

УДК 624.21: 004.021

## ШИРИНА РАСКРЫТИЯ ТРЕЩИН КАК КРИТЕРИЙ ДЕГРАДАЦИИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Статья посвящена проблеме моделирования процесса деградации железобетонных изгибаемых элементов мостов. Формулируется постановка задачи прогноза жизненного цикла элементов. Критерием деградации принимается параметр ширины раскрытия нормальных трещин в элементах.

The article is devoted to the problem of modeling the process of degradation of reinforced concrete elements of bridges. The statement of the task of the life cycle forecast of elements is formulated. The criterion of degradation is parameter of the width of normal cracks opening in the elements.

**Ключевые слова:** детерминистическая модель, железобетонный элемент, прогноз жизненного цикла, ресурс, мост.

**С**татья посвящена проблеме прогнозирования технического состояния железобетонных элементов автодорожных мостов, другими словами – проблеме оценки ресурса элементов мостов в функции времени. Прогноз ресурса железобетонных элементов как на этапе проектирования, так и в процессе эксплуатации всегда был белым пятном в теории сооружений, а с другой стороны – наиболее весомым вопросом в социально-экономическом плане.

В последние два десятилетия констатируется резкое снижение долговечности автодорожных мостов. В чем причина снижения ожидаемого ресурса? Для Украины это, прежде всего, отсутствие действенной системы эксплуатации и низкое качество строительства. Нельзя забывать и о тяжелом экономическом положении страны, угрожающее низким финансированием дорожной отрасли, недостаточно развитой дорожной сети.

Очевидно, что кроме названных, есть и другие объективные причины. Снижение долговечности в значительной степени закладывается еще на стадии изыскания и проектирования сооружения. Действительно, в современной процедуре проектирования железобетонных элементов (и не только мостов!) нет никаких рычагов управления долговечностью. Срок службы железобетонных мостов назначается директивно, расчетные зависимости проверки сечений не имеют переменных времени, проблема долговечности остается полностью в плоскости опыта и интуиции проектировщика.

В наших условиях крайне ограниченного финансирования системы эксплуатации транспортных сооружений, стратегическое планирование расходов на содержание сооружений должно опираться на реалистичный прогноз ре-



**А.И. Лантух-Лященко**  
профессор Национального  
транспортного университета,  
д.т.н., профессор

сурса железобетонных элементов. Остро ощущается потребность в новых моделях теории сооружений, которые отражали бы эволюцию напряженно-деформированного состояния в функции времени. Именно модели, описывающие деградацию элемента на всех этапах жизненного цикла с течением времени, должны способствовать проектированию элементов сооружений на заданный срок службы, прогнозируя жизненный цикл элемента в эксплуатации. Такие модели позволят проектировать и эксплуатировать конструктивные элементы транспортных сооружений в системе управляемой долговечности.

Модели жизненного цикла сформируют теоретический базис финансирования строительства и эксплуатации сооружений таким, чтобы в течение срока службы сохранить параметры функциональности, надежности, безопасности эксплуатации, а также архитектурные, эстетические и исторические ценности сооружения.

Однако в истории мостостроения никаких нормативных или методических документов, определяющих долговечность элементов, не было. В нормах проектирования мостов термин «долговечность» не фигурировал вообще. И только, начиная с 2006 г., с принятием первого национального нормативного документа по

проектированию мостов были декларированы сроки службы определяющих несущих элементов в 70–100 лет [8]. Систематические исследования, трактующие ресурс железобетонных элементов как аналитически определяемую величину в функции времени эксплуатации, появились в Украине только в начале нового века. Именно этой проблеме и посвящена предлагаемая работа, главная цель которой заключается в информировании о новом перспективном подходе к оценке ресурса железобетонных элементов мостов на всех этапах жизненного цикла, начиная с проектирования.

Главная научная задача исследования – это поиск критерия деградации, адекватно описывающего снижение несущей способности железобетонных элементов в функции времени эксплуатации.

Предлагаемая альтернативная модель оценки и прогноза жизненного цикла изгибаемых железобетонных элементов строится в функции одного параметра – ширины раскрытия нормальных трещин. Ширина раскрытия трещин, в свою очередь, есть функцией параметров физико-механических характеристик материалов элемента. В такой постановке модель прогноза будет применима на всех этапах жизненного цикла, начиная с проектирования. Задача ограничивается железобетонными изгибаемыми элементами мостов.

Исследование, изложенное в статье, представляет собой постановку задачи моделирования ресурса железобетонного элемента в функции времени.

**Немного истории.** Сегодня мы рассматриваем проблему в рамках новой парадигмы теории сооружений – формулировке уравнений напряженно-деформированного состояния элементов сооружений в функции времени.

Аналитические решения проблемы весьма сложны и малодоступны для практического применения в строительном проектировании. Особое значение в истории развития теории прогнозирования ресурса механизмов и сооружений имеют вопросы надежности в функции времени. Уже в 70-х годах прошлого века в публикациях В.В. Болотина [5, 4] приведены решения задач прогноза ресурса элементов строительной механики методами теории случайных функций. Позже, в 80-х годах, публикуется большое количество работ относительно оценки

надежности в терминах стохастической задачи (англ.: time-variant) в англоязычной литературе.

В Украине теоретические разработки аппарата оценки и прогноза технического состояния автодорожных мостов появились еще в конце прошлого столетия [13]. Первый документ, регламентирующий управление техническим состоянием мостов Укравтодора ВБН «Оцінка технічного стану мостів, що експлуатуються» [6], был разработан в 2002 г., марковская феноменологическая модель, составляющая теоретический базис ВБН, в дальнейшем развивалась и была принята в 2009 г. как нормативный документ системы эксплуатации ДСТУ-Н «Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів» [11] – рекомендованный аппарат управления долговечностью автодорожных мостов.

Научные исследования последних лет по созданию основ оценки и прогнозирования технического состояния транспортных сооружений составили базу первых в Украине и СНГ действующих нормативных документов [9, 11], которые в настоящее время регламентируют в системе эксплуатации мостов обязательную процедуру интегральной оценки технического состояния конструктивных элементов сооружения в функции времени и, таким образом, прогнозируют ее остаточный ресурс.

Начиная с 2006 г., функционирует программный комплекс Укравтодора «Аналитическая экспертная система управления мостами» (АЕСУМ) [3] – компьютерная реализация современной информационной технологии оценки и прогноза технического состояния, планирования, координации человеческих и материальных ресурсов, поиска оптимальной стратегии финансирования эксплуатационных мероприятий в течение жизненного цикла эксплуатации сооружения. Теоретическим базисом ПК АЕСУМ также есть марковская феноменологическая модель накопления повреждений, принятая в ДСТУ-Н [11]. Десятилетний опыт эксплуатации ПК АЕСУМ показал адекватность модели, ее эффективность как аппарата управления безопасностью и оценки ресурса сооружения в процессе эксплуатации.

Марковская феноменологическая стохастическая модель жизненного цикла элемента завоёвала признание в системе управления автодорожными мостами Украины. Вместе с тем,

сегодня мы видим ее недостатки. Первый из них заключается в ограничении по времени – модель описывает падение надежности эксплуатируемого элемента сооружения, начиная со второго эксплуатационного состояния. Второй – это чисто вероятностная природа модели, модель управляется только одним параметром – интенсивностью отказов, т.е. скоростью деградации. Эти обстоятельства и были побудительным мотивом научного поиска новых моделей, содержащих в качестве управляющих физико-механические параметры и применимых на всех этапах жизненного цикла, начиная с проектирования [15, 22, 23].

**Проблема критерия деградации.** Принципиально важным моментом в формулировке модели оценки и прогноза жизненного цикла является принятие критерия деградации, т.е. меры накопления повреждений. Теоретически критерий является составной фундаментальной проблемы управления надежностью и долговечностью строительных объектов. В теории сооружений известно не менее десяти различных по своей физической сути критериев. Назовем некоторые из них.

В строительной механике с 50-х годов прошлого века широко использовалась универсальная модель накопления повреждений, известная под названием «теория линейного суммирования повреждений Пальмгрен-Майнера», в которой используется принцип линейной суперпозиции повреждений [19]. В качестве критерия здесь выступает «цикл погрузки – разгрузки». Эта простая и прозрачная модель получила широкое распространение в машиностроении. В меньшей степени модель использовалась для оценки жизненного цикла элементов сооружений.

Очевидно, что для использования модели нужна достоверная оценка количества циклов нагрузки, т.е. для прогноза ресурса в процессе эксплуатации необходимо иметь полные данные истории нагружения. Относительно элементов автодорожных мостов, да и других элементов конструкций, необходимые исходные данные определяются настолько примерно, что теряется достоверность модели. Есть и другие недостатки, сдерживающие применение модели Пальмгрен-Майнера, такие как, например, игнорирование эффектов взаимодействия циклов нагрузки с малой и большой амплитудами.

Достаточно распространена модель жизненного цикла железобетонных элементов, в которой деградация железобетона описывается критериями накопления определенного «критического количества хлоридов», проникающих через защитный слой по капиллярной системе и микротрещинам. Процесс диффузии хлоридов здесь описывается общими законами аналитической теории диффузии, известными как уравнения первого и второго законов Адольфа Фика [22].

Другое направление развития моделей накопления повреждений элементов строительных конструкций основывается на фундаментальных исследованиях механики разрушения. В Украине это исследования школы академика НАНУ В.В. Панасюка [17, 18]. В этих работах критериями деградации материала элементов сооружений являются «коэффициенты интенсивности», трактуемые как физические константы материала. Безусловно модели, основанные на классической теории механики разрушения, теоретически наиболее совершенны, однако, пока что не получили широкого применения в практической оценке ресурса элементов сооружений.

В последние 20–30 лет универсальным и наиболее эффективным критерием деградации элементов строительных конструкций в Европе, США, Японии признан «параметр надежности» [14], применяемый, прежде всего, в марковских феноменологических стохастических моделях, описывающих накопление повреждений как процесс, эволюция которого во времени определяется вероятностными законами. Сейчас многие исследователи склоняются к мысли, что именно стохастические модели марковских цепей есть наиболее перспективным, универсальным интегральным аппаратом описания постепенной деградации во времени элементов сооружений.

Наконец еще один широко применяемый критерий деградации – «геометрический параметр (параметры) трещины в материале» для оценки и прогноза жизненного цикла. Геометрические параметры трещин (ширина, длина, глубина) давно применяются в моделях деградации металлических элементов машин и механизмов, элементов стальных конструкций сооружений. В этой работе приводится пример модели жизненного цикла железобетонных эле-

ментов транспортних сооружений, в которой критерием деградации служит ширина раскрытия трещин.

**Проблема анализа трещиностойкости железобетонных элементов.** Ученые всего мира больше 100 лет изучают проблему трещиностойкости железобетонных конструкций, и количество таких исследований увеличивается с каждым годом. Складывается впечатление, что проблема будет открытой вечно, во всяком случае до тех пор, пока железобетон будет применяться в строительстве.

Главной проблемой этих исследований является установление закономерностей развития трещин и их влияние на несущую способность элемента. Для железобетонных элементов характерны два типа трещин:

- *первый* – трещины, связанные с пластическими свойствами бетона, появляющиеся при твердении и протекании длительных процессов (усадки и ползучести) бетона или резких изменениях температуры окружающей среды;
- *второй* – трещины, которые неизбежно сопровождают эксплуатацию железобетонного элемента под действием постоянных и временных нагрузок. Именно второй тип трещин и является предметом исследования в нашей работе.

Сегодня общепризнанно, что трещинообразование и последующее скалывание защитного слоя есть главными факторами, определяющими в процессе эксплуатации железобетонных элементов долговечность, надежность и несущую способность.

В процессе эксплуатации трещины вызывают в элементах «эффект домино»: в зоне трещины коррозия арматуры становится более интенсивной, продукты коррозии вызывают давление на защитный слой, защитный слой скалывается, расширяется трещина, растет коррозия – и круг замкнулся. Причем, интенсивность процесса деградации растет нелинейно [12, 25, 26, 31].

Известны десятки зависимостей прогноза ширины раскрытия трещин ненапряженного и предварительно напряженного железобетона. Так только в обширном обзоре исследований трещиностойкости А. Борошного приведено 32 формулы определения начальной ширины нормальных трещин под воздействием рас-

четных поперечных нагрузок в изгибаемых элементах [25].

В нормативных документах разных стран по проектированию железобетонных элементов для контроля ширины раскрытия трещин применяется пять-шесть зависимостей. Наиболее известными из них является модель Международной федерации бетонных конструкций (англ.: CEB-FIP) [27], которая принята в Еврокоде 2 [10], и модель Р. Фроша [28, 29] – в нормативах США [24].

В украинской методологии анализа трещиностойкости принята теория В.И. Мурашова [16], которая является нормативной в расчете железобетонных элементов строительных конструкций. В анализе трещиностойкости железобетонных элементов мостов применяется модель Я. Берга [1, 2].

При всем многообразии моделей определения ширины раскрытия нормальных трещин и расстояния между ними в изгибаемых элементах их объединяет общая фундаментальная научная идея – именно процесс трещинообразования наиболее полно отражает деформационные свойства железобетонного элемента. Поэтому все известные модели трещинообразования имеют в качестве расчетных параметров количество арматуры в сечении элемента, механические характеристики и модуль упругости арматуры и бетона, топологию расположения арматуры в сечении.

Наш опыт построения модели трещинообразования в функции времени показывает, что вид зависимости определения начальной (мгновенной) ширины раскрытия трещин при максимальных сочетаниях нагрузок существенного значения в анализе жизненного цикла не имеет. Можно избрать любую, наиболее простую. Важно чтобы зависимость оперировала перечисленными выше параметрами.

Подчеркнем, что абсолютное большинство формул ширины раскрытия трещин в железобетонных элементах, представленных в публикациях, дают значения начальной ширины раскрытия. Исследования, в которых трещинообразование рассматривается как процесс в функции времени, нам неизвестны.

**Детерминистическая модель.** В качестве иллюстрации подхода к оценке долговечности железобетонных элементов, используя как критерий деградации контроль ширины раскрытия



трещин, приведем детерминистическую модель. Модель прогноза жизненного цикла имеет своей целью установить закон деградации элемента в функции времени и, тем самым, дать аппарат прогноза его технического состояния. Следующие две гипотезы составляют теоретическую базу модели:

**А.** Критерием технического состояния элемента принимается числовой параметр ширины раскрытия трещины, служащий количественной интегральной характеристикой процесса деградации.

**Б.** Параметр ширины раскрытия трещины является достаточно информативным для построения закона деградации железобетонного изгибаемого элемента в функции времени.

Процесс деградации – рост ширины раскрытия трещины – будем описывать одномерным дифференциальным уравнением

$$\frac{dA(t)}{dt} = \gamma A(t), \quad (1)$$

где  $A(t)$  – ширина раскрытия трещин, функция времени;  $\gamma$  – скорость деградации, константа;  $t$  – время.

Решение дифференциального уравнения (1) имеет вид:

$$A(t) = a_0 \exp(-\gamma t), \quad (2)$$

здесь  $a_0$  – начальное значение ширины раскрытия трещин – суть постоянная интегрирования, определяемая из начального условия: при  $t = 0$ ;  $A(t) = a_0$ .

Начальное значение ширины раскрытия трещин при проектировании определяется функцией О.Я. Берга [1, 2]

$$a_0 = f_a(H, R, E, \sigma, \Psi), \quad (3)$$

где  $H$  – геометрические характеристики сечения;  $R, E$  – физико-механические характеристики сечения;  $\sigma$  – напряжения в сечении;  $\Psi$  – коэффициент типа сечения. Параметры ( $H, R, E, \sigma, \Psi$ ) определяются в соответствии с требованиями ДБН [8].

Проектный срок эксплуатации  $T$  получим из решения (2), положив  $A(t) = A_{\text{lim}}$ , где  $A_{\text{lim}}$  – скаляр, граничное значение ширины раскрытия трещин в эксплуатации,

$$T = \frac{1}{\gamma} \ln \left( \frac{A_{\text{lim}}}{a_0} \right). \quad (4)$$

Для использования в проектной практике прогноза (4) введем коэффициент надежности как 5 % квантиль логнормально распределенной переменной  $T$ :

$$T_d = T \gamma_t, \quad (5)$$

где  $T_d$  – проектный срок службы элемента;  $\gamma_t$  – коэффициент надежности времени жизненного цикла.

Первый опыт использования нового подхода прогноза ресурса в системе эксплуатации автодорожных мостов показал его адекватность и весомые преимущества по сравнению с принятой ныне марковской моделью [20, 21]. Выполненный анализ достоверности модели дает основания утверждать, что прогноз жизненного цикла имеет достаточную сходимость с данными системы эксплуатации автодорожных мостов на дорогах общего пользования.

### Выводы.

1. Приведенная постановка задачи моделирования процесса деградации, используя параметр ширины раскрытия трещин, может стать базой для разработки простого инженерного аппарата прогнозирования ресурса на всех этапах жизненного цикла, начиная с проектирования.

2. Этот подход открывает пути управления ресурсом изгибаемых железобетонных элементов, варьируя механическими характеристиками материалов, площадью арматуры, схемами армирования. В системе эксплуатации автодорожных мостов модели такого типа будут эффективным инструментом управления безопасностью транспортных сооружений.

[1] Берг О.Я. Исследование процесса трещинообразования в железобетонных элементах с арматурой периодического профиля / О. Я. Берг // М.: Трансжелдориздат, 1954. – № 44. – С. 5–10.

[2] Берг О.Я. О предельном состоянии по трещинам в железобетонных мостовых конструкциях / О.Я. Берг // Вопросы проектирования и строительства железнодорожных мостов. М.: Трансжелдориздат, 1951. – Вып. 3. – 11 с.

- [3] Боднар Л.П. Програмний комплекс АЕСУМ. Сучасний стан та концепція подальшого розвитку / Л.П. Боднар // «Дороги і мости»: зб. наук. пр. – К.: ДерждорНДІ, 2010. – Вип.12. – С. 31–39.
- [4] Болотин В.В. Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений / Болотин В.В. – М.: Стройиздат, 1971.
- [5] Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.
- [6] ВБН В.3.1-218-174-2002 Мости та труби. Оцінка технічного стану мостів, що експлуатуються. Державна служба автомобільних доріг України. – К.: 2002.
- [7] Давиденко О.О. Оцінка технічного стану і прогнозування залишкового ресурсу автодорожніх мостів України [Текст] / О.О. Давиденко // Автошляховик України – К., 2014. – Вип. 237. – С. 29–35.
- [8] ДБН В.2.3-14:2006 «Мости та труби. Правила проектування». – К.: Міністерство будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства, 2006.
- [9] ДБН В.2.3-6 – 2009. «Споруди транспорту. Мости і труби. Обстеження і випробування» – К.: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2009.
- [10] ДСТУ-Н Б EN 1992-2:2012 «Єврокод 2. Проектування залізобетонних конструкцій» – К.: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2012.
- [11] ДСТУ-Н Б В.2.3-23:2012. Споруди транспорту. Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів. – К.: Мінрегіонбуд України, 2012.
- [12] Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона / Н.И. Карпенко. – М.: Стройиздат, 1996.
- [13] Лантух-Лященко А.И. Оцінка надійності споруди за моделлю марковського випадкового процесу з дискретними станами. // Зб. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – К.: 1999.
- [14] Лантух-Лященко А.И. Феноменологическая модель деградации элементов сооружений / Лантух-Лященко А.И. // Труды международной научно-технической конференции «Вычислительная механика деформируемого твердого тела», – М.: МИИТ, 2006. – С. 259–265.
- [15] Лантух-Лященко А.И. Новая модель прогноза жизненного цикла железобетонных элементов мостов. // Зб. Сучасні проблеми технічного регулювання у будівництві – К.: КНУБА, 2016. вип. 2. – С. 33–40.
- [16] Мурашов В.И. Трещиностойкость. Жесткость и прочность железобетона, Машстройиздат, – М.: 1950.
- [17] Панасюк В.В. Механика квазихрупкого разрушения материалов. – К.: Наук. думка, 1991.
- [18] Панасюк В.В. Механика разрушения и прочность материалов / Справ. пос. в 4-х т. под. ред. В.В. Панасюка. – К.: Наук. думка, 1988–1990.
- [19] Чирков В.П. Вероятностные методы расчета мостовых железобетонных конструкций. – М.: Транспорт, 1980.
- [20] Янчук Л.Л. Аналіз тріщиностійкості залізобетонних елементів мостів як практичний апарат прогнозу ресурсу // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2014. – № 25. – С. 132–137.
- [21] Янчук Л.Л. Моделювання життєвого циклу залізобетонних елементів мостів що знаходяться в експлуатації // Збірник наукових праць ДАЗТ. – Харків, 2015. – № 151. – С. 21–26.
- [22] Яцко Ф.В. Прогноз довговічності залізобетонних елементів мостів. Статистичний підхід. Теорія і практика будівництва : Вісник / Національний університет «Львівська політехніка»; № 664 – Л.: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2010. – С. 371–378.
- [23] Яцко Ф.В. Прочность, надежность и долговечность железобетонных элементов автодорожных мостов / Яцко Ф.В., Медведев К.В. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – Дніпропетровськ, 2013. – № 4 ISSN 2227–1252. – С. 52–61.
- [24] ACI COMMITTEE 224, «Control of Cracking in Concrete Structures (ACI 224R-01)», American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 2001.
- [25] Borosnyoi A., Balazs G.L. Models for flexural cracking in concrete: the state of the art. Structural Concrete, 2005, 6, No. 2, 53-6
- [26] Carino, Nicholas J. and Clifton, James R. (2005). «Prediction of Cracking in Reinforced Concrete Structures», Report NISTIR. PP. 1–50
- [27] CEB-FIP «Model Code 1990», Thomas Telford, 1993.
- [28] Frosch, R.J. «Flexural Crack Control in Reinforced Concrete», ACI Special Publication. V. 204, 2001. PP. 135–154.
- [29] Frosch, R.J., «Another Look at Cracking and Crack Control in Reinforced Concrete», ACI Structural Journal, May-June 1999, pp. 437 – 442. Rao, S. V. K. M. and Dilger, W. H. Control of flexural crack width in cracked prestressed concrete members. ACI Structural Journal, No.2, 1992, pp. 127–138.
- [30] Miner, M. A., Cumulative damage in fatigue, J. Applied Mech., 12 (1945) pp. 159–164.
- [31] Rao, S. V. K. M. and Dilger, W.H. Control of flexural crack width in cracked prestressed concrete members. ACI Structural Journal, No.2, 1992, pp. 127–138.

Надійшла 04.08.2017 р.

