

ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МОСТОВ НА СЕТИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ БЕЛАРУСИ

*Докт. техн. наук, проф. ЛЕОНОВИЧ И. И.,
докт. техн. наук, проф. ПАСТУШКОВ Г. П.*

Белорусская государственная политехническая академия

Республика Беларусь имеет развитую сеть автомобильных дорог и густую сеть рек. Это привело к необходимости строительства большого количества мостов и труб. Построенные в разное время мосты отличаются своими параметрами, конструкцией и техническим состоянием.

В настоящее время на автомобильных дорогах общего пользования, протяженность которых превышает 74 тыс. км, эксплуатируются около 5 тыс. мостов общей протяженностью 159 км. Большие и средние мосты составляют 37,3 % и по протяженности 75,5 %, а малые соответственно – 62,7 % и 24,5 %. На дорогах республиканского значения находится около 50 % мостов протяженностью свыше 82 %. Самый длинный мост построен на реке Припять (свыше 1000 м) в районе Мозыря. К числу больших относятся мосты на реках Березина (Бобруйск), Днепр (дорога Санкт-Петербург–Одесса), Сож (дорога Буда-Кошелев–Чериков) и др. На Минской кольцевой дороге построены и находятся в процессе строительства 29 мостов и путепроводов общей протяженностью около 2000 м. До 1958 г. на автомобильных дорогах Беларуси строились преимущественно мосты из монолитного бетона. Они составляют около 21 % от общего количества и характеризуются достаточно высокой долговечностью, но в ряде случаев уже не соответствуют современным требованиям по грузоподъемности и пропускной способности.

Железобетонные мосты постройки 1958–1971 гг. в основном имеют сборные диафрагменные пролетные строения, средние по длине и составляют 36 % от общей протяженности. Они не отличаются требуемой долговечностью и часто не соответствуют требованиям по грузоподъемности и габаритам. Железобетонные мосты, построенные после 1971 г., имеют преимущественно пролетные строения из сборного железобетона в виде типовых бездиафрагменных балок.

Абсолютное большинство малых и средних мостов – железобетонные. Пролетные строения

70 % железобетонных мостов балочного типа и 30 % – плитные. Опоры преимущественно из железобетонных свай, но имеют место опоры в виде железобетонных стенок и стоек. Мостовое полотно – асфальтобетонное. Что касается путепроводов и больших мостов, то они имеют, как правило, более сложную конструкцию как пролетного строения, так и опор. При их строительстве используются балки коробчатого сечения, сваи-оболочки и др.

От надежности и долговечности железобетонных мостовых сооружений во многом зависит бесперебойное функционирование дорожной сети республики, эффективность работы автомобильного транспорта. Однако, как показывают многочисленные исследования, мостовые конструкции изнашиваются, стареют и постепенно теряют свои эксплуатационные качества. Долговечность мостовых конструкций стала серьезной проблемой не только для Беларуси, но и для других стран. Достаточно отметить, что статистика, опубликованная Федеральной администрацией автодорог США в 1990 г., свидетельствовала о том, что в США 41 % мостов (общее количество – 577710) имели структурные повреждения, или функционально устарели. На многих из мостов был ограничен вес проезжающих автомобилей. В России в настоящее время более трех четвертей мостов имеют недостаточные габариты и грузоподъемность.

К основным причинам, приводящим к ухудшению технического состояния мостовых сооружений, можно отнести следующие:

- интенсивное развитие транспорта и интенсивная автомобилизация, вследствие чего мостовые сооружения старой постройки не отвечают новым нормативным требованиям;
- непрерывный рост подвижных нагрузок и интенсивности движения;
- усиление влияния агрессивности окружающей среды;
- недооценка значимости проблемы эксплуатации и содержания мостовых сооружений;

- отсутствие четких сведений о физико-химических, химических и других факторах, действующих на мостовые конструкции и способных привести к снижению их долговечности;

- отсутствие работающих систем управления эксплуатацией мостовых сооружений, плохой уровень оснащённости современными приборами и оборудованием как эксплуатирующих организаций, так и специализированных дорожно-мостовых лабораторий научно-исследовательских организаций и высших учебных заведений;

- отсутствие комплексного подхода к решению вопросов первичной и вторичной защиты от коррозии железобетонных элементов мостовых сооружений при воздействии агрессивной среды;

- отсутствие проектов эксплуатации для больших мостов или групп однотипных небольших мостов.

Проблема долговечности особенно важна для железобетонных мостов, которые по праву считаются долговечными конструкциями. И несомненно, что в ближайшие годы основными в мостостроении будут железобетонные мосты. Однако с каждым годом наблюдается достаточно устойчивая тенденция роста подвижных нагрузок, повышения степени агрессивного воздействия жидких, твердых и газовых сред на мостовые конструкции.

Как указано выше, на автомобильных дорогах нашей страны эксплуатируются мосты различных лет постройки. Они проектировались по действующим в те годы нормативам и обладают различной грузоподъемностью. До 1986 г. в качестве расчетных нагрузок применялись автомобильные нагрузки Н-13, Н-18, Н-30, НГ-60, НК-80, с января 1986 г. начали применяться нагрузки в соответствии с действующим СНиП 2.05.03–84*, с 2002 г. намечено ввести для проектирования очередное повышение временных нагрузок.

Рост подвижных нагрузок, естественно, вызывает повышение напряжений в сечениях, и часто старые конструкции перестают удовлетворять возросшим требованиям по грузоподъемности. Для пропуска сверхтяжелых транзитных автомобилей или проезда их в определенный пункт республики необходимо выбирать маршруты, на которых мосты имеют достаточную грузоподъемность. Международная экономическая интеграция выдвигает в число важнейших проблему межгосударственной унификации нормативных требований к автомобильным на-

грузкам на мосты и трубы. ГПП «Белгипродор» и РГПП «Белавтострада» столкнулись с проблемой проектирования моста через реку Западный Буг, когда возникла необходимость удовлетворения требованиям по нагрузкам по СНиП 2.05.03–84* (Республика Беларусь) и по PN-85/S-10030 и PN-91/S-10042 (Польша).

Опыт эксплуатации автодорожных мостов в РБ свидетельствует о том, что под влиянием условий эксплуатации несущая способность и долговечность железобетонных мостов значительно снижаются. Основное определение долговечности регламентируется нормативным документом (ГОСТ 27.002–89). Долговечность – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность до предельного состояния с необходимыми перерывами для технического обслуживания и ремонтов. Для мостов основным показателем долговечности является срок службы – календарная продолжительность эксплуатации до возникновения предельного состояния. Различают срок службы до первого капитального ремонта (усиления), срок службы между капитальными ремонтами и срок службы до списания (замены).

Согласно Еврокоду [1], существуют четыре реально важных механизма, угрожающих железобетонным конструкциям: коррозия арматуры, реакция между щелочью цемента и кремнеземом заполнителя (внутренняя коррозия), химическое воздействие, замораживание–оттаивание.

Коррозия разрушает обычную или предварительно напряженную арматуру; три других – механизмы разрушения бетона. Для всех упомянутых механизмов наиболее важными, решающими факторами являются вода и соль.

Особенно уязвимыми к повреждениям оказались плиты проезжей части автодорожных мостов. Причинами являются низкое качество и несовершенство конструкции гидроизоляции и водоотвода. В результате агрессии воды с солями на плиты проезжей части бетон плиты деградирует, цементный раствор выщелачивается, срок службы резко сокращается. Без кардинального решения вопроса качественного улучшения конструкции гидроизоляции трудно решить вопрос о повышении долговечности.

Поры и пустоты в теле бетона не только способствуют фильтрации воды, вызывающей коррозию, в каналы, но и вызывают расширение трещинообразования при замораживании.

Важнейшими свойствами бетона являются его проницаемость, пористость и диффузия. Диффузия кислорода, углекислого газа, раство-

ренных хлор-ионов очень важна для долговечности бетона. И диффузия, и проницаемость зависят от водоцементного отношения и условий выдержки бетона.

Диффузия может быть определена по формуле

$$i_D = -D \operatorname{grad} C, \quad (1)$$

где D – коэффициент диффузии;

$\operatorname{grad} C$ – градиент концентраций.

Так как подразумевается, что свободный путь диффундирующей молекулы меньше, чем размер пор, коэффициент диффузии D зависит только от поперечного сечения пор, т. е. от пористости бетона.

Проницаемость, которая представляется как массоперенос, инициированный градиентом внешнего давления, может быть выражена формулой

$$i_p = \frac{K}{\eta} \operatorname{grad} P, \quad (2)$$

где K – коэффициент проницаемости;

η – вязкость жидкости или газа;

$\operatorname{grad} P$ – градиент внешнего давления.

Оценка влияния мороза и солей-антиобледенителей на железобетонные мосты особенно важна для климатических условий Беларуси, которые характеризуются относительно большим количеством дней в году с переходом температуры через 0°C . Совместное воздействие мороза и солей-антиобледенителей более опасно с точки зрения долговечности железобетонных мостов, чем просто действие мороза. Наиболее разрушительным действием обладает NaCl 3-процентной концентрации. Кроме того, NaCl активно всасывается с водой, и долговечность конструкции снижается не только от воздействия мороза, но и от воздействия растворенных ионов, так как хлориды увеличивают коррозию стали, а сульфаты разрушают бетон. Отрицательное влияние перечисленных факторов хорошо известно и может вызвать существенное снижение долговечности бетона. В условиях эксплуатации по мере накопления повреждений величины усилий или напряжений и уровень надежности изменяются. Исследования последних лет позволили установить, что проблемы эксплуатации мостовых сооружений гораздо сложнее проблем, которые приходится решать на стадиях проектиро-

вания и строительства. В работах В. М. Бондаренко, Л. И. Иосилевского, В. П. Чиркова, Р. К. Мамажанова и др. [2–4] показано, что истощение ресурса железобетонных пролетных строений происходит в результате накопления необратимых повреждений, вызванных трещинообразованием и разрушением внутренних связей в тяжелом бетоне между цементным камнем и заполнителем.

Определение напряженно-деформированного состояния с оценкой спада ресурса сооружения во времени представляет собой сложнейшую задачу диагностики и идентификации. В процессе диагностики необходимо выявить не только сами повреждения, но и причины, их вызвавшие.

Во всех действующих нормативных документах имеются лишь общие замечания по расчету долговечности, носящие, как правило, декларативный характер. Основания и фундаменты, опоры, пролетные строения, опорные части, элементы мостового полотна, эксплуатационные устройства и другие части мостов должны быть запроектированы и сооружены таким образом, чтобы при безусловном учете потребительских свойств, а также нагрузок и воздействий обладали достаточной долговечностью и безотказностью. Например, пролетные строения длиной свыше 50 м должны обладать долговечностью в 100 лет, а периоды между капитальными ремонтами и реконструкциями составлять не менее 30–50 лет.

При оценке долговечности бетона используется широко применяемый в механике разрушения материалов коэффициент интенсивности напряжений K_{Ic} , по которому возможно оценить ресурс сооружения безразмерной величиной

$$\psi_t = \frac{K_{Ic,t} - K_{Ic,cr}}{K_{Ic,o} - K_{Ic,cr}}, \quad (3)$$

где $K_{Ic,o}$; $K_{Ic,t}$; $K_{Ic,cr}$ – коэффициенты интенсивности напряжений соответственно в начале эксплуатации, в момент технической диагностики и перед разрушением.

По известным параметрам состава, свойств бетона и его компонентов коэффициент интенсивности напряжений в начале эксплуатации $K_{Ic,o}$ может быть определен по эмпирической формуле [5]

$$R_{Ic,o} = -0,0148 + 0,0058R_c + 0,0011R_{ag} + + 0,1330 \text{ Ц/В} - 0,0082W - 0,5825K_{ag}, \quad (4)$$

где R_c – активность цемента;

C/B – истинное цементно-водное отношение;

R_{ag} – прочность щебня;

K_{ag} – количество щебня в единице объема бетона;

W – влажность бетона.

Долговечность бетона при длительных силовых нагружениях и температурно-влажностных воздействиях характеризуется коэффициентом интенсивности напряжений $K_{1c,t}$, который может быть вычислен по формуле

$$K_{1c,t} = K_{1c,o} \lg t / \lg 28 \sqrt{1 + 2E_b C(t, 28)}, \quad (5)$$

где $K_{1c,o}$ – интегральный коэффициент интенсивности напряжений от действия кратковременной силовой нагрузки и стационарного температурно-влажностного воздействия;

E_b – модуль упругости бетона;

$C(t, 28)$ – мера ползучести бетона.

В процессе многократно повторного приложения нагрузок величина $K_{1c,t}$ может быть оценена зависимостью [2]

$$K_{1c,t} = 0,955 K_{1c,o} e^{-\alpha(T-T_o)^2 n^2}, \quad (6)$$

где α – показатель кривой выносливости, который отражает скорость падения K_{1c} в зависимости от режима нагружения и неблагоприятных воздействий окружающей среды на бетон;

T – срок эксплуатации на момент оценки ресурса сооружения в годах;

T_o – период приработки конструкции;

n – число эквивалентных циклов в год.

Условие безопасной эксплуатации конструкций устанавливается по формуле

$$\Psi_{11} \geq \Psi_{cr}, \quad (7)$$

где Ψ_{11} – значение уровня ресурса прочности бетона на момент технической диагностики;

Ψ_{cr} – допустимое значение уровня этого ресурса.

Таким образом, для бетонов с известным составом и свойствами компонентов достаточно просто вычислить остаточную продолжительность безремонтной эксплуатации бетона. Однако чаще всего для эксплуатируемых мостовых сооружений мы имеем дело с недостатком информации о составах и изменяющихся во времени прочностных характеристиках материалов.

В этом случае ресурс конструкции $Z(t)$ оценивается с тем уровнем надежности, который заложен в нормах СНиП 2.05.03–84* соответственно в начале эксплуатации, в момент технической диагностики, и в конце эксплуатации. Значение прочности в конце эксплуатации можно принять равным $R_{b,mc2}$ или R_{bf} .

При экспериментальном определении прочностных характеристик в качестве значения прочности в конце эксплуатации принимаются параметрические точки диаграммы состояния бетона по О. Я. Бергу [6]: R_{crc}^o и R_{crc}^v . В любой момент диагностики экспериментально может быть получен и критический коэффициент интенсивности напряжений K_{1c} при применении метода отрыва со скалыванием для определения прочности бетона.

Ресурс вычисляется с учетом изменения прочностных характеристик элементов составного сечения, деформационных свойств бетона и арматуры, образования поперечных трещин, нарушения связей между элементами пролетного строения и др. При современном состоянии вычислительной техники возможно определение напряжений как в любой точке бетонного сечения, так и в любом арматурном стержне. Для анализа напряженно-деформированного состояния удобно пользоваться моделью, базирующейся на так называемом деформационном расчете для сечений с принятием трансформированных диаграмм деформирования материалов. Сечение общей формы может быть представлено в виде элементарных площадок, описывающих материалы, входящие в него, а распределение нормальных напряжений в пределах каждой элементарной площадки с достаточной для практики точностью может быть принято равномерным или изменяющимся по линейному закону.

В общем случае, независимо от схемы приложения внешних усилий при равномерном распределении напряжений в пределах элементарных площадок, условия равновесия для составного сечения имеют вид

$$\begin{Bmatrix} \Delta N \\ \Delta M_x \\ \Delta M_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_0 \\ \Psi_x \\ \Psi_y \end{Bmatrix}, \quad (8)$$

где ε_0 – деформация продольной координатной оси элемента;

Ψ_x, Ψ_y – соответственно кривизны этой оси в плоскостях, совпадающих с осями x и y ;

$B_{i,j}$ – элементы матрицы жесткости, определенные как некоторые переменные характеристики жесткости сечения, зависящие от уровня нагружения и геометрических параметров сечения.

Принцип построения данной модели позволяет достаточно просто описать сечение любой формы с различными дефектами и повреждениями, задать в явном виде исходное напряженное состояние и проследить поведение конструкции в континуальном режиме, задавая поэтапно приращения вектора внешних нагрузок.

Обследования и испытания экспериментальных мостов позволяют получить исходный материал не только для оценки их надежности, долговечности и остаточного ресурса, но и для разработки новых конструктивно-технологических решений для широкого класса искусственных сооружений.

ВЫВОДЫ

1. Эксплуатация автодорожных мостов требует постоянного внимания со стороны дорожных организаций и должна вестись на основе объективных данных, своевременной и правильной оценки состояния эксплуатируемых сооружений, которую можно получить во время периодических осмотров.

2. Среди проблем эксплуатации мостовых сооружений в Беларуси важными являются проблемы повышения грузоподъемности и увеличения габаритов тех сооружений, которые не соответствуют изменившимся автомобильным нагрузкам и возросшим транспортным потокам, а также выбора наиболее эффективных способов их реконструкции.

3. Для повышения эффективности эксплуатационного содержания мостов явно недостаточно указаний действующих нормативных документов, и решить эту задачу можно только на основе хорошо разработанной теории безопасной и долговечной эксплуатации сооружений, формирования банка данных с объективными оценками физического состояния сооружений, обоснованных закономерностей спада ресурса сооружения во времени, создания автоматизированной системы управления режимом эксплуатации.

4. Требуется пересмотра стратегия подготовки и повышения квалификации инженеров-мостовиков с переориентацией их с проблем преимущественно проектирования и строительства мостовых сооружений на проблемы их эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. CEB GTG 20. Durable Concrete Structures. CEB Design Guide, CEB Bulletin d'Information, № 182, June 1989.
2. Бондаренко В. М., Иосилевский Л. И., Чирков В. П. Надежность строительных конструкций и мостов. – М.: Российская академия архитектуры и строительных наук, 1996. – 230 с.
3. Иосилевский Л. И., Улупов А. С., Маснева М. Б. Организация эксплуатации железобетонных мостов на сети железных и автомобильных дорог России: Сб. тр. – М.: МГУПС, 1997.
4. Мамажанов Р. К. Прогнозирование процессов накопления повреждений в элементах, подверженных режимным нагрузкам // Известия АН. Сер. техн. наук. – 1989. – № 2.
5. Рекомендации по расчету долговечности бетона при температурных, влажностных и силовых воздействиях на основе механики разрушения. – М.: НИИЖБ, 1999.
6. Берг О. Я., Щербаков Е. Н., Писанко Г. Н. Высокопрочный бетон. – М.: Стройиздат, 1971. – 208 с.
7. СНБ 5.03.01. Конструкции бетонные и железобетонные: Нормы проектирования (проект). – Мн.: Министерство архитектуры и строительства РБ, 2001.