

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2024, Том 11, № 4 / 2024, Vol. 11, Iss. 4 <https://t-s.today/issue-4-2024.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/06SATS424.pdf>

DOI: 10.15862/06SATS424 (<https://doi.org/10.15862/06SATS424>)

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки)

УДК 624.21/8

## Анализ аварий мостовых сооружений, вызванных прогрессирующим разрушением

Архипова Е.Д., Овчинников И.Г.

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия

**Автор, ответственный за переписку:** Архипова Екатерина Дмитриевна, e-mail: [ek.arhipova666@gmail.com](mailto:ek.arhipova666@gmail.com)

**Аннотация.** В статье рассматривается проблема прогрессирующего разрушения мостовых сооружений. Проанализированы причины возникновения и типы прогрессирующего разрушения, исходя из анализа зарубежной и отечественной литературы. Приведены методы по предотвращению аварий, вызванных прогрессирующим разрушением. На стадии проектирования — это определение ключевых элементов в системе и увеличение их прочности, анализ различных вариантов случайных событий, из-за которых может произойти авария, а также ограничение разрушения в границах одного участка. На стадии эксплуатации рассматриваются варианты мониторинга мостовых сооружений, а также строительство параллельных сооружений для распределения нагрузок. Рассмотрены аварии мостовых сооружений: из-за не правильного демонтажа строительных конструкций в Китае,

обрушение пешеходного моста в Индии и автомобильного моста в Китае из-за неправильной эксплуатации, разрушение эстакады метро из-за ошибок при строительстве в Мексике, обрушение моста из-за ошибок при проектировании во Флориде, разрушение опор из-за влияния природных факторов и человеческих ошибок в Шотландии. В заключении предлагаются меры по предотвращению аварий, вызванных прогрессирующим разрушением. Приведенные меры как на стадии проектирования, так и на стадии строительства и эксплуатации, заключаются в тщательном контроле на каждом из этапов жизнедеятельности мостового сооружения.

**Ключевые слова:** мост; прогрессирующее разрушение; аварии мостов; причины аварий; типы разрушений; защита; проектирование мостов

## Analysis of bridge structure failures due to progressive collapse

Ekaterina D. Arkhipova, Igor G. Ovchinnikov

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

**Corresponding author:** Ekaterina D. Arkhipova, e-mail: [ek.arkhipova666@gmail.com](mailto:ek.arkhipova666@gmail.com)

**Abstract.** This paper addresses the issue of progressive collapse in bridge structures. It analyzes the causes and types of progressive collapse based on a review of both foreign and domestic literature. Methods for preventing accidents caused by progressive collapse are presented. During the design phase, this includes identifying key elements within the system and enhancing their strength, analyzing various scenarios that could lead to an accident, and limiting damage to a specific area. In the operational phase, options for monitoring bridge structures are discussed, as well as the construction of parallel structures to distribute loads. The paper examines several bridge failures: improper dismantling of construction structures in China, the collapse of a pedestrian bridge in India, and the failure of a vehicular bridge in China due to misuse,

as well as the destruction of a metro overpass in Mexico due to construction errors, and a bridge collapse in Florida resulting from design flaws. Additionally, it addresses failures of supports due to environmental factors and human errors in Scotland. In conclusion, measures to prevent accidents caused by progressive collapse are proposed. These measures, applicable during both the design and construction phases as well as during operation, emphasize the importance of thorough monitoring at each stage of a bridge's lifecycle.

**Keywords:** bridge; progressive collapse; bridge accidents; causes of accidents; types of failures; protection; bridge design

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



## Введение

### Introduction

Под термином «прогрессирующее разрушение» понимают распространение первоначального локального разрушения от элемента к элементу, приводящее в конечном итоге к разрушению всей конструкции или непропорционально большой ее части [1; 2]. При разрушении одного элемента системы, нагрузка распределяется на другие элементы. Те в свою очередь, могут не выдержать перераспределившейся на них нагрузки из-за недостаточной несущей способности, так как в проекте не предусматривались возникшие нагрузки, что в конечном итоге приводит к полному отказу конструкций.

В России проблеме прогрессирующего разрушения мостовых сооружений посвящено множество статей, в которых анализируются причины возникновения [3], рассматриваются и исследуются более конкретные ситуации аварийных ситуаций, как например, в статье [4], где рассмотрены аварии из-за размыва опор [4]. В работе [5] проводится анализ прогрессирующего обрушения балок мостов при навале судна. Также разрабатываются учебные пособия по данной тематике, где анализируются произошедшие аварии и рассматриваются способы предотвращения подобных аварий.<sup>1</sup>

Аварии мостов происходят по множеству причин. Ошибки при проектировании и строительстве, неправильная эксплуатация, погодные явления и экономия материала могут привести к обрушению мостовых сооружений. Поэтому, глубокое изучение прогрессирующего разрушения, причины его возникновения, а также анализ уже произошедших аварий, могут предотвратить в дальнейшем подобные случаи.

## Причины возникновения прогрессирующего разрушения

### Causes of progressive collapse

Тема прогрессирующего разрушения мостовых сооружений довольно широко изучается во всем мире. Проведено множество анализов случившихся аварий [1; 6–8], приведены причины прогрессирующего разрушения конструкций и способы их защиты.

---

<sup>1</sup> Аварии транспортных сооружений и их предупреждение: учебное пособие для магистрантов направления 08.04.01 «Строительство». Прикладная программа «Искусственные сооружения на транспорте, способы возведения и эксплуатации» / И.И. Овчинников, Ш.Н. Валиев, И.Г. Овчинников, И.С. Шатилов. — Чебоксары: ИД «Среда», 2020. — 216 с. URL: <https://phsreda.com/e-publications/e-publication-186.pdf>.

В статье [9], исходя из терминологии, проблему прогрессирующего разрушения сформулировали как проблему живучести конструкций, когда при отказе одного элемента, соседние конструкции не выдерживают перераспределенных нагрузок.

Термин «живучесть» в статьях [10; 11] определяется как способность конструкций противостоять неблагоприятным нагрузкам и сохранять свою работоспособность полностью или частично, при отказе одного из элементов системы.

Отказ конструкций может произойти по множеству причин. В статьях [12–14] при анализе аварий были сформулированы основные причины прогрессирующего разрушения мостов:

- природный фактор — это ураганы, цунами, землетрясения и другие различные природные явления;
- человеческий фактор — это ошибки при проектировании, строительстве или эксплуатации мостовых сооружений.

Данные два фактора и их комбинации, которые были приведены в статье [15], являются серьезной проблемой для живучести мостовых сооружений. Однако, благодаря современным технологиям, природные факторы можно предупреждать, используя результаты многолетних анализов погодных явлений и бедствий в различных регионах, а человеческий фактор появления ошибок можно предупредить лишь тщательным контролем и многоступенчатыми стадиями проверки этапов проектирования и строительства сооружений, учитывая, в том числе, анализ природных явлений.

## Типы прогрессирующего разрушения

### Types of progressive collapse

В статье [16] были выделены 6 типов прогрессирующего разрушения конструкций.

Тип 1. При разрушении по типу «блин» происходит отказ вертикальных несущих элементов, после чего происходит перераспределение нагрузок на нижележащие конструкции, которые воспринимают ударную нагрузку от разрушившихся выше элементов. Далее обрушение распространяется в вертикальном направлении.

Тип 2. При разрушении по типу «молния» происходит перераспределение сил по альтернативным путям. Из-за внезапного отказа элементов появляется импульсное нагружение и скопление в одной точке статических и динамических усилий. Полное разрушение конструкции

происходит, когда альтернативные пути перегружены и уже не могут воспринимать возникшие усилия.

Тип 3. Разрушение по типу «домино» происходит при первоначальном опрокидыванием одного элемента, который при падении ударяет соседний элемент. В результате образуется горизонтальная выталкивающая сила, которая имеет как статическое, так и динамическое происхождение. Развитие разрушения происходит в направлении опрокидывания элементов.

Тип 4. Секционное разрушение имеет аналогичный характер с разрушением по типу «молния». Разница заключается в том, что в молниевом типе рассматривается система, которая состоит из элементов разных по свойствам, а в этом типе рассматриваются однородные элементы.

Тип 5. Неустойчивые конструкции характеризуются малыми запасами прочности, что может привести к появлению деформаций или разрушений. Отказ одного элемента в результате какого-либо небольшого события может сделать систему неустойчивой. Прогрессия разрушений может быть различна, в зависимости от того, какой элемент системы деформировался. Если один из главных, то вся система незамедлительно разрушится, а если же один из второстепенных, то разрушение будет происходить последовательно из-за перегрузки других элементов.

Тип 6. Смешанный тип прогрессирующего разрушения характеризуется комбинацией нескольких типов, описанных выше.

## **Методы предотвращения прогрессирующего разрушения**

### **Methods for preventing progressive collapse**

Задача инженеров-строителей состоит в том, чтобы находить компромисс между безопасностью и экономичностью при строительстве. При проектировании мостовых сооружений можно ориентироваться на нормы проектирования строительных конструкций, но важно учитывать, что мостовые конструкции проще строительных. Их особенностями являются низкая избыточность, большие нагрузки и высокая степень взаимодействия конструкций. В статье [12] описаны методы противодействия прогрессирующему разрушению.

1. Косвенное проектирование — характеризуется повышением прочности строительных конструкций, а также усилением связей между ними. Путем использования пластичных материалов, которые в работе

полностью поглощают энергию деформации, можно предотвратить появление хрупкого разрушения.

2. Контроль событий — направлен на защиту мостовых сооружений. Постоянный мониторинг искусственных сооружений, контроль правильной их эксплуатации, чтобы не подвергать мосты перегрузкам, помогут защитить искусственные сооружения от локальных отказов и впоследствии от разрушения.

3. Прямое проектирование. Разделяется на три метода по предотвращению прогрессирующего разрушения.

3.1. Специфическое местное сопротивление. При проектировании мостового сооружения определяется ключевой элемент системы, при исключении которого из системы нагрузки на конструкции становятся сильно велики, и вся система выходит из строя. Такие ключевые элементы можно проектировать ударопрочными, чтобы повысить прочность и исключить появление локального отказа при воздействии каких-либо случайных событий.

3.2. Альтернативные пути нагрузки. Данный метод основан на сложном анализе системы и состоит из нескольких этапов:

- определение ключевых элементов и исключение их из расчета;
- анализ смоделированного локального разрушения;
- добавление элементов для увеличения статической неопределимости системы.

Таким образом, при добавлении новых элементов появляются альтернативные пути, по которым может перераспределяться нагрузка и тем самым повышается прочность и живучесть всего сооружения в целом.

3.3. Изоляция путем разделения на части. Цель метода — ограничение разрушения в границах определенного участка. Таким образом, можно предотвратить обрушение всего мостового сооружения и избежать случайных жертв.

В статьях [9; 17] было предложено на стадии проектирования разрабатывать сценарии аварийных случаев, производить расчеты на живучесть конструкций и предлагать решения по предотвращению разрушения сооружения. Такой подход поможет минимизировать ущерб и избежать возникновения несчастных случаев.

В книге [18] приведен обзор требований к надежности конструкций при чрезвычайных ситуациях. Основным принципом является то, что конструкции должны быть запроектированы таким образом, чтобы выдержать удар, взрыв или возможность появления последовательных человеческих ошибок.

В статье [19] произведен анализ стратегий при проектировании, направленных на защиту конструктивных систем от прогрессирующего разрушения, где было выявлены способы повышения живучести:

- обеспечение прочности ключевых конструкций;
- ограничение воздействий на конструкцию до уровней, при которых конструктивная система сможет ограниченно работать;
- обеспечение живучести конструкций, при исключении из расчета элемента.

Таким образом, анализируя спроектированное мостовое сооружение и проверяя различные варианты аварийных случаев, в том числе и их комбинации, можно выяснить, какие конструкции необходимо усилить, чтобы избежать обрушения сооружения.

В статье [20] была произведена оценка сейсмостойкости старых мостов. Для предотвращения прогрессирующего разрушения мостового сооружения, подвергшегося агрессивным природным явлениям, предлагается модернизация дорожной инфраструктуры, то есть строительство параллельных сооружений. Таким образом, можно убрать часть нагрузки с одного моста и распределить на два, за счет участников дорожного движения.

## **Авария мостового сооружения из-за неправильного механического разрушения**

### **Bridge structure failure due to improper mechanical destruction**

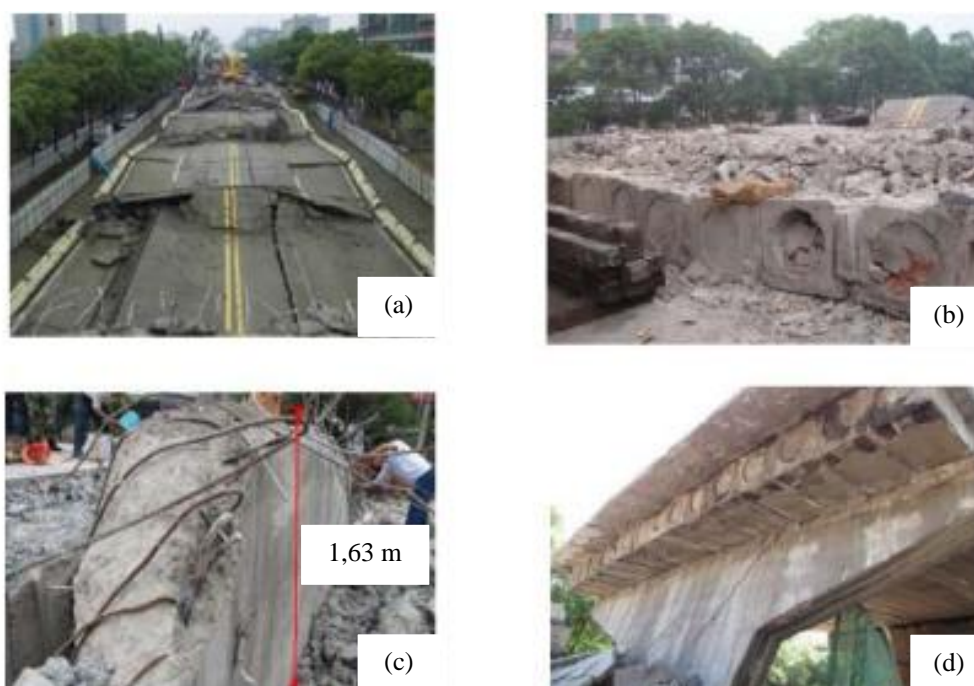
Аварии, вызванные прогрессирующим разрушением, могут происходить не только на стадиях проектирования и эксплуатации мостовых сооружений, но и во время демонтажа конструкций. Примером такого случая является мост Хунци в Китае (рис. 1) [1]. Виадук Хунци — это многопролетный мост с простыми опорами, расположенный в городе Чжучжоу в Китае. Общая длина моста составляет 2 329 метров.

В 2009 г. во время механического разрушения моста произошло постепенное обрушение виадука Хунци (рис. 2). Всего в результате аварии обрушилось девять пролетов. В результате аварии погибли 9 человек и 16 получили ранения. При работах по сносу моста было одновременно разрушено четыре пролетных строения, в результате чего были вызваны некоторые локальные повреждения опор. При последующем одновременном разрушении двенадцати пролетных строений, их удар вызвал разрушение опор, а так как они не были рассчитаны на сопротивление боковому удару, это привело к полному обрушению моста.



**Рисунок 1.** Виадук Хунци до разрушения (снимок по материалам Kaiming Bi, Hong Hao «Progressive collapse analysis of Hongqi Viaduct: a multi-span simply-supported bridge» [1])

**Figure 1.** Hongqi viaduct before collapse (photo sourced from Kaiming Bi, Hong Hao «Progressive collapse analysis of Hongqi Viaduct: a multi-span simply-supported bridge» [1])



**Рисунок 2.** Виадук Хунци после разрушения: а — общий вид; б — обрушившееся пролетное строение; с, d — оставшиеся опоры и их элементы (снимки по материалам Kaiming Bi, Hong Hao «Progressive collapse analysis of Hongqi Viaduct: a multi-span simply-supported bridge» [1])

**Figure 2.** Hongqi Viaduct after Collapse: a — general view; b — collapsed span structure; c, d — remaining supports and their elements (photos sourced from Kaiming Bi, Hong Hao «Progressive collapse analysis of Hongqi Viaduct: a multi-span simply-supported bridge» [1])

По первоначальному плану пролетные строения должны были разрушаться поочередно, а не одновременно, что возможно не привело бы к трагической аварии, а падающие плиты пролетных строений вызвали бы лишь небольшие локальные повреждения опор моста. В 2009 г. во время механического разрушения моста произошло постепенное обрушение виадука Хунци (рис. 2). Всего в результате аварии обрушилось девять пролетов. В результате аварии погибли 9 человек и 16 получили ранения.

При работах по сносу моста было одновременно разрушено четыре пролетных строения, в результате чего были вызваны некоторые локальные повреждения опор. При последующем одновременном разрушении двенадцати пролетных строений, их удар вызвал разрушение опор, а так как они не были рассчитаны на сопротивление боковому удару, это привело к полному обрушению моста.

По первоначальному плану пролетные строения должны были разрушаться поочередно, а не одновременно, что возможно не привело бы к трагической аварии, а падающие плиты пролетных строений вызвали бы лишь небольшие локальные повреждения опор моста.

Такие типы мостов с простыми опорами очень сильно подвержены прогрессирующему разрушению, так как при отказе одной опоры может произойти разрушение по типу «домино». Для того, чтобы снизить риск прогрессирующего разрушения, необходимо запроектировать опоры больших размеров. Или же можно использовать Т-образные опоры для опирания пролетных строений, что предотвращает влияние на соседние опоры при падении одного пролета.

## **Аварии мостового сооружения из-за неправильной эксплуатации**

### **Bridge structure failures due to improper operation**

30 октября 2022 года обрушился подвесной пешеходный мост Морби в Индии (рис. 3). Мост был построен в 1880-х годах и в 2022 году были проведены работы по его реконструкции. Открытие моста состоялось за несколько дней до трагической аварии. По мнению очевидцев в момент обрушения на мосту находилось более 500 человек, хотя мост был рассчитан на одновременное нахождение 100–150 человек. Из-за перегруженности стальные тросы не выдержали действующей на них нагрузки, и мостовое сооружение обрушилось в воду. Всего из-за несчастного случая погибло 135 человек и еще несколько десятков человек получили тяжелые ранения.<sup>2</sup>

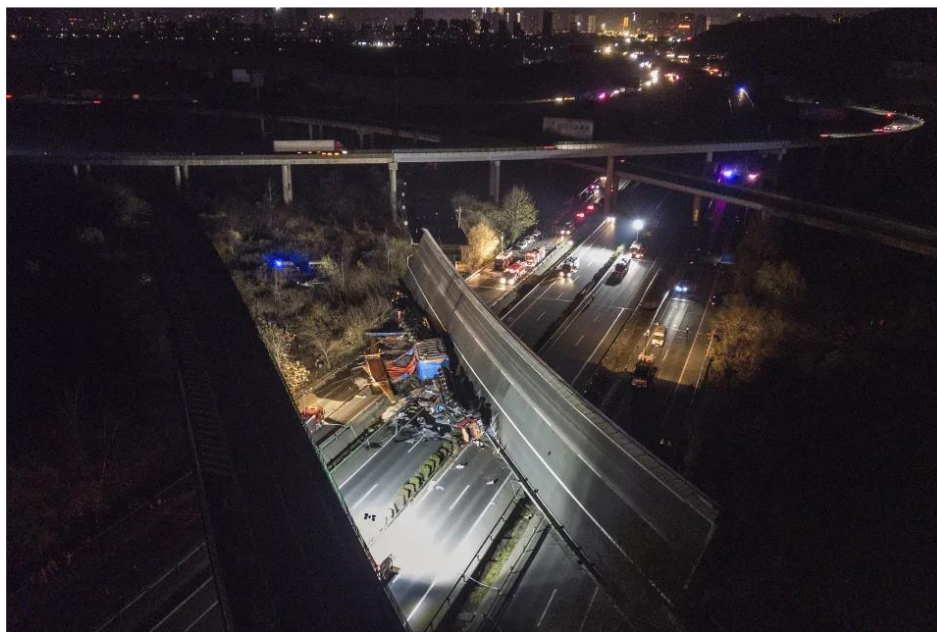
<sup>2</sup> <https://www.cbsnews.com/news/india-bridge-collapse-deaths-arrests-rescuers-recount-diwali-disaster/>.



*Рисунок 3. Обрушение моста в Индии (автор фотографии Sam Panthak<sup>2</sup>)*

*Figure 3. Bridge collapse in India (photo by Sam Panthak<sup>2</sup>)*

18 декабря 2021 года в Китае в городе Эчжоу обрушился участок пандусного моста длиной около 500 метров (рис. 4).<sup>3</sup> Причиной обрушения моста стал перегруженный грузовик, вес которого превышал допустимую нагрузку в 4 раза. В итоге, пролетное строение моста упало на ребро, а виновник аварии разломился на две части и опрокинул вместе с собой ещё два грузовика. В результате аварии погибло 4 человека и 8 было госпитализировано.



*Рисунок 4. Обрушение моста в г. Эчжоу  
(автор фотографии информационное агентство «Синьхуа»<sup>3</sup>)*

*Figure 4. Bridge collapse in Ezhou (photo by Xinhua News Agency<sup>3</sup>)*

<sup>3</sup> <https://www.yahoo.com/news/4-dead-collapse-highway-flyover-131737509.html>.

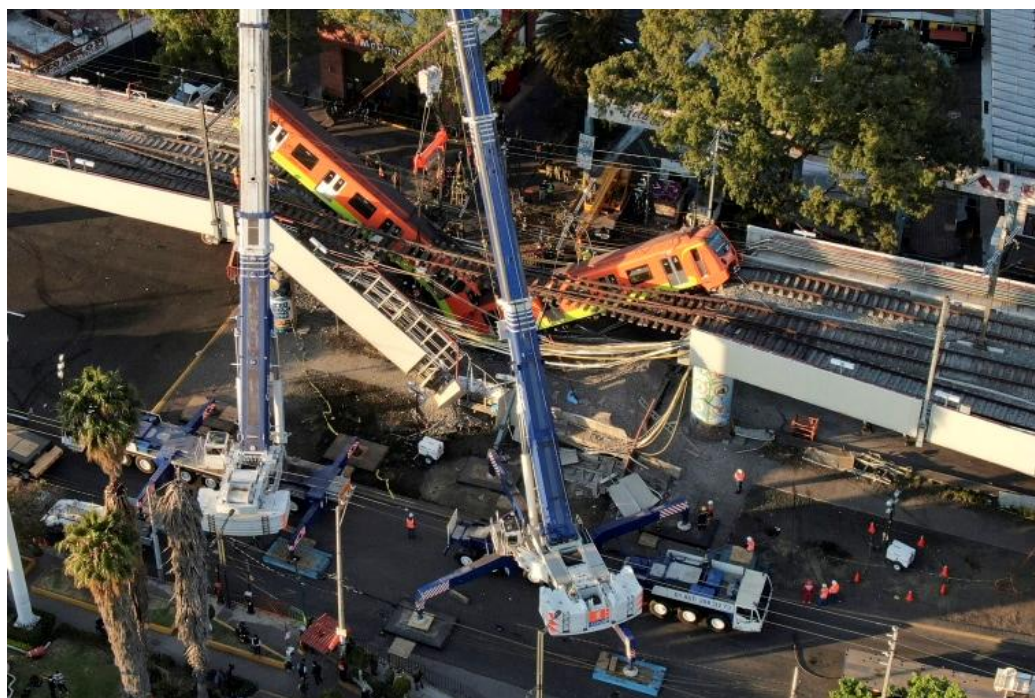
В данных случаях при строительстве мостов не предполагалось, что мосты будут эксплуатироваться в перегруженном режиме, и так как нагрузка на транспортные сооружения превышала в несколько раз допустимую, произошли полные отказы системы, что привело к трагическим последствиям.

При проектировании нельзя учесть все возможные факторы, которые могут привести к аварии, а если и учитывать, то это увеличивает стоимость транспортных сооружений, что не всегда целесообразно. Необходимо не только правильно строить сооружения, но и правильно их эксплуатировать, а значит нужно принимать меры и тщательно отслеживать вес транспорта, проезжающего по мостам или количество людей, находящихся на мостах.

## Авария мостового сооружения из-за ошибок при строительстве

### Bridge structure failure due to construction errors

3 мая 2021 года обрушилась эстакада метрополитена в Мехико (рис. 5).<sup>4</sup> В результате аварии погибло 26 человек и еще 100 получили ранения разной степени тяжести.



*Рисунок 5. Обрушение эстакады в Мехико (автор фотографии Fernando Llano<sup>4</sup>)*

*Figure 5. Overpass collapse in Mexico (photo by Fernando Llano<sup>4</sup>)*

<sup>4</sup> <https://www.nbcnews.com/news/latino/preliminary-report-blames-construction-errors-deadly-mexico-city-metro-rca1217>.

Этот метрополитен входит в список самых загруженных метро в мире. Он перевозит около 6 миллионов людей каждый день. Линия 12, на которой и произошло обрушение, была открыта в 2012 году и с самого открытия в ней выявлялись структурные и технические проблемы.

Во время осмотра места аварии, деформированные балки обнаружены там, где рельсы метро изгибались, а остальные балки соскользнули со своих мест опирания. Также в месте разлома не было сделано необходимое усиление колонн, а фундамент для колонн был неглубокого заложения.

Во время расследования аварии был подготовлен отчет, в котором описывалось, по меньшей мере, шесть ошибок, допущенных на стадии строительства. Были выявлены ошибки при сварке болтов, которые не были оплавлены, чтобы защитить их от коррозии. Также, в балках либо отсутствовали болты, либо их было установлено меньше и не на равном расстоянии, как это предполагалось в проекте. Бетон, который использовали при строительстве, не подходил для установки важнейших болтов. Сварные швы были либо плохо выполнены, либо просто не завершены. В 2017 году в Мехико произошло землетрясение, что привело к повреждениям на линии 12 и в течение нескольких дней проводились работы по их устранению. Трещины, которые были замечены в основании опор, были отремонтированы. Также в 2019 году проводилась проверка из-за жалоб местных жителей, что на участке путепровода изогнуты балки, но в результате было определено, что никакой опасности нет.

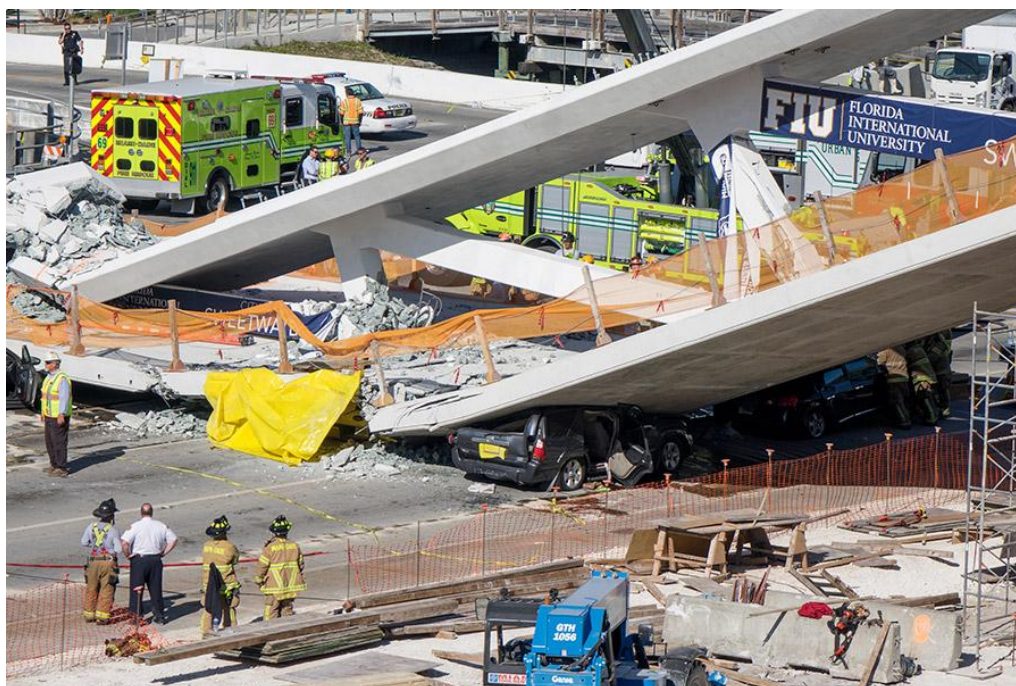
В данной аварии из-за допущенных ошибок при строительстве мостовое сооружение получилось не таким, каким было задумано в проекте. Некачественная сварка, плохое соединение элементов друг с другом привели к тому, что вся система оказалась недостаточно устойчивой. Также важным фактором является то, что во время эксплуатации моста на линии 12 были серьезные аварии, из-за которых подверглись локальному разрушению пролет и опоры моста, на которых были обнаружены трещины.

## **Авария мостового сооружения из-за ошибок при проектировании**

### **Bridge structure failure due to design errors**

15 марта 2018 года во время строительства обрушился пешеходный мост международного университета Флориды (рис. 6).<sup>5</sup> В результате аварии погибло 6 человек и 10 человек получили ранения.

<sup>5</sup> <https://www.rbc.ru/photoreport/16/03/2018/5aab56779a79471ccfa47696>.



*Рисунок 6. Обрушение пешеходного моста в США (автор фотографии Giorgio Viera<sup>5</sup>)*

*Figure 6. Pedestrian bridge collapse in the USA (Photo by Giorgio Viera<sup>5</sup>)*

Обрушение моста произошло из-за ошибки при проектировании.<sup>5</sup> Был произведен неправильный расчет сопротивления скольжению соединения между прохожей частью и ферменной конструкцией, которая его поддерживала. Элементы фермы были соединены с настилом с помощью стальных арматурных стержней, встроенных в настил и бетон фермы. Для удержания моста, эти соединения должны были предотвратить скольжение фермы по поверхности пешеходной дорожки. Но расчет был сделан неправильно, и сопротивления скольжению оказалось недостаточно, чтобы предотвратить скольжение соединения, вызвавшего трещины в бетоне фермы. В конечном итоге трещины стали увеличиваться и это привело к полному отказу одного из соединений фермы с пешеходной дорожкой и произошло обрушение мостового сооружения.

## **Авария мостового сооружения из-за ухудшения характеристик строительных конструкций**

### **Bridge structure failure due to deterioration of structural characteristics**

15 декабря 1967 года произошло обрушение Серебряного моста в Огайо (рис. 7). В результате аварии погибло 46 человек. Серебряный мост был построен в 1928 году и являлся подвесным мостом с цепными звеньями.

В ходе расследования обломков было установлено, что причиной аварии послужила вышедшая из строя одна из цепей.

Трещина, образовавшаяся в одном из звеньев, стала разрастаться из-за появления коррозии. Глубина трещины составляла 2,5 мм, когда звено не выдержало и хрупко разрушилось.

Когда нижняя сторона проушины вышла из строя, нагрузка перераспределилась на другую, и вследствие перегрузки та также вышла из строя.

В это время шарнир удерживался вместе только тремя проушинами, а еще одна соскользнула со штифта в центре подшипника, так что цепь была полностью разорвана.

Обрушение всей конструкции было неизбежно, поскольку все части подвесного моста находятся в равновесии друг с другом.



*Рисунок 7. Обрушение серебряного моста в Огайо (изображение из материалов Witcher, T.R. «From Disaster to Prevention: The Silver Bridge» [21])*

*Figure 7. Silver bridge collapse in Ohio (image sourced from Witcher, T.R. «From Disaster to Prevention: The Silver Bridge» [21])*

В процессе эксплуатации моста проводились тщательные проверки его состояния и проводились ремонтные работы, но к несущим конструкциям моста замечаний никогда не было. В то время состояние проушин стержня невозможно было определить без демонтажа конструкций, а появление коррозии никто не мог предугадать [21].

## Авария мостового сооружения, вызванная природными и человеческими факторами

### Bridge structure failure caused by natural and human factors

26 декабря 1879 г. произошло обрушение железнодорожного моста Тэй в Шотландии (рис. 8) [22]. Авария мостового сооружения произошла из-за резонансной вибрации, возникшей в конструкциях, по причине сильных порывов ветра. Вследствие чего произошел отказ мостовых опор и ферм и сооружение обрушилось.

Во время расследования аварии было выяснено, что балочная часть была недостаточно армирована и закреплена. Кроме того, на стадии строительства балочная конструкция была повреждена во время подъема. Таким образом, в совокупности из-за человеческих ошибок и погодных условий произошла авария, которую можно было предотвратить тщательной проверкой проектных конструктивных решений и строгим контролем за строительством объекта.



а



б

**Рисунок 8.** Изображение моста Тэй: а — Мост Тэй после завершения строительства; б — Мост Тэй после обрушения (изображение из материалов Jamilur Reza Choudhury, Ariful Hasnat. «Bridge collapses around the world: Causes and mechanisms» [22])

**Figure 8.** Image of Tay bridge: a — Tay bridge after completion; b — Tay bridge after collapse (image sourced from Jamilur Reza Choudhury, Ariful Hasnat. «Bridge collapses around the world: Causes and mechanisms» [22])

## Заключение

### Conclusion

Проблема прогрессирующего разрушения является актуальной в современном мире.

Если на стадии проектирования применять меры по предупреждению распространения прогрессирующего разрушения, то в случае чрезвычайных ситуаций можно сократить количество аварий.

Одной из главных проблем по предупреждению прогрессирующего разрушения является непредсказуемый фактор проявления динамического воздействия, из-за которого выходят из строя несущие конструкции мостовых сооружений.

Чтобы разработать стандарт для проектирования мостов при такого рода разрушениях, необходимо использовать международный опыт исследований в данной области. Важное значение имеют исследования типичных событий разрушения, а также структурный анализ и изучение свойств строительных конструкций.

При проектировании мостов, устойчивых к прогрессирующему разрушению, необходимо учитывать множество факторов. Необходим многоступенчатый контроль проектов, чтобы исключить человеческий фактор появления ошибки. Во время строительства необходимо проводить проверки строительно-монтажных работ, кроме того, необходимо тщательно проверять материалы и конструкции, которые поступают на объект на исправность и целостность. При эксплуатации мостовых сооружений следует проводить мониторинг состояния конструкций, а также устанавливать весовой контроль для предотвращения перегрузки искусственного сооружения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Kaiming, B.** Progressive collapse analysis of Hongqi Viaduct: a multi-spansimply-supported bridge / B. Kaiming, H. Hong // Australia Earthquake Engineering Society 2013 Conference, Nov 15–17, 2013, Tasmania / Хобарт: Australian Earthquake Engineering Society, 2013. — URL: <https://aes.org.au/wp-content/uploads/2015/06/15-Bi-Kaiming-Progressive.pdf>. (дата обращения: 06.11.2024).
2. **Назаров, Ю.П.** К проблеме обеспечения живучести строительных конструкций при аварийных воздействия / Ю.П. Назаров, А.С. Городецкий, В.Н. Симбиркин // Строительная механика и расчет сооружений. — 2009. — № 4. — С. 5–9. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12566763>. — EDN KOZYWJ. (дата обращения: 06.11.2024).
3. **Габышев, С.В.** Выявление прогрессирующего разрушения мостовых сооружений / С.В. Габышев, И.Г. Овчинников // Вестник евразийской науки. — 2024. — Т 16. — № 2. — С. 43SAVN224. — URL: <https://esj.today/PDF/43SAVN224.pdf>. — EDN TWRRFC. (дата обращения: 06.11.2024).
4. **Салимов, А.М.** Аварии мостовых сооружений из-за повреждения или разрушения опор / А.М. Салимов, Р.С. Гульязев, И. Г. Овчинников. — DOI <https://doi.org/10.15862/16SATS423> // Транспортные сооружения. — 2023. — Т 10. — № 4. — С. 16SATS423. — URL: <https://t-s.today/16SATS423.html>. — EDN OBRARM. (дата обращения: 06.11.2024).
5. **Овчинников, И.И.** Анализ прогрессирующего обрушения балок мостов при навале судна / И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников // Мостовые сооружения. XXI век. — 2024. — 1[60] Спецвыпуск. — С. 50–53.
6. **Караханян, В.Б.** Особенности прогрессирующего разрушения применительно к мостовым сооружениям / В.Б. Караханян, И.И. Овчинников, М.А. Баев [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.15862/12SATS220> // Транспортные сооружения. — 2020. — Т 7. — № 2. — С. 12SATS220. — URL: <https://t-s.today/12SATS220.html>. — EDN EZHNZC. (дата обращения: 06.11.2024).
7. **George, C.L.** A study of U.S. bridge failures (1980–2012) / C.L. George, B.M. Satish, H. Chao, N.F. Bastam. — Буффало: MCEER, 2013. — 128 с. — URL: <https://ubir.buffalo.edu/xmlui/bitstream/handle/10477/29474/13-0008.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (дата обращения: 06.11.2024).

8. **Карамышева, А.А.** Анализ и систематизация причин разрушения мостовых сооружений / А.А. Карамышева, Д.А. Строев, М.А. Колотиенко, А.И. Коник // Инженерный вестник Дона. — 2019. — № 3. — С. 34. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38513115>. — EDN CFUJJQ. (дата обращения: 06.11.2024).
9. **Кудишин, Ю.И.** Концептуальные проблемы живучести конструкций / Ю.И. Кудишин // Научно-технический журнал «Вестник МГСУ», специальный выпуск № 2 / Москва: МГСУ, 2009. — С. 28–36. — URL: <https://www.litres.ru/book/raznoe/vestnik-mgsu-2-2009-specvypusk-22828490/>. (дата обращения: 08.11.2024).
10. **Городецкий, А.С.** Живучесть строительных конструкций / А.С. Городецкий, Т. Цымбалевиц, А.В. Тур // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Строительство и архитектура. — 2011. — № 1. — С. 167–171. — URL: <https://rep.bstu.by/bitstream/handle/data/4180/167-171.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. (дата обращения: 08.11.2024).
11. **Меркулов, С.И.** Живучесть железобетонных конструкций и конструктивных систем / С.И. Меркулов // Вестник Белгородского государственного технологического университета имени В.Г. Шухова. — 2015. — № 3. — С. 58–61. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23324473>. — EDN TQKQPD. (дата обращения: 08.11.2024).
12. **Liu, Yu.** Advances in Progressive Collapse of Bridge Structures / Yu. Liu, B. Han, X. Ma // Pacific Science Review. — 2011. — Т 13. — № 3. — С. 173–181. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24554779>. — EDN URIQJT. (дата обращения: 10.11.2024).
13. **Abdelaziz, M.M.** Progressive collapse analysis of prestressed concrete girder bridges using improved applied element method / M.M. Abdelaziz, M.S. Gomaa, H.A. El-Ghazaly. — DOI <https://doi.org/10.1186/s43251-022-00075-w> // Advances in Bridge Engineering. — 2022. — Т 3. — № 1. — С. 24. — URL: <https://aben.springeropen.com/articles/10.1186/s43251-022-00075-w>. (дата обращения: 10.11.2024).
14. **Limaye, S.V.** A Review on Progressive Collapse of the Bridge / S.V. Limaye, A.B. Pujari // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). — 2020. — Т 7. — № 8. — С. 3180–3184. — URL: <https://www.irjet.net/archives/V7/i8/IRJET-V7I8537.pdf>. (дата обращения: 12.11.2024).
15. **Айдемиров, К.Р.** Состояние проблемы прогрессирующего разрушения зданий и сооружений, классификация задач и подходы к их решению / К.Р. Айдемиров // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. — 2010. — № 3. — С. 117–129. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15512317>. — EDN NBLWDT. (дата обращения: 12.11.2024).
16. **Starossek, U.** Typology of progressive collapse / U. Starossek // Progressive Collapse of Structures, Second edition / Лондон: ICE Publishing, 2017. — С. 18–42. — URL: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/pcos.61682.018>. (дата обращения: 12.11.2024).
17. **Еремеев, П.Г.** Обеспечение безопасности большепролетных сооружений от лавинообразного (прогрессирующего) обрушения при аварийных воздействиях / П.Г. Еремеев // Современное промышленное и гражданское строительство. — 2008. — Т 4. — № 3. — С. 129–134. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=13088970>. — EDN LALBVF. (дата обращения: 12.11.2024).
18. **Грачев, В.Ю.** Непропорциональное разрушение. Сравнение методов расчета / В.Ю. Грачев, Т.А. Вершинина, А.А. Пузаткин. — Екатеринбург: Грачев и Партнеры, 2010. — 81 с. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004586718>. (дата обращения: 12.11.2024).
19. **Тур, В.В.** О разработке проектных стратегий, направленных на защиту конструктивных систем от прогрессирующего обрушения / В.В. Тур // Вестник Брестского государственного технического университета. — 2009. — № 1. — С. 147–154. — URL: <https://rep.bstu.by/bitstream/handle/data/8746/147-154.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. (дата обращения: 12.11.2024).
20. **Capacci, L.** Probabilistic life-cycle seismic resilience assessment of aging bridge networks considering infrastructure upgrading / L. Capacci, F. Biondini. — DOI <https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1716258> // Structure and Infrastructure Engineering. — 2020. — Т 16. — № 4. — С. 659–675. — URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15732479.2020.1716258>. (дата обращения: 12.11.2024).
21. **Witcher, T.R.** From Disaster to Prevention: The Silver Bridge / T.R. Witcher // Civil Engineering Magazine. — 2017. — Т 87. — № 11. — С. 44–47. — URL: <https://ascelibrary.org/doi/epdf/10.1061/ciegag.0001250>. (дата обращения: 12.11.2024).

22. **Choudhury, J.** Bridge collapses around the world: Causes and mechanisms / J. Choudhury, A. Hasnat // Conference: IABSE-JSCE Joint Conference on Advances in Bridge Engineering-III / Дакка, 2015. — URL: [https://www.researchgate.net/publication/281280663\\_Bridge\\_collapses\\_around\\_the\\_world\\_Causes\\_and\\_mechanisms](https://www.researchgate.net/publication/281280663_Bridge_collapses_around_the_world_Causes_and_mechanisms). (дата обращения: 12.11.2024).

#### Сведения об авторах:

**Архипова Екатерина Дмитриевна** — ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия, e-mail: ek.arhipova666@gmail.com  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9673-7823>

**Овчинников Игорь Георгиевич** — доктор технических наук, профессор, академик Российской академии транспорта, заслуженный деятель науки РФ, профессор, ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия, e-mail: bridgesar@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0617-3132>

РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=2922](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=2922)

WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/J-5539-2013>

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=7102605749>

Статья получена: 26.11.2024. Принята к публикации: 03.02.2025. Опубликовано онлайн: 17.02.2025.

## REFERENCES

1. Kaiming B., Hong H. Progressive collapse analysis of Hongqi Viaduct: a multi-span simply-supported bridge. In: *Australia Earthquake Engineering Society 2013 Conference, Nov 15–17, 2013, Tasmania*. Hobart: Australian Earthquake Engineering Society; 2013. Available at: <https://aees.org.au/wp-content/uploads/2015/06/15-Bi-Kaiming-Progressive.pdf> (accessed 06th November 2024). (In Eng.).
2. Nazarov Y.P., Gorodetsky A.S., Simbirkin V.N. About a Problem of Survivability Support of Building Structures Subjected to Emergency Actions. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2009;(4): 5–9. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12566763> (accessed 06th November 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
3. Gabyshev S.V., Ovchinnikov I.G. Identification of progressive destruction of bridge structures. *The Eurasian Scientific Journal*. 2024;16(2): 43SAVN224. Available at: <https://esj.today/PDF/43SAVN224.pdf> (accessed 06th November 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
4. Salimov A.M., Gulyaev R.S., Ovchinnikov I.G. Accidents on bridge structures due to piers damaged or failing. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2023;10(4): 16SATS423. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/16SATS423>.
5. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G. Analiz progressiruyushchego obrusheniya balok mostov pri navale sudna = [Analysis of progressive collapse of bridge beams during ship collision]. *Mostovyye sooruzheniya. XXI vek = [Bridge structures. XXI century]*. 2024;(1[60] Special Issue): 50–53. (In Russ.).
6. Karakhyan V.B., Ovchinnikov I.I., Baev M.A., Ovchinnikov I.G. Features of the progressive destruction of bridge structures. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2020;7(2): 12SATS220. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/12SATS220>.
7. George C.L., Satish B.M., Chao H., Bastam N.F. A study of U.S. bridge failures (1980–2012). Buffalo: MCEER; 2013. Available at: <https://ubir.buffalo.edu/xmlui/bitstream/handle/10477/29474/13-0008.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (accessed 06th November 2024). (In Eng.).
8. Karamysheva A.A., Stroev D.A., Kolotienko M.A., Konik A.I. Analysis and Systematization of The Causes of Bridge Structures Destruction. *Engineering Journal of Don*. 2019;(3): 34. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38513115> (accessed 06th November 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
9. Kudishin Yu.I. [Conceptual problems of structural survivability]. In: [Scientific and technical journal "Vestnik MGSU", special issue No. 2]. Moscow: Moscow State University of Civil Engineering (National Research University); 2009. p. 28–36. Available at: <https://www.litres.ru/book/raznoe/vestnik-mgsu-2-2009-specvypusk-22828490/> (accessed 08th November 2024). (In Russ.).

10. Gorodeckiy A.S., Cymbalevich T., Tur A.V. Survivability of building designs in special settlement situations. *Vestnik of Brest State Technical University*. 2011;(1): 167–171. Available at: <https://rep.bstu.by/bitstream/handle/data/4180/167-171.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (accessed 08th November 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
11. Merkulov S.I. [Durability of reinforced concrete structures and structural systems]. *Bulletin of BSTU Named After V.G. Shukhov*. 2015;(3): 58–61. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23324473> (accessed 08th November 2024). (In Russ.).
12. Liu Yu., Han B., Ma X. Advances in Progressive Collapse of Bridge Structures. *Pacific Science Review*. 2011;13(3): 173–181. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24554779> (accessed 10th November 2024). (In Eng.).
13. Abdelaziz M.M., Gomaa M.S., El-Ghazaly H.A. Progressive collapse analysis of prestressed concrete girder bridges using improved applied element method. *Advances in Bridge Engineering*. 2022;3(1): 24. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1186/s43251-022-00075-w>.
14. Limaye S.V., Pujari A.B. A Review on Progressive Collapse of the Bridge. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2020;7(8): 3180–3184. Available at: <https://www.irjet.net/archives/V7/i8/IRJET-V7I8537.pdf> (accessed 12th November 2024). (In Eng.).
15. Aydemirov K.R. The state of the problem of progressive destruction of buildings and structures, classification of problems and approaches to their solution. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2010;(3): 117–129. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15512317> (accessed 12th November 2024). (In Russ.).
16. Starossek U. Typology of progressive collapse. In: *Progressive Collapse of Structures*, Second edition. London: ICE Publishing; 2017. p. 18–42. Available at: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/pcos.61682.018> (accessed 12th November 2024). (In Eng.).
17. Eremeev P.G. Large-Span Structures Protection from Progressive Collapse While Accidental Actions. *Modern Industrial and Civil Construction*. 2008;4(3): 129–134. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=13088970> (accessed 12th November 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
18. Grachev V.Yu., Vershinina T.A., Puzatkin A.A. [Disproportionate Destruction. Comparison of Calculation Methods]. Yekaterinburg: Grachev and Partners; 2010. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004586718> (accessed 12th November 2024). (In Russ.).
19. Tur V.V. Design strategies for defense of structural systems against progressive collapse. *Vestnik of Brest State Technical University*. 2009;(1): 147–154. Available at: <https://rep.bstu.by/bitstream/handle/data/8746/147-154.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (accessed 12th November 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
20. Capacci L., Biondini F. Probabilistic life-cycle seismic resilience assessment of aging bridge networks considering infrastructure upgrading. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2020;16(4): 659–675. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1716258>.
21. Witcher T.R. From Disaster to Prevention: The Silver Bridge. *Civil Engineering Magazine*. 2017;87(11): 44–47. Available at: <https://ascelibrary.org/doi/epdf/10.1061/ciegag.0001250> (accessed 12th November 2024). (In Eng.).
22. Choudhury J., Hasnat A. Bridge collapses around the world: Causes and mechanisms. In: Conference: IABSE-JSCE Joint Conference on Advances in Bridge Engineering-III. Dhaka, 2015. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/281280663\\_Bridge\\_collapses\\_around\\_the\\_world\\_Causes\\_and\\_mechanisms](https://www.researchgate.net/publication/281280663_Bridge_collapses_around_the_world_Causes_and_mechanisms) (accessed 12th November 2024). (In Eng.).

---

#### Information about the authors:

**Ekaterina D. Arkhipova** — Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia, e-mail: [ek.arkhipova666@gmail.com](mailto:ek.arkhipova666@gmail.com)  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9673-7823>

**Igor G. Ovchinnikov** — Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia, e-mail: [bridgesar@mail.ru](mailto:bridgesar@mail.ru)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0617-3132>  
RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=2922](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=2922)  
WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/J-5539-2013>  
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=7102605749>

---

Submitted: 26th November 2024. Revised: 03rd February 2025. Published online: 17th February 2025.