

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>

Russian journal of transport engineering

2020, №2, Том 7 / 2020, No 2, Vol 7 <https://t-s.today/issue-2-2020.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/12SATS220.pdf>

DOI: 10.15862/12SATS220 (<http://dx.doi.org/10.15862/12SATS220>)

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Караханян В.Б., Овчинников И.И., Баев М.А., Овчинников И.Г. Особенности прогрессирующего разрушения применительно к мостовым сооружениям // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2020 №2, <https://t-s.today/PDF/12SATS220.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/12SATS220

**For citation:**

Karakhanyan V.B., Ovchinnikov I.I., Baev M.A., Ovchinnikov I.G. (2020). Features of the progressive destruction of bridge structures. *Russian journal of transport engineering*, [online] 2(7). Available at: <https://t-s.today/PDF/12SATS220.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/12SATS220

**УДК 624.04**

**Караханян Вадим Барменович**

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Саратов, Россия  
Аспирант  
E-mail: [vadimkarakhanyan@mail.ru](mailto:vadimkarakhanyan@mail.ru)

**Овчинников Илья Игоревич**

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия  
ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Саратов, Россия  
Кандидат технических наук, доцент  
E-mail: [bridgeart@mail.ru](mailto:bridgeart@mail.ru)  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8370-297X>  
РИНЦ: [http://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=177132](http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=177132)  
SCOPUS: <http://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57191523104>

**Баев Михаил Алексеевич**

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», Пенза, Россия  
Соискатель  
E-mail: [Baev-300581@mail.ru](mailto:Baev-300581@mail.ru)

**Овчинников Игорь Георгиевич**

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия  
ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия  
Профессор  
Доктор технических наук, профессор  
E-mail: [bridgesar@mail.ru](mailto:bridgesar@mail.ru)  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0617-3132>

## **Особенности прогрессирующего разрушения применительно к мостовым сооружениям**

**Аннотация.** Рассматривается проблема безопасной эксплуатации мостовых сооружений при аварийных воздействиях. Обсуждается проблема учета запроектных воздействий на них. Особое внимание обращается на проблему прогрессирующего разрушения мостов, которая в нашей стране практически не исследуется. Обсуждается эквивалентность проблем прогрессирующего разрушения и живучести искусственных сооружений. Приводится обзор ряда публикаций по авариям мостовых сооружений с анализом вызвавших их причин, которые

разделяются на 3 группы: вызванные катастрофическими природными воздействиями (60 %), вызванные ошибками проектирования и дефектами строительства (30 %), вызванные неудовлетворительной эксплуатацией или сверхнормативной нагрузкой (10 %). Формулируются 5 тезисов А.В. Перельмутера о прогрессирующем разрушении: появление локальных отказов проектируемой системы вполне возможно; цепное развитие процесса разрушения является наиболее опасным из возможных; защититься от прогрессирующего обрушения можно не только путем резервирования прочности несущих конструкций сооружения, на основе анализа генезиса чрезвычайных ситуаций можно предложить и другие способы защиты от прогрессирующего обрушения; при моделировании процессов прогрессирующего разрушения следует учитывать динамические эффекты, сопровождающие изъятие отдельных элементов из системы; если появление прогрессирующего разрушения неизбежно, то следует поискать способы его локализации и снижения последствий его реализации. В конце статьи приводятся примеры прогрессирующего разрушения мостовых сооружений из-за потери несущей способности основными элементами (вследствие коррозионного растрескивания арматуры) и из-за частичного разрушения некоторых несущих элементов пролетных строений моста. Делается заключение о необходимости организации научных исследований прогрессирующего разрушения мостовых сооружений. Изложение сопровождается двумя фильмами о разрушениях мостов.

**Ключевые слова:** мостовые сооружения; прогрессирующее разрушение; аварии мостов; причины аварий; разрушение мостов; Такомский мост

## Введение

За последнее время проблема безопасной эксплуатации транспортных сооружений при аварийных воздействиях возникает всё чаще. Связана эта проблема с необходимостью повышения общей безопасности населения. Угроза безопасности населения возникает из-за выхода из строя и последующего разрушения конструкций транспортных сооружений в результате чрезвычайных ситуаций. Характер чрезвычайных ситуаций может быть разным и нередко непредсказуемым. Как ни странно, наибольшие разрушения конструкций транспортных сооружений вызывают аварии антропогенного характера. Учитывая, что в последнее время количество аварий мостовых сооружений увеличивается и уже достигло величины порядка 100 аварий и разрушений мостов в год, то проблема безопасности жизни населения возрастает. В случае наступления чрезвычайных ситуаций на мостовых сооружениях необходимо предотвратить человеческие потери, снизить материальный ущерб, поэтому задача повышения безопасной эксплуатации мостовых сооружений при запроектных воздействиях весьма актуальна.

## Анализ состояния проблемы

После реализации аварийных ситуаций на транспортных сооружениях обычно начинается корректировка нормативных документов, в них вносятся различные корректировки, отражающие потребность в учете непроектных и аварийных воздействий, но, к сожалению, методологий оценки степени аварийности транспортных сооружений и мероприятий по их защите от аварийных воздействий не приводится. За последнее время проведены исследования конструктивной безопасности промышленных и гражданских зданий и сооружений при чрезвычайных ситуациях, однако транспортные сооружения с этой точки зрения пока исследованы недостаточно.

Результаты исследований аварийности строительных объектов позволяют выделить некоторые принципы обеспечения их безопасности: на этапе проектирования или

конструктивными мерами, или путем применения анализа рисков, а на этапе эксплуатации объектов определенными превентивными мерами. При этом аварийные воздействия можно предусмотреть в проекте закладывая величину риска их реализации, но при этом в проекте учитывается только воздействия, характерные для определенных типов зданий или определенного типа местности (например, для сейсмоопасного региона). Однако запроектные воздействия, к сожалению, при проектировании не учитываются и не нормируются. Превентивный способ защиты от аварийных воздействий заключается в предупреждении или исключении аварийных воздействий. Так, например, в зданиях общественного назначения можно установить датчики и сигнализацию и предупреждающую о наступлении чрезвычайной ситуации. В ряде документов предлагались возможные конструктивные решения по обеспечению конструктивной безопасности на этапе проектирования от прогрессирующего разрушения, но единого подхода к проектированию инженерных сооружений различного вида с учетом запроектных и аварийных воздействий пока нет.

Аварийные воздействия рекомендуется исследовать для инженерных сооружений только повышенного уровня ответственности, а согласно Техническому регламенту о безопасности зданий и сооружений<sup>1</sup>, к таковым принято относить особо опасные, технически сложные или уникальным объекты. Характерно, что в настоящее время подавляющее большинство строительных объектов (жилые и общественные здания) относятся к объектам нормального уровня ответственности и потому при их проектировании аварийные воздействия не рассматриваются и не нормируются (за исключением случаев, когда этого прописано в техническом задании).

Следовательно, рассмотрение аварийных воздействий и разработка конструктивных мер безопасности для объектов нормального уровня ответственности – весьма актуальная задача в настоящее время.

Можно отметить, что в нашей стране проблема прогрессирующего разрушения мостовых сооружений практически мало исследована. При этом вместо прогрессирующего разрушения рассматривается проблема живучести искусственных сооружений, в какой-то мере эквивалентная проблеме прогрессирующего разрушения.

Проблема аварийности мостовых сооружений мало освещена в русскоязычной литературе. Рассмотрим некоторые из них.

В предисловии к вероятно самой первой книге об авариях инженерных сооружений на русском языке [1] её автор Ф.Д. Дмитриев отмечает: «предлагаемая книга представляет собой первую попытку изучения крушений инженерных сооружений и анализа причин этих крушений». В книге указывается, что крушение инженерного сооружения дает уникальную возможность экспериментальным путем оценить пределы прочности и устойчивости этого разрушенного сооружения. Все причины крушений в книге подразделяются на три группы:

- воздействие стихийных природных (наводнения, землетрясения, ураганы);
- низкое качество инженерно-технических решений, не учитывающих все возможные воздействия на сооружения в процессе как строительства, так и эксплуатации);
- влияние социально-экономические условий, приводящих к тому, что судьба сооружения оказывается зависимой от извлекаемой при его создании выгоды.

---

<sup>1</sup> Федеральный закон Технический регламент о безопасности зданий и сооружений 30 декабря 2009 года № 384-ФЗ.

В книге проанализировано разрушение 22 мостов, происшедших к тому времени, и рассмотрено только одно разрушение в СССР.

Изучению аварий мостов за рубежом посвящена работа [2].

В книге [3] рассмотрены случаи аварии и разрушений в процессе как строительства, так и эксплуатации тоннелей, предложена классификация аварий по ряду признаков, проанализированы причины и эффективность мер по устранению последствий аварий и разрушений, а также приведен ряд рекомендаций по предсказанию и недопущению возникновения аварий в процессе строительства и эксплуатации транспортных тоннелей и метрополитенов.

В обзоре [4] рассмотрен вопрос защиты мостов от навала судов, которое является довольно редким, но тем не менее опасным видом воздействия. Авторы указали на четыре возможных направления исследований в этой области: формирование базы данных аварий мостовых сооружений от навала судов; изучение вопросов навигации в месте мостовых переходов; определение вероятности навала судов на мостовые сооружения; разработка мер, предотвращающих навал.

В работах [5; 6] исследованы случаи аварий пешеходных мостов, отмечено, что аварии вследствие пешеходной нагрузки унесли не меньше жизней по сравнению с авариями на других мостовых сооружениях. К сожалению, аварии пешеходных мостов от нагрузки практически не анализировались и потому информации для разработки корректных рекомендаций по определению расчетных нагрузок от пешеходного движения пока недостаточно.

В публикации [7] выделяются такие основные причины разрушения мостовых сооружений:

- вызванные катастрофическими природными воздействиями (порядка 60 %);
- вызванные ошибками при разработке проектов, а также дефектами, появившимися в процессе строительства (около 30 %);
- вызванные либо пропуском сверхнормативной нагрузки, либо плохой эксплуатацией построенного сооружения (порядка 10 %).

Отметим, что в России в последнее время появились довольно интересные публикации по проблемам аварийности мостовых сооружений [8–13], особенно отметим серию статей, инициированных И.Г. Овчинниковым [14–17].

Рассмотрим иностранные публикации, посвященные изучению аварийности мостовых сооружений.

В книге [18] содержится анализ 20 различных случаев разрушений мостов и приведены соображения, учет которых позволит улучшить проекты создаваемых мостов с целью предотвращения наступления аварийных ситуаций.

В книге [19] рассматриваются случаи разрушения мостов в период с 2000 по 2010 годы, вызванные недостаточным контролем состояния и эксплуатацией старых мостов, внешними воздействиями, неподходящими методами строительства, недостатками конструкции. В книге представлен обзор аварий мостовых сооружений, показывающий большую ответственность специалистов по строительству мостов. Справедливо указывается, что для создания проекта моста нужна компетентная команда, позволяющая разработать такой проект, который бы учитывал особенности проектирования и монтажа, возможное превышение проектной временной нагрузки, снижение прочности используемых материалов под влиянием агрессивной эксплуатационной среды. К сожалению, нормативные документы регламентируют процесс проектирования для «нормальных», можно сказать типовых, случаев. При

проектировании же новых типов сооружений нормы должны быть откорректированы с целью обеспечения безопасности при строительстве и эксплуатации этих сооружений.

В статье [20] отмечается необходимость обеспечения безопасности мостовых сооружений как важных элементов транспортной сети региона, страны. Прочность и долговечность мостовых сооружений определяется прочностью и долговечностью их составных частей, компонентов. А так компоненты мостовых сооружений в процессе эксплуатации подвергаются деградации под совместным воздействием силовых, температурных факторов и эксплуатационной среды, то и сами мостовые сооружения имеют ограниченный срок службы, который может быть значительно сокращен неправильной эксплуатацией. Ожидаемый срок службы пролетных строений мостовых сооружений может достигать величины порядка 70 лет, а срок службы опор может достигать ста лет. Однако, к сожалению, некоторые мостовые сооружения могут разрушаться, не достигнув срока службы 20–25 лет, причиной чему является плохая организация их эксплуатации.

Авторы статьи [21] обращают внимание на то, что при проектировании мостовых сооружений следует обеспечивать требуемый уровень безопасности потребителей этих сооружений, то есть водителей и пассажиров. Анализируя причины возникновения дефектов и повреждений в конструкциях эксплуатируемых мостов, а также исследуя причины разрушения самих мостовых сооружений, можно определить более эффективные конструктивные и технологические решения, позволяющие длительное время избегать наступления аварийных ситуаций и последующего разрушения мостов. В статье анализируются примеры аварийных ситуаций на мостовых сооружениях, следствием которых стали проблемы с их эксплуатацией, ограничением грузоподъемности и даже к разрушению мостовых сооружений.

### **Основные причины аварий транспортных сооружений при эксплуатации и реконструкции**

Как показывает анализ аварий и разрушений мостовых сооружений, проведенный в работах [14–17], количество разрушений мостов с течением времени не уменьшается, а наоборот, возрастает, причем с увеличением ущерба и трагических последствий. Причем причиной аварий мостовых сооружений нередко является нарушение требований, содержащихся в нормативных документах, и относящихся как к процедуре проведения изысканий, к изготовлению мостовых элементов, к процессу монтажа мостовых сооружений. Также причиной наступления аварийных ситуаций на мостах является нарушение требований нормативных документов, регламентирующих процесс эксплуатации мостовых сооружений, в последнее время одной из причин стал пропуск сверхнормативной нагрузки без предварительной оценки состояния сооружений.

Следует отметить, что к авариям и разрушениям мостовых сооружений обычно приводит не один какой-то фактор в отдельности, а определенное сочетание, причем неблагоприятное, нескольких факторов. Чтобы не допустить наступления аварийных ситуаций, следует анализировать причины их появления на разных стадиях процесса создания мостового сооружения [22]. Кстати заметим, что в последние годы одной из основных причин, приводящих к наступлению аварийных ситуаций является невыполнение требований технической эксплуатации мостовых сооружений, как вновь построенных, так и реконструируемых.

В последние годы возросла актуальность проблемы обеспечения надежной и безопасной эксплуатации транспортных сооружений. Причем это характерно не только для России, но и для других стран мира, и развитых, и развивающихся. Анализ показал, что разрушение транспортных сооружений приводит к значительным потерям в экономике и нередко к

человеческим жертвам. К сожалению, в нашей стране проблеме анализа аварий и разрушений мостовых сооружений, а также исследованию и разработке путей уменьшения риска наступления таких неприятных ситуаций до сих пор уделяется мало внимания, хотя предотвращение аварий мостовых сооружений должно быть одним из основных направлений научных исследований в отрасли транспортного строительства. Нам по крайней мере не известны мостовые организации, одним из направлений деятельности которых было бы предотвращение аварий транспортных сооружений как на этапе строительства, так и на этапе эксплуатации.

Обычно причины аварий мостов разделяются на три группы:

- вызванные катастрофическими природными воздействиями (около 60 %);
- вызванные ошибками проектирования и дефектами строительства (около 30 %);
- вызванные неудовлетворительной эксплуатацией или сверхнормативной нагрузкой (до 10 %).

Понятно, что любой инженер стремится не допустить реализации аварийных ситуаций в мостовых сооружениях, а уж если разрушение произошло, то создаются специальные комиссии, задачей которых является расследование и установление причин разрушения, а также разработка способов предотвращения наступления таких случаев в дальнейшем и не только на данном сооружении, но и на подобных ему [4–17]. Расследование причин происшедших аварий мостовых сооружений и специальные проводимые дополнительные теоретические и экспериментальные исследования организуются с целью понимания причин наступления аварийных ситуаций для недопущения их в дальнейшем [27–32]. Вся полученная в процессе таких расследований информация используется для корректировки и совершенствования существующих и разработки новых современных нормативных документов, цель которых на основе наработанного опыта и анализа ошибок обеспечить проектирование безопасных мостовых сооружений различных типов.

В последнее время при проектировании и анализе поведения построенных и эксплуатируемых инженерных сооружений начало использоваться понятие живучести, то есть свойства конструкции противостоять различным достаточно редким событиям, таким как авария, взрыв, удар, сейсмическое воздействие, а также такие нередкие как человеческие ошибки, без появления больших повреждений, непропорциональных причине, их вызвавшей.

То есть прогрессирующее разрушение представляет собой цепную последовательность разрушений, следующих за некоторым исходным локальным разрушением небольшой части или отдельного конструктивного элемента сооружения. При этом вызванный прогрессирующим разрушением ущерб значительно превышает ущерб от разрушения локального объема или элемента, инициировавшего прогрессирующее разрушение.

Ущерб от прогрессирующего разрушения не пропорционален ущербу, инициировавшему это разрушение.

Определенная часть аварий и разрушений мостовых сооружений имеет прогрессирующий характер. К сожалению, до сих пор в нашей стране прогрессирующее разрушение изучается только в отношении сооружений промышленного и гражданского назначения (в Интернете много ссылок на статьи и даже нормативные документы по этой теме), однако прогрессирующее разрушение мостовых сооружений практически не рассматривается. В то же время за рубежом имеется определенное количество статей по прогрессирующему разрушению мостовых сооружений, причем включая и давно произошедшие аварии мостов [23–28].

В Своде Правил 35.13330.2011 «Мосты и трубы» пункт 5.35 гласит: «Расчетные схемы и основные предпосылки расчета должны отражать действительные условия работы конструкций мостов и труб при их эксплуатации и строительстве. При этом должна быть предусмотрена конструктивная схема мостового сооружения, не допускающая возможности прогрессирующего обрушения при выходе из строя одного или нескольких элементов в случае экстремальных природных или техногенных воздействий, а также потери эффекта регулирования усилий в мостовых конструкциях». Однако это все пожелания, так как нет ни слова о том, а как же выполнить это требование по отношению к мостовым сооружениям. В ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения» так формулируется прогрессирующее обрушение: «последовательное (цепное) разрушение несущих строительных конструкций, приводящее к обрушению всего сооружения или его частей вследствие начального локального повреждения».

А.В. Перельмутер, выступая на семинаре SCAD и анализируя тематику семинара под названием: «Прогрессирующее обрушение и динамика конструкций при внезапном разрушении элемента», отметил [29; 30]: «Отечественное нормирование традиционно избегало системного рассмотрения аварийных воздействий. Они не представлены в СНиП «Нагрузки и воздействия», нет и других норм для этих воздействий. Их упоминание в ГОСТ 27751-2014 достаточно невнятно, десятки лет отсутствуют нормативные документы, где такие воздействия кодифицированы. А пока идет массовая спекуляция на понятии «прогрессирующее обрушение». Эта спекуляция в числе прочего инициируется неразберихой в нормативных документах».

В конце выступления А.В. Перельмутер формулирует 5 тезисов относительно прогрессирующего разрушения [29; 30]:

1. появление локальных отказов проектируемой системы вполне возможно;
2. цепное развитие процесса разрушения является наиболее опасным из возможных;
3. защититься от прогрессирующего обрушения можно не только путем резервирования прочности несущих конструкций сооружения, на основе анализа генезиса чрезвычайных ситуаций можно предложить и другие способы защиты от прогрессирующего обрушения;
4. при моделировании процессов прогрессирующего разрушения следует учитывать динамические эффекты, сопровождающие изъятие отдельных элементов из системы;
5. если появление прогрессирующего разрушения неизбежно, то следует искать способы его локализации и снижения последствий его реализации.

Эти тезисы (хотя мы их несколько переформулировали) были сформулированы применительно к промышленным и гражданским, но чисто строительным объектам, но мы полагаем, что они с полным на то основанием могут быть перенесены и на мостовые сооружения.

Можно констатировать, что мосты разрушались раньше, разрушаются сейчас и, вероятнее всего, будут разрушаться в будущем на различных этапах жизненного цикла. К сожалению, до сих пор расследование аварий и их последствий в основном проводилось в рамках служебных заданий и редко результаты этих расследований коренным образом сказывались на качестве проектирования, изготовления, монтажа и особенно на качестве процессов эксплуатации. И несмотря на разговоры и даже некоторые статьи о том, что необходимо научное сопровождение процесса проектирования, создания и тем более эксплуатации транспортных сооружений, больших подвижек в этом направлении мы не

наблюдаем. Более того, нередко имеет место ситуация, когда по результатам торгов выполнение научно-исследовательских работ в определенной сфере транспортного строительства поручается организации, в которой нет известных своими работами в соответствующей научной сфере ученых и специалистов, хотя обычно круг исследователей, занимающихся определенной проблемой довольно ограничен и они обычно знакомы если не лично, то по своим работам.

В диссертации [31] обращается внимание на то, что в современных условиях имеющиеся конструктивные и технологические решения позволяют и проектировать, и строить весьма сложные, даже можно сказать грандиозные инженерные сооружения, но по иронии судьбы они оказываются не менее, а даже более уязвимыми, чем достаточно давно построенные инженерные сооружения, некоторые из которых успешно эксплуатируются и сегодня под действием современных, более интенсивных нагрузок и других воздействий. В соответствии с современными нормативными документами мостовые сооружения и проектируются, и возводятся в виде, позволяющем сопротивляться внешним воздействиям, которые полагаются нормальными на протяжении проектного срока службы мостовых сооружений. Причем эти нормативные и расчетные воздействия отражают ситуации и риски, которые с наибольшей вероятностью ожидаются во время строительства и эксплуатации мостовых сооружений. При этом события, имеющие низкие вероятности появления, как правило не учитываются, хотя определенная, хотя и низкая вероятность того, что они могут произойти, имеется. И вот такие события с низкой вероятностью проявления, которые в быту называются непредвиденными, могут произойти, что и может привести к нарушению нормальной работы мостового сооружения и даже разрушению, возможно и с человеческими жертвами.

Как показывает анализ результатов исследований, в последнее время проводились научные и инженерные исследования, направленные на понимание и обоснование причин разрушения, в том числе и прогрессирующего мостовых сооружений, причем в большинстве своем эти исследования инициировались запросами судебной практики, то есть формулировались вопросы вида: Кто виноват в случившемся? Почему соответствующее разрушение произошло? Что не было сделано для предотвращения рассматриваемого случая?

При этом опыт проведения подобных разбирательств свидетельствует о том, что в большинстве случаев весьма сложно или почти невозможно с гарантией 100 % при расчетном анализе и нормативном проектировании мостовых сооружений предсказать возможность наступления подобных аварийных случаев.

Ярким примером подобного развития события можно считать разрушение висячего моста Такома-Нэрроуз 1940 году, которое произошло вследствие развития изгибно-крутильных деформаций металлического пролетного строения, которые были вызваны действием ветра, причем это ветровое воздействие не было учтено при проектировании мостового сооружения по нормам того времени.

В фильме «Tacoma Narrows Bridge Collapse 'Gallop' Gertie»<sup>2</sup> показан процесс разрушения этого моста, называемого «галолирующей Гертой».

Другим примером также непроектного деформирования, но уже балочного неразрезного мостового сооружения под действием ветрового потока может служить произошедшее десять лет тому назад деформирование моста через Волгу в Волгограде. Информация о таком поведении моста, названного «танцующим», обсуждалась и на телевидении, и в печати, были созданы группы исследователей, которые анализировали такое непроектное поведение моста и

---

<sup>2</sup> <https://t-s.today/PDF/%D0%A4%D0%B8%D0%BB%D1%8C%D0%BC%20%20Tacoma%20Narrows%20Bridge%20Collapse%20%27Gallop%27%20Gertie%27.mp4>.



затем разрабатывали мероприятия по недопущению в будущем таких деформаций. Также разрабатывались предложения по корректировке нормативных документов с целью недопущения такого непроектного поведения мостов в будущем. Более подробно феномен танцующего моста рассмотрен в статьях [32; 33], поэтому здесь мы его не будем рассматривать. Но недавно, 5 мая 2020 года в Китае на висячем мосту Humen Bridge имело место также непроектное поведение моста, позволяющее отнести его к «танцующим» мостам. Колебания этого моста, вызванные действием ветра показаны в фильме «OMG! Humen Bridge is shaking 虎门大桥遭遇强风，桥面晃动不停»<sup>3</sup>.

### Примеры прогрессирующего разрушения мостовых сооружений

Как уже отмечалось, прогрессирующее разрушение начинается с местного начального разрушения какого-либо элемента или участка мостового сооружения, а затем распространяется к другим элементам вызывая в конце всего процесса разрушение непропорционально значительной части мостового сооружения или даже целого сооружения.

В качестве начального, инициирующего события может выступать ударное воздействие (например, навал судна на пролет или опору), местный размыв дна у опоры, приводящий к потере устойчивости опоры, какая-либо ошибка в технологии при строительстве мостового сооружения и другие события. При этом последствия последующего прогрессирующего разрушения могут превышать ожидания специалистов на порядок. К сожалению, проектирование сооружений с использованием современных нормативных документов, в которых, как уже отмечалось, высказываются только общие соображения о необходимости учитывать возможность прогрессирующего разрушения, но не дается никаких инженерных рекомендаций и тем более правил, приводит к созданию сооружений, которые не способны противодействовать развитию процесса прогрессирующего разрушения.

Для сопротивления такому фактору конструкции должны обладать прочностью, статической неопределенностью, пластическими свойствами, наличием избыточного количества связей.

Поэтому анализ сооружений с точки зрения сопротивления прогрессирующему разрушению, разработка теории и методики такого анализа является важным направлением исследований в последнее время.

К сожалению, до последнего времени большое внимание уделялось прогрессирующему разрушению зданий, что и отражено в нормативных документах. Мостовые сооружения по сравнению со зданиями в большинстве случаев имеют более простую конструкцию, обладают меньшей избыточностью связей и потому более уязвимы для прогрессирующего разрушения.

Ниже рассматриваются два типа прогрессирующего разрушения, характерных для мостовых сооружений.

---

<sup>3</sup> <https://t-s.today/PDF/%D0%A4%D0%B8%D0%BB%D1%8C%D0%BC%20%20OMG%21%20Humen%20Bridge%20is%20shaking%20%E8%99%8E%E9%97%A8%E5%A4%A7%E6%A1%A5%E9%81%AD%E9%81%87%E5%BC%BA%E9%A3%8E%EF%BC%8C%E6%A1%A5%E9%9D%A2%E6%99%83%E5%8A%A8%E4%B8%8D%E5%81%9C.mp4>

### 1-й тип. Потеря несущей способности основными элементами

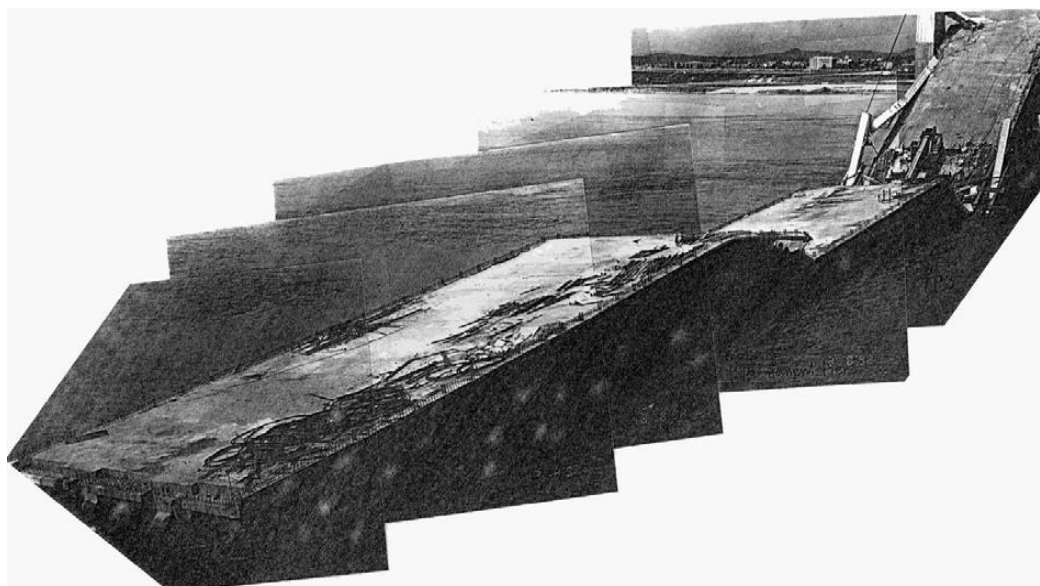
К прямым последствиям такого типа разрушения относится: (а) уменьшение степени статической неопределенности и даже преобразование системы в мгновенно изменяемую; (б) перераспределение внутренних усилий, которое может вызвать вторичные эффекты и даже привести к прогрессирующему разрушению.

Типичным примером такого типа разрушения является разрушение моста Guangdong Jiujiang в Китае в 2007 году (рис. 1). Из-за неправильного маневрирования судно, загруженное песком, натолкнулось на опору, в результате чего вышли из строя четыре соседних неразрезных пролета. Исследование показало, что, поскольку сила удара судна на опору превысила допустимое значение, произошло повреждение опоры, что привело к перераспределению внутренних усилий, а эти перераспределенные усилия превысили величину несущей способности соседних опор и произошло прогрессирующее разрушение [34].



*Рисунок 1. Прогрессирующее разрушение моста в Китае [34]*

Другим примером является прогрессирующее разрушение моста Naeng-Ju Grand Bridge, который был построен в Сеуле (Южная Корея) в 1992 году. После разрушения временной опоры разрушился участок длиной 800 метров (рис. 2).



*Рисунок 2. Прогрессирующее разрушение моста в Южной Корее [34]*

Но это разрушение моста отличается от случая разрушения моста в Китае, хотя повреждение опоры явилось начальным локальным разрушением, которое привело к перераспределению внутренних усилий. Прежде всего в предварительно напряженной непрерывной арматуре в конструкции моста содержалось много энергии деформирования и начальное локальное разрушение опоры вызвало разрыв и выброс арматуры. Вследствие этого разрушение моста в горизонтальном продольном направлении прогрессировало из-за непрерывности предварительно напряженного армирования по всей длине моста.

Отличие в рассмотренных формах разрушения видно на приведенных рисунках.

Еще одним примером прогрессирующего разрушения, относящегося к этому же типу, является разрушение моста Baihua Bridge вследствие землетрясения в Wenchuan (рис. 3).



*Рисунок 3. Прогрессирующее разрушение моста вследствие землетрясения [35]*

Как видно, под действием землетрясения многие опоры разрушились и пролетные строения упали, причем некоторые из них закручивались.

## **2 тип – частичное разрушение некоторых несущих элементов пролетных строений моста**

Из-за разрушения этих элементов или изменения их положения происходит перераспределение жесткости конструкции и изменение величины внутренних усилий, что приводит к прогрессирующему разрушению.

Примером такого разрушения может быть разрушение Квебекского моста в 1907 году, который для своего времени являлся самой длинной консольной конструкцией (рис. 4). Основной причиной разрушения явилось неправильное проектирование связей в сжимаемых элементах и небрежность в подсчёте нагрузки. Разрушение инициировалось потерей устойчивости одного элемента на левой стороне вблизи прикрепления к опоре, вследствие этого нагрузка перераспределилась на элемент на правой стороне, который вследствие этого также потерял устойчивость.

Разрушение приняло прогрессирующий характер и в результате не разрушились только опоры.



*Рисунок 4. Разрушение Квебекского моста [35]*

Еще одним примером является разрушение в провинции Сычуань в Китае арочного моста Хяопапмен с ездой посередине, которое началось с подвесок (рис. 5).



*Рисунок 5. Разрушение арочного моста в провинции Сычуань. Видны порвавшиеся подвески [36]*

Расследование показало, что ряд подвесок подвергся коррозии под напряжением и при въезде на мост грузовика сверхнормативного веса они оборвались. В результате произошедшего перераспределения усилий между элементами моста часть балок пролетного строения, играющего роль и затяжки, упала в реку [36].

Также характерным примером прогрессирующего разрушения является разрушение виадука Red Flag Road в 2009 году в Китае, которое произошло на стадии демонтажа (рис. 6).



*Рисунок 6. Разрушение виадука в Китае [35]*

Неправильный способ демонтажа явился причиной появления локального повреждения, которое привело к перераспределению внутренних усилий. Разрушение началось в месте начала работ и распространилось на длину более 200 метров. Это лишний раз говорит о необходимости тщательного проектирования последовательности демонтажа мостовых конструкций и учета всех сопутствующих факторов.

Всем мостовикам давно знакома ранее уже упоминавшаяся выше катастрофа Такомского моста в 1940 году в США, которая является классическим случаем частичного разрушения несущего элемента. По конструкции Такомский мост висячий. Первая подвеска на нем оборвалась из-за чрезмерного закручивания балки жесткости и динамической ударной нагрузки, вызванной действием ветра. Далее порвались соседние подвески, что привело к разрушению пролетного строения [36]. Все это можно наблюдать в уже упоминавшемся и приведенном в середине настоящей статьи фильме.

### **Заключение**

Как уже отмечалось выше, в России исследования прогрессирующего разрушения проводится в основном на зданиях, мостовые же сооружения остались как бы в стороне от этого процесса. Поэтому значительный интерес представляют хотя бы некоторые исследования, связанные с прогрессирующим разрушением мостовых сооружений.

Интересно исследование поведения висячего моста при действии на него потерявшего управление автомобиля, который перемещался по мосту и, потеряв управление, ударяется в

подвеску моста. Такое исследование было проведено под руководством В.Б. Зылева [37]. В процессе анализа установлено, что разрушение висячего моста начиналось с разрушения одной подвески и последовательно распространилось сначала на остальные подвески и затем привело к глобальному разрушению моста. Возможной причиной прогрессирующего разрушения висячего моста явилось уменьшение разрывного усилия в одной из подвесок, причем в качестве причины снижения разрывного усилия рассматривалось коррозионное повреждение, приведшее к уменьшению сечения одной из подвесок. Как видно, в данной работе смоделирован процесс разрушения мостового сооружения, близкий к тому, что имел место на мосту моста Хиаопанмен в провинции Сычуань в Китае.

Исследование процесса прогрессирующего разрушения вантового моста было проведено авторами работы [38]. В этой работе авторы сначала также отметили, что, что большое внимание изучению прогрессирующего разрушения было уделено применительно к строительным конструкциям промышленного и гражданского назначения, а вот исследований, посвященных анализу мостовых сооружений, особенно вантовых мостов было уделено сравнительно недостаточное внимание. В своей работы авторы и провели исследование прогрессирующего разрушения вантового моста в случае обрыва ванты. При этом использовалась нелинейная динамическая модель прогрессирующего разрушения. Был получен интересный результат, состоящий в том, что по мере приближения разрушающейся ванты к пилону вероятность прогрессирующего разрушения после обрыва ванты уменьшалась.

Интересное исследование рассмотрено в работе [39], посвященной анализу особенностей прогрессирующего разрушения типа домино регулярных и нерегулярных плитно-балочных мостовых сооружений, вызванного действием землетрясения. Анализ показал, что разрушение по типу домино происходит в мостах, где плита проезжей части разрушается вследствие осадки опоры моста. Установлено, что тип пролетного строения, уклон грунта и высота опор оказывают большое влияние на процесс прогрессирующего разрушения мостов как с регулярным, так и с нерегулярным расположением опор.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев Ф.Д. Крушения инженерных сооружений. Историко-технические очерки. Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре. М. 1953. 188 с.
2. Пассек В.В. Обрушения мостовых сооружений за рубежом. М. 1970. 27 с. (Техн. информ. / Оргтрансстрой).
3. Власов С.Н., Маковский Л.В., Меркин В.Е. (при участии Куплиса А.Э., Сарабеева В.Ф., Торгалова В.В.). Аварийные ситуации при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей и метрополитенов. М. ТИМР. 1997. 181 с.
4. Перевозчиков Б.Ф., Селиверстов В.А. Защита опор мостов от навала судов // Автомобильные дороги. Обзорная информация. 2000. №4.
5. Уолмут Б., Сертиз Д. Аварии пешеходных мостов // Мостостроение мира. 2004. № 1–2. с. 69–77.
6. Овчинников И.Г., Дядченко Г.С. Пешеходные мосты: конструкция, строительство, архитектура. Саратов. Сара. гос. тех. ун-т. 2005. 227 с.
7. Платонов А.С. Уроки аварий металлических конструкций мостов // Транспортное строительство. 2009. №6. С. 6–9.
8. Еремеев В.П. Аварии мостов: причины и меры предупреждения. Казань. КИСИ. 1994. 75 с.
9. Еремеев В.П. Предельные и аварийные состояния мостов. Казань. КГАСУ. 1997. 159 с.

10. Овчинников И.Г., Овчинников И.И., Атаева Е.В. Причины аварий и повреждений конструкций транспортных сооружений // Актуальные вопросы строительства: материалы Междунар. науч.-техн. конф.: в 2 ч. Ч. 2 / редкол.: В.Т. Ерофеев (отв. ред.) [и др.]. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2008. с. 444–452.
11. Овчинников И.Г., Овчинников И.И. Анализ причин аварий и повреждений транспортных сооружений // Транспортное строительство. М. 2010, №7. с. 2–5.
12. Мирошник В.А., Ключник С.В., Журбенко М.К. Проблемы аварийности мостовых конструкций // Мосты и тоннели: теория, исследования, практика. ДИИТ. 2012. с. 55–59.
13. Кокодеев А.В., Овчинников И.Г. Обеспечение безаварийной эксплуатации мостов и других транспортных сооружений путем обследования и мониторинга их подводных частей: состояние проблемы в России // Транспорт. Транспортные Сооружения. Экология. Вестник ПНИПУ. 2015. №1, с. 69–87.
14. Майстренко И.Ю., Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Кокодеев А.В. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ из причин. Часть 1 // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», Том 4, №4 (2017) <https://t-s.today/PDF/13TS417.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/13TS417.
15. Овчинников И.Г., Овчинников И.И., Майстренко И.Ю., Кокодеев А.В. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ из причин. Часть 2 // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», Том 4, №4 (2017) <https://t-s.today/PDF/14TS417.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/14TS417.
16. Майстренко И.Ю., Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Успанов А.М. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 3 // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2018 №1, с. 1–41. <https://t-s.today/PDF/08SATS118.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/08SATS118.
17. Овчинников И.И., Майстренко И.Ю., Овчинников И.Г., Успанов А.М. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 4 // Транспортные сооружения, 2018 №1, с. 1–25. <https://t-s.today/PDF/05SATS118.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.
18. Borjan Alesson. Understanding Bridge Collapse. Taylor & Francis Group, London, UK, 2008. 282 p.
19. Scheer, Joachim, Failed bridges: case studies, causes and consequences, Berlin: Ernst & Sohn, 2010, 321 p.
20. Azmat Hussain and Sumaira Jan, Bridges Failures in Extreme Flood Events by Taking a Case Study. International Journal of Civil Engineering and Technology, 7(5), 2016, pp. 222–231.
21. Brandon W. Chavel and John M. Yadlosky. Framework for Improving Resilience of Bridge Design. Publication No. FHWA-IF-11-016 January 2011. 75 p.
22. Проблеми протидії конструкцій прогресуючому обваленню будівель та споруд: монографія / В.М. Першаков, М.С. Барабаш, А.О. Белятинський, К.М. Лисницька. – К.: НАУ, 2015. – 456 с.
23. Lebeau K.H. and Wadia-Fascetti S.J. Fault tree analysis of Schoharie creek bridge collapse // Journal of Performance of Constructed Facilities, 2007. vol. 21, no. 4, pp. 320–326.
24. Astaneh-Asl A. Progressive collapse of steel Truss bridges, the case of I-35W collapse // Proceedings of the 7th International Conference on Steel Bridges, 2008. pp. 1–10.

25. Wibowo H., Reshotkina S.S., and Lau D.T. Modeling progressive collapse of RC bridges during earthquakes // Proceedings of the CSCE Annual General Conference, GC-176-1-GC-176-10, May 2009.
26. Xu Z., Lu X., Guan H. and. Ren A. Progressive-collapse simulation and critical region identification of a stone arch bridge // Journal of Performance of Constructed Facilities, 2013. vol. 27, no. 1, pp. 43–52.
27. Weibing Peng, Ruodan Pan, and Fei Dai. Theoretic Framework and Finite Element Implementation on Progressive Collapse Simulation of Masonry Arch Bridge // Mathematical Problems in Engineering Volume 2015, Article ID 707269, 12 pages.
28. Fulzele Ashish B., Wakchaure M.R. A Study on Progressive Collapse Response of Cable Stayed Bridges using Elastomeric Bearing // International Journal for Scientific Research & Development. 2017. Vol. 5, Issue 05, p. 1997–2000.
29. Перельмутер А.В. Прогрессирующее обрушение и методология проектирования конструкций (совершенствование нормативных документов). №6 «Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений». 2004.
30. Перельмутер А.В. О расчетах на прогрессирующее обрушение // Вестник МГСУ. 2008. №1. С. 119–129.
31. Björnsson Ívar. Robust design of bridges – Robustness analysis of Sjölundaviadukten Bridge in Malmö. Master Thesis. Report no. TVBK-5179. Division of Structural Engineering Lund Institute of Technology Lund University, 2010. 114 p.
32. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Филиппова В.О. Танцующий мост в Волгограде: причины, аналогии, мероприятия. Часть 1. Причины // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 7, №6 (2015) <http://naukovedenie.ru/PDF/07KO615.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/07KO615.
33. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Филиппова В.О. Танцующий мост в Волгограде: причины, аналогии, мероприятия. Часть 2. Аналогии, мероприятия // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 7, №6 (2015) <http://naukovedenie.ru/PDF/08KO615.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/08KO615.
34. Jiang, X.F., Chen, Y.Y., “A review on the progressive collapse and control design of building structures”, China Civil Engineering Journal, 41(6), 1–8, 2008.
35. Yuping Liu, Bing Han, Xiao Ma. Advances in Progressive Collapse of Bridge Structures // Pacific Science Review, vol. 13, no. 3, 2011, pp. 173–181.
36. Wei, J.D., “Urgent reinforcement and restoration of Xiaonanmen Bridge in Yibin City”, Highway, 4, 34–38, 2003.
37. Зылев В.Б., Григорьев Н.А. Удар летящего объекта о подвеску висячего моста с анализом разрушений // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2017. Volume 13, Issue 1. с. 50–54.
38. R. Dasa, A.D. Pandeyb, Soumyac, M.J. Maheshd, P. Sainie, and S. Anveshf. Progressive Collapse of a Cable Stayed Bridge // 12th International Conference on Vibration Problems, ICOVP 2015. Procedia Engineering 144 (2016) 132–139.
39. Amir Seyedkhoei, Reza Akbari, and Shahrokh Maalek. Earthquake-Induced Domino-Type Progressive Collapse in Regular, Semiregular, and Irregular Bridges // Hindawi. Shock and Vibration Volume 2019, Article ID 8348596, 18 pages <https://doi.org/10.1155/2019/8348596>.



### **Karakhanyan Vadim Barmenovich**

Yuri Gagarin state technical university of Saratov, Saratov, Russia  
E-mail: vadimkarakhanyan@mail.ru

### **Ovchinnikov Ilya Igorevich**

Industrial university of Tyumen, Tyumen, Russia  
Yuri Gagarin state technical university of Saratov, Saratov, Russia  
E-mail: bridgeart@mail.ru

### **Baev Michail Alexeevich**

Penza state university of architecture and construction, Penza, Russia  
E-mail: Baev-300581@mail.ru

### **Ovchinnikov Igor Georgievich**

Industrial university of Tyumen, Tyumen, Russia  
Perm national research polytechnic university, Perm, Russia  
E-mail: bridgesar@mail.ru

## **Features of the progressive destruction of bridge structures**

**Abstract.** The problem of safe maintenance of bridge structures in the event of emergency impacts is being considered. Also the problem of accounting for beyond-design-basis impacts on them is being discussed. Particular attention is paid to the problem of progressive fracture of bridges, which is practically not studied in our country. The equivalence of the problems of progressive fracture and survivability of engineering structures is discussed. An overview is given of a number of publications on bridge construction accidents with an analysis of the causes, which are divided into three groups: those caused by catastrophic natural events (60 per cent), caused by design errors and construction defects (30 per cent) and also caused by poor maintenance or excessive load (10 %).

A.V. Perelmuter's five theses on progressive fracture are being formulated: (1) The appearance of local failures of the designed system is quite possible; (2) The process of developing sequential destruction is the most dangerous of all possible; (3) Protection against progressive collapse is possible not only by bearing structures strength reservation of the construction, but on the basis of an analysis of the genesis of emergencies it is possible to propose other safety methods against progressive collapse; (4) When modelling the processes of progressive fracture, dynamic effects accompanying the removal of individual elements from the system should be taken into account; (5) If progressive fracture is unavoidable, ways should be sought to localize it and reduce its effects.

At the end of the article, examples of progressive fracture of bridge structures due to the loss of sustaining capacity by the main members (due to corrosion cracking of the reinforcement) and owing to the partial fracture of some load-bearing elements of bridge superstructures are given. A conclusion is made on the need to organize scientific research on the progressive fracture of bridge structures.

**Keywords:** bridge structures; progressive fracture; bridge construction accidents; causes of accidents; bridge collapses; Tacoma Narrows bridge

## REFERENCES

1. Dmitriev F.D. (1953). Krusheniya inzhenernykh sooruzheniy. Istoriko-tekhnicheskie ocherki. [*The collapse of engineering structures. Historical and technical essays.*] Moscow: State Publishing House of Literature on Construction and Architecture, p. 188.
2. Passek V.V. (1970). Obrusheniya mostovykh sooruzheniy za rubezhom. [*Collapse of bridge structures abroad.*] Moscow: Technical information "Orgtransstroy", p. 27.
3. Vlasov S.N., Makovskiy L.V., Merkin V.E., Kuplis A.Eh., Sarabeev V.F., Torgalov V.V. (1997). Avariynye situatsii pri stroitel'stve i ehkspluatatsii transportnykh tonneley i metropolitenov. [*Emergencies during the construction and operation of transport tunnels and subways.*] Moscow: TIMR, p. 181.
4. Perevozchikov B.F., Seliverstov V.A. (2000). Protection of bridge piers from a pile of ships. *Highways. Overview information*, 4 (in Russian).
5. Uolmut B., Sertiz D. (2004). Accidents of pedestrian bridges. *Bridge Construction*, 1–2, pp. 69–77 (in Russian).
6. Ovchinnikov I.G., Dyadchenko G.S. (2005). Peshekhodnye mosty: konstruktsiya, stroitel'stvo, arkhitektura. [*Pedestrian bridges: construction, construction, architecture.*] Saratov: Saratov State Technical University, p. 227.
7. Platonov A.S. (2009). Lessons from accidents of metal structures of bridges. *Transport construction*, 6, pp. 6–9 (in Russian).
8. Ereemeev V.P. (1994). Avarii mostov: prichiny i mery preduprezhdeniya. [*Bridge accidents: causes and preventive measures.*] Kazan: Kazan Civil Engineering Institute, p. 75.
9. Ereemeev V.P. (1997). Predel'nye i avariynye sostoyaniya mostov. [*Limit and emergency conditions of bridges.*] Kazan: Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, p. 159.
10. Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I., Ataeva E.V. (2008). Prichiny avariyy i povrezhdeniy konstruktsiy transportnykh sooruzheniy. [*Causes of accidents and damage to structures of transport facilities.*] Saransk: Mordovian University Press, pp. 444–452.
11. Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I. (2010). Analysis of the causes of accidents and damage to transport facilities. *Transport construction*, 7, pp. 2–5 (in Russian).
12. Miroshnik V.A., Klyuchnik S.V., Zhurbenko M.K. (2012). Accident problems of bridge structures. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, pp. 55–59 (in Russian).
13. Kokodeev A.V., Ovchinnikov I.G. (2015). Ensuring trouble-free operation of bridges and other transport structures by examining and monitoring their underwater parts: the state of the problem in Russia. *Transport. Transport Facilities. Ecology. Bulletin Perm National Research Polytechnic University*. 2015. №1, с. 69–87 (in Russian).
14. Maystrenko I.Y., Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Kokodeev A.V. (2017). Failures and collapses of bridge constructions, analysis of their causes. Part 1. *Russian journal of transport engineering*, [online] 4(4). Available at: <https://t-s.today/PDF/13TS417.pdf> (in Russian) DOI: 10.15862/13TS417.

15. Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I., Maystrenko I.Y., Kokodeev A.V. (2017). Failures and collapses of bridge constructions, analysis of their causes. Part 2. *Russian journal of transport engineering*, [online] 4(4). Available at: <https://t-s.today/PDF/14TS417.pdf> (in Russian) DOI: 10.15862/14TS417.
16. Maystrenko I.Yu., Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Uspanov A.M. (2018). Failures and collapses of bridge constructions, analysis of their causes. Part 3. *Russian journal of transport engineering*, [online] 1(5). Available at: <https://t-s.today/PDF/08SATS118.pdf> (in Russian) DOI: 10.15862/08SATS118.
17. Ovchinnikov I.I., Maystrenko I.Yu., Ovchinnikov I.G., Uspanov A.M. (2018). Failures and collapses of bridge constructions, analysis of their causes. Part 4. *Russian journal of transport engineering*, [online] 1(5). Available at: <https://t-s.today/PDF/05SATS118.pdf> (in Russian) DOI: 10.15862/05SATS118.
18. Borjan Aleson (2008). *Understanding Bridge Collapse*. London, United Kingdom: Taylor & Francis Group, p. 282.
19. Scheer, Joachim (2010). *Failed bridges: case studies, causes and consequences*. Berlin: Ernst & Sohn, p. 321.
20. Azmat Hussain, Sumaira Jan (2016). Bridges Failures in Extreme Flood Events by Taking a Case Study. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 7(5), pp. 222–231.
21. Brandon W. Chavel, John M. Yadlosky (2011). *Framework for Improving Resilience of Bridge Design. Publication No. FHWA-IF-11-016*, p. 75.
22. Pershakov V.M., Barabash M.S., Belyatins'kiy A.O., Lisnits'ka K.M. (2015). Problemy protivodeystviya konstruktsiy progressiruyushchem obrusheniya zdaniy i sooruzheniy. [Problems of counteracting structures to the progressive collapse of buildings and structures.] Kiev: National Aviation University, p. 456.
23. Lebeau K.H., Wadia-Fascetti S.J. (2007). Fault tree analysis of Schoharie creek bridge collapse. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 4(21), pp. 320–326.
24. Astaneh-Asl A. (2008). Progressive collapse of steel Truss bridges, the case of I-35W collapse. *Proceedings of the 7th International Conference on Steel Bridges*, pp. 1–10.
25. Wibowo H., Reshotkina S.S., Lau D.T. (2009). *Modeling progressive collapse of RC bridges during earthquakes. Proceedings of the CSCE Annual General Conference, GC-176-1-GC-176-10*.
26. Xu Z., Lu X., Guan H., Ren A. (2013). Progressive-collapse simulation and critical region identification of a stone arch bridge. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 1(27), pp. 43–52.
27. Weibing Peng, Ruodan Pan, Fei Dai (2015). Theoretic Framework and Finite Element Implementation on Progressive Collapse Simulation of Masonry Arch Bridge. *Mathematical Problems in Engineering*, (2015), p. 12.
28. Fulzele Ashish B., Wakchaure M.R. (2017). A Study on Progressive Collapse Response of Cable Stayed Bridges using Elastomeric Bearing. *International Journal for Scientific Research & Development*, 5(5), pp. 1997–2000.
29. Perel'muter A.V. (2004). Progressive collapse and structural design methodology (improvement of regulatory documents). *Earthquake-resistant construction. Building Safety*, 6 (in Russian).

30. Perel'muter A.V. (2008). On calculations for progressive collapse. *Bulletin of Moscow State University of Civil Engineering*, 1, pp. 119–129 (in Russian).
31. Björnsson Ívar (2010). *Robust design of bridges – Robustness analysis of Sjölundaviadukten Bridge in Malmö. Master Thesis. Report no. TVBK-5179*. Division of Structural Engineering Lund Institute of Technology Lund University, p. 114.
32. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Filippova V.O. (2015). Dancing bridge in Volgograd: reasons, analogies, measures. Part 1. Reasons. *Naukovedenie*, [online] 6(7). Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/07KO615.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/07KO615.
33. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Filippova V.O. (2015). Dancing bridge in Volgograd: reasons, analogies, measures. Part 2. Analogies, measures. *Naukovedenie*, [online] 6(7). Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/08KO615.pdf> (in Russian) DOI: 10.15862/08KO615.
34. Jiang X.F., Chen Y.Y. (2008). A review on the progressive collapse and control design of building structures. *China Civil Engineering Journal*, 41(6), pp. 1–8.
35. Yuping Liu, Bing Han, Xiao Ma (2011). Advances in Progressive Collapse of Bridge Structures. *Pacific Science Review*, 3(13), pp. 173–181.
36. Wei J.D. (2003). Urgent reinforcement and restoration of Xiaonanmen Bridge in Yibin City. *Highway*, 4, pp. 34–38.
37. Zylev V.B., Grigor'ev N.A. (2017) Impact of a flying object on a suspension bridge suspension with destruction analysis. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 1(13), pp. 50–54 (in Russian).
38. R. Dasa, Pandey A.D., Soumya, Mahesh M.J., Saini P., Anvesh S. (2015). *Progressive Collapse of a Cable Stayed Bridge*. pp. 132–139.
39. Amir Seyedkhoei, Reza Akbari, Shahrokh Maalek (2019). Earthquake-Induced Domino-Type Progressive Collapse in Regular, Semiregular, and Irregular Bridges. *Hindawi. Shock and Vibration*, (2019), p. 18. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/8348596>.