

А. В. СЫРКОВ,

к. т. н., 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

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ МОСТОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СТАТИСТИКИ ОТКАЗОВ

В статье приведены некоторые результаты работы целевой группы TG1.5 IABSE по сбору и анализу данных по критическим отказам (обрушениям) автодорожных и пешеходных мостовых сооружений (МС) в 74 странах, начиная с 1966 года. Даны количественные показатели последствий для жизни и здоровья людей. Выявлены тенденции и причины роста обрушений. Классифицированы наиболее распространенные в мировой практике методы повышения надежности мостовых сооружений. Представлены примеры наиболее прогрессивных и эффективных решений.

В последнее время в мире отмечается тенденция к росту числа критических отказов, обрушений мостовых сооружений (МС). Рядом зарубежных исследователей проводился анализ этой статистики. В 2018 году 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 и разработка практических рекомендаций с целью снижения рисков. На данный момент TG1.5 включает в себя 18 исследователей из 16 стран.

Обнаруживаемая в открытых источниках информация систематизируется, преобразуется и заполняется в формате базы данных (БД) Excel, содержащей 33 поля, в том числе 10 обязательных для заполнения.

Предметом исследования группы TG1.5 являются автодорожные и пешеходные МС, поскольку, по сравнению с железнодорожными, отмечен значительный рост числа и последствий обрушений именно этих групп конструкций. Для исследования выбран период с 1966 по 2021 гг. Итоговый отчет будет разработан в 2022 году. На периоде с 1966 года 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. 1, 2 показано распределение учтенных обрушений, которые произошли в 74 странах за 53-летний период.



Рис. 1. Мировая статистика и тренды роста критических отказов автомобильных и пешеходных МС и их последствий для жизни и здоровья человека за 1966–2018 гг.

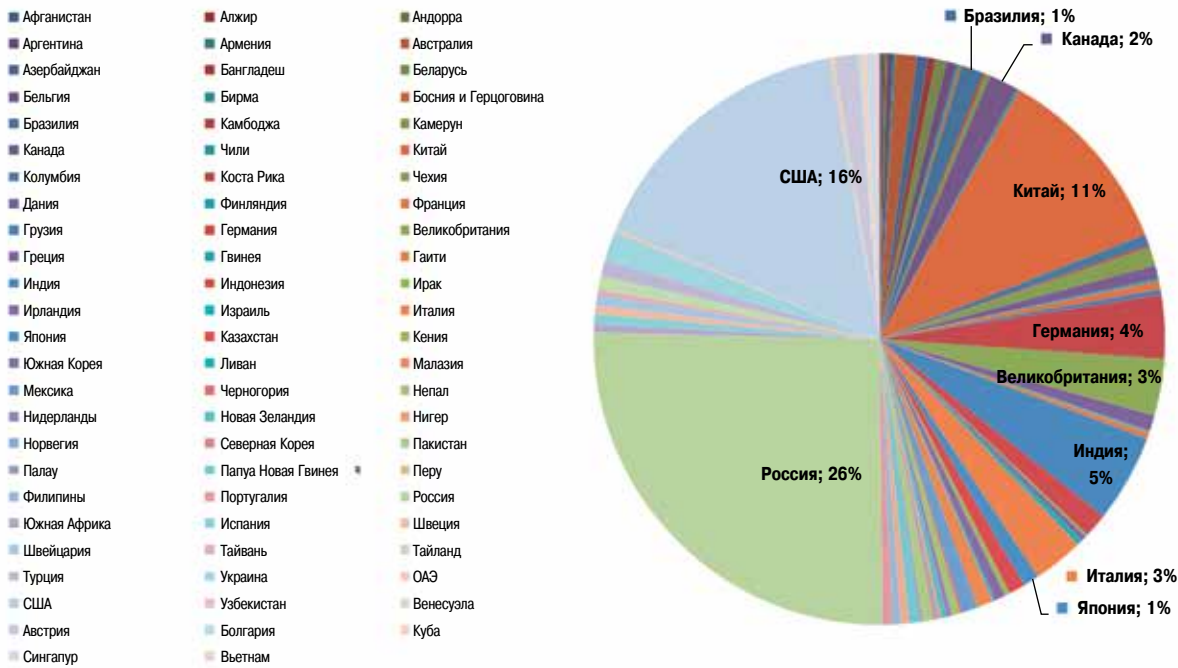


Рис. 2. Распределение количества обрушений МС, зарегистрированных в БД, по 74 странам (на январь 2019 года)

На сегодняшний день по БД идентифицировано 28 основных групп опасностей (рис. 3).

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

При обработке БД получено много и других статистических результатов. (Опубликованы: Syrkov A.

Review of bridge collapses worldwide 1966–2017, Keynote report in the IABSE Workshop «Ignorance, uncertainty and human errors in structural engineering». Helsinki, Finland: 2017). В их числе распределение МС по назначению (автодорожные — пешеходные), последствий по типам опасностей и группам опасностей; по этапам ЖЦ и т. д. Так, например, доли обрушений автодорожных и пешеходных МС по БД составляют 85 и 15%, число погибших — 78 и 22%, раненых — 62 и

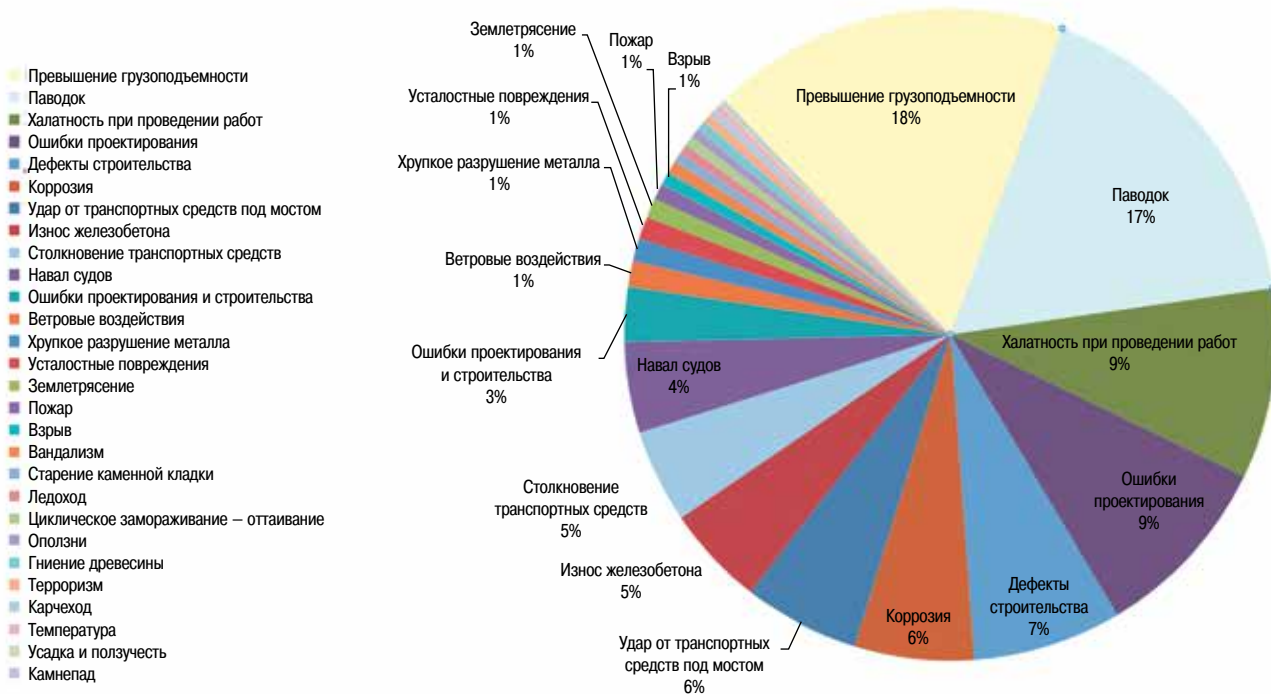


Рис. 3. Распределение обрушений МС по видам опасностей (по состоянию на январь 2019 г.)

38% соответственно для автодорожных и пешеходных, что говорит о не меньшей значимости работы по снижению рисков пешеходных сооружений. Следует отметить тенденцию к усилению катастрофических последствий критических отказов МС, находящихся в эксплуатации, строящихся и ремонтирующихся при наличии на них и под ними транспортных потоков (рис. 4).

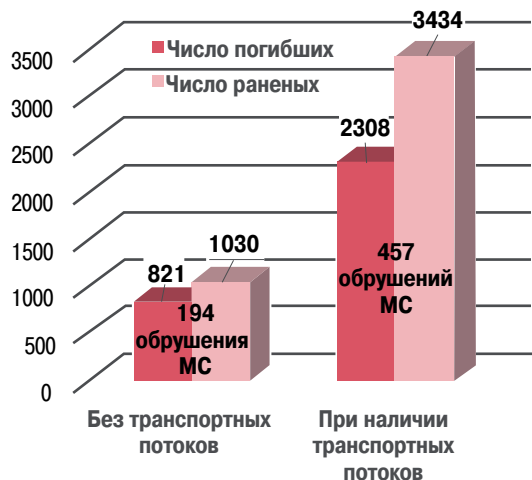


Рис. 4. Распределение последствий для жизни и здоровья человека в результате обрушений МС при наличии на них и под ними транспортных потоков (за 1966–2018 гг.)

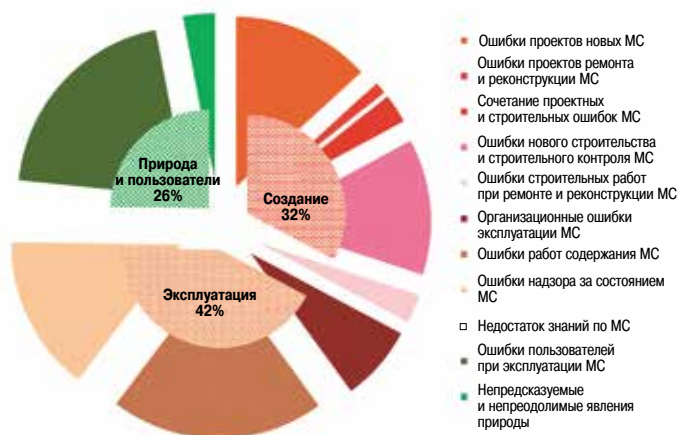


Рис. 5. Распределение критических отказов МС по группам производственных ошибок человека или других форс-мажорных обстоятельств

Также были выявлены и проанализированы типы критических человеческих ошибок или других форс-мажорных обстоятельств. Из диаграммы на рис. 5 видно, что 32% разрушений МС вызваны ошибками при проектировании и строительстве; 42% — ошибками эксплуатации, а 26% произошли из-за непредсказуемых воздействий природы и пользователей.

Это косвенно подтверждает мировые данные о значительной роли ошибок людей, занятых в создании и функционировании инфраструктурных объектов, в росте отказов строительных конструкций. Сумма ошибок «создания» и «эксплуатации» составила в целом 74% (рис. 6). Эта цифра коррелирует с данными многих других авторитетных международных источников.

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 также коррелируют с выявленными при анализе мировой БД. Если раньше в среднем около половины аварий МС происходила при их строительстве, реконструкции и ремонте, то в последнее десятилетие эта доля уменьшилась до 18%. Вызвано это, как и во всем мире, старением основной части мостового парка. Прослеживается, что риски при одном среднестатистическом обрушении в России (в сравнении с мировыми) пока, по счастливой случайности, значительно ниже. Однако, несмотря на относительно небольшое число погибших и раненых, обрушения мостов — это и огромный материальный ущерб, который еще 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 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 пункта 1 вышеприведенного перечня. Так, например, после обрушения Серебряного моста через р. Огйо 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. Другим, более современным примером, является углубленное исследование, а затем демонтаж нескольких объектов в Бельгии после обрушения в 1992 году моста через р. Шелдт, ослабленного коррозией преднапряженных пучков.

Однако эта группа методов весьма затратна и реализуется в основном в странах с развитой экономикой, причем, как правило, после трагических последствий с человеческими жертвами. Недавнее обрушение виадука проекта Риккардо Моранди в Генуе (август 2018 года), когда погибли 43 человека, заставило вспомнить аварию во многом аналогичного по системе преднапряжения (и запроектированного тоже Моранди) моста Санто Стефано вблизи Мессины в 1999 году. То обрушение осталось почти без внимания, так как не имело трагических последствий. Кроме того, в Венесуэле существует мост им. Генерала Рафаэля Урданеты, построенный по проекту Моранди в 1962 году. Это сооружение имеет пять внеклассных вантовых пролетов по 235 м, почти полностью аналогичных по конструкции обрушившейся в Генуе системе, при полной длине 8678 м и высоте проезжей части над рельефом до 92 м. Очевидно, что данный мост придется эксплуатировать еще долго, несмотря на то, что он на пять лет старше генуэзского и имеет не меньшие риски.

За период с 1966 по 2019 гг. (53 года)

- 168 зарегистрированных случаев обрушений (3 случая в год в среднем)
- 63 безвозвратных потери (max 20, в среднем 1 в год)
- 252 получивших травмы (max 100, в среднем 5 год)

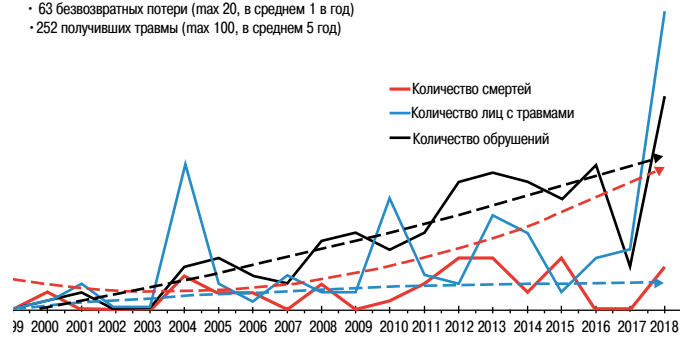


Рис. 6. Статистика за последние 20 лет и тренды роста критических отказов российских автодорожных и пешеходных МС и последствий для жизни и здоровья человека

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 и повторяемости обрушений множества типов конструкций автодорожных и пешеходных МС. Этим обозначились многочисленные группы риска, но многие сооружения в силу распространенности на дорогах общего пользования не могут быть заменены полностью в сжатые сроки.

Накопленная статистика позволяет выделить «серийные» обрушения. Например, для разрезных балочных МС, которых в РФ на дорогах общего пользования около 90%, наиболее распространенными случаями, ответственными за обрушение мостового полотна или его существенной части, по информации БД, явились (в порядке степени частоты отказа):

- 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 автодорожных 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 гг., имеет критический возраст, и начинают проявляться последствия скрытого строительного брака, результаты деградационных и усталостных процессов. Как по данным общемировой статистики, так и в пределах РФ, обрушения МС происходят все чаще на стадии эксплуатации, при наличии на мостах пользователей и их транспортных средств (рис. 7).



Рис. 7. Распределение количества обрушений МС в РФ по стадиям жизненного цикла при наличии и отсутствии транспортных потоков

Как видно из диаграммы, 82% всех отмеченных обрушений произошли при наличии транспортных потоков на или под МС.

Одну значительную аварию следует выделить особо. Это произошедшее летом 2010 года обрушение двух железобетонных преднапряженных балок путепровода, построенного по типовому проекту в 1975 году, на автодорогу I технической категории с интенсивным движением транспорта. По счастливой случайности никто не пострадал, хотя потенциальный риск гибели и ранения людей, по опыту аналогичных случаев в других странах, может быть велик. Так, например, в 2006 году в Канаде на проходящую внизу автодорогу рухнуло железобетонное пролетное строение путепровода «Лаваль», в результате чего пять человек погибли и шесть получили значительные ранения. Это событие явилось в стране поводом к выделению средств

на подробное обследование 135 подобных мостовых конструкций, в результате 28 из них были разобраны, а 25 немедленно отремонтированы.

Российский случай 2010 года также вызвал осторожность ответственных представителей дорожных служб насчет состояния железобетонных балок пролетов в диапазоне 12–33 м, которым раньше уделялось значительно меньше внимания, чем внеклассным МС. Менеджмент рисков в отношении этих относительно небольших пролетных строений потребовал реализации методов повышения надежности по типу пункта 2 (см. выше). Был предложен ряд мероприятий, однако наиболее радикальное решение — быстрая замена подобных балок старше 35 лет 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 группы риска, их тщательным содержанием и усилением (при необходимости) до появления финансовой возможности полной замены.

Одним из неразрушающих видов контроля, который было решено развивать для обслуживания группы риска, является магнитная дефектоскопия рабочей арматуры балок при помощи дефектоскопа «Интрос» российского производства для поиска ослаблений армирования (рис. 8). 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.



Рис. 8. Неразрушающий контроль преднапряженных балок пролетных строений МС при помощи магнитного дефектоскопа «Интрос»

Для решения поставленной задачи были задействованы предусмотренные российскими стандартами методики анализа рисков (по ГОСТ Р 51901.1-2002). Данные анализа статистики отказов, приведенные выше, в сочетании с данными регулярной диагностики МС, были использованы для:

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

В итоге типы пролетных строений были ранжированы по критичности рисков уменьшения сечения рабочей арматуры. Это определило приоритетность проведения мероприятий по управлению рисками, в том числе неразрушающего приборного контроля. Количество идентифицированных для данной цели типов пролетных строений было сведено в 135 подгрупп по начальной критичности рисков. В основе ее определения лежали особенности конструктивных параметров, категория автодороги, дорожно-климатическая зона, возраст с момента ввода в эксплуатацию, наличие под пролетным строением автопоездов, железнодорожных путей или судоходства. Актуальность влияния перечисленных факторов 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; ОДМ 218.4.001-2008 «Методические рекомендации по организации обследования и испытания мостовых сооружений на автомобильных дорогах») или обследования (типы 5-9) конкретного МС учитывается влияние обнаруженных дефектов и повреждений на вероятность отказа. Итогом реализации данного комплекса методов повышения надежности по типу пункта 2 из вышеприведенного списка являются перечни МС и их критических элементов, ранжированные по приоритетности осуществления мероприятий по управлению рисками, в том числе проведение неразрушающей магнитной дефектоскопии.

Характерным, широко известным в мире примером реализации методов повышения надежности МС с использованием опыта критических отказов для орга-

низации системы обратных связей (см. выше, тип по п. 3), является изменение подходов к проектированию висячих и вантовых систем по итогам анализа причин обрушения Такомоского моста. 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.

После данного случая создалась общемировая практика — производить расчеты висячих и вантовых МС на воздействие ветра и испытания их крупномасштабных моделей в аэродинамических трубах. Это наглядная демонстрация принципа обратной связи «проектирование — обрушение — проектирование», который постоянно реализуется 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, а на его основе — разработка и воплощение мероприятий по управлению рисками. Например, это оснащение высоких конструкций МС аэронавигационными устройствами и их расчеты на удар самолета. Возможно, благодаря подобным 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 опыт учета отказов, особенно если они не являются сенсационными и катастрофическими в смысле количества жертв, далеко не всегда передается широкой огласке, статистика рассмотренной БД может быть полезна для проактивного анализа проектных решений с учетом долговременных факторов применительно, например, к МС на дорогах общего пользования РФ.

Так, в последние годы проектировщики в России часто предлагают монолитные железобетонные плиты с оставляемой металлической или композитной опалубкой. На первый взгляд, это весьма эффективное по критериям сокращения трудозатрат и сроков строительства решение, так как не требуется проектировать, возводить и разбирать съемную опалубку. Однако по критериям надежности, долговечности и рисков сверхнормативных затрат жизненного цикла в результате преждевременного износа оно представляется неприемлемым. Опасность данного типа конструкций проявляется как раз при долговременной эксплуатации, через несколько лет. Результатом может стать значительный ущерб, вплоть до внезапного обрушения МС. Случаи отказов подобных конструкций отмечены в зарубежной практике уже давно, и поэтому, видимо, подобные решения не имеют в ряде развитых стран широкого применения. Представляется, что оставляемые опалубки плит МС потенциально опасны по следующим, скрытым на момент ввода в эксплуатацию и в гарантийный период, причинам:

- оставляемая опалубка из практически водонепроницаемых материалов при возможном браке или повреждении гидроизоляции долгое время скрывает следы протечек, в то время как их ингредиенты и продукты — хлориды, продукты выщелачивания, гели, ржавчина — накапливаются в бетоне плиты, способствуя ее ослаблению и усиленной коррозии арматуры и упоров, обеспечивающих совместную работу стальных главных балок и ж/б плиты;

- оставляемая опалубка скрывает возможные строительные дефекты недоуплотнения, размораживания, других пороков структуры бетона, нарушения толщины защитного слоя арматуры и провоцирует недобросовестных исполнителей снижать качество работ (например, снижая трудозатраты на уплотнение), так как нижняя поверхность плиты (наружная поверхность опалубки) при приемке всегда идеальна;

- стоимость этой опалубки весьма значительна и не приводит к существенному снижению капитальных затрат при строительстве.

Дефект может быть обнаружен, когда конструкция достигнет состояния неремонтопригодности, либо наступит критический отказ — недопустимое провисание или даже обрушение пролетного строения. Поэтому, используя проактивный подход, для повышения надежности МС в течение всего ЖЦ, применение не-

извлекаемых поддонов для бетонирования плит проезда, особенно в климатических условиях, требующих интенсивного применения противогололедных реагентов, следовало бы исключить.

ВЫВОДЫ

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.

Тенденции роста обрушений МС и их последствий для жизни и здоровья людей в РФ аналогичны мировой статистике, однако усредненные риски 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, однако, 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 ими.

Действенным методом, направленным на повышение надежности проектных решений, 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 проактивных обратных связей, когда разработка подобных корректировок производится в результате моделирования потенциально возможных критических отказов.■