

Риск-ориентированный подход при эксплуатации мостов



А. В. Кочетков,
д-р техн. наук, профессор
кафедры автомобилей
и технологических машин
Пермского национального
исследовательского поли-
технического университе-
та, главный эксперт ФАУ
«РОСДОРНИИ»,



Ш. Н. Валиев,
канд. техн. наук, про-
фессор кафедры мостов,
тоннелей и строительных
конструкций Московского
автомобильно-дорожного
государственного техниче-
ского университета

В последние годы в России намечается тенденция к выработке качественно иного подхода к эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры, связанного с новым взглядом на конструктивные детали мостовых сооружений: пролетные строения, опоры, фундаменты, проезжую часть, деформационные швы и т. д.

В послании Федеральному собранию в 2024 г. президент В. В. Путин указал: «Считаю возможным с 1 января 2025 г. отказаться от временных мораториев на проверки бизнеса и вместо этого с учетом наработанного опыта полностью перейти на риск-ориентированный подход, закрепив его законодательно. Там, где риски отсутствуют, надо применять профилактические меры и таким образом минимизировать число проверок». Этот подход стал занимать внимание специалистов с появлением более широкого понимания работы транспортных сооружений, взаимосвязи элементов конструкций между собой, новых принципов их агрегатно-модульного проектирования, осознания важности таких элементов и влияния их технического состояния на общую функциональную устойчивость, работоспособность, безопасность и надежность сооружения в целом.

В соответствии с ФЗ № 184 от 27.12.2002 «О техническом регулировании» технические регламенты должны устанавливать минимально необходимые требования безопасности с учетом степени риска причинения вреда. В качестве измерителя требуемого уровня безопасности в законе предусмотрен универсальный показатель — допустимый риск причинения вреда. Это подтверждается Приложением 9 Протокола о техническом регулировании в рамках Евразийского экономического союза, Договора о Евразийском экономическом союзе от 29.05.2014, а также ФЗ «О государственном контроле (надзоре) и муниципальном контроле».

Предлагается усовершенствовать научно-методическое обеспечение качества и технического регулирования работ на эксплуатируемых транспортных сооружениях с использованием теоретико-вероятностного подхода на основе анализа, оценки и расчета технической и экономической составляющих риска причинения вреда с учетом п. 11 технического регламента Таможенного союза «Безопасность автомобильных дорог» (ТР ТС 014/2011) (снижение риска).

Подробный перечень литературы по теме настоящего исследования приведен в списке [1–21]. Он вполне отражает историю вопроса и его научно-технический уровень.

Вопросами системы управления качеством и надежности в области транспортного строительства занимались в Федеральном дорожном агентстве «Росавтодор» и государственной компании «Автодор», технических комитетах ТК-418 (дорожное хозяйство) и ТК-465 (строительство), МАДИ, ПГУПС, ФАУ «РОСДОРНИИ», СПбГАСУ, СГТУ, ОАО «СОЮЗДОРНИИ» и др. [1–21].

Большая роль в развитии вероятностно-статистических методов расчета строительных конструкций принадлежит выдающимся ученым: В. В. Болотину, А. Р. Ржаницыну,



Н. С. Стрелецкому и др. Вероятностно-статистический подход при исследовании мостовых конструкций развит в работах А. Г. Барченкова, А. И. Васильева, Р. Б. Викторов, Л. И. Иосилевского, В. О. Осипова, А. А. Потапкина, В. П. Чиркова и др. Теория рисков в проектировании, строительстве и эксплуатации автомобильных дорог и искусственных сооружений на них успешно развивается научной школой В. В. Столярова. Анализ результатов существующих исследований показывает, что имеются все условия для вероятностных расчетов и оценки надежности сложных технических систем, к которым относятся мосты.

Важная прикладная отраслевая проблема в настоящий момент заключается в отсутствии отраслевой системы управления качеством эксплуатации объектов транспортного строительства (на примере мостовых сооружений), основанной на риск-ориентированном подходе, изложенном в ФЗ «О государственном контроле (надзоре) и муниципальном контроле» и статье 4 технического регламента Таможенного союза «Безопасность автомобильных дорог».

Цель настоящей работы — создание научных основ комплексной оценки надежности эксплуатируемых мостовых сооружений в системе технического регулирования объектов транспортного строительства за счет разработки новых методов анализа, оценки и расчета технической и экономической составляющих риска причинения вреда, разработки отраслевой системы индикативных показателей риска, организационных и программно-нормативных мероприятий и путем совершенствования эффективно действующих механизмов системы управления качеством эксплуатируемых мостов.

Основной задачей при эксплуатации мостовых сооружений является вопрос обеспечения уровня их безопасности. Если выявленную опасность невозможно исключить полностью, необходимо снизить вероятность риска до допустимого уровня путем выбора соответствующих технических и технологических решений. Анализ возросших опасностей показан на рис. 1.

Можно выделить следующие виды рисков:

- Управляемый, ведущий к постепенному накоплению повреждений (износу). По темпу накопления повреждений определяется срок капитального ремонта.



Рис. 1. Анализ возросших опасностей по отношению к транспортным сооружениям

- Нежелательный, требующий ограничения эксплуатации моста или уменьшающий его долговечность (предельное состояние второй группы $S_{\text{норм}}$).

- Недопустимый, требующий прекращения эксплуатации моста (предельное состояние первой группы, усилие $S_{\text{расч}}$).

- Критический, когда существует опасность катастрофического обрушения с возможными человеческими жертвами. Условно можно принять $S_{\text{кр}} = 1,25S_{\text{расч}}$.

Применение теории риска причинения вреда для мостовых сооружений имеет определенные ограничения, связанные с тем, что мост перестает быть объектом с постоянными физикомеханическими свойствами, а превращается в технический объект с изменяющимися (вариативными) состояниями. Следует заявлять о нерегламентных причинах разрушения мостовых сооружений, связанных не с пересечением хвостов гистограмм распределений прочностных, силовых (моментных, деформационных) и размерных показателей, а с увеличением степеней свободы и возникновением динамических нерасчетных волновых и резонансных процессов.

Как правило, прямолинейное движение даже на повышенной скорости грузового транспорта по оси моста не приводит к его обрушению, так как механические характеристики имеют определенный запас прочности. Однако перестроение грузового транспортного средства на мосту, вызванное движением по своей полосе встречного легкового автомобиля, приводит к возникновению нерасчетного случая на пролетном строении и опоре, приводящего к разрушению. При этом сопутствующее разрушение ригеля при-

водит, например, к тому, что он летит вперед и к центру мостового сооружения с переворотом. Также необходимо учитывать и отношение не скорости движения транспортных средств к разрешенной, а ее квадрата, как показателя энергии взаимодействия и разрушения. Особое значение для разрушения мостов имеет не только воздействие нагружением, а снятие накопленной нагрузки и возникновение недопустимых сил и деформаций растяжения. Как правило, элементы мостового сооружения более подвержены разрушению от воздействия растяжения.

Если обратиться к теории резания или обработки материалов давлением, например, гибки с растяжением, то основным применяемым технологическим приемом здесь является добавление воздействия, значительно меньшего по энергетическим затратам с рабочим, в виде дополнительной степени свободы, реализованной как поперечное перемещение, приводящее к переводу поверхностного слоя объекта в зону, близкую к зоне разрушения на диаграмме «напряжения — деформации». Это приводит к уменьшению сопротивления объекта резанию или пластическому деформированию без дополнительных энергетических затрат. Поэтому в мостостроении большую надежность и способность к сопротивлению разрушению имеют деформационные швы, запроектированные по модульному способу (металлический профиль отвечает за механическую нагрузку, а резиновый элемент — за гидроизоляцию).

Если говорить о теории машиностроения (например, технологии авиастроения), то в ней применяются не модули упругости материала, а критерий при-

ращений относительных перемещений, причем в неевклидовой обобщенной технологической системе координат и криволинейных векторов в виде касательных и эволюент к обтяжному пуансону. Приращения относительных деформаций является инвариантом, показателем, слабо зависимым от изменений размерно-механических характеристик мостового сооружения.

Для задач оценки состояния эксплуатируемых мостов применение приращений относительных деформаций (как оценка положительных эффектов применения армирующих преднапряженно-упругих систем) является перспективным научным направлением мостостроения и позволяет снизить риск разрушения мостовых сооружений. Авторы полагают, что разрушение моста не относится к ответственности теории риска, а более — к теории катастроф, причем для непрогнозируемого (нерасчетного) сочетания факторов и воздействий различной природы.

Основные параметры и характеристики, определяющие транспортно-эксплуатационные показатели мостовых сооружений:

- геометрические параметры, к которым относятся ширина проезжей части, продольные уклоны, радиусы кривых в плане и профиле, уклоны виражей и расстояние видимости, ровность и сцепление покрытий проезжей части и полос безопасности;
- состояние ездового полотна;
- состояние и работоспособность водоотвода;
- габариты, грузоподъемность и техническое состояние сооружений;
- состояние элементов инженерного оборудования и обустройства.

Из возможных параметров, характеризующих отдельные свойства транспортных сооружений в количественном или качественном отношении, целесообразно оставить только количественные, методика определения которых достаточно отработана.

Экономическая составляющая риска является обобщением технико-экономического обоснования внедрения инновации, а также сметного (калькуляционного) расчета вклада продуктивных (инновационные дорожно-строительные материалы и конструкции) и технологических (технологии выполнения дорожных и мостовых работ) инноваций в экономическую эффективность проектов в транспортном строительстве, а также

процедур проверки соответствия достигаемых результатов.

Согласно методу В. В. Столярова, в качестве исходных данных рассматриваются два распределения вероятностей чистой приведенной ценности проекта, при этом среднее значение вспомогательного распределения принимают равным нулю [14–19]. В развитие данного метода предлагается критерий технико-экономического обоснования в виде обобщенного риска как произведение технической и экономической составляющей риска:

$$R = \Delta T \times \Xi,$$

где R — экономическая эффективность (в долях инвестиционного проекта);

ΔT — положительное приращение коэффициента вариации как оценки степени риска;

Ξ — доля инвестиционного проекта.

Если при реализации проекта строительства транспортного сооружения или развития транспортной инфраструктуры возможно внедрение новых инновационных материалов и технологий, то расчет рыночной стоимости проекта осуществляется через суммирование текущей стоимости той части проекта $S_{\max}^p$, которая реализуется без внедрения технологической новации $S_{\max}$ и текущей стоимости, приносящей доход от инновации NPV_p :

$$S_{\max}^p = S_{\max} + NPV_p;$$

$$NPV_p = \sum_{t_r=1}^{k_r} Z_{t_r} \left(\frac{1}{1+i_r} \right)^{t_r} - IC_r,$$

где IC_r — размер первоначальных инвестиций по r -му инновационному проекту, руб.;

Z_{t_r} — величина денежного потока, ожидаемого в t -м периоде, руб.;

i_r — норма дисконтирования дохода по каждому;

k_r — срок периодов реализации.

Для оценки уровня риска инновационной технологии или новых материалов предлагается использовать подход, основанный на оценке вклада технологической или продуктовой новации в сумму денежных потоков (налоговых поступлений) от реализации проекта за период эксплуатации дорожного сооружения или участка дороги. Рассматривается метод анализа рисков в виде оценки пересечения «хвостов» распределений вклада технологической или продуктовой новации в сумму денежных потоков (налоговых поступлений) от реализации проекта за период эксплуатации дорожного сооружения или участка дороги, а также ожидаемых денежных потоков от введенного в эксплуатацию сооружения транспортного строительства. Для оценки инновационного риска следует воспользоваться моделью, показанной на рис. 2.

$P(\bar{Z}_{t_r})$ — вероятность средневзвешенной величины денежного потока, ожидаемого в t -м периоде по всем вариантам реализации r -го инновационного решения;

ΔZ_{t_r} — абсолютное значение отклонения величины денежного потока по конкретному варианту реализации от средневзвешенной величины, руб.

Целевая функция управления рисками:

$$\frac{\sigma_{Z_{t_r}}}{\bar{Z}_{t_r}} \rightarrow \min,$$

где $\sigma_{Z_{t_r}}$ — среднее квадратическое отклонение от средневзвешенной величины $\bar{Z}_{t_r}$.

В соответствии с этой моделью инновационный риск в транспортном строительстве может быть оценен вероятностью и среднее квадратическим отклоне-

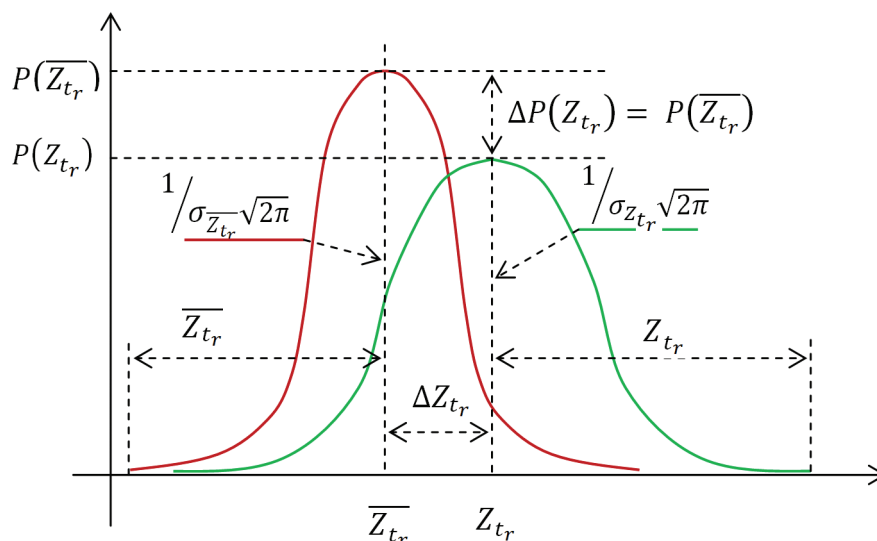


Рис. 2. Графическая интерпретация управления инновационными рисками

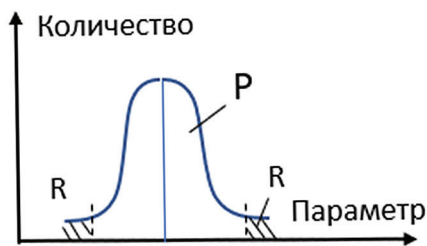


Рис. 3. Риск R как вероятность нежелательного события

нием ожидаемого от продуктовой или процессной инновации дохода. Математически под риском можно понимать отношение площади «хвоста» гистограммы нормального распределения между критическим значением и зоной аппроксимации (на половину ширины разброса графика изменения параметра) к общей площади правой или левой гистограммы распределения, аппроксимированной нормальным или иным непротиворечащим нормальному законом.

Риск R как вероятность нежелательного события, определяется по формуле через вычисление площадей части P безопасных событий и площади части гистограммы распределения (теоретической) нежелательных событий («хвоста распределения») (рис. 3).

$$R = \frac{r}{r + p},$$

$$r = \int_A^{A+S_1} f(x)dx,$$

где

$$p = \int_0^A f(x)dx.$$

Площадь «хвоста распределения» определяется через ширину хвоста гистограммы распределения, выражаемую в количестве σ от 1 до 3:

$$S_1 = \sigma, S_2 = 2\sigma, S_3 = 3\sigma.$$

Принципиально важна для интегрального и дискретного видов формулы расчета рисков установка ширины диапазона хвоста гистограммы распределения. Должны анализироваться хвосты распределения по критериям «уточенный» и «утолщенный», а также по критериям «укороченный» и «удлинённый».

Для управляемого процесса можно заявлять ширину хвоста гистограммы распределения, равную $S_1 = \sigma$, для неуправляемого — равную $S_1 = 3\sigma$. Анализ риска проводится по теоретической кривой нормального распределения по данным эксперимента. Количество замеров ориентировочно от 20 до 60. Диапазон допустимых значений будет меняться.

Выделяются следующие методы управления рисками: отказ от риска, устранение, компенсация, снижение, передача, принятие. При этом управление ведется по установленным и проанжированным факторам. Важным результатом является сокращение затрат (на один, иногда до трех порядков) на получение и анализ требуемой информации для принятия решения о сравнении проектов конкретных объектов технического регулирования.

Таким образом, проделанная работа позволяет сделать следующие выводы.

- Разработаны научные основы технического регулирования и нормирования, оценки и управления техническими рисками для эксплуатируемых объектов транспортного строительства (на примере мостовых сооружений), теоретико-вероятностный подход к оценке технических и экономических составляющих рисков причинения вреда мостам с учетом основных положений международных стандартов системы менеджмента качества ИСО 9000–2015.

- Предложены методы гармонизации систем технического регулирования и управления качеством в транспортном строительстве на основе новых показателей — параметрического риска как критерия качества и допустимого риска причинения вреда.

- Разработана методическая основа оценки надежности, однородности и технических рисков в техническом регулировании и управлении качеством эксплуатации мостов на основе пересечения «хвостовых» составляющих аппроксимаций гистограмм распределения силовых и прочностных характеристик опасностей риска для эксплуатируемых объектов. Наряду с обсуждением понятий риска введено понятие гарантии.

- Предложено использование в качестве критериев технического регулирования эксплуатируемых объектов транспортного строительства в виде приращений относительных деформаций и недопустимом риске разрушения мостовых сооружений. Третья группа предельных состояний (ПГС-3) — это условия, при которых конструкция может испытывать недопустимые вариации приращений относительных деформаций, при которых возникает недопустимый риск разрушения моста.

- Сформирована структура отра-
сле-
вой системы индикативных пока-

зателей риска для различных этапов жизненного цикла мостовых сооружений. Впервые определены измерители, показатели размерности, процедуры ранжирования и статистические параметры оценок однородности и риска причинения вреда для эксплуатируемых мостов, оценки утолщенности и укороченности хвостов распределений управляемого и неуправляемого процессов.

- Предложен метод оценки грузоподъемности мостовых сооружений на основе риск-ориентированного подхода, а также даны рекомендации по методам сбора статистической информации и обработки результатов, назначения режима эксплуатации и ремонтно-профилактических мероприятий.

Источники

1. Асаяра М. М. К вопросу об инновационных методах оценки рисков в строительстве в условиях неопределенности // Интернет-журнал «Наукоедение». URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/47TVN216.pdf> (дата обращения: 10.05.2024). DOI: 10.15862/47TVN216
2. Акулова Н. Е., Щеголева Н. В., Столяров В. В. TST-RISK // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2020612667, 28.02.2020. Заявка № 2020611749 от 18.02.2020.
3. Андронов С. Ю., Талалай В. В., Щеголева Н. В. Судебно-техническая экспертиза на транспорте и в строительстве: техническое регулирование, расчет риска, лучшие практики, анализ правоприменения / под ред. профессора А. В. Кочеткова. Саратов: СГТУ, 2018. 236 с.
4. Бондарев Б. А., Борков П. В., Бондарев А. Б. Оценка транспортно-эксплуатационного состояния мостовых сооружений на основе теории риска // Роль опорного вуза в развитии транспортно-энергетического комплекса саратовской области (Трансэнергоком-2018): Сборник научных трудов по материалам Всероссийской научно-практической конференции. 2018. С. 269–273.
5. Васильев Ю. Э., Валиев Ш. Н., Щеголева Н. В. и др. Оценка технических рисков в техническом регулировании дорожного хозяйства. М.: Изд-во МАДИ, 2017.
6. Валиев Ш. Н. Определение грузоподъемности железобетонных пролетных строений автодорожных мостов вероятностным методом // Вестник Московского автомобильно-дорожного государст-

венного технического университета (МАДИ). 2004. № 3. С. 78–83.

7. Валиев Ш. Н., Кокодеева Н. Е., Карпеев С. В., Кочетков А. В. Основные направления совершенствования технического регламента Таможенного союза «Безопасность автомобильных дорог» // Строительные материалы. 2016. № 3. С. 56–60.
8. Кокодеева Н. Е., Талалай В. В., Кочетков А. В. и др. Методологические основы оценки технических рисков // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер. Строительство и архитектура. 2012. № 28. С. 126–134.
9. Мепуришвили Д. Г., Семенов В. А. Статистический контроль и регулирование качества при строительстве автомобильных дорог // Автомобильные дороги: Обзорная информация. М., 1982. 48 с.
10. Столяров В. В., Щеголева Н. В., Кочетков А. В. Необходимость в управлении транспортным риском для уменьшения числа погибших в дорожно-

транспортных происшествиях // Грузовик. 2017. № 10. С. 36–40.

11. Кочетков А. В. Свидетельство от государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019661451 «Услуга расчета, оценки и анализа риска».
12. Семенов В. А. Качество и однородность автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1989. 125 с.
13. Булгаков С. Н., Тамразян А. Г., Рахман И. А., Степанов А. Ю. Снижение рисков в строительстве при чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера / под общ. ред. А. Г. Тамразяна. М.: МАКС Пресс, 2004. 304 с.
14. Столяров В. В., Щеголева Н. В. Некоторые исторические рубежи развития теории риска (от зарождения до наших дней) // Транспортные сооружения. 2016. Т. 3. № 3. С. 4.
15. Столяров В. В. Теория риска в проектировании плана дороги и организации движения: учеб. пособие. Саратов: СГТУ, 1995. 84 с.
16. Столяров В. В. Проектирование автомо-

бильных дорог с учетом теории риска: в 2 ч. Ч. 1. Саратов: СГТУ, 1994. 184 с.

17. Столяров В. В. Проектирование автомобильных дорог с учетом теории риска: в 2 ч. Ч. 2. Саратов: СГТУ, 1994. 232 с.
18. Столяров В. В. Дорожные условия и организация движения с использованием теории риска. Саратов: СГТУ, 1999. 168 с.
19. Столяров В. В. Теория риска в судебно-технической экспертизе дорожно-транспортных происшествий с участием пешеходов (+ABS): монография. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2010. 344 с.
20. Гошовец С. В., Козлов А. В., Илюшин Н. В., Новак Н. Ю. Состояние и перспективы развития нормативной базы в области мостостроения для соблюдения требований ТР ТС 014/2011 «Безопасность автомобильных дорог» // Дороги и мосты. 2023. № 1 (49). С. 11–30.
21. Кокодеева Н. Е., Столяров В. В., Васильев Ю. Э. Техническое регулирование в дорожном хозяйстве: монография. Саратов: СГТУ, 2011. 232 с.



Общероссийская общественная организация

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ ТРАНСПОРТА – В ЦИФРАХ

Академия включает
47 РЕГИОНАЛЬНЫХ ОТДЕЛЕНИЙ



СОСТАВ ОО «РАТ» В 2023 ГОДУ

> 680 УЧЕНЫХ-
ТРАНСПОРТНИКОВ:

170 ДОКТОРОВ НАУК

510 КАНДИДАТОВ НАУК

260 ПОЧЕТНЫХ ЧЛЕНОВ РАТ



ДАТА ОСНОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ
ТРАНСПОРТА:

26 июня 1991 года

www.rosacademtrans.ru