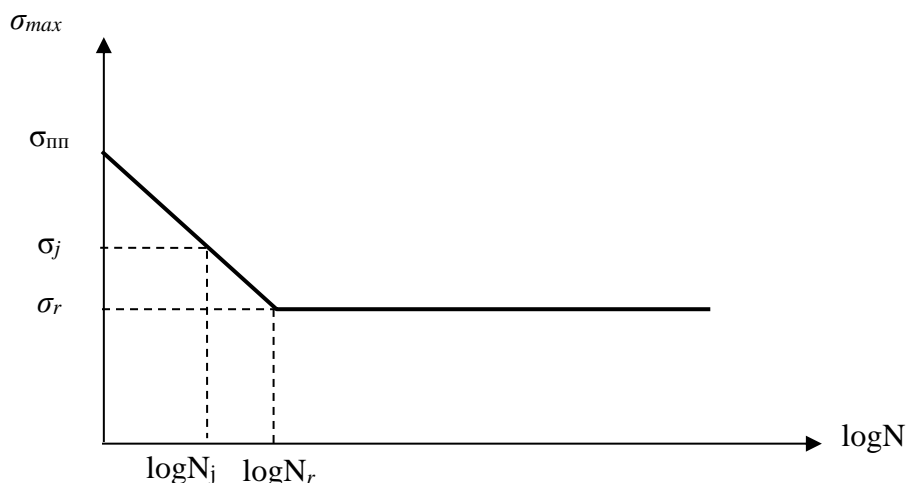
4. Усталостный износ металлических мостовых конструкций

Причиной усталостного разрушения и стальных конструкций и арматуры железобетонных конструкций является неоднородность кристаллической структуры стали. Составляющие тело металла микроскопические кристаллы имеют неодинаковую форму, размеры и по-разному ориентированы. Если на конструкцию действуют переменные напряжения, то на границах кристаллов появляются деформации, образующие микротрещины, в результате возникает усталостное микрповреждение. Под действием многократных переменных нагрузок на конструкцию эти трещины развиваются, достигая уже макроскопических размеров, что приводит к хрупкому разрушению конструкции.

Графически выраженная зависимость между амплитудой повторяющихся напряжений (σ) и предельным количеством циклов (N) напряжений, приводящих к появлению усталостных трещин называется кривой усталости Вёллера [5; 6; 12].

Схематическое изображение кривой усталости показано на рисунке 4, на котором горизонтальная шкала N_j приведена в логарифмическом масштабе.

Уровень напряжений, соответствующий точке перелома на кривой усталости, называется пределом выносливости σ_r . Как видно, усталость не наступает, если уровень возникающих напряжений ниже предела выносливости. Для мостовых конструкций количество циклов N_r , соответствующее пределу выносливости обычно принимается равным $N_r = 10^7$.



σ_{pp} — предел прочности; σ_r — предел выносливости

Рисунок 7. Схематическое представление кривой усталости [12]

Вертикальная координата на кривой усталости может быть представлена по-разному. Например, можно по вертикали откладывать размах напряжений $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$, а можно откладывать величину максимального напряжения σ_{max} , что обычно и используется при расчете мостовых конструкций, так как позволяет учесть влияние не только переменных, но и постоянных нагрузок. Но следует учитывать влияние коэффициента асимметрии $\rho = \sigma_{min}/\sigma_{max}$, на предел выносливости.

Для оценки усталости несущих мостовых конструкций можно использовать нормированную меру усталостных повреждений D ($0 \leq D \leq 1$), для определения которой используется тот или иной вариант теории накопления усталостных повреждений.

Величина усталостного повреждения d_j за один j -тый цикл загрузки, в котором напряжения изменяются от минимального по абсолютной величине значения напряжения $\sigma_{\min,j}$ до максимального по абсолютной величине значения напряжения определяется выражением:

$$d_j = \frac{1}{N_j(\sigma_{\max,j}, \rho)}, \quad (5)$$

в котором N_j — предельное количество циклов загрузки до появления видимых признаков усталостного разрушения.

Можно принять, что в процессе эксплуатации конструктивного элемента мостового сооружения в течение некоторого интервала времени (допустим, одного года), происходит m загрузок конструктивного элемента грузовыми автотранспортными средствами. Очевидно, что эти m загрузок распределяются по уровням возникающих в элементе напряжений (σ_i) в зависимости от структуры автомобильного движения на мостовом сооружении.

Тогда, используя линейную теорию накопления усталостных повреждений можно определить приращение меры усталостного повреждения $\Delta D(t)$ за t -ый год по формуле:

$$\Delta D(t) = \Delta D(m) = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i(\sigma_i, \rho_i)}, \quad (6)$$

где k — количество уровней напряжений; n_i — количество загрузок, при которых в конструктивном элементе возникает напряжение σ_i ; при этом $\sum_{i=1}^k n_i = m$.

Количество загрузок n_i с уровнями напряжений σ_i определится по параметрам распределения вероятностей p_i эксплуатационных нагрузок, приведённым выше, в разделе 3:

$$n_i = p_i \cdot m.$$

Количество загрузок m в течение одного года зависит от интенсивности L и состава грузового автомобильного движения на мосту и с учётом вероятности появления на мосту колонн той или иной численности, может быть принятым $m \approx 0,18 L$.

При отсутствии данных об интенсивности движения L по конкретному мостовому сооружению, в общем случае интенсивность движения по одной полосе мостового сооружения на дороге высшей категории при плотном движении может быть принята равной 2000 ед./сутки, что при 300 рабочих дней в году даёт $L = 600\,000$ ед./год, и $m = 108\,000$.

Если элементы мостового сооружения работают на местную нагрузку, то из-за кратного воздействия на эти элементы многоосных транспортных средств при их расчётах на выносливость интенсивность движения принимается с повышающим коэффициентом 1,4. Число загрузок элементов мостового сооружения, работающих на местную нагрузку, принимается равным интенсивности грузового движения с учётом повышающего коэффициента 1,4 и равным $m = 840\,000$.

Величина накопленного усталостного повреждения за t лет определится из выражения:

$$D(t) = \int_0^t \Delta D(t) dt = \Delta D(1) + \frac{t^2}{2} \cdot \frac{\Delta D(100) - \Delta D(1)}{99}. \quad (7)$$

Нормативная усталостная долговечность T нагружаемого мостового элемента, определится из (7) при задании предельного значения поврежденности $D = 1,0$.

Так как усталость материалов по определению является одним из предельных состояний первой группы, то для получения расчетной долговечности нормативное значение долговечности T следует умножить на коэффициент надёжности 0,9. Следовательно, $T_{расч} = 0,9 T$.

Если величина $T_{расч}$ мостового элемента меньше срока службы, установленного для этого элемента согласно², то этот элемент необходимо усилить.

Выводы

1. Основные потребительские свойства мостовых сооружений, такие как грузоподъемность и долговечность в процессе эксплуатации снижаются за счет таких длительных деградиционных процессов, как накопление усталостных повреждений под действием транспортного потока и коррозионного воздействия эксплуатационной среды, приводящего к уменьшению сечения несущих элементов и изменению их геометрических характеристик. Поэтому задача исследования особенностей воздействия подвижных нагрузок от транспортного потока на мостовые конструкции, а также особенностей и кинетики деструктирующего воздействия коррозионных эксплуатационных сред является весьма важной для оценки остаточного ресурса и долговечности мостовых сооружений.

2. Как показывают экспериментальные исследования, действующие на мостовые сооружения подвижные нагрузки, вызываемые перемещающимися по мостам грузовыми автотранспортными средствами имеют вероятностную природу и в общем случае могут быть описаны с использованием нормального закона распределения. При этом изменение подвижных эксплуатационных нагрузок с течением времени может быть представлено в виде линейной функции времени $K(t) = 7 + 0,02t$, причем значение $t = 0$ соответствует 2022 году.

3. Как показал анализ, параметры нормального закона распределения, выраженные через классы схемы АК, оказываются одинаковыми для всех длин загрузки в рассматриваемый момент времени. Причем для всего срока службы мостового сооружения можно полагать коэффициент вариации этого нормального распределения равным 0,3.

4. Изменение характеристик сечения конструктивных элементов мостовых сооружений в условиях воздействия агрессивной эксплуатационной среды может быть вызвано влиянием соледержащих выбросов автотранспортных средств, влиянием применяемых антигололедных материалов, влиянием окружающей атмосферы (промышленной в городах, или хлоридсодержащей в зонах воздействия приморской среды). Равенство величины обеспеченности фактической грузоподъёмности в момент времени t проектному значению $\gamma_{пр} = 3$ означает достижение предельной величины износа. Для замедления кинетики износа мостовых конструкций и соответствующего увеличения долговечности сооружения необходимо применение эффективных и долговечных систем противокоррозионной защиты того или иного вида [11].

5. Для определения меры усталостной поврежденности D можно применить линейную теорию накопления усталостных повреждений, причем предельная усталость сооружения соответствует пронумерованному значению $D = 1$.

6. Для вновь проектируемых мостовых сооружений следует проводить обязательную проверку конструкций на усталость под действием эксплуатационных нагрузок вероятностного характера от грузовых автотранспортных средств, с учетом кинетики их

² СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Изм. № 1, 2, 3.

возрастания во времени. Если мера усталостного износа элемента эксплуатируемого мостового сооружения достигает значения $D = 0,8$ то этот элемент следует усиливать.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андраде, К. Поверхностные трещины и величина коррозии арматуры. Ремонт, восстановление и коррозия бетона. Лондон. — 1996. — стр. 263–273.
2. Болотин, В.В. Статистические методы в строительной механике. М.: Стройиздат, 1965.
3. Васильев, А.И. Новые нормативные автомобильные нагрузки на мосты / А.И. Васильев // Вестник мостостроения. — 2002. — № 3–4.
4. Васильев А.И. Деградационные процессы и остаточный ресурс долговечности мостовых элементов / Автомобиль. Дорога. Инфраструктура, № 1(23) 2020 (электронный научный журнал).
5. Васильев А.И. Грузоподъемность и долговечность мостовых сооружений. Вологда. Инфра-Инженерия, 2021, 200 с.
6. Васильев А.И. Оценка технического состояния мостовых сооружений. Москва, из-во КНОРУС, 257 с.
7. Васильев, А.И. Стадии коррозии арматуры в защитном слое бетона мостовых конструкций / А.И. Васильев, А.М. Подвальный // Мир мостов. — - 2008. — № 35.
8. Валиев Ш.Н., Овчинников И.И., Шатилов И.С. Аварии транспортных сооружений и их предупреждение. Чебоксары: ИД «Среда», 2020, с. 216.
9. Валиев Ш.Н., Черный С.А. Оценка параметрической надежности эксплуатируемых мостовых сооружений / Дорожная держава. № 84/2018, С. 30–34.
10. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. — М. Изд-во Jstitia, 2018.
11. Защита от коррозии металлических и железобетонных мостовых конструкций методом окрашивания / И.Г. Овчинников, А.И. Ликверман, О.Н. Распоров и др. — Саратов: Изд-во «Кубик», 2014. — 504 с.: ил. 155., табл. 23., библиограф. 175 наим.
12. Корчинский И.Л. Прочность строительных материалов при динамических нагрузках / И.Л. Корчинский. — М.: Издательство литературы по строительству, 1966.
13. Мигунов В.Н., Овчинников И.И., Овчинников И.Г. Экспериментально-теоретическое моделирование армированных конструкций в условиях коррозии. — Пенза, ПГУАС, 2014. — 352 с.
14. Мигунов В.Н., Овчинников И.Г., Шамшина К.В. Влияние жидких хлоридсодержащих сред и переменной эксплуатационной нагрузки на деформационные свойства железобетонных элементов и характеристики коррозионного поражения арматуры в расчётных поперечных трещинах бетона // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 7, № 6 (2015) <http://naukovedenie.ru/PDF/11KO615.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/11KO615.

15. Овчинников И.И., Мигунов В.Н., Овчинников И.Г. Моделирование кинетики деформирования армированных конструкций в специальных эксплуатационных средах — Пенза, ПГУАС, 2014. — 280 с.
16. Овчинников И.И., Овчинников И.Г. Идентификация и верификация моделей коррозионных и деформационных процессов. Саратов: СГТУ, 2014. 164 с.
17. Овчинников И.И., Чэнь Т., Овчинников И.Г. Вероятностное моделирование железобетонной сваи при совместном действии нагрузки и хлоридсодержащей среды // Региональная архитектура и строительство. — 2016. — № 4(29). — С. 55–61.
18. Овчинников И.И., Чэнь Тао, Овчинников И.Г. Вероятностное моделирование поведения армированных мостовых конструкций в агрессивных условиях эксплуатации // Транспортные сооружения. — 2017. — № 4. — С. 1–20. — <https://t-s.today/PDF/03TS417.pdf> (доступ свободный). — DOI: 10.15862/03TS417.
19. Овчинникова Т.С., Маринин А.Н., Овчинников И.Г. Коррозия и антикоррозионная защита железобетонных мостовых конструкций // Интернет-журнал "Науковедение" № 5(24), 2014. Сентябрь-октябрь с. 1–25. Идентификационный номер статьи в журнале 06КО514.
20. 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.
21. I.G. Ovchinnikov, Sh.N. Valiev, Y. E. Vasilyev, Chen Tao/Model of Reinforced-Concrete Structure Deformation Under Combined Effect Carbonation and Chloride Corrosion / International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern technologies DOI: 10.1088/1757-899X/463/3/032093, 2018.
22. Vasiliev A.I., Valiev Sh.N. Chen Tao. Evaluating the load capacity and durability of bridges in operation // International cooperation issue of transportation-Especial Issue- No. 8, 2018.
23. K.V. Shamshina, V.N. Migunov, I.G. Ovchinnikov. Influence of corrosion longitudinal cracks on rigidity and strength of reinforced concrete structures // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 451 (2018) 012058. doi: 10.1088/1757-899X/451/1/012058. P. 1–7.

Vasilyev Alexandr Ilich

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia
Research Institute of Bridges and Hydraulic Structures, Moscow, Russia
E-mail: 655178@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2135-7311>

Valiev Sherali Nazaralievich

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia
Small innovative enterprise «Scientific and Engineering Center of Bridges and Structures», Moscow, Russia
E-mail: mosti.madi@mail.ru

Schmidt Voldemar Sergeevich

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia
E-mail: shmidt-voldemar@mail.ru

Ovchinnikov Igor Georgievich

Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia
E-mail: bridgesar@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0617-3132>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=2922
Publons: <https://publons.com/researcher/2611921/igor-g-ovchinnikov/>

Long-term degradation processes affecting the reduction of load capacity and durability of bridge structures during their maintenance

Abstract. The article considered the influence of long-term degradation processes affecting the load capacity and durability of bearing structures of bridge structures during their operation. The problem of reducing the carrying capacity and durability of bridge structures due to physical wear of supporting structure has not ceased to be relevant for decades. Objectively, physical wear of bridge structures is inevitable. It is impossible to completely eliminate it, but protective measures can slow it down. This article discusses the following most dangerous degradation processes that seriously affect the load capacity and durability of bridges: corrosion and fatigue of steel structures and fittings. The nature and rates of corrosion and fatigue wear of structures are investigated, as well as the impact on the reduction of load capacity reserves, increasing in time operational automobile loads. A probabilistic distribution of the effects of automobile loads on bridges is constructed, approximated by the normal law (Gauss distribution). The concept of the security of the limit state is introduced as the value of the excess of the load capacity of the average value of operational loads, calculated in mean square deviations. As a criterion of extreme corrosion wear for the entire service life of the bridge, the normative value of the security of the first limit condition was chosen. The moment of reduction of the actual security to the regulatory level determines the durability of the structure. Durability on the basis of fatigue wear is estimated based on the linear theory of accumulation of fatigue damage. The most significant degradation processes that reduce the load capacity and durability of bridges are corrosion wear and accumulation of fatigue damage. To assess the residual life of the durability of bridge elements, it is necessary to investigate these degradation processes, as well as the effects of mobile operational loads on bridges, as a function of time. The impacts on bridges of operational loads from cargo vehicles are probabilistic in nature and distributed according to the normal law. For new bridges, it is recommended to check the structures for fatigue at the stage of design calculations, considering the probabilistic distribution of operational loads from cargo vehicles and the forecast of increasing loads over time.

Keywords: automotive load; load capacity; wear; corrosion; bridge structure; security; limit condition; durability of the structure; fatigue; probability; endurance; wear; corrosion; degradation