

Анализ и систематизация причин разрушения мостовых сооружений

А.А. Карамышева, Д.А. Строев, М.А. Колотиенко, А.И. Коник

Донской государственной технической университет

Аннотация: в работе представлена классификация основных причинно-следственных аспектов возникновения катастроф большепролетных мостовых сооружений, данная с элементами анализа фактических примеров разрушения конструкций различного типа. Также описаны инновационные разработки, применимые в исследуемой области.

Ключевые слова: усталостное разрушение, мост, большепролетный мост, отказ конструкций, разрушение мостовых конструкций, авария в строительстве, резонанс, износ, аэродинамика мостовых конструкций, балка жесткости, болтовое соединение.

Анализ мирового опыта строительства и эксплуатации большепролетных мостов позволяет утверждать, что причины разрушения конструкций зачастую комплексны: включают несколько факторов влекущих катастрофу. Некорректно произведенные расчеты, необоснованная экономия материала на стадии строительства, отклонение от технологии производства работ, нарушение эксплуатационных предписаний, в совокупности с неблагоприятным природным воздействием, либо приложением избыточной нагрузки, в виде увеличения потока машин, к примеру, приводят к обрушению [1]. Следует учитывать, что воздействия одного негативного фактора, как правило, достаточно, чтобы привести к отказу конструкций [2].

В работе нами выделены следующие основные причины отказа мостовых конструкций:

1. Ошибки, допущенные на стадии проектирования

Ошибки в расчете можно считать первоначальной причиной разрушения инженерных конструкций. Усугубляется влияние данного фактора тем, что выявить погрешность в большинстве случаев возможно лишь в процессе эксплуатации. В качестве примера возможно привести обрушение моста через Ферт-оф-Тей (река Тэй, Шотландия) в 1879 году [3]. Причиной считается ошибка инженера Томаса Бауча. В связи с разногласиями в пробной и окончательной геологических экспертизах, автору сооружения

пришлось перепроектировать мост, уменьшив количество опор, что повлекло увеличение пролетов. Фундаменты представляли собой опалубки, заполненные бетоном, распределяющие на основание нагрузки от чугунных колонн, принимающих вес мостовых балок. Колонны соединялись горизонтальными распорками и вертикальными связями для обеспечения жесткости и устойчивости. Однако, данной конфигурации оказалось недостаточно для предотвращения катастрофы, возникшей во время шторма: произошло обрушение центральных пролетов моста, вследствие усталостного разрушения материала. Опоры моста, сечение которых было некорректно подобрано, не смогли противостоять опрокидыванию. Примененное конусообразное болтовое соединение, вместо цилиндрического штифтового, не обеспечило требуемую совместную работу элементов конструкций.

2. Нарушение эксплуатационных предписаний

Превышение допустимой нагрузки на конструкцию — это наиболее часто указываемое нарушение условий эксплуатации. Данная причина установлена при расследовании факторов крушения Серебряного моста (Огайо, Виргиния, США) в 1967 году [4]. Центральный пролет моста составлял 213 метров, а конфигурация включала новые для того времени решения- применение стержней с проушинами, вместо тросов; минимизацию количества стержней, за счет применения высокопрочной стали; конструирование башен, позволяющих мосту беспрепятственно воспринимать температурные изменения длин цепей благодаря размещению изогнутого фитинга в нижней части опор и штифтов, предотвращающих горизонтальные сдвиги. Однако, запроектированный изначально на восприятие нагрузок от одних из первых моделей легковых автомобилей и грузовых машин мост, в год катастрофы обслуживал увеличившийся вдвое транспортный поток, состоящий из новых моделей авто, вес которых возрос

второе, возникли так же ежедневные пробки, создающие постоянную нагрузку. Катастрофу, повлекшую гибель 46 человек, спровоцировал выход из рабочего состояния одной из стержневых подвесок, задействованных в узле крепления дорожного полотна к тросам. При этом необходимо учесть, что при минимизации количества стержней отказ одного из них увеличивает нагрузку на оставшийся вплоть до полного отказа конструкции.

Не смотря на опыт проектирования, разрушение мостов вследствие перегрузок не редкость даже сегодня. Одной из причин отказа конструкций моста «9340», через реку Миссисипи (Миннесота, США), считается нарушение эксплуатационных условий. Установлено, что на мостовое полотно, в процессе ремонтных работ, было добавлено порядка 51 мм. бетона, что повлекло увеличение статической нагрузки, также были нарушены допустимые пределы воспринимаемого веса, в связи с чем 1 августа 2008 года сооружение обрушилось, в результате чего погибло 13 человек. Центральный пролет составлял 140 м. и состоял из стальной арочной фермы на опорах, с двумя несущими бетонными пилонами

Однако, к нарушениям эксплуатационных предписаний относится не только превышение допустимых нагрузок на конструкцию. Известно, что причиной обрушения моста Хинце Рибейру (Каштелу-де-Пайва, Португалия) в 2001 году, стало проведение работ по добыче песка из прилегающего карьера [5]. Неконтролируемое изъятие породы привело к потере устойчивости в опорах сооружения.

3. Явление резонанса

Большой риск разрушения возникает при раскачивании мостов: действующие при этом колебания, попадая в частоту собственных колебаний конструкции, при интенсивном нарастании могут повлечь аварии сооружений, вследствие явления резонанса [6]. Известны случаи, когда отсутствие дополнительных расчетов на действие резонанса влекло

обрушение конструкций и гибель людей. Катастрофы не удалось избежать во Франции в 1850 году на Анжерском мосту, во время прохождения по нему строевым шагом более 200 человек. Наиболее распространенной иллюстрацией, при рассмотрении аварий вследствие данного явления, является разрушение Египетского моста (Санкт-Петербург, 1905 г.), однако, при упоминании часто упускается из вида заключение экспертов, постановивших в качестве основного негативного фактора «наличие полостей в металле одной из конструктивных частей сооружения, а также возможное окончание эксплуатационного срока службы моста (порядка 80 лет работы)».

Сегодня первостепенной задачей стоит предупреждение подобных катастроф на стадии проектирования, либо в кратчайшие сроки после введения в эксплуатацию. К примеру, в 2000 году был закрыт на реконструкцию мост длиной 325 м., пересекающий реку Темза (Лондон, Великобритания). Максимальный пролет моста составлял 144 м., а сама конструкция сооружения включала восемь тросов, передающих усилия на опоры. Данная конфигурация позволяет выдерживать нагрузку свыше четырех тысяч пешеходов, находящихся одновременно на мосту, однако, в следствие явления резонанса, меньшее количество человек оказалось достаточным для вывода конструкции из равновесия. Видимые колебания моста стали следствием явления бокового возбуждения, возникшего в связи с ритмичными движениями пешеходов, пытавшихся одновременно подстроиться под образовавшийся уклон конструкции. В процессе реконструкции моста, были установлены следующие элементы: шевронные амортизаторы под панелями мостовой палубы, сокращающие боковые сдвиги; более десяти демпферов, компенсирующих боковые и крутящие усилия; порядка пятидесяти инерционных демпферов, компенсирующих вертикальное смещение.

4. Стихийные бедствия и чрезвычайные ситуации

Мониторинг состояния конструкций и их своевременное обслуживание являются неотъемлемыми мерами обеспечения безопасности мостовых сооружений. Так, в 2002 году на реконструкцию был закрыт мост через реку Кинзуа (Пенсильвания, США): в процессе диагностики было установлено, что сильные порывы ветра вызывают смещение центра тяжести конструкции и неравномерное перераспределение воспринимаемых нагрузок [7]. В 2003 году, в процессе ремонтных работ, произошел отказ 11 из 20 опор моста, вызванный торнадо— 120-летние конструкции не выдержали ветра скоростью выше 150 км/ч и были разрушены менее, чем за 30 секунд. В связи с поперечными колебаниями сооружений под действием стихии усталостные явления привели к выходу из рабочего состояния анкерных болтов основания. Установлено, что катастрофу повлекло приложение свыше 800 кН избыточной поперечной силы на конструкции.

Корректировки конструктивного решения возможно проводить даже на стадии возведения сооружения. Во время строительства висячего моста Акаси-Кайке (Япония), центральный пролет которого составлял 1990 м., в 1995 году, произошло сильное землетрясение на расстоянии 3,2 км. от установленных, на тот момент, опор. После землетрясения было обнаружено смещение фундаментов порядка 75 см. по горизонтали, вызванное подвижностью земной коры. Установленные конструкции не подверглись деформациям, однако было принято решение увеличить пролет до 1991м. Проведение пространственного расчета позволило определить, что дополнительные усилия в элементах конструкции, возникшие от изменения конфигурации моста, незначительны. Мост спроектирован с применением системы балок жесткости с двумя шарнирами, обеспечивающих устойчивость в условиях стихийного бедствия, а также демпферов, компенсирующих явление резонанса.

Известно, что не только природные катаклизмы влекут аварии мостовых сооружений. Так в 2007 году был разрушен один из пролетов развязки моста через залив Сан-Франциско (Окленд, Калифорния), по причине разлива и возгорания более 32,000 литров неэтилированного бензина, перевозимого в цистерне. Воздействие высоких температур повлекло отказ стальных конструкций.

5. Нарушение условий аэродинамической устойчивости сооружения

Случай на мосту Такома, штат Вашингтон (США) в 1940 году стал яркой иллюстрацией влияния ветра на прочность гибких мостовых конструкций и их надежность. Этому мосту обязана своим рождением аэродинамика мостов как одно из направлений динамики в общей проблеме обеспечения их устойчивости.

Разрушение подвесного автомобильного моста через пролив Такома-Нэрроуз между полуостровом Китсуп и городом Такома, также связано с ветровыми нагрузками. Когда в проливе поднимался боковой ветер, возникало колебание дорожного полотна. Причиной стало ошибочное применение сплошных стальных балок, в то время, как традиционное использование сквозных или перфорированных конструкций позволили бы снизить ветровое давление и распределить ветровые потоки.

Следует отметить благотворное влияние для висячих систем поперечных деформаций под действием поперечной ветровой нагрузки. Этот "маятниковый эффект" уравнивает значительную часть ветровой нагрузки и позволяет проектировать балку жесткости с весьма значительными показателями ее поперечной жесткости.

Характер обтекания элементов мостовых конструкций настолько сложный, что вопрос устойчивости сооружения, в том числе и аэродинамической, а также оценка эффективности мероприятий по гашению колебаний должны быть увязаны с результатами исследований в

аэродинамических трубах. Эти технологии нашли широкое применение в современном уникальном строительстве.

6. Производственные дефекты элементов конструкций

Одним из немало важных факторов возникновения аварийных ситуаций мостовых конструкций являются погрешности, допущенные на стадии производства, либо в процессе монтажа конструктивных элементов.

Возможно, что причиной обрушения моста, центральный пролет которого составлял 270 м., стало нарушение технологических предписаний в процессе производства работ по техническому обслуживанию конструкций Кутай Картанегара (мост на острове Борнео, Индонезия). Обрыв опорного троса повлек отказ большей части конструктивных элементов сооружения, устойчивость сохранили только две мостовые башни.

В 1994 году был разрушен мост через реку Хан (Сеул, Южная Корея). Бетонная плита полотна обрушилась из-за отказа стальных опорных ферм. Экспертное заключение постановило в качестве причин «некорректное производство сварочных работ, а также низкое качество соединительных болтов».

Отсутствие антикоррозийной обработки соединительных элементов привело к разрушению моста через реку Мианус (Коннектикут, США) в 1983 году. Один из подшипников штифта подвергся ржавчине, вследствие чего возросли нагрузки, передаваемые на элементы соединения, что вызвало образование в них усталостных явлений [8].

Предотвратить разрушение конструкций, вызванное производственным браком, возможно, если корректно производить приемочный контроль поступающих на строительную площадку элементов и материалов, а также внедрять многоступенчатую систему оценки качества и соответствия проектным характеристикам. Важную роль при этом играют акты приема

скрытых работ, позволяющие комплексно оценить качество сооружения, до и после его введения в эксплуатацию [9].

Нельзя не заметить, что при авариях мостовых сооружений из металлических элементов чаще всего происходит потеря устойчивости либо отдельных элементов, либо всей конструкции.

Если говорить о железобетонных конструкциях мостов, представляющих подавляющую часть путей сообщения в мире, то наблюдается статистический разброс механических характеристик материалов и геометрических параметров элементов конструкций. Так же можно выделить изменчивость внешних воздействий и механических свойств материалов во времени, что влияет на характеристики сооружений.

Говоря о снижении аварийности мостовых сооружений, в первую очередь необходимо уделить внимание основам проектирования - нормативной документации [10]. Это, на сегодняшний день, пробел для всего уникального строительства. Необходимо повышать качество проектных и строительно-монтажных работ, внимательно отслеживать содержание мостовых сооружений с учетом накопленного опыта проектирования, строительства и эксплуатации, включая изучение происшедших аварий.

Литература

1. Шумейко В.В., Карамышева А.А., Евтушенко А.И. Большепролетные вантовые несущие конструкции зданий и сооружений. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2019. С. 69-73.
2. Akesson B. Understanding Bridge Collapses. Florida (USA): CRC Press, 2014. 49 p.
3. Alampalli S., Moreau W.J. Inspection, Evaluation and Maintenance of Suspension Bridges. Florida (USA): CRC Press, 2015. 70 p.
4. Bullard S.G, Gromek B.J., Fout M. The Silver Bridge Disaster of 1967. Mount Pleasant (USA): Arcadia Publishing, 2012. pp. 31-37.



5. Pipinato A. Innovative Bridge Design Handbook: Construction, Rehabilitation and Maintenance. Oxford (United Kingdom): Butterworth-Heinemann, 2015. 806 p.

6. Шумейко В.И., Кудинов, О.А. Об особенностях проектирования уникальных, большепролетных и высотных зданий и сооружений // Инженерный вестник Дона, 2013, №4 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2164.

7. Springirth K. C. Northwestern Pennsylvania Railroads. Mount Pleasant (USA): Arcadia Publishing, 2010 pp. 9-10.

8. Brinckerhoff P. Bridge Inspection and Rehabilitation: A Practical Guide New Jersey (USA): John Wiley & Sons, 1993. 2 p.

9. Гиря Л.В., Хоренков С.В. Проблемы консервации и технического обследования объектов капитального строительства в современных условиях // Инженерный вестник Дона, 2013, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1656.

10. Шумейко В.И., Пименова Е.В., Евтушенко А.И. Архитектурное конструирование зданий и сооружений. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2017. С. 211-212.

References

1. Shumeyko V.V., Karamysheva A.A., Yevtushenko A.I. Bol'sheproletnyye vantovyye nesushchiye konstruktсии zdaniy i sooruzheniy [Long-span cable-carrying structures of buildings and structures]. Rostov-na-Donu: DSTU, 2019. pp. 69-73.

2. Akesson B. Understanding Bridge Collapses. Florida (USA): CRC Press, 2014. 49 p.

3. Alampalli S., Moreau W.J. Inspection, Evaluation and Maintenance of Suspension Bridges. Florida (USA): CRC Press, 2015. 70 p.



4. Bullard S.G, Gromek B.J., Fout M. The Silver Bridge Disaster of 1967. Mount Pleasant (USA): Arcadia Publishing, 2012. pp. 31-37.
5. Pipinato A. Innovative Bridge Design Handbook: Construction, Rehabilitation and Maintenance. Oxford (United Kingdom): Butterworth-Heinemann, 2015. 806 p.
6. Shumejko V. I., Kudinov O.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2164.
7. Springirth K. C. Northwestern Pennsylvania Railroads. Mount Pleasant (USA): Arcadia Publishing, 2010. pp. 9-10.
8. Brinckerhoff P. Bridge Inspection and Rehabilitation: A Practical Guide New Jersey (USA): John Wiley & Sons, 1993. 2 p.
9. Girya L.V., Khorenkov S.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/165
10. Shumeiko V.I., Pimenova E.V., Evtushenko A.I. Arkhitekturnoye konstruirovaniye zdaniy i sooruzheniy [Architectural design of buildings and structures]. Rostov-on-Don: DSTU, 2017. pp. 211-212.