

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

2026, Том 13, № 2 / 2026, Vol. 13, Iss. 2 <https://t-s.today/issue-2-2026.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/23SATS226.pdf>

DOI: 10.15862/23SATS226 (<https://doi.org/10.15862/23SATS226>)

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

Ссылка для цитирования этой статьи:

Стрельников, Д. С. Прогрессирующее разрушение транспортных сооружений: анализ рисков, патентные решения на примере мостовых конструкций / Д. С. Стрельников, И. И. Овчинников // Транспортные сооружения. — 2026. — Т. 13. — № 2. — URL: <https://t-s.today/PDF/23SATS226.pdf>. DOI: 10.15862/23SATS226.

For citation:

Strelnikov D.S., Ovchinnikov I.I. Progressive destruction of transport structures: risk analysis, patent solutions using the example of bridge structures. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2026;13(2): 23SATS226. Available at: <https://t-s.today/PDF/23SATS226.pdf>. DOI: 10.15862/23SATS226. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 624.04

Стрельников Даниил Сергеевич

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия
Студент базовой кафедры АО «Мостострой-11»
E-mail: 20010507@inbox.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8257-6721>

Овчинников Илья Игоревич

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия
Заведующий базовой кафедры «АО Мостострой-11», профессор
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Уфа, Россия
Профессор кафедры «Автомобильные дороги, мосты и транспортные сооружения»
Доктор технических наук, доцент
E-mail: bridgeart@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8370-297X>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=177132
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57191523104>

Прогрессирующее разрушение транспортных сооружений: анализ рисков, патентные решения на примере мостовых конструкций

Аннотация. В статье проводится комплексный анализ проблемы прогрессирующего разрушения мостовых конструкций, представляющего собой каскадный отказ, при котором локальное повреждение приводит к непропорционально масштабным последствиям. В работе систематизированы ключевые риски: классифицированы иницирующие события (внешние воздействия и внутренние факторы), детально исследованы механизмы распространения разрушения в зависимости от типа критического элемента (ванты, пилоны, опоры). Методология исследования включает сравнительный анализ исторических катастроф, обзор современных методов моделирования (нелинейный динамический анализ МКЭ, вероятностные оценки) и экспериментальных подходов.

Центральное место в исследовании занимает анализ принципов и практических решений для противодействия прогрессирующему разрушению. Рассмотрена философия защитного проектирования, основанная на создании альтернативных путей нагрузки, повышении локальной устойчивости элементов и обеспечении пластичности. Проведен обзор патентных

решений, направленных на повышение живучести мостов, таких как усовершенствованные деформационные швы, системы мониторинга и методы реконструкции.

В результате исследования доказано, что наиболее эффективной стратегией является комплексный подход, сочетающий избыточность конструктивной схемы, своевременный мониторинг технического состояния и применение инновационных материалов. Выявлен компромиссный характер выбора между разрезными и неразрезными системами с точки зрения локализации повреждений и риска каскадного обрушения. Практическая значимость работы заключается в предоставлении систематизированных данных и рекомендаций, которые могут быть использованы для проектирования новых и оценки устойчивости существующих мостовых сооружений, а также для совершенствования нормативной базы в области безопасности транспортной инфраструктуры.

Ключевые слова: прогрессирующее разрушение; мостовые конструкции; анализ рисков; устойчивость сооружений; патентные решения; системы мониторинга; живучесть конструкций

Введение

Проблема прогрессирующего разрушения мостовых сооружений представляет собой одну из наиболее сложных и актуальных задач современной строительной науки и практики [1]. Прогрессирующее разрушение, определяемое как каскадный отказ конструктивной системы, при котором локальное повреждение приводит к непропорционально масштабным последствиям, стало причиной ряда катастрофических обрушений по всему миру [2]. Исторические примеры, начиная от обрушения моста через Тай (1879 г.) и заканчивая недавней трагедией моста Моранди в Генуе (2018 г.) (рис. 1), с трагической наглядностью демонстрируют социально-экономическую уязвимость транспортной инфраструктуры [3]. Актуальность темы обусловлена старением существующего парка мостов, увеличением нагрузок, воздействием коррозии и усталости материалов, а также риском экстремальных событий, что в совокупности повышает вероятность реализации сценария прогрессирующего разрушения.



Рисунок 1. Разрушенный мост Моранди в Генуе¹

¹ Reuters <https://www.bbc.com/russian/features-45181559>.

Проведенный анализ научной литературы свидетельствует о значительном внимании исследователей к различным аспектам этой проблемы. В работах отечественных и зарубежных ученых глубоко изучены вопросы механизма распространения разрушения, методов численного моделирования и экспериментальных исследований [4]. Однако комплексный анализ, объединяющий систематизацию рисков, обзор инновационных патентных решений, остается недостаточно полно освещенным. Существующий пробел определяет необходимость в проведении данного исследования, направленного на синтез разрозненных знаний в единую систему.

Целью данного исследования является комплексный анализ проблемы прогрессирующего разрушения мостовых конструкций, включающий оценку рисков, систематизацию современных методов противодействия. Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи: классификация инициирующих событий и уязвимостей; исследование механизмов распространения разрушения; анализ современных методов моделирования и оценки устойчивости; обзор патентных решений и материалов нового поколения.

Прогрессирующее разрушение транспортных сооружений

Прогрессирующее разрушение представляет собой каскадный отказ конструктивной системы, при котором локальное повреждение ключевого элемента приводит к перераспределению нагрузок и последовательному нарушению целостности смежных компонентов, вплоть до полного или частичного обрушения сооружения, несоразмерного первоначальной причине [2].

Анализ рисков возникновения такого сценария требует систематической идентификации инициирующих событий (табл. 1) [5–8].

Таблица 1

Классификация инициирующих событий

Категория риска	Инициирующее событие	Пример из практики / Механизм воздействия
Внешние воздействия	Столкновение судов	Обрушение моста через реку Тамбор (Флорида, 1980) вследствие столкновения с судном, приведшее к разрушению пролётного строения. Динамическая нагрузка вызывает локальное разрушение опоры.
	Столкновение транспорта	Удар тяжелогрузного транспорта в элементы опор или главных балок, приводящий к их смещению или локальному разрушению.
	Взрыв (диверсия или авария)	Целенаправленное или случайное взрывное воздействие, вызывающее мгновенную потерю критического элемента (ванты, пилоны, опоры).
	Пожар	Пожар при ДТП под мостом через автомагистраль I-85 в Атланте (2017), приведший к обрушению пролёта. Высокая температура снижает прочность стали и бетона.
	Землетрясение	Сейсмические воздействия, вызывающие чрезмерные пластические деформации в опорных частях, обрушение промежуточных опор.
	Оползень, размыв	Смещение или потеря устойчивости устоя или промежуточной опоры из-за геотехнических процессов.
Внутренние факторы	Коррозия арматуры и тросов	Обрушение моста Моранди (Генуя, 2018): коррозия закладных деталей вант в пилоне привела к их обрыву и перераспределению нагрузок с последующим разрушением пилона.
	Усталостные трещины в металле	Катастрофа моста I-35W в Миннеаполисе (2007): развитие усталостной трещины в элементе фермы при недостаточной конструктивной жёсткости.
	Дефекты изготовления/монтажа	Некачественные сварные швы, нарушение геометрии, неправильное натяжение вант или канатов, создающие дополнительные начальные напряжения.
	Ошибки проектирования	Обрушение подвесного моста через пролив Такома (1940): аэродинамическая неустойчивость, неучтённая в проекте. Недостаточный учёт альтернативных путей нагрузки.

Составлено авторами

Иницирующие события, представленные в таблице 1, характеризуются различной вероятностью возникновения, но всегда высокой потенциальной тяжестью последствий. Внешние воздействия, такие как столкновения или взрывы, носят зачастую случайный и трудно прогнозируемый характер, что требует от конструкции наличия устойчивости, или способности к перераспределению усилий. Внутренние факторы, напротив, развиваются инкрементально, создавая латентный период, в течение которого возможно выявление уязвимости при помощи систем мониторинга и регулярных инспекций. Однако сочетание внутренних дефектов, например, усталостной трещины и коррозии, может создать критическое ослабление сечения, при котором даже незначительное внешнее воздействие способно запустить катастрофический каскад разрушения.

После возникновения иницирующего события дальнейшая судьба сооружения определяется механизмами распространения разрушения, которые описывают, каким образом локальный отказ трансформируется в системную катастрофу. Фундаментальной концепцией для понимания этих процессов является «эффект домино», при котором потеря устойчивости одного конструктивного элемента создает новое, непредусмотренное в проектной схеме, силовое воздействие на соседние элементы. Это приводит к их последовательному выходу из строя по цепной реакции. Ключевым моментом является то, что конструктивная система теряет свою геометрическую неизменяемость и превращается в механизм [9].

Начальной фазой механизма распространения всегда является потеря несущей способности ключевого (критического) элемента, функция которого является фундаментальной для статической работы всей системы. Характер последующего обрушения напрямую зависит от типа выбывшего из работы элемента и его места в силовой схеме (табл. 2) [10–13].

Таблица 2

Влияние типа критического элемента на механизм иницирования разрушения

Тип критического элемента	Статическая функция и последствия потери	Характерный сценарий прогрессирующего разрушения
Ванта (вантового моста)	Работает на осевое растяжение, обеспечивает упругое подвешивание и стабилизацию пролётного строения. Потеря приводит к резкому провисанию и перераспределению усилий в соседних вантах и пилонах.	Обрыв одной ванта вызывает динамическую «хлыстовую» нагрузку, приводит к перегрузу и последовательному обрыву соседних вант («эффект застёжки-молнии»), что вызывает опрокидывание пилон или обрушение пролётного строения.
Пилон (вантового/подвесного моста)	Работает на сжатие с изгибом, является основной вертикальной опорой, воспринимающей усилия от вант или пилонов. Потеря устойчивости приводит к полной потере опорной функции для значительной части пролётного строения.	Разрушение пилон (вследствие взрыва, коррозии, удара) вызывает обрушение всех связанных с ним вант и свободное падение опирающихся секций пролётного строения, которые могут при падении разрушить следующие опоры.
Подвес (подвесного моста)	Основной несущий трос, работающий на растяжение и воспринимающий постоянную и временную нагрузки через подвески. Обрыв создает масштабную перестройку силовой схемы.	Локальный обрыв несущего троса приводит к провисанию большого участка пролётного строения, динамическим нагрузкам, перегрузу и возможному обрыву второго троса, что вызывает полное обрушение центрального пролета.
Промежуточная опора (балочного моста)	Работает на сжатие, обеспечивает вертикальную поддержку пролётного строения на промежуточных точках. Внезапное разрушение создает условие для работы пролета как консоли.	Внезапное разрушение опоры (от столкновения, размыва) приводит к тому, что пролётное строение, рассчитанное на балочную схему, начинает работать как консоль, создавая изгибающие моменты, на которые оно не рассчитано, что ведет к его разрушению в опорной зоне и обрушению соседних пролетов.

Составлено авторами

Сразу после потери критического элемента в конструкции активируются процессы перераспределения нагрузок. Способность системы найти новый, альтернативный путь для передачи нагрузок является центральным фактором, определяющим, будет ли разрушение

остановлено или перейдет в прогрессирующую стадию. В идеале конструкция должна обладать достаточной статической неопределенностью и ресурсом пластичности, чтобы переформироваться в новую устойчивую конфигурацию. Однако на практике этот процесс сопровождается сложными динамическими явлениями. Резкая потеря элемента вызывает ударное воздействие и колебания, которые генерируют нагрузки, значительно превышающие статические. Кроме того, новые силовые потоки часто создают изгибающие моменты и срезающие усилия в направлениях и узлах, не укрепленных для их восприятия. Например, при потере опоры в балочной системе в соседних пролетах возникают значительные отрицательные изгибающие моменты в верхней зоне плиты проезжей части, которая обычно слабо армирована для их восприятия, что приводит к ее мгновенному хрупкому разрушению.

Для прогнозирования сценариев прогрессирующего разрушения и оценки устойчивости мостовых конструкций применяется комплекс современных методов анализа и моделирования, которые условно можно разделить на три взаимодополняющие группы: детерминистические, вероятностные и экспериментальные. Детерминистические подходы направлены на точное вычисление отклика конструкции на заданное воздействие, исходя из физических законов механики и известных свойств материалов. Наиболее мощным инструментом в этом классе является метод конечных элементов (МКЭ), позволяющий создать детализированную цифровую модель сооружения. Для адекватного моделирования каскадного разрушения используется нелинейный динамический анализ, учитывающий геометрическую нелинейность (большие перемещения), физическую нелинейность (пластичность, поврежденность материала), а также контактное взаимодействие отделяющихся частей конструкции [14]. Пошаговое интегрирование по времени позволяет воспроизвести всю последовательность событий: от локального повреждения, вызванного иницилирующим событием, до полного обрушения или его остановки. Например, такая модель может наглядно показать, как обрыв одной ванты приводит к динамическому «захлесту» соседних, перегрузке пилона и последующему коллапсу пролетного строения.

В отличие от детерминистических, вероятностные методы признают и количественно оценивают неопределенности, присущие как нагрузкам (например, интенсивность движения или сила взрыва), так и сопротивлению конструкции (разброс прочностных характеристик стали, скорость коррозии). Эти подходы основаны на анализе надежности и позволяют оценить вероятность прогрессирующего обрушения в течение заданного срока службы сооружения. Методом Монте-Карло проводится множество численных экспериментов, в каждом из которых параметры модели варьируются в соответствии с их статистическими распределениями. В результате строится не единый сценарий, а распределение вероятностей различных исходов. Это позволяет ответить на вопросы типа: «Какова вероятность того, что удар судна приведет к обрушению моста, учитывая изменчивость прочности опоры и возможных траекторий столкновения?». Совмещение детерминистических моделей МКЭ с вероятностными рамками представляет собой наиболее передовой подход, известный как вероятностная оценка риска прогрессирующего разрушения [15].

Несмотря на мощь вычислительных методов, их верификация и калибровка невозможны без экспериментальных исследований. Испытания масштабных моделей критических узлов (например, соединений вант с пилоном или опорных частей) в лабораторных условиях позволяют получить данные о реальном поведении материалов и элементов при экстремальных нагрузках, включая хрупкое разрушение и остаточную несущую способность. Полевые наблюдения и мониторинг существующих сооружений с помощью датчиков деформаций, акселерометров и акустической эмиссии предоставляют бесценные данные о реальных эксплуатационных нагрузках и скорости деградации материалов [15].

Наконец, трагический, но информативный источник данных — это инженерные расследования реальных катастроф, такие как обрушение мостов Моранди в Генуе или I-35W в Миннеаполисе (рис. 2), которые предоставляют уникальные данные для проверки и совершенствования всех видов моделей [3; 5].



Рисунок 2. Рухнувший мост I-35W через Миссисипи²

Современная философия проектирования мостовых сооружений, ориентированная на противодействие прогрессирующему разрушению, базируется на трех фундаментальных принципах: создании альтернативных путей нагрузки, повышении локальной устойчивости ключевых элементов и реализации концепции «защитного проектирования». Эти принципы не являются взаимоисключающими; напротив, их синергетическое применение позволяет создать конструкцию, способную выдержать локальное повреждение без катастрофического развития аварии [8].

Принцип устройства альтернативных путей нагрузки предполагает проектирование структурной системы таким образом, чтобы при выходе из строя одного несущего элемента приложенные к нему нагрузки могли быть перенаправлены по другим, заранее предусмотренным маршрутам. Это достигается за счет целенаправленного создания статически неопределимых систем, обладающих избыточностью. Классическим примером является переход от однопролетных балочных систем, где потеря опоры неминуемо ведет к обрушению, к неразрезным многопролетным системам. В последних потеря промежуточной опоры приводит к перераспределению усилий, и пролетное строение может работать в аварийном режиме по балочно-консольной схеме, что, при достаточной пластичности и прочности соединений, предотвращает немедленное обрушение. В вантовых мостах этот принцип реализуется через плотное расположение вант, обеспечивающее дублирование, и создание жесткого пролетного строения (например, коробчатого сечения), способного работать как неразрезная балка и перераспределять нагрузки при обрыве одной или нескольких вант.

Однако на самом деле ситуация не такая простая. Разрезные системы также имеют свои преимущества перед неразрезными. Разрезные системы (статические определимые), несмотря на отсутствие альтернативных путей нагрузки, обладают тем преимуществом, что разрушение одной части конструкции, как правило, не передается на соседние. В случае выхода из строя

² ABC News https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%BE%D1%81%D1%82_I-35W_%D1%87%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B7_%D0%9C%D0%B8%D1%81%D1%81%D0%B8%D1%81%D0%B8%D0%BF%D0%B8.

опоры, обрушивается только один пролет, на который она непосредственно воздействует, что локализует разрушение и может снизить общие потери.

Неразрезные системы (статические неопределимые), обеспечивая альтернативные пути нагрузки и повышенную живучесть при локальных повреждениях, несут в себе и определенный риск [16]. При катастрофическом разрушении одной опоры или пролета, перераспределившиеся усилия могут оказаться чрезмерными для соседних пролетов. Это может привести к эффекту «домино», когда обрушение, начавшись в одном месте, последовательно вовлекает соседние пролеты, вызывая их обрушение через один от разрушенного, так как обрушившийся пролет «тянет» за собой соседние через жесткие связи в непрерывном пролетном строении.

Таким образом, выбор между разрезной и неразрезной системой представляет собой компромисс между устойчивостью к начальному повреждению и потенциальным масштабом прогрессирующего обрушения в случае его развития.

Второй принцип — повышение локальной устойчивости ключевых элементов — нацелен на усиление сопротивления конструкции иницирующим событиям. Даже при наличии альтернативных путей нагрузки, масштаб начального повреждения должен быть минимизирован. Это предполагает применение пассивных защитных мер, таких как устройство массивных железобетонных банкетов (булингов) вокруг опор, находящихся в зоне риска столкновения с судами или транспортом. Узлы крепления вант к пилонам и пролетному строению проектируются с повышенным запасом прочности и многократным дублированием анкерных устройств для предотвращения их внезапного разрушения при коррозии или перегрузе [17]. Армирование критических участков пилонов и опор производится с учетом не только эксплуатационных, но и исключительных нагрузок, возникающих, например, при взрыве [4].

Таблица 3

Патентные решения для повышения живучести мостовых конструкций

№ патента	Автор(ы)	Описание решения
RU196838U1	Панин С.В.	Деформационный шов мостовых сооружений. Устройство для перекрытия деформационных зазоров. Включает прикрывающий элемент в виде пластины, торцы которого установлены в карманы из резиновых пластин. Цель: повышение долговечности, прочности и надежности.
RU2786609C2	Яшнов А.Н., Иванов Е.О.	Способ мониторинга технического состояния пролетного строения моста. Способ включает мониторинг с опросом измерительного оборудования и оценку состояния путем сравнения измеренных параметров (напряжения в поясах, выкатка опорных частей и др.) с заранее вычисленными сигнальными уровнями.
WO2017146606A1	Сахарова И.Д., Казарян В.Ю.	Способ реконструкции мостового сооружения и устройство для его осуществления. Способ включает установку временных опор и траверс, протягивание и натяжение канатов через отверстия в балке для подтягивания и усиления конструкции.
RU2291242C1	Файко Ю.И., Шапиро Д.И., Гринберг Е.И.	Мостовое сооружение. Пролётное строение выполнено в виде рамы с V-образными опорами, снабженными нишами для установки подкосов-вставок, что повышает эффективность и долговечность.

Составлено авторами

Обобщающей концепцией, интегрирующей оба подхода, является «защитное проектирование». Под ним понимается свойство конструкции, характеризующее ее способность поглощать повреждения, вызванные непредвиденными событиями, без распространения разрушения, непропорционального первоначальной причине [18]. Это свойство не описывается отдельным расчетным параметром, а является возникающим свойством всей системы, достигаемым через комбинацию избыточности, пластичности и детальной проработки узлов. Пластичность играет

здесь ключевую роль: способность элементов к значительным неупругим деформациям позволяет поглотить энергию динамического воздействия и обеспечить плавное перераспределение усилий, предотвращая хрупкое, то есть внезапное и полное, разрушение [19].

Интенсивное развитие технологий обеспечения безопасности мостовых сооружений находит отражение в значительном количестве патентных решений, направленных на предотвращение прогрессирующего разрушения (табл. 3).³

Таким образом, анализ патентной активности и разработок в области строительных материалов свидетельствует о переходе от реактивного устранения последствий к проактивному предотвращению аварий.

Заключение

Проведенное исследование позволило достичь поставленной цели и осуществить комплексный анализ проблемы прогрессирующего разрушения мостовых конструкций. В работе систематизированы ключевые аспекты этой сложной проблемы — от классификации рисков до современных методов противодействия. Доказано, что прогрессирующее разрушение представляет собой каскадный отказ конструктивной системы, где локальное повреждение приводит к непропорционально масштабным последствиям.

Выявлены наиболее уязвимые элементы мостовых конструкций, к которым относятся ванты, пилоны, подвесы и промежуточные опоры. Установлено, что потеря любого из этих элементов может запустить цепную реакцию разрушения, что подтверждается анализом исторических примеров катастроф. Особую опасность представляет сочетание внутренних дефектов (коррозия, усталостные трещины) с внешними воздействиями, создающее критическое ослабление конструкции.

В результате исследования доказана эффективность комплексного подхода к обеспечению устойчивости мостовых сооружений. Наиболее перспективными направлениями признаны: внедрение принципов защитного проектирования, создание альтернативных путей нагрузки, повышение локальной устойчивости ключевых элементов, а также использование современных материалов и систем мониторинга. Полученные результаты имеют практическую значимость для проектирования новых и оценки состояния существующих мостовых сооружений, а также могут быть использованы при разработке нормативной документации в области безопасности транспортной инфраструктуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Особенности прогрессирующего разрушения применительно к мостовым сооружениям / В.Б. Караханян, И.И. Овчинников, М.А. Баев, И.Г. Овчинников // Транспортные сооружения. — 2020. — Т. 7, № 2. — С. 10. — DOI: [10.15862/12SATS220](https://doi.org/10.15862/12SATS220). — EDN: [EZHHZC](https://www.edn.net/EZHYZC). (дата обращения: 12.02.2026).
2. Клокова Е.В. Выявление несущих конструкций каркаса здания, определяющих устойчивость здания против прогрессирующего обрушения / Е.В. Клокова, В.С. Федоров, В.Д. Кудрявцева // Матрица научного познания. — 2021. — № 4-1. — С. 46–54. — EDN: [ZVAYDO](https://www.edn.net/ZVAYDO). (дата обращения: 12.02.2026).

³ Официальный сайт Федеральной службы по интеллектуальной собственности (Роспатент) [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.fips.ru/> (дата обращения: 08.11.2025).

3. Заварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 1 / И.Ю. Майстренко, И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников, А.В. Кокодеев // Транспортные сооружения. — 2017. — Т. 4, № 4. — С. 11. — DOI: [10.15862/13TS417](https://doi.org/10.15862/13TS417). — EDN: [NRLEKT](https://www.edn.net/NRLEKT). (дата обращения: 12.02.2026).
4. Шалимов А.С. Моделирование прогрессирующего разрушения при упругом деформировании представительных объемов двунепрерывных пористых структур / А.С. Шалимов, М.А. Ташкинов // XXXII Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения: сборник трудов конференции, Москва, 02–04 декабря 2020 года. — Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения имени А.А. Благонравова Российской академии наук, 2021. — С. 93–98. — EDN: [IWHTLT](https://www.edn.net/IWHTLT). (дата обращения: 12.02.2026).
5. Карпухина А.А. Причины разрушения транспортных сооружений / А.А. Карпухина, Е.А. Пестрякова, Е.В. Мазур // Развитие теории и практики транспортного строительства, информационной поддержки транспортных систем: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, Петергоф, 21 июня 2024 года. — Санкт-Петербург, Петергоф: ВОЕННЫЙ ИНСТИТУТ (ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ВОЙСК И ВОЕННЫХ СООБЩЕНИЙ), 2024. — С. 52–62. — EDN: [GHTYWJ](https://www.edn.net/GHTYWJ). (дата обращения: 12.02.2026).
6. Тимофеев В.В. О прогрессирующем разрушении мостовых сооружений / В.В. Тимофеев // Молодежь и научно-технический прогресс в дорожной отрасли юга России: материалы XII Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Волгоград, 23–25 мая 2018 года. — Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2018. — С. 73–79. — ISBN 978-5-9948-2911-0. — EDN: [VMYTOO](https://www.edn.net/VMYTOO). (дата обращения: 12.02.2026).
7. Соколова О.Я. Моделирование прогрессирующего разрушения железнодорожного мостового сооружения / О.Я. Соколова, И.И. Овчинников, А.Н. Маринин // Вестник евразийской науки. — 2024. — Т. 16, № 3. — С. 75. (дата обращения: 12.02.2026).
8. Габышев С.В. Выявление прогрессирующего разрушения мостовых сооружений / С.В. Габышев, И.Г. Овчинников // Вестник евразийской науки. — 2024. — Т. 16, № 2. — EDN: [TWRRFC](https://www.edn.net/TWRRFC). (дата обращения: 12.02.2026).
9. Овчинников И.Г. Стратегии проектирования балочных мостов против прогрессирующего разрушения / И.Г. Овчинников, О.Н. Герасимов // Карбышевские чтения. Наука на службе обществу. Сессия 7 — Тенденции развития строительства объектов гражданского и специального назначения: сборник материалов Международной научно-практической конференции, Уфа, 14–16 декабря 2022 года. — Уфа: Общество с ограниченной ответственностью "Аэтерна", 2022. — С. 192–196. — ISBN 978-5-00177-563-8. — EDN: [FPXNXG](https://www.edn.net/FPXNXG). (дата обращения: 12.02.2026).
10. Герасимов О.Н. Тенденция проектирования арочных мостов против прогрессирующего разрушения / О.Н. Герасимов, И.Г. Овчинников // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе: материалы Национальной с международным участием научно-практической конференции студентов, аспирантов, учёных и специалистов, посвященной 65-летию Тюменского индустриального университета, Тюмень, 27–29 октября 2021 года / отв. редактор А.Н. Халин. — Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2021. — С. 62–66. — ISBN 978-5-9961-2779-5. — EDN: [OTGGTX](https://www.edn.net/OTGGTX). (дата обращения: 12.02.2026).

11. Овчинников И.Г. Основные методы обеспечения живучести мостовых сооружений против прогрессирующего разрушения / И.Г. Овчинников, О.Н. Герасимов // Карбышевские чтения. Наука на службе обществу. Сессия 7 — Тенденции развития строительства объектов гражданского и специального назначения: сборник материалов Международной научно-практической конференции, Уфа, 14–16 декабря 2022 года. — Уфа: Общество с ограниченной ответственностью "Аэтерна", 2022. — С. 196–199. — ISBN 978-5-00177-563-8. — EDN: [FPXNXG](#). (дата обращения: 12.02.2026).
12. Архипова Е.Д. Анализ аварий мостовых сооружений, вызванных прогрессирующим разрушением / Е.Д. Архипова, И.Г. Овчинников // Транспортные сооружения. — 2024. — Т. 11, № 4. — DOI: [10.15862/06SATS424](#). — EDN: [ELSFKI](#). (дата обращения: 12.02.2026).
13. Архипова Е.Д. Методы по предотвращению прогрессирующего разрушения мостовых сооружений / Е.Д. Архипова, И.Г. Овчинников // Дорожная наука — дорожной отрасли: материалы региональной научно-практической конференции, Тюмень, 26 апреля 2024 года. — Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2024. — С. 5–6. (дата обращения: 12.02.2026).
14. О разработке интеллектуальных систем проектирования и оценки технического состояния мостовых сооружений. Часть 2 / А.Ю. Шварц, И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников [и др.] // Транспортные сооружения. — 2018. — Т. 5, № 1. — С. 12. — EDN: [XNZIHR](#). (дата обращения: 12.02.2026).
15. Тамразян А.Г. Научные основы оценки риска и обеспечения безопасности железобетонных конструкций, зданий и сооружений при комбинированных особых воздействиях / А.Г. Тамразян // Вестник НИЦ Строительство. — 2018. — № 1(16). — С. 106–114. — EDN: [YNSGEI](#). (дата обращения: 12.02.2026).
16. Расчет строительных конструкций на просадочных грунтах / П.В. Рожков, И.А. Пурикова, Ю.С. Димитрюк, С.В. Тертица // Актуальные вопросы управления, экономики и права. Наука на современном этапе: вопросы, достижения, инновации: материалы V Международных научно-практических конференций, Томск, 05–10 марта 2019 года. — Томск: ИП Шелистов Денис Александрович (Издательский центр "Quantum"), 2019. — С. 48–53. — EDN: [BAPTJQ](#). (дата обращения: 12.02.2026).
17. Патент № 2618307 Российская Федерация, МПК E01D 19/16, E01D 11/00. Ванта моста: № 2015126268: заявл. 01.07.2015: опубл. 03.05.2017 / С.Л. Ситников, А.С. Ситников; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Следящие тест-системы". — EDN: [ZDHAXB](#). (дата обращения: 12.02.2026).
18. Тамразян А.Г. Оценка риска и надежности несущих конструкций и ключевых элементов — необходимое условие безопасности зданий и сооружений / А.Г. Тамразян // Вестник ЦНИИСК имени В.А. Кучеренко "Исследования по теории сооружений". — 2009. — № 1. — С. 160–171. — EDN: [MSMCRD](#). (дата обращения: 12.02.2026).
19. Железнов С.А. Использование фиброармированного пластика в конструкции опор мостов / С.А. Железнов, О.Р. Бирюков, Н.А. Ермошин // Неделя науки ИСИ: материалы всероссийской конференции в 3-х частях, Санкт-Петербург, 26–30 апреля 2021 года / Инженерно-строительный институт Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Том Часть 2. — Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2021. — С. 261–263. — EDN: [PPKKG](#). (дата обращения: 12.02.2026).

Strelnikov Daniil Sergeevich

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia
E-mail: 20010507@inbox.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8257-6721>

Ovchinnikov Ilya Igorevich

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia
Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia
E-mail: bridgeart@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8370-297X>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=177132
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57191523104>

Progressive destruction of transport structures: risk analysis, patent solutions using the example of bridge structures

Abstract. The article provides a comprehensive analysis of the problem of progressive destruction of bridge structures, which is a cascading failure in which local damage leads to disproportionately large-scale consequences. The paper systematizes the key risks: the initiating events (external influences and internal factors) are classified, the mechanisms of destruction propagation are studied in detail depending on the type of critical element (shrouds, pylons, supports). The research methodology includes a comparative analysis of historical disasters, a review of modern modeling methods (nonlinear dynamic FEM analysis, probabilistic estimates) and experimental approaches.

The central place in the research is occupied by the analysis of principles and practical solutions for countering progressive destruction. The philosophy of protective design is considered, based on the creation of alternative load paths, increasing the local stability of elements and ensuring plasticity. A review of patent solutions aimed at improving the survivability of bridges, such as improved expansion joints, monitoring systems and reconstruction methods, has been conducted.

As a result of the research, it is proved that the most effective strategy is an integrated approach combining redundancy of the design scheme, timely monitoring of the technical condition and the use of innovative materials. The compromise nature of the choice between split and non-split systems in terms of damage localization and the risk of cascade collapse is revealed. The practical significance of the work lies in providing systematized data and recommendations that can be used to design new and assess the stability of existing bridge structures, as well as to improve the regulatory framework in the field of transport infrastructure safety.

Keywords: progressive destruction; bridge structures; risk analysis; stability of structures; patent solutions; monitoring systems; survivability of structures