

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ МОСТОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СТАТИСТИКИ ОТКАЗОВ

В последнее время, согласно данным мировой статистики, отмечается тенденция к росту числа критических отказов мостовых сооружений (МС). Исследования статистики критических отказов (обрушений) МС проводились рядом зарубежных исследователей [1, 2, 3, 4]. С 2018 года в Международной ассоциации мостового и строительного инжиниринга (IABSE) создана целевая группа TG1.5, основными задачами которой являются сбор, систематизация и анализ мировых данных о критических отказах автодорожных и пешеходных МС, разработка на основе «уроков прошлого» практических рекомендаций по совершенствованию проектных решений и долгосрочных мероприятий жизненного цикла с целью снижения рисков. На данный момент TG1.5 включает 18 исследователей из 16 стран.

Обнаруживаемые в открытых источниках данные систематизируются, преобразуются и заполняются в формате базы данных (БД) Excel, содержащей 33 поля, в том числе 10 обязательных для заполнения, которые показаны на рис. 1.

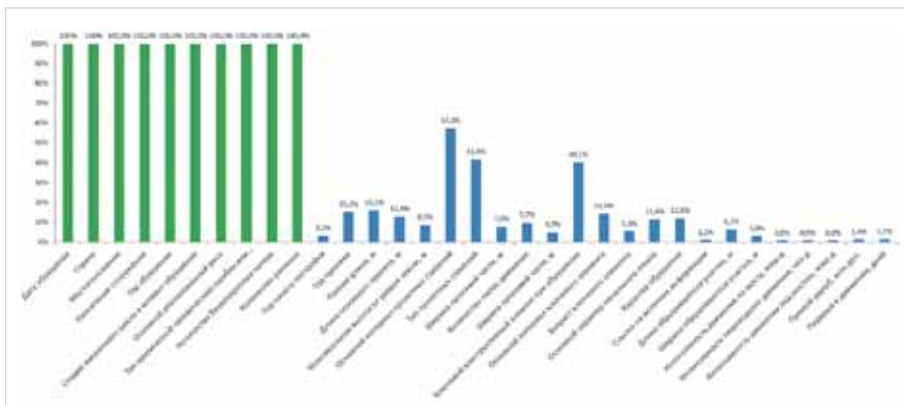


Рис. 1. Информационные поля БД в рамках исследования TG1.5 IABSE и текущая степень их наполненности (обязательные поля выделены зеленым цветом)



Рис. 2. Мировая статистика и тренды роста критических отказов автомобильных и пешеходных МС и их последствий для жизни и здоровья человека за 1966–2018 годы (на январь 2019)

Предметом исследования группы TG1.5 являются автодорожные и пешеходные МС, поскольку отмечен значительный рост числа и последствий обрушений именно этих групп конструкций, в сравнении с железнодорожными. К тому же автодорожные и пешеходные МС сходны по характеру случайности расположения, веса и габаритов эксплуатационных нагрузок. Для исследования выбран период с 1966 по 2021 год, который является предпоследним годом работы группы перед разработкой итогового отчета в 2022 году. На периоде с 1966 года было решено сосредоточиться потому, что более старые «уроки прошлого» уже практически полностью учтены в современных нормах проектирования.

Число случаев отказов МС, зарегистрированных в БД, увеличилось за период с 2016 года по настоящее время, за счет применения новых технологий сетевого поиска данных и фактического прироста текущей статистики, с 363 до 651. На рис. 2 показано распределение обрушений МС, зарегистрированных в БД, которые произошли в 74 странах за 53-летний период.

Одним из наиболее ценных результатов исследования является идентификация опасностей. На сегодняшний день по БД идентифицировано 28 основных групп опасностей (рис. 3).

Здесь будет уместно процитировать известного исследователя в области надежности конструкций Йорга Шнайдера [6]: «Может быть исследована только та часть потенциального риска, которая уже где-то проявилась и, следовательно, объективно известна».

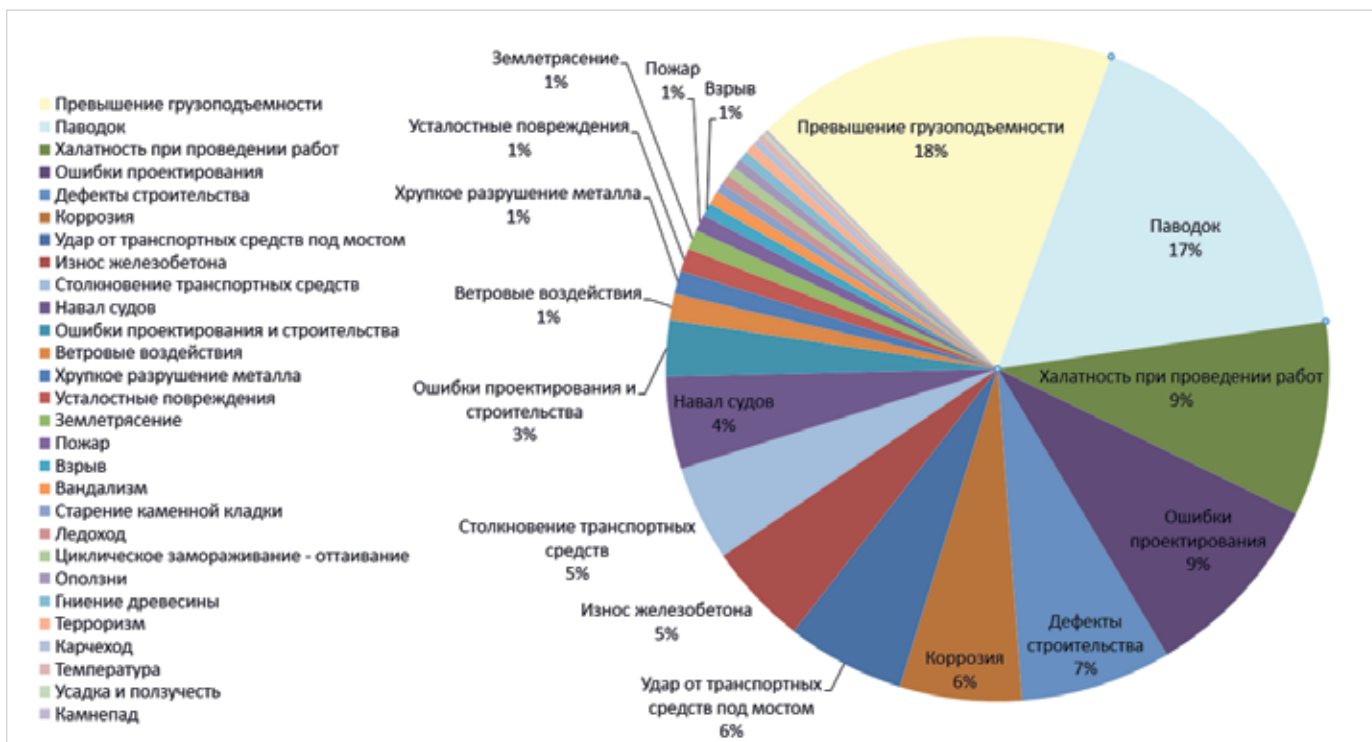


Рис. 3. Распределение обрушений МС по видам опасностей (по состоянию на январь 2019)

При обработке БД было получено много других статистических результатов, представленных в [5]: распределение МС по назначению (автодорожные – пешеходные), последствий по типам опасностей и группам опасностей; по этапам ЖЦ и т. д. Так, например, соотношения количества обрушений автодорожных и пешеходных МС по БД составляют 85% и 15%, числа погибших – 78% и 22%, раненых – 62% и 38%

соответственно для автодорожных и пешеходных, что говорит о не меньшей значимости работы по снижению рисков пешеходных МС по сравнению с автодорожными. Следует отметить тенденцию к усилению катастрофических последствий критических отказов МС, находящихся в эксплуатации, строящихся и ремонтирующихся при наличии на МС и под ними транспортных потоков (рис. 4).

Также были выявлены и проанализированы типы критических человеческих ошибок или других форс-мажорных обстоятельств. Из диаграммы на рис. 5 видно, что 23% разрушений МС вызваны ошибками при их создании, то есть при проектировании и строительстве; 40% вызваны ошибками эксплуатации и 37% произошли из-за непредсказуемых воздействий природы и пользователей.

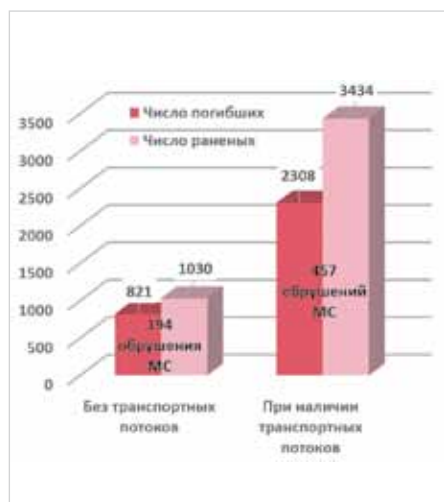


Рис. 4. Распределение последствий для жизни и здоровья человека в результате обрушений МС при наличии на них и под ними транспортных потоков (за 1966–2018 годы)

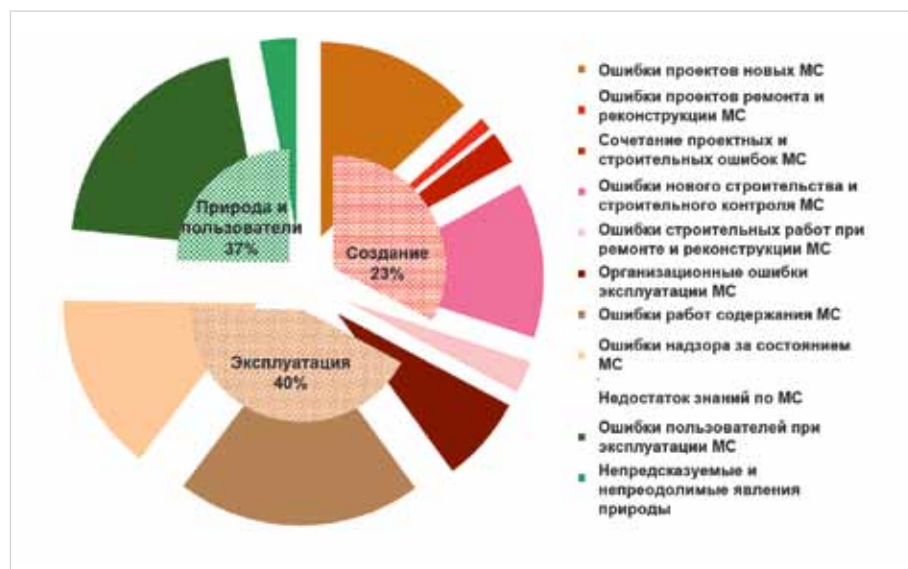


Рис. 5. Распределение критических отказов МС по группам производственных ошибок человека или других форс-мажорных обстоятельств

Это косвенно подтверждает мировые данные о значительной роли ошибок людей, занятых в создании и функционировании инфраструктурных объектов, в росте отказов строительных конструкций. Профессиональные человеческие ошибки, которые вызвали критические отказы, как сумма ошибок «создания» и «эксплуатации», составили в целом 63% (рис. 5). Эта цифра довольно близко коррелирует с данными многих других авторитетных международных источников: в некоторых трудах даже до 75% отказов строительных конструкций отнесено на счет человеческих ошибок [6].

Дальнейший анализ сравнительно недавних критических отказов МС из БД показывает, что их количество увеличивается со временем: в основном из-за старения и износа мостового парка, усиления негативных воздействий природной и техногенной сред, недостаточности мероприятий по надзору и обслуживанию, наличия скрытых и нераспознанных дефектов. Аналогично мировой статистике, существует схожая тенденция роста обрушений МС и в России, особенно заметная в период двух последних десятилетий (рис. 6).

Причины обрушений МС также коррелируют с выявленными при анализе мировой БД. Если раньше

в среднем около трети аварий МС происходило при их строительстве, то в последнее десятилетие эта доля уменьшилась до 18%. Вызвано это, как и во всем мире, старением основной части мостового парка. В сравнении с мировыми данными прослеживается, что риски при одном среднестатистическом обрушении в России пока, по счастливой случайности, значительно ниже (рис. 6). Однако, несмотря на относительно небольшое число погибших и раненых, обрушения мостов – это еще и огромный материальный ущерб, который пока не анализировался. Они оказывают также большое психологическое воздействие на пользователей транспортных коммуникаций, на общество в целом и на международный престиж государства.

Методы повышения надежности МС на основе анализа данных статистики критических отказов, как показывает мировой опыт, можно подразделить на следующие группы:

1. Выявление групп рисков по фактам критических отказов и осуществление экстренной углубленной проверки, ремонта или замены сомнительных типов конструкций существующих МС.
2. Разработка системы переоценки существующих МС с использованием характерных произошедших критических отказов в качестве

головных событий, построение деревьев отказов, ранжирование элементов МС по критичности рисков, определение приоритетности мероприятий (усиленный контроль, замена, ремонт или модернизация элементов) по управлению рисками мостового парка.

3. Организация системы обратных связей, когда за каждым произошедшим критическим отказом существующего МС следует оперативная разработка корректировок нормативной и методической документации и/или изменений соответствующих типов проектных решений.

4. Организация системы проактивных обратных связей, когда разработка корректировок нормативной и методической документации и/или изменений типов проектных решений производится в результате моделирования возможных в будущем критических отказов.

Можно привести ряд мировых примеров реализации методов повышения надежности МС по типу п. 1 вышеприведенного перечня. Так, например, после обрушения Серебряного моста через реку Огайо в США в 1967 году, которое унесло 46 жизней, один из двух аналогичных мостов был сразу же закрыт, а затем разобран в 1971 году. Второй аналог после тщательной проверки использовался вплоть до 1991 года [1]. Другим, более современным примером является углубленное исследование, а затем демонтаж нескольких однотипных мостов в Бельгии после обрушения в 1992 году моста через реку Шелдт, ослабленного коррозией преднапряженных пучков [7].

Однако эта группа методов весьма затратна и реализуется в основном в странах с благополучной экономикой, причем, как правило, после реализации трагических последствий с человеческими жертвами. Так, виадук проектировки Риккардо Моранди в Генуе, частичное обрушение которого 14 августа 2018 года унесло жизни 43 человек (рис. 7), был полностью демонтирован под постройку нового МС.



Рис. 6. Статистика за последние 20 лет и тренды роста критических отказов российских автомобильных и пешеходных МС и их последствий для жизни и здоровья человека



Рис. 7. Вид рухнувшей 14.08.2018 части виадукта в Генуе
(static.standard.co.uk/s3fs-public/thumbnails/image/2018/08/15/16/enoabridgecollapse1508a.jpg)

Эта недавняя трагедия заставила вспомнить аварию другого, также запроектированного Моранди моста Санто Стефано вблизи Мессины 23 апреля 1999 года [8]. Это обрушение осталось почти без внимания, так как не имело трагических последствий. Кроме того, в Венесуэле существует мост Генерала Рафаэля Урданеты, построенный по проекту Моранди в 1962 году. Этот мост имеет пять внеклассных вантовых пролетов по 235 м, во многом аналогичных по конструкции обрушившейся в Генуе системе, при полной длине 8678 м и высоте проезжей части над рельефом, достигающей 92 м. Очевидно, что, с учетом состояния экономики Венесуэлы, данный мост придется эксплуатировать еще долго, несмотря на то, что он на пять лет старше генуэзского аналога и имеет не меньшие риски.

Аналогичная ситуация, когда конструкции группы риска не могут быть заменены в кратчайшие сроки, существует и во многих других случаях. Так, для российского мостового парка сигналом тревоги стала наметившаяся с начала века тенденция к массовости (рис. 6) и повторяемости обрушений множества типов конструкций автомобильных и пешеходных МС [9], которые обо-

значили многочисленные группы риска, но в силу их распространенности на дорогах общего пользования не могут быть заменены полностью в сжатые сроки. Накопленная статистика позволяет выделить «серийные» случаи обрушений. Например, для разрезных балочных МС, которых в РФ на дорогах общего пользования около 90%, наиболее распространенными «серийными» случаями, ответственными за обрушение мостового полотна или его существенной части, по информации БД, явились:

- разрушение оснований опор от местного размыва, карста и других грунтовых явлений;
- сброс и опрокидывание балок пешеходных МС от ударов негабаритного транспорта;
- разрушение и опрокидывание тротуарных консолей;
- разрушение плиты проезда или балочной клетки от воздействия осевой нагрузки;
- разрушение (срез от воздействия поперечной силы) насадки опоры;
- разрушения и провалы переходных плит;
- разрушение тел опор от эксплуатационных нагрузок;
- разрушение балок от воздействия изгибающего момента;
- опрокидывание крайних балок автомобильных мостов при нарушении связей;
- падение балок пролетных строений из-за сдвигов и кренов опор и опорных частей;
- разрушение балок от воздействия поперечной силы.

Российский мостовой парк, так же, как в Европе и США, вступает в период, когда большинство несущих конструкций, построенных в 1955–1990 годы, входит в критический возраст, начинают проявляться последствия скрытого строительного брака, результаты деградационных и усталостных процессов. Как по данным общемировой статистики (рис. 4), так и в пределах РФ обрушения МС

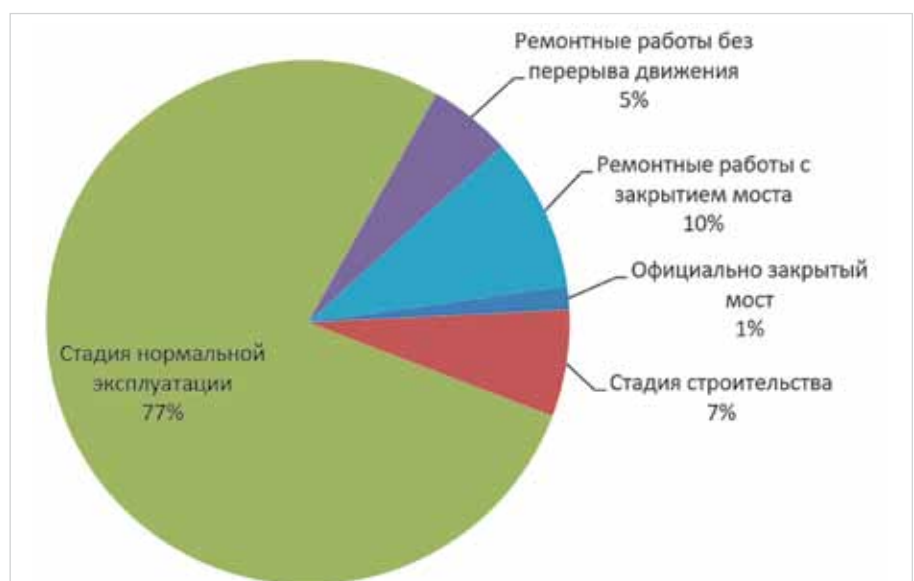


Рис. 8. Распределение количества обрушений МС в РФ по стадиям жизненного цикла при наличии и отсутствии транспортных потоков



Рис. 9. Обрушение путепровода Конкорд в Канаде 30.09.2006
(cip.management.dal.ca/publications/report_eng%20concorde%20overpass%20montreal.pdf)

происходят все чаще на стадии эксплуатации (рис. 8).

Как видно из диаграммы (рис. 8), 82% всех отмеченных обрушений произошли при свободном доступе на или под МС транспортных и пешеходных потоков. Среди них отмечено несколько коллапсов с высокой вероятностью множественных смертельных исходов, когда падение пролетных строений МС происходило внезапно на проходящие внизу транспортные магистрали с интенсивным движением. По счастливой случайности в результате этих обрушений никто не пострадал, хотя потенциальный риск гибели и

ранения людей, по опыту аналогичных случаев в других странах может достигать более десятка единиц. Так, например, в 2006 году в Канаде на проходящую внизу автодорогу рухнуло железобетонное пролетное строение путепровода Конкорд в Лавале (Канада), в результате чего пять человек погибло и шесть получили значительные ранения (рис. 9).

Это событие явилось поводом к пересмотру правил проектирования CSA-S6-2006 Code, стандарта по бетону CSA-A23.1-2004, обновлению методик расчета и рекомендаций по осмотру и содержанию МС, а также выделению средств

на подробное обследование 135 подобных мостовых конструкций в Канаде. В результате 28 мостов были разобраны, а 25 немедленно отремонтированы [8].

Подобные российские случаи также вызвали настороженность ответственных представителей дорожных служб, особенно к поведению преднапряженных железобетонных балок пролетами до 33 м, которым раньше уделялось значительно меньше внимания, чем большим пролетам внеклассных МС. Менеджмент рисков в отношении этих относительно небольших пролетных строений МС потребовал реализации методов повышения надежности по типу п. 2 (см. выше). Был предложен ряд мероприятий по управлению группами риска, однако наиболее радикальное решение – быстрая замена наиболее опасных и имеющих большой износ балок групп риска на всей дорожной сети – оказалось невыполнимым, так как их насчитывается на дорогах общего пользования несколько тысяч единиц. Поэтому предполагается постепенная, рассчитанная на несколько десятилетий процедура замены, в сочетании с организацией углубленного контроля балок групп риска, их тщательным содержанием и усилением (при необходимости) до появления финансовой возможности полной замены.



Рис. 10. Неразрушающий контроль преднапряженных балок пролетных строений МС при помощи магнитного дефектоскопа «Интрос»

Одним из неразрушающих видов контроля, который было решено развивать для обслуживания группы риска, является магнитодефектоскопия рабочей арматуры балок при помощи дефектоскопа «Интрос» российского производства для поиска ослаблений армирования (рис. 10). Поскольку при помощи этих приборов физически возможно протестировать только несколько десятков балок в год, была поставлена задача выявить наиболее опасные конструкции для их первоочередной неразрушающей диагностики.

Для решения поставленной задачи были задействованы предусмотренные российскими стандартами методики анализа рисков [10]. Данные анализа статистики отказов МС, приведенные выше в данной статье, в сочетании с данными регулярной диагностики МС, были использованы для:

- идентификации потенциальных опасностей;
- формирования перечня нежелательных событий;
- построения деревьев отказов и прогнозирования развития дефектов;
- определения потенциальных рисков причинения вреда жизни и здоровью пользователей автомобильных дорог общего пользования.

Рамки этой статьи не позволяют изложить все этапы анализа рисков, в ходе которого были сформированы матрицы рисков «вероятность – тяжесть последствий» и определены критичности рисков. В итоге типы пролетных строений групп риска были ранжированы по критичности рисков уменьшения сечения рабочей арматуры, что определило приоритетность проведения мероприятий по управлению рисками, в том числе неразрушающего приборного контроля. Количество идентифицированных для этой цели типов пролетных строений было сведено в 135 подгрупп по начальной критичности рисков, в основе определения которой лежали особенности конструктивных параметров, ка-

тегория автодороги, дорожно-климатическая зона, возраст с момента ввода в эксплуатацию, наличие под пролетными строениями автопроездов, пешеходных зон, железнодорожных путей или судоходства. Актуальность влияния перечисленных факторов риска уточнялась на основе статистики критических отказов МС, обзор которой дан выше.

При адресном расчете критичности рисков для любой индивидуальной балки из идентифицированных 135 подгрупп, по результатам диагностики (типы 1–4 [11]) или обследования (типы 5–9 [11]) конкретного МС учитывается влияние обнаруженных дефектов и повреждений на вероятность отказа. Итогом реализации данного комплекса методов повышения надежности по типу п. 2 из вышеприведенного списка являются перечни МС и их критических элементов, ранжированные по приоритетности осуществления мероприятий по управлению рисками, в том числе проведение неразрушающей магнитодефектоскопии.

Другим характерным и широко известным в мире примером реализации методов повышения надежности МС с использованием опыта критических отказов для организации системы обратных связей (см. выше тип по п. 3) является изменение подходов к проектированию висячих и вантовых систем по итогам анализа причин обрушения Такомского моста [1, 2]. Мост обрушился спустя четыре месяца после ввода в эксплуатацию в 1940 году. Известно, что проектировщик принял слишком тонкую балку жесткости с соотношением высоты к длине пролета 1:72, без учета аэродинамических воздействий. К решению проблемы подключился Т. Карман, после чего общемировой практикой стало производить расчеты висячих и вантовых МС на воздействие ветра и испытания их крупномасштабных моделей в аэродинамических трубах. Это наглядная demonstra-

ция принципа обратной связи «проектирование – обрушение – проектирование», постоянно реализующегося на практике, особенно после значительных критических отказов конструкций в результате неординарных природных воздействий (землетрясения, цунами, наводнения, оползни и т. п.).

Но наиболее эффективным методом повышения надежности и безопасности конструкций является организация системы проактивных обратных связей (см. выше тип по п. 4), когда главной целью является прогнозирование нежелательных событий. На этой основе необходимы разработка и воплощение мероприятий по управлению рисками, которые теоретически могут и не допустить до реализации этого события на практике. Например, это оснащение высоких конструкций МС аэронавигационными устройствами и их расчеты на удар самолета, а также многие другие подобные мероприятия. Возможно, благодаря этим мерам фатальное столкновение воздушного судна с МС рассматривалось и анализировалось пока только теоретически.

Но и при проактивных корректировках нормативных положений и типов проектных решений анализ уже произошедших критических отказов МС может быть весьма полезен, особенно при воплощении этого подхода в рамках управления техническим состоянием национального мостового парка, когда анализируются аварии, случившиеся в других странах. Так как зарубежный национальный опыт учета этих отказов, особенно если они не являются сенсационными и катастрофичными в смысле количества жертв, далеко не всегда подробно освещается в научных трудах и средствах массовой информации, статистика рассмотренной БД может быть полезна для проактивного анализа проектных решений с учетом долговременных факторов применительно, например, к МС на дорогах общего пользования РФ.

Выводы

- Целевая группа TG1.5, созданная в рамках деятельности Международной ассоциации мостового и строительного инжиниринга (IABSE) с целью разработки на основе «уроков прошлого» практических рекомендаций по снижению рисков проектных решений МС, собрала и систематизировала к настоящему времени данные по критическим отказам (обрушениям) 651 МС, произошедшим в мире с 1966 года.
- Общее число погибших в результате обрушений автодорожных и пешеходных МС за период 1966–2018 годов по 74 странам составило 3129 (максимум 246, в среднем 59 в год), а получивших серьезные травмы – 4464 (максимум 500, в среднем 84 в год) соответственно. Средний реализованный риск на одно обрушение по критериям безопасности жизни человека составляет 5 безвозвратных потерь и 7 раненых.
- На сегодняшний день TG1.5 идентифицировано 28 групп опасностей, реализованных при зарегистрированных в БД обрушениях МС.
- Мировой анализ критических отказов МС за период с 1966 года показывает, что их рост со временем обусловлен в основном накоплением последствий старения и износа мостового парка, усилением негативных воздействий природной и техногенной сред, недостаточностью мероприятий по надзору и обслуживанию, наличием скрытых и нераспознанных дефектов.
- Выявлена тенденция к усилению катастрофических последствий критических отказов МС, находящихся в эксплуатации, строящихся и ремонтирующихся при наличии на МС и под ними транспортных потоков. Среднее число жертв в этих случаях примерно в три раза превышает потери при обрушениях МС, строящихся с полным закрытием движения либо выведенных из эксплуатации на момент обрушения.
- Результаты обработки данных подтвердили закономерность преобладания причин отказов МС, вызванных профессиональными ошибками человека, на уровне 63% от общего числа случаев, зарегистрированных в базе данных.
- Тенденции роста обрушений МС и их последствий для жизни и здоровья людей в России аналогичны мировой статистике, однако усредненные риски при одном среднестатистическом обрушении в России пока значительно ниже общемировых показателей.
- Установлено, что наиболее распространенным в мировой практике методом повышения надежности МС на основе анализа данных статистики критических отказов является выявление групп рисков по фактам катастрофических обрушений с последующей углубленной проверкой или экстренной заменой существующих МС, составляющих группу риска.
- Значительно более эффективен метод, предусматривающий разработку системы переоценки существующих МС с использованием характерных, уже произошедших, критических отказов в качестве головных событий для построения деревьев отказов, с последующим анализом рисков, ранжированием элементов МС по критичности рисков и определением приоритетности мероприятий по управлению рисками мостового парка.
- Действенным методом, направленным на повышение надежности проектных решений с использованием «уроков прошлого», является организация системы обратных связей, когда за каждым произошедшим критическим отказом существующего МС следует оперативная разработка корректировок нормативной и методической документации и/или изменений соответствующих типов проектных решений.
- Оптимальной для предупреждения обрушений МС является организация системы про-активных обратных связей, когда разработка корректировок нормативной и методической документации и/или изменений типов проектных решений производится в результате моделирования потенциально возможных в будущем критических отказов.

А.В. Сырков, канд. техн. наук,
начальник отдела
АО «Трансмост»,
председатель целевой группы
TG1.5 IABSE;

А.С. Сизиков,
технический директор
Vinci Construction Grands Projects,
член целевой группы TG1.5 IABSE

Использованные источники

- [1] Imhof D. Risk Assessment of Existing Bridge Structures. Ph.D. Dissertation, King's College, London; 2004.
- [2] Proske D. Bridge Collapse Frequencies versus Failure Probabilities. Springer International Publishing AG; 2018.
- [3] Whittle R. Failures in Concrete Structures: Case Studies in Reinforced and Prestressed Concrete. CRC Press; 2012.
- [4] Tang M.-C. The story of the Coror Bridge. IABSE Case studies 1. IABSE; 2014.
- [5] Сырков А. Review of bridge collapses worldwide 1966 – 2017, Keynote report in the IABSE Workshop «Ignorance, uncertainty and human errors in structural engineering». Helsinki, Finland: 2017.
- [6] Schneider J., Vrouwenvelder T. Introduction to Safety and Reliability of Structures. IABSE Structural Engineering Documents (SED) 5, 3rd reviewed and extended Edition. IABSE; 2017.
- [7] Dister V. The rebuilding of the Harchies bridge / Proceedings, Bridges and Structural Sustainability – Seeking Intelligent Solutions, IABSE Conference, Guangzhou, 2016, pp. 335–342.
- [8] Calvi G.M., Moratti M., O'Reilly G.J. and others. Once upon a time in Italy: the tale of the Morandi bridge. IABSE Journal of Structural Engineering International (SEI) 2019; №2: pp. 198–216.
- [9] Сырков А.В. Предложения по снижению рисков аварий мостовых сооружений // Дорожная держава. – 2015. – № 60. – С. 61–63.
- [10] ГОСТ Р 51901.1-2002. Менеджмент риска. Анализ риска технологических систем.
- [11] ОДМ 218.4.001-2008 «Методические рекомендации по организации обследования и испытания мостовых сооружений на автомобильных дорогах». Федеральное дорожное агентство (РОСАВТОДОП). – М., 2008.