

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

2024, Том 11, № 1 / 2024, Vol. 11, Iss. 1 <https://t-s.today/issue-1-2024.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/05SATS124.pdf>

DOI: 10.15862/05SATS124 (<https://doi.org/10.15862/05SATS124>)

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

Повышение «живучести» железнодорожного моста с повреждением элемента фермы

Быкова Н.М., Баранов Т.М., Забияка А.А.

ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», Иркутск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Фамилия Имя отчество, e-mail: Bikova_nm@irgups.ru

Аннотация. В современную эпоху часто регистрируются аварии и повреждения отдельных конструктивных элементов мостов, поэтому все более актуальным становится вопрос о «живучести» мостов, как способности пропускать транспортную нагрузку, имея поврежденные элементы. Актуальность подтверждается включением новых требований проверки живучести в современные нормы проектирования мостов.

В статье приведен обзор публикаций в области развития теории живучести, выделены методы ее повышения применительно к транспортным сооружениям и проведены исследования повышения живучести железнодорожных мостов.

Обзор исследований в области оценки и повышения живучести сооружений применительно к транспортным сооружениям позволил выделить методы повышения живучести путем обеспечения несущей способности ключевых элементов конструкций, оптимизации пространственной работы конструкции и разработки специальных организационных мер исключения аварийной ситуации.

Применительно к пролетному строению со сквозными главными фермами железнодорожного моста расчетной длиной 66 м численными методами исследованы возможности повышения надежности путем повышения несущих способностей ключевых элементов. Установлено, что положительный эффект повышения живучести при исключении из работы элементов нижних поясов и раскосов дает увеличение несущей способности нижних продольных связей и раскосов, соответственно. Выявлено, что наиболее опасным является исключение из работы элементов верхнего пояса фермы, при этом мало эффективно увеличение несущей способности ключевых элементов продольных связей, как и увеличение степени статической неопределимости решетки связей.

Предложены организационные мероприятия в случае повреждения и выхода из строя элемента фермы пролетного строения.

Ключевые слова: железнодорожные мосты; фермы; повреждения элементов; живучесть; прогрессирующие обрушения; запредельные состояния; снижение жесткости; усиление элементов

Improving the survivability of a railway bridge with damage to a truss members

Natalya M. Bikova, Timofey M. Baranov, Andrey A. Zabiyaka

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

Corresponding author: Natalya M. Bikova, e-mail: Bikova_nm@irgups.ru

Abstract. In the modern era, accidents and damage to individual structural elements of bridges are frequently recorded, so the issue of bridges survivability, as the ability to pass the transport load with damaged elements, is becoming more and more relevant. The timeliness is confirmed by the inclusion of new requirements for survivability testing in modern bridge design standards.

The article gives a publications review in the field of survivability theory development, identifies the methods of its increase in relation to transport structures and conducts research on increasing the railway bridges survivability.

The research review in the field of assessment and increase of structures survivability as applied to transport structures allowed to single out the methods of survivability increase by providing bearing capacity of structures key elements, optimisation of spatial performance of a building structure and development of special organisational measures of emergency situation exclusion.

With regard to the superstructure with through main trusses of a railway bridge with a design length of 66 m, numerical methods have been used to investigate the possibilities of increasing the reliability by increasing the bearing capacity of key elements. It has been established that the positive effect of increasing the survivability by excluding the bottom chord member and struts from operation gives an increase in the bearing capacity of the bottom lateral bracing and struts, respectively. It is revealed that the most dangerous is the exclusion from operation of the upper chord truss members, and the bearing capacity increase of the key lateral bracing elements, as well as the increase of the degree of static indeterminacy of the lattice of links is ineffective.

Organisational measures in case of damage and failure of the span truss element are proposed.

Keywords: railway bridges; trusses; element damage; survivability; progressive collapses; limit states; stiffness reduction; element reinforcement

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

Существующая система строительства и эксплуатации железнодорожных мостов, построенная на действующей нормативно-технической и правовой базе документов, создает все основы их безопасности. В то же время, анализ аварий железнодорожных мостов показывает, что на современном этапе растет количество механических повреждений элементов мостов за счет ударов транспортных средств, управляемых человеком [1].

Численное исследование механической работы пролетного строения со сквозными главными фермами с ездой понизу однопутного железнодорожного балочного моста при частичном и полном исключении из работы отдельных элементов одной фермы (расчетная длина 66 м) позволило выявить характер перераспределения напряжений и степень опасности подобных повреждений [1]. Очевидно, что для повышения безопасности пропуска поездов имеет значение проблема повышения живучести пролетных строений железнодорожных мостов в случае механического повреждения их элементов.

В нормах проектирования мостов введено Приложение 7 СП 35.13330-2011¹, в котором рекомендуется мостовые сооружения проверять на живучесть (проверка на прочность и устойчивость формы и положения остальных элементов при выходе из строя отдельных конструктивных элементов). «Живучесть» рассматривается как обеспеченность от прогрессирующего разрушения. При этом рассматривается также выход из строя одного из элементов решетки сквозного пролетного строения. В случае выхода из строя отдельных элементов сооружения во время эксплуатации и возобновления движения транспорта, должны быть выполнены расчеты по измененной расчетной схеме для определения допустимых величин подвижных нагрузок и условий их пропуска.

Хотя такие рекомендации введены в нормы проектирования мостов, в связи с малой изученностью проблемы, широкого применения они не нашли в практике проектирования мостов, а также не отражены в нормах их эксплуатации.

¹ СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84*: Свод правил: издание официальное: утвержден Приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 28 декабря 2010 г. N 822 и введен в действие с 20 мая 2011 г.: Дата введения 2011-05-20 / разработан ОАО "ЦНИИС". — КонсультантПлюс: <https://www.consultant.ru/> (дата обращения 09.12.23). — Режим доступа: для авториз. пользователей. — Текст: электронный.

Обзор публикаций в области оценки и повышения живучести конструкций

Review of publications in the field of structures survivability assessment and improvement

Впервые термин «живучесть» был введен адмиралом С.О. Макаровым в 1894 г.: «Живучесть — это способность корабля вести бой, имея повреждения в различных боевых частях» [2]. В работе [3] живучесть определяется как свойство объекта, заключающееся в его способности выполнять заданное назначение в процессе неблагоприятных воздействий на весь объект или отдельные его компоненты, поддерживая в допустимых пределах свои эксплуатационные показатели. Анализируя простые модели живучести, Г.Н. Черкесов [4] отмечает, что свойство живучести существенно отличается от безотказности, долговечности и других известных свойств надежности. Для обеспечения живучести, как правило, необходим более высокий уровень избыточности, чем для обеспечения безотказности. Порой увеличение числа элементов приводит к росту живучести, в то время как безотказность при этом снижается. При решении задачи обеспечения живучести изменяется не только масштаб, но и характер восстановительных мероприятий.

В последние десятилетия большое внимание уделяется развитию теоретических и практических подходов к оценке живучести сложных организационно-технических систем (СТС) различного назначения [5–7].

В работе [5] отмечается, что сложные организационно — технические системы независимо от их назначения должны обладать способностью эффективно функционировать при получении повреждений (разрушений) или восстанавливать ее в течение заданного времени, то есть обладать свойством — живучести. При этом, живучесть рассматривается как внутреннее свойство системы, которым она обладает при внешних воздействиях, не предусмотренных условиями нормальной эксплуатации. Проводится анализ методик и моделей оценки живучести, делается вывод о том, что на настоящий момент в теории живучести сложных организационно-технических систем отсутствует единый методологический подход, позволяющий решать задачу комплексной оценки живучести сложной системы с точки зрения ее структурной уязвимости и функциональности с учетом значимости существующих в системе взаимосвязей.

Существенный вклад в общую теорию живучести внес коллектив авторов во главе с Н.А. Махутовым [6; 7]. В работе [6] отмечается, что живучесть сложных технических систем характеризует ее способность сопротивляться катастрофическому разрушению и выполнять предписанные ей функции, в случае если в результате экстремальных

(запроектных) воздействий система получит локальные повреждения. В связи с этим для проведения количественной оценки живучести принято брать соотношение между какими-либо параметрами, характеризующими состояние неповрежденной системы и состояние системы при наличии локального повреждения. В частности, может рассматриваться отношение нагрузок разрушения системы с повреждением и неповрежденной системы или отношение вероятностей отказа системы при наличии повреждения и вероятности отказа неповрежденной системы. Предлагается ввести индекс живучести, основанный на соотношении прямых и косвенных рисков для рассматриваемой системы. Этот индекс позволяет оценить склонность системы к катастрофическим отказам. Выделяется вероятностный и детерминированный подходы к оценке живучести технических систем. К детерминированным подходам отнесены силовой и энергетический методы оценки живучести. К вероятностному подходу отнесен метод построения индексов, характеризующих надежность поврежденной и неповрежденной системы, и индекса надежности, базирующегося на соотношении прямых и косвенных рисков. Для обеспечения живучести сложных технических систем рекомендуется использование технических и организационных мер. К техническим мерам отнесены: системы мониторинга состояния сложных технических систем, введение систем резервирования. К организационным мерам отнесены: совершенствование системы управления, повышение квалификации операторов и персонала и подготовка плана ликвидации последствий отказов сложных технических систем.

В работе [6] отмечается, что традиционные методы проектирования сложных технических систем предполагают расчет реакции элементов систем на проектные воздействия, которые определяются, исходя из нормальных условий эксплуатации. Ввиду высокого уровня вариативности основных механических свойств конструкционных материалов и действующих нагрузок оценка конструкционной прочности и структурной целостности сложных технических систем должна быть вероятностной. В связи с этим вводится понятие прочностной надежности системы, под которой понимается вероятность неразрушения системы под действием расчетных режимов эксплуатационного нагружения. При оценках прочностной надежности, как правило, не учитываются запроектные воздействия на систему (нерасчетные режимы нагружения, ошибки операторов, экстремальные условия внешней среды), которые с высокой вероятностью вызывают повреждения системы на различных масштабных уровнях (в том числе макроповреждения), способные инициировать разрушение системы в целом. Это объясняет, что фактическая вероятность отказов сложных систем оказывается на порядок выше расчетных оценок, полученных методами теории надежности.

Поскольку при оценке прочностной надежности из рассмотрения выводятся запроектные воздействия и не исследуется реакция системы на них, оценка прочностной надежности системы должна быть дополнена оценкой ее живучести, в рамках которой детально исследуются свойства системы, получившей различного рода повреждения. Таким образом, вводится термин прочностной живучести как способности системы продолжать воспринимать нагрузки и сопротивляться деформированию и разрушению после возникновения повреждений на различных масштабных уровнях. Источниками прочностной живучести являются физико-механические свойства конструкционных материалов, позволяющие системе сопротивляться деформированию и разрушению; заложенный в систему запас прочности по различным механизмам достижения предельных состояний; наличие в системе структурной избыточности и альтернативных путей передачи нагрузки.

На основании моделей и подходов, разработанных в рамках физической мезомеханики, механики накопления повреждений, механики разрушения, механики катастроф, теории надежности, теории риска и теории систем, было показано, что для обеспечения адекватных результатов при моделировании процессов накопления повреждений и разрушения, а в ряде случаев и для получения достаточно точных количественных оценок, достаточно выделить три уровня оценки живучести: живучесть конструкционного материала, живучесть конструктивных элементов системы и структурная живучесть системы в целом.

Под живучестью конструкционного материала понимается его способность полностью или частично сохранять свои физико-механические свойства и сопротивляться деформированию и разрушению при наличии деградиационных повреждений различной природы. Для оценки живучести материала и конструкции авторами предложена система индексов, характеризующих ухудшение механических свойств материала при накоплении рассеянных повреждений.

Под прочностной живучестью конструктивного элемента понимается его способность сохранять, по крайней мере, частично свою несущую способность в течение некоторого времени после возникновения микро- и макроповреждений различного типа. Для оценки конструкционной живучести был предложен ряд дополнительных индексов, учитывающих макроповреждения различного типа (макротрещин, зон локальной потери устойчивости, областей местных пластических деформаций, очагов коррозионного поражения и т. д.).

Для оценки живучести СТС в целом была сформирована система показателей, основанных на детерминистских и вероятностных оценках прочности, а также интегральных подходах, базирующихся на проведении риск-анализа системы и на оценке ее прочностных характеристик в поврежденном состоянии. Анализ живучести на системном уровне предполагает исследование последовательности событий и причинно-следственных связей между событиями, происходящими вслед за локальными повреждениями, вплоть до разрушения системы в целом. Иными словами, анализ живучести системы заключается в проведении качественного и количественного исследования структуры сценариев эскалации аварии.

Использование индекса живучести, базирующегося на проведении риск-анализа рассматриваемой сложной технической системы, позволяет в наиболее полной мере учесть многовариантность сценариев разрушения.

В статье [8] приводится обзор концептуально-методологических подходов к обеспечению конструктивной безопасности. В качестве примера первого лавинообразного разрушения приводится авария Квебекского моста в Канаде в начале прошлого века, когда внезапная потеря устойчивости одного из сжатых стержней фермы моста вызвала лавинообразное обрушение всей конструкции моста, далее приводятся примеры обрушений промышленно — гражданских сооружений. Отмечается, что базовые положения конструктивной безопасности содержатся в действующих нормах, в частности, в методе предельных состояний. Модели деформирования конструктивных систем могут быть адаптированы для анализа живучести систем. Но при этом сложно прогнозировать место, характер и величину запроектного воздействия, сложно выполнить динамический расчет минимум дважды нелинейной системы в условиях неопределенности воздействия. Для нормирования воздействий необходимо накопление статистической информации по результатам натурных измерений при чрезвычайных ситуациях. Отмечается малоэффективность резервирования прочности конструктивных ключевых элементов в условиях неопределенности запроектных воздействий, так же, как и создание других превентивных и организационных мер. Более широко используется направление, связанное с максимальным учетом пространственной работы конструктивной системы. Остро актуальным вопросом недопущения хрупкого выключения отдельных элементов и связей является контроль и учет эксплуатационного износа и повреждений. Таким образом, защита зданий и сооружений должна строиться с одной стороны на вероятностной основе с оценкой риска и стоимости мер обеспечения живучести, с другой стороны, она должна быть адресной и гибкой в зависимости от характеристики сооружения и условий его эксплуатации.

Следуя концептуально-методологическим подходам, можно выделить работы, которые посвящены живучести зданий и сооружений с точки зрения вероятностной оценки рисков аварийных ситуаций, работы исследования детерминированных подходов, и особо следует выделить работы по изучению прогрессирующего обрушения.

Так, исследование рисков обрушения зданий и сооружений отражено в монографии А.Г. Тамразяна [9]. В большей степени работы посвящены детерминированным методам оценки работы конструкций гражданских зданий и сооружений в запредельных состояниях [11–15]. Так, в работе [11] акцент сделан на исследование длительного силового сопротивления материалов строительных конструкций с учетом режимов силового нагружения, коррозионных повреждений и вибрационных пригрузений.

Применительно к строительным зданиям и сооружениям в диссертации Н.В. Ключевой [12] построены критерии живучести железобетонных балочных и стержневых физически и конструктивно-нелинейных систем с внезапно выключающимися связями с учетом одностороннего характера их работы, силовых и коррозионных воздействий, длительной и динамической прочности материалов. В работе [13] выведены расчетные зависимости для оценки параметров живучести железобетонных рамно-стержневых конструктивных систем в запредельных состояниях при потере устойчивости несущих элементов, связанной с внезапным изменением структуры таких систем. В статье [14] предложена феноменологическая модель расчета железобетонных конструкций с проявленной коррозией арматуры. Экспериментальные работы по изучению работы неразрезных балок при аварийном отключении элементов проводились в работе [15]. Тестовые испытания конструктивных элементов зданий на живучесть проводились в работе [16].

Основополагающие понятия надежности и безопасности строительных конструкций изложены в монографии А.В. Перемутьера [17]. Живучесть охарактеризована как свойство системы сохранять несущую способность при выходе каких-либо ее элементов из строя. Этим же автором сформулированы тезисы относительно прогрессирующего обрушения [18; 19]:

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.

Еремеев П.Г. в статье [20] дал анализ требований зарубежных норм по недопущению лавинообразного (прогрессирующего) разрушения. Причиной такого события может стать любая аварийная ситуация: промышленные и террористические взрывы, воздействия движущихся транспортных средств, отказы фундаментов и оснований, отказы в результате ошибок проектирования, строительства или эксплуатации. Такие аварийные ситуации не учитываются при проектировании сооружений. В то же время, воздействия, на которые рассчитываются сооружения: землетрясения, сильные ветры, пожары, также не должны приводить к лавинообразному обрушению.

Из анализа [20] следует, что в Стандарте США установлено требование о том, что сооружение должно выдерживать локальное повреждение конструкции, не теряя несущей способности в целом. При этом сформулированы три требования сопротивления лавинообразному обрушению: (1) за счет обеспечения прочности и жесткости «ключевых» элементов; (2) организация дополнительных путей восприятия нагрузки; (3) «ключевые» элементы должны противостоять заданным аварийным воздействиям. Позднее были рекомендованы методы количественной оценки способности здания сохранить структурную целостность после потери несущего элемента.

Европейские нормы рекомендуют: (1) организацию мер устранения или уменьшения вероятности наступления аварийных ситуаций; (2) увеличение степени статической неопределенности, увеличение вклада пространственной работы сооружения; (3) проектирование «ключевых» элементов, способных к восприятию заданных аварийных воздействий.

Канадские нормы требуют проектировать сооружения с достаточной несущей способностью для противостояния возможным воздействиям в течение срока службы.

Анализ существующих подходов позволил выделить наиболее важные из них:

1. Обеспечение прочности и жесткости ключевых элементов, способных воспринимать не только расчетные нагрузки, но и дополнительные аварийные воздействия за счет их усиления, которые необходимо нормировать.
2. Увеличение несущей способности конструкции за увеличения степени статической неопределимости и увеличения вклада пространственной работы.
3. Использование превентивных или организационных мер с целью исключения аварийной ситуации.

Отмечается, что в уникальных большепролетных сооружениях конструктивно защитить ключевые элементы (пилон, ванты) от лавинообразного обрушения не представляется возможным. Поэтому при проектировании следует учитывать вероятность аварийных ситуаций. Аварийные ситуации подразделяются на проектные и запроектные. Проектные оговариваются нормативными документами, запроектные должны быть заданы в «Специальных технических условиях на проектирование».

Защита уникальных большепролетных сооружений должна обеспечиваться созданием запасов несущей способности ключевых элементов, разработкой мер исключения аварийных ситуаций, проектированием элементов, способных воспринимать аварийные воздействия, создания конструктивного решения, которое при наличии локальных повреждений исключает лавинообразное разрушение, использование специальных технических решений огнестойкости, сейсмостойкости.

Ведущие ученые в области безопасности строительных конструкций опубликовали статью [21], в которой обозначили 10 наиболее важных научных направлений исследований по обеспечению комплексной безопасности и предотвращению аварий зданий и сооружений. Укрупненно это: изучение и систематизация аварий, их причин и особенностей проявления в увязке с развитием повреждений; развитие нормативной базы по обеспечению безопасности сооружений на всех стадиях жизненного цикла; исследование напряженно-деформированного состояния в критических элементах и узлах, способных вызвать прогрессирующее обрушение при возможных непроектных ситуациях их работы; создание физико-математических моделей процессов прогрессирующего обрушения зданий и сооружений; развитие технологий и методик, направленных на своевременное диагностирование опасных ситуаций; создание методов оценки безопасности с учетом показателей

рисков; разработка новых конструктивных решений и материалов, отличающихся повышенной безопасностью.

Анализ аварий показывает, что наиболее часто к прогрессирующему обрушению приводит потеря устойчивости критического элемента или сооружения в целом.

В публикации [22] рассмотрены энергетические критерии анализа роли отдельных сжатых элементов или их групп при потере устойчивости равновесия стержневых конструкций для выявления наиболее опасных элементов системы. В работе о резервах несущей способности сжатых элементов металлических мостов [23] по сути рассмотрены вопросы «живучести» пролетных строений мостов со сквозными фермами железнодорожных мостов. Резервы несущей способности заложены в вероятностном разбросе прочностных характеристик составных элементов, в реальных условиях защемления стержней в узлах, в реальной гибкости сжатых стержней при правильной оценке критических напряжений. Экспериментальное исследование несущей способности металлических ферм гражданского назначения с выключением отдельных элементов проведено в работе [24]. Васильев А.И. [25] отмечает, что решетки ферм железнодорожных мостов с ездой понизу часто страдают от ударов негабаритных транспортных средств. Повреждения и выход из строя раскосов ферм может привести к разрушению конструкции, как, например, в 70-х годах прошлого столетия на мосту через реку Волгу на обходе Твери, в 90-х годах — на мосту через реку Колу в Мурманске [25]. Автор, как гарантию от прогрессирующего разрушения, рассматривает целесообразность установки в каждой панели фермы скрещающихся раскосов.

В связи с большим объёмом строительства в XXI веке вантовых мостов много работ посвящено вопросам их надежности и живучести [26–28]. В работах [26; 27] дается оценка живучести моста с обрывом ванты, в [26] разработан новый алгоритм нелинейного динамического расчета для исследования живучести вантового моста при внезапном обрыве вант, выявлен динамический эффект этого воздействия, предложен динамический коэффициент для смежных вант по отношению к оборванным вантам. В статье [28] исследуются влияние на живучесть вантового моста геометрических параметров.

Несмотря на то, что термин «живучести» строительных объектов появился более 100 лет назад, научные исследования по изучению живучести сооружений получили широкое распространение только в XXI веке. Акцент этих исследований был сделан на живучесть железобетонных промышленных и гражданских сооружений, имеющих большую статистику аварий. В транспортной отрасли аварии вначале

носили единичный характер, но со временем их количество увеличивается [1]. Труднопредсказуемые «сверхпроектные» сочетания нагрузок и воздействий, а также, сложно управляемый «человеческий фактор» водителей транспортных средств являются причинами увеличения числа аварий мостов.

Обзор работ по оценке живучести позволил сделать следующие выводы:

1. Теория «живучести» в настоящее время находится в стадии становления. Под живучестью следует понимать способность технической системы, получившей локальные повреждения, сопротивляться катастрофическому разрушению и выполнять свои функции в течение определенного времени. Существуют вероятностный и детерминированный (силовой и энергетический) подходы к оценке живучести технических систем.

2. Источниками живучести системы являются: запас свойств конструктивно-материальной системы, не допускающий наступления какого-либо предельного состояния, структурная конструктивная избыточность для пространственного распределения усилий от нагрузок, корректировка условий приложения нагрузок. Системно рекомендуется разделять живучесть материалов, живучесть конструкций и живучесть системы в целом. Первые два подхода могут быть оценены системой индексов, характеризующих работу материалов и конструкций до и после появления повреждений. Живучесть системы в целом оценивается вариантами сценариев обрушения.

3. В области строительных конструкций наибольшее развитие получили вероятностные и детерминированные методы исследования живучести зданий промышленного и гражданского назначений, как в железобетонном, так и металлическом исполнении. В области транспортного строительства вопросы живучести мостов исследовались с давних времен по проблеме изучения резервов металлических ферм железнодорожных мостов, на современном этапе много работ посвящено оценке живучести наиболее популярных в XXI веке вантовых мостов.

4. Для совершенствования существующих рекомендаций нормативно-технических документов в области повышения живучести мостовых сооружений необходимо развитие комплексного подхода, включающего:

- статистический анализ аварий на транспортных сооружениях с оценкой рисков возможных сценариев разрушений и разработкой мероприятий к их понижению;

- исследование статической и динамической пространственной работы конструктивных систем с учетом наиболее повторяемых при авариях повреждений, с разработкой технических решений выгодного перераспределения усилий, повышающего живучесть мостов;
- разработку организационно-технологических мероприятий, обеспечивающих возможность функционирования сооружений с полученными повреждениями на период времени их устранения.

Методы исследования

Research methods

Методы исследования выстроены в соответствие с вышеприведенными выводами обзора публикаций по теме исследования. Анализ аварий железнодорожных мостов [1] показал, что 20 % составляют аварии по причине природных воздействий (паводки, ледоход, штормовые ветра), 30 % связано с проектными и строительными решениями, 50 % — связано с воздействием транспортной техники (навал судов, удары негабаритным грузом, сход поезда). При этом много случаев механических повреждений элементов ферм, чаще всего, это один-два элемента.

Численное исследование механической работы пролетного строения со сквозными главными фермами с ездой понизу однопутного железнодорожного балочного моста при частичном и полном исключении из работы отдельных элементов одной фермы (расчетная длина 66 м) показало характер пространственного перераспределения напряженно — деформированного состояния в элементах решетки параллельной фермы и продольных связей [1].

Очевидно, следует разделить вопросы обеспечения живучести во вновь проектируемых пролетных строениях и в эксплуатируемых на мостах действующих железных дорог.

Во вновь проектируемых пролетных строениях железнодорожных мостов с учетом обращающихся нагрузок следует методом численного моделирования исследовать возможность применения технических решений, создающих резервный конструктивный запас, учитывающий исключение из работы одного из элементов фермы.

В случае появления повреждения, исключаяющего полностью или частично один-два элемента фермы следует разработать организационно-технические мероприятия, обеспечивающие безопасный пропуск поездов.

Результаты исследования

Research results

Численное исследование работы типового пролетного строения со сквозными главными фермами длиной 66 м с ездой понизу железнодорожного моста [1] позволило выявить элементы, повреждение которых приводит к наиболее опасному перераспределению напряжений. К ним относятся элементы верхних поясов, нижних поясов средних панелей, раскосы первых двух панелей. При этом в соответствии с размерами, принятыми в типовом проекте, выключение элементов из работы, связанное с его повреждением по-разному отражается на работе других элементов ферм. Так повреждения элементов верхних поясов одной фермы в большей степени увеличивает напряжения в элементах верхних продольных связей, повреждения нижних поясов одной фермы, соответственно, увеличивает напряжения в элементах нижних связей, повреждения раскоса в одной ферме приводит к увеличению напряжений в раскосах и примыкающих поясах параллельной фермы. Элементы, которые в большей степени реагируют на повреждения, были названы **ключевыми**.

Задачей исследования в целях повышения живучести пролетного строения была оценка степени перераспределения напряжений в результате увеличения геометрических характеристик выявленных ключевых элементов.

Размеры конструкций приняты в соответствии с данными типового проекта № 3.501.2-139 пролетного строения расчетной длиной 66 м. Расчеты выполнялись на действие постоянных нагрузок и фактически обращающегося подвижного состава С-8.

Увеличение ресурсов несущей способности принималось за счет увеличения толщины стенок коробчатых элементов следующих элементов:

- на 20 % всех верхних продольных связей конструкции;
- на 33 % нижних продольных связей конструкции начиная с панели № 3 и заканчивая панелью № 6;
- на 20 % раскосов, расположенных в панелях фермы № 2 и № 7;
- на 60 % диагональных связей (портальных) панелей № 1 и № 8.

Выбор количественных характеристик принят в связи с особенностями геометрических размеров по данному типовому проекту и оценкой эффективности работы фермы. Так, например, в нижнем поясе в двух крайних панелях сечение нижних продольных связей было больше, чем в средних панелях, принятие всех связей одинакового сечения привело к увеличению несущей способности связей средних панелей на 33 %.

На рисунке 1 отражена схема ключевых элементов с увеличенными геометрическими параметрами.

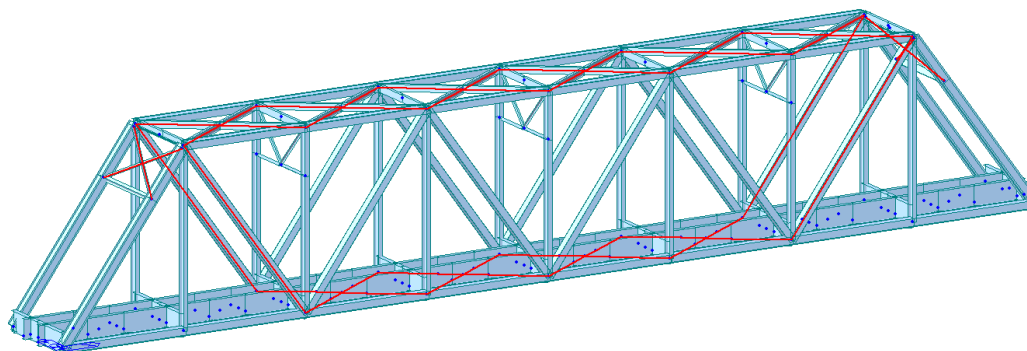


Рисунок 1. Схема ключевых элементов с увеличением ресурсов несущей способности (скриншот модели, выполнен авторами)

Figure 1. Key elements diagram with increase of bearing capacity resources (screenshot of the model, made by the authors)

В таблицах 1–4 дана оценка влияния повреждений элемента в одной ферме до и после увеличения несущей способности элементов по основному сечению.

Принятые сокращения в таблицах 1–4: В.п.1, В.п.2 — элемент верхнего пояса 1 и 2 ферм; Н.п.1, Н.п.2 — элемент нижнего пояса 1 и 2 ферм; Р1, Р2 — раскосы второй панели 1 и 2 ферм; Св1, Св2 — элементы верхних продольных связей с максимальными напряжениями 1 и 2 ферм; Сн1, Сн2 — элементы нижних продольных связей с максимальными напряжениями 1 и 2 ферм; Сп1, Сп2 — элементы порталных связей с максимальными напряжениями 1 и 2 ферм.²

В первом столбце параметром Е указана степень снижения продольной жесткости элемента, моделирующая степень его повреждения, 100 % — неповрежденный элемент, 0,1 % — практически исключенный элемент.

² Tables 1–4 provide an assessment of the effect of member damage in one truss before and after increasing the load carrying capacity of the elements along the main cross-section.

Abbreviations used in tables 1–4: В.п.1, В.п.2 — top chord member of the trusses 1 and 2; Н.п.1, Н.п.2 — lower chord member of the trusses 1 and 2; Р1, Р2 — second panel face bracing of the trusses 1 and 2; Св1, Св2 — top lateral bracing members with maximum stresses of the trusses 1 and 2; Сн1, Сн2 — lower lateral bracing members with maximum stresses of the trusses 1 and 2; Сп1, Сп2 — portal brace members with maximum stresses of the trusses 1 and 2.

На рисунках 2–5 приведены зависимости абсолютные изменения напряжений и перемещений при повреждении различных элементов до и после усиления ключевых элементов.

За предельные напряжения при деформации растяжения принято расчетное сопротивление стали 15ХСНД с учетом коэффициента условий работы в 265 МПа, при деформации сжатия дополнительно учтен коэффициент продольного изгиба, соответствующий данному элементу. За предельный прогиб принята величина в 110 мм, составляющая 1/600 от расчетного пролета. В таблицах 1–4 отмечены ячейки с параметрами, превышающими эти предельные значения.

Таблица 1 / Table 1

**Напряжения в элементах при повреждении верхнего пояса В.п.1
до и после увеличения несущей способности ключевых элементов в МПа**

**Stresses in members at top chord damage В.п.1
before and after increase of key elements bearing capacity in МПа**

Е	До увеличения площади поперечного сечения элементов <i>Before increasing the cross-sectional area of the members</i>					После увеличения площади поперечного сечения элементов <i>After increasing the cross-sectional area of the members</i>				
	В.п.1, МПа	В.п.2, МПа	Св1, МПа	Св2, МПа	Прогиб, мм	В.п.1", МПа	В.п.2", МПа	Св1", МПа	Св2", МПа	Прогиб", мм
100 %	-159,3	-159,4	-84,2	-84,2	98	-157,5	-157,5	-79,8	-79,9	95
20 %	-113,2	-153,0	-206,0	-201,2	111	-108,9	-148,2	-192,0	-188,3	107
10 %	-83,2	-148,7	-285,4	-277,8	121	-78,6	-142,4	-261,9	-256,1	117
1 %	-14,4	-138,9	-466,9	-453,0	147	-13,1	-129,6	-413,3	-403,0	139
0,10 %	-1,6	-137,0	-500,8	-485,7	152	-1,4	-127,3	-440,3	-429,3	143

Составлена авторами / Compiled by the authors

Таблица 2 / Table 2

**Напряжения в элементах при повреждении нижнего пояса Н.п.1
до и после увеличения несущей способности ключевых элементов в МПа**

**Stresses in members at lower chord damage Н.п.1
before and after increase of key elements bearing capacity in МПа**

Е	До увеличения площади поперечного сечения элементов <i>Before increasing the cross-sectional area of the members</i>					После увеличения площади поперечного сечения элементов <i>After increasing the cross-sectional area of the members</i>				
	Н.п.1, МПа	Н.п.2, МПа	Сн1, МПа	Сн2, МПа	Прогиб, мм	Н.п.1", МПа	Н.п.2", МПа	Сн1", МПа	Сн2", МПа	Прогиб", мм
100 %	128,2	128,3	124,8	124,9	98	125,3	125,3	116,7	116,8	95
20 %	75,6	116,6	198,5	192,6	104	75,6	111,3	181,8	177,6	100
10 %	50,0	110,9	233,8	225,9	106	46,6	104,7	211,7	206,1	102
1 %	7,0	101,3	292,9	282,0	110	6,4	94,2	259,9	252,3	106
0,10 %	0,7	99,9	301,5	290,2	111	0,7	92,7	266,7	258,9	106

Составлена авторами / Compiled by the authors

Таблица 3 / Table 3

**Напряжения в элементах при повреждении раскоса P1 панели
№ 2 до и после увеличения несущей способности ключевых элементов в МПа**

**Stresses in members at face bracing damage P1 of panel
No. 2 before and after increase of key elements bearing capacity in MPa**

E	До увеличения площади поперечного сечения элементов <i>Before increasing the cross-sectional area of the members</i>					После увеличения площади поперечного сечения элементов <i>After increasing the cross-sectional area of the members</i>				
	P1, МПа	P2, МПа	Св1, низ, МПа	Св2, низ, МПа	Прогиб, мм	P1", МПа	P2", МПа	Св1", низ, МПа	Св2", низ, МПа	Прогиб", мм
100 %	153,6	153,6	124,8	124,9	98	129,8	129,9	116,7	116,8	95
20 %	124,2	178,6	112,4	148,3	110	108,2	150,2	109,7	136,9	106
10 %	96,3	190,5	103,6	165,2	123	85,8	160,1	103,2	150,8	116
1 %	19,4	223,1	79,6	211,3	164	18,5	189,8	83,9	192,6	158
0,10 %	2,6	230,2	74,4	221,4	174	2,5	196,9	79,3	202,6	169

Составлена авторами / Compiled by the authors

Таблица 4 / Table 4

**Напряжения в элементах при повреждении portalного раскоса
P.п.1 до и после увеличения несущей способности ключевых элементов, МПа**

**Stresses in members at portal brace damage P.п.1 before
and after increase of key elements bearing capacity in MPa**

E	До увеличения площади поперечного сечения элементов <i>Before increasing the cross-sectional area of the members</i>					После увеличения площади поперечного сечения элементов <i>After increasing the cross-sectional area of the members</i>				
	Р.п.1, МПа	Р.п.2, МПа	Сп1, низ, МПа	Сп2, низ, МПа	Прогиб, мм	P1", МПа	P2", МПа	Сп1", низ, МПа	Сп2", низ, МПа	Прогиб", мм
100 %	-113,6	-113,7	-12,1	-13,4	98	-113,8	-113,7	-10,1	-10,6	95
20 %	-97,4	-126,4	-24,6	-76,7	109	-97,8	-127,4	-24,9	-60,8	106
10 %	-83,0	-137,8	-36,7	-129,2	122	-82,0	-139,2	-38,4	-101,2	118
1 %	-23,5	-184,6	-65,3	-319,2	187	-22,9	-186,3	-62,4	-231,1	179
0,10 %	-3,3	-200,5	-15,5	-338,2	215	-3,3	-202,1	-13,4	-228,3	203

Составлена авторами / Compiled by the authors

Анализ численного исследования перераспределения напряжений при повреждении элементов одной ферма при повышении несущей способности ключевых элементов показал следующее:

1. Наибольший эффект повышения живучести пролетного строения по напряжениям дало повышение несущей способности нижних продольных связей средних панелей и раскосов, при этом напряжения в элементах ферм не превышают предельных значений даже при полном выключении контролируемых элементов.
2. Наибольшую опасность для таких ферм представляют повреждения элементов верхнего пояса, конструктивные решения по увеличению несущей способности ключевых элементов —

верхних продольных связей, изменению решетки связей незначительно повысили живучесть ферм, которая сохраняется при остаточной жесткости 10 %.

3. Проверка прогибов показала, что величина предельных контролируемых прогибов достигается при остаточной жесткости поврежденных элементов 15 %, следует учитывать, что невыполнение проверок 2 группы предельных состояний не является таким критичным, как контроль несущей способности.

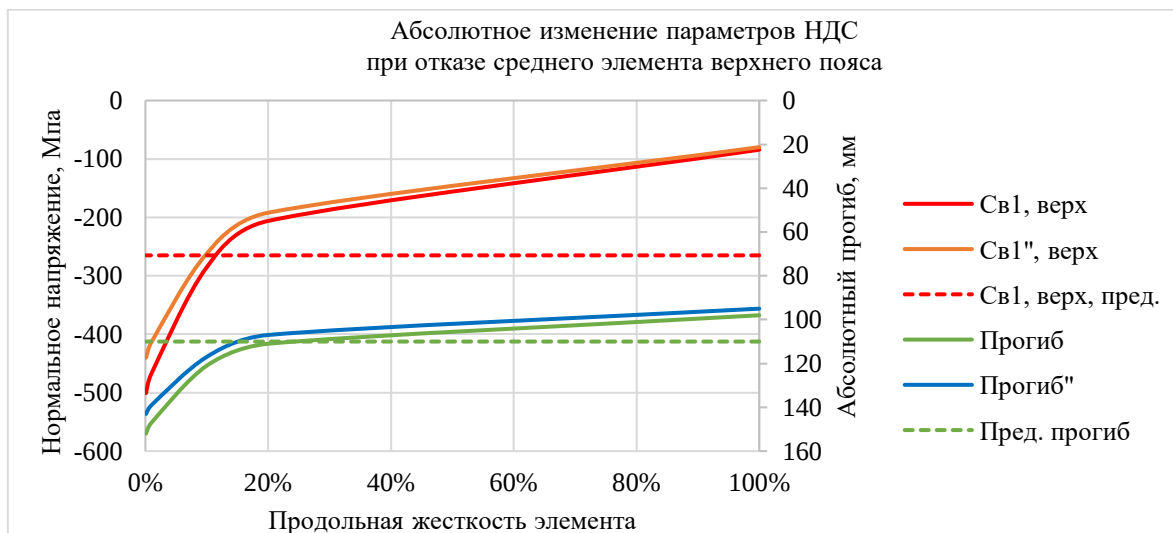


Рисунок 2. Абсолютные изменения напряжений и перемещений при повреждении элемента верхнего пояса в средней панели одной фермы (рисунок авторов)

Figure 2. Absolute stresses and displacements variation at the top chord member damage in the middle panel of one truss (figure by the authors)

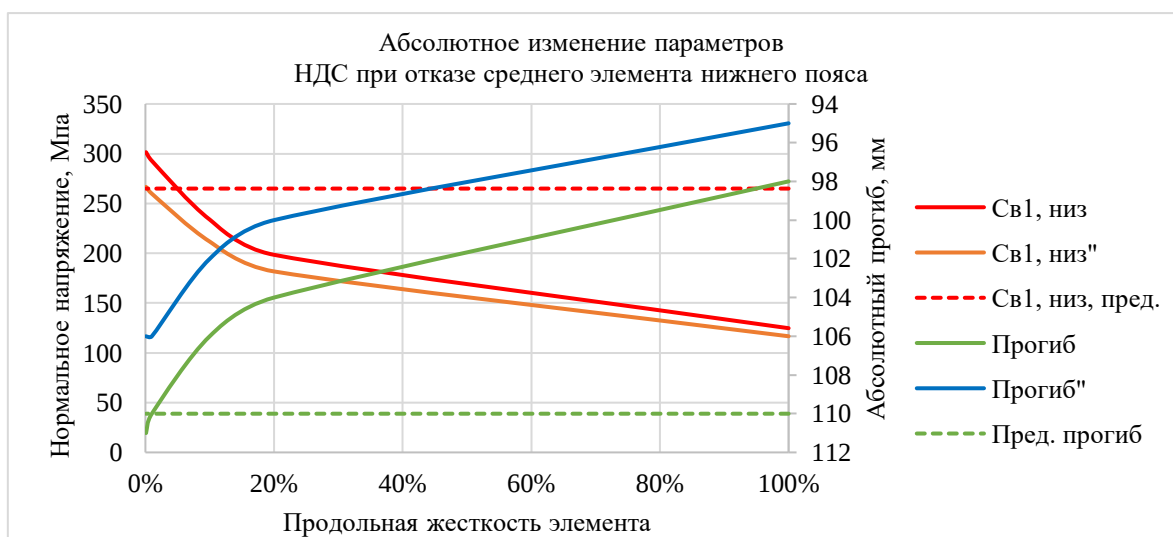


Рисунок 3. Абсолютные изменения напряжений и перемещений при повреждении элемента нижнего пояса в средней панели одной фермы (рисунок авторов)

Figure 3. Absolute stresses and displacements variation at the lower chord member damage in the middle panel of one truss (figure by the authors)

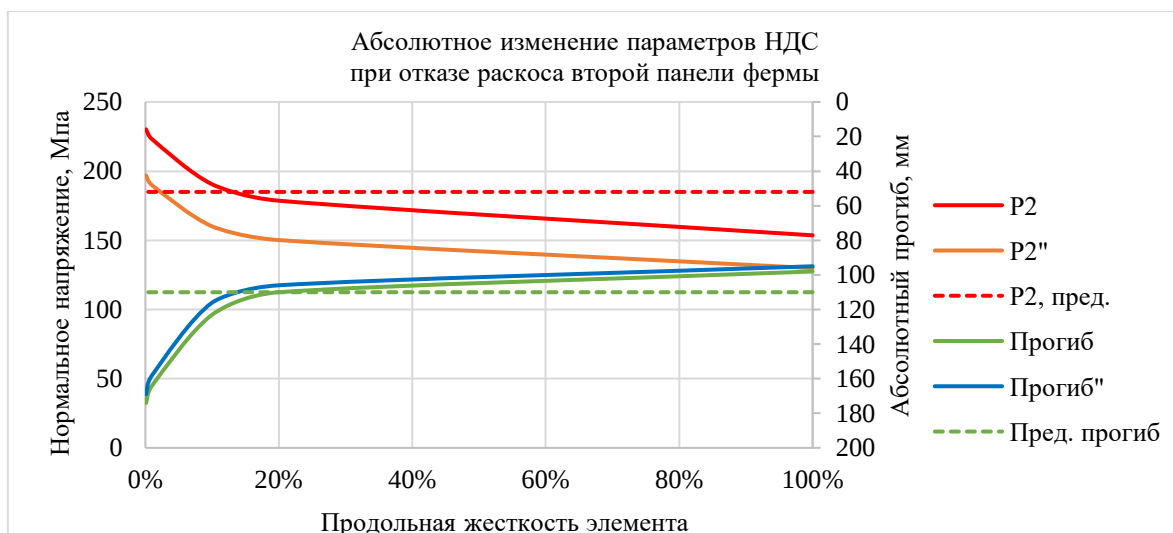


Рисунок 4. Абсолютные изменения напряжений и перемещений при повреждении элемента раскоса второй панели одной фермы (рисунок авторов)

Figure 4. Absolute stresses and displacements variation at the face bracing member damage of the second panel of one truss (figure by the authors).

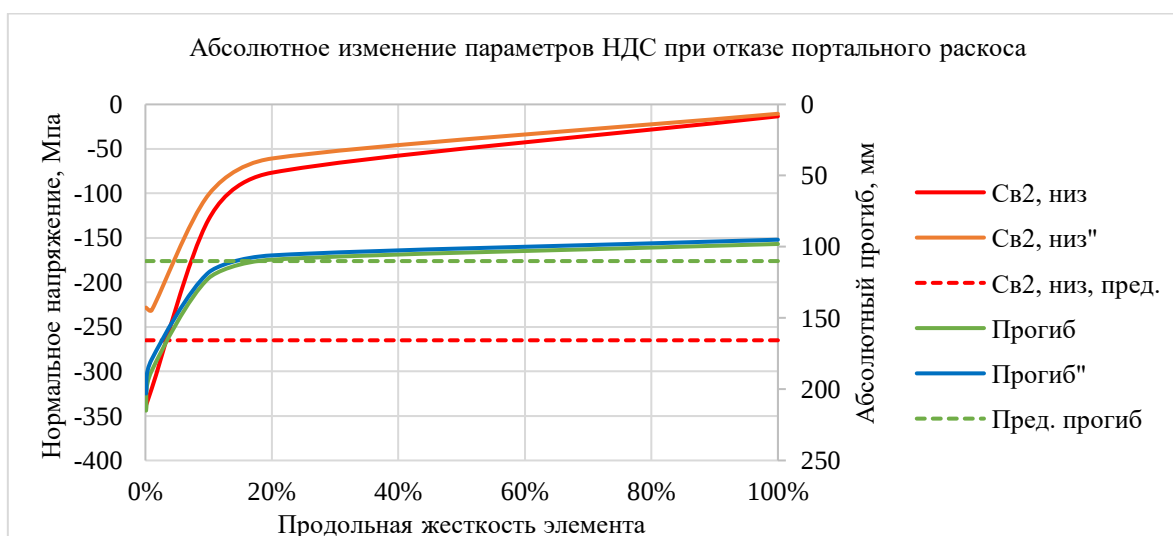


Рисунок 5. Абсолютные изменения напряжений и перемещений при повреждении элемента portalного раскоса одной фермы (рисунок авторов)

Figure 5. Absolute stresses and displacements variation at portal brace member damage of one truss (figure by the authors)

Учитывая, что элементы ферм, повреждаемые за счет ударов транспортных средств, имеют остаточный запас жесткости больше, чем на 10–15 %, можно допустить, что предлагаемое увеличение несущей способности ключевых элементов будет достаточным.

Рекомендуется выполнять расчеты на живучесть на стадии проектирования новых конструкций пролетных строений.

На стадии эксплуатации существующих железнодорожных мостов при механическом повреждении элементов ферм следует выполнить организационно-технические мероприятия, включающие:

1. При возможности повысить степень статической неопределимости, поставив дополнительную временную опору под пролетным строением в районе пострадавшего узла фермы.
2. Провести оперативное обследование поврежденного пролетного строения с установлением возможности и безопасности проведения испытания с целью оценки характера перераспределения усилий в связях и элементах обеих ферм и возможности условий пропуска подвижного состава.
3. При возможности пропуска подвижного состава установить с проведением расчетов возможную скорость пропуска подвижного состава, при необходимости со снижением класса пропускаемого состава, предварительно назначив снижение скорости 25 км/час.
4. Установить систему мониторинга контроля напряжений в элементах двух ферм в пределах панели с поврежденными элементами и систему контроля прогибов, в случае появления опасной динамики развития напряженно-деформированного состояния конструкций остановить движение поездов.
5. Разработать проект восстановления поврежденного элемента и реализовать в максимально возможные оперативные сроки.

Выводы

Conclusions

1. Обзор работ по оценке живучести позволил выявить направления повышения живучести мостов. Представляется более актуальным и приемлемым детерминированный подход к оценке живучести мостовых сооружений. Потенциальный запас живучести мостов может быть заложен в конструктивной избыточности ключевых элементов, конструктивных решениях перераспределения усилий при аварийных ситуациях. Для разных видов мостов оптимальные решения повышения их живучести должны создаваться с учетом особенностей механической работы конструктивных систем в условиях сценариев возможных разрушений.

2. Ключевыми элементами пролетных строений со сквозными главными фермами железнодорожных мостов при возможных повреждениях элементов ферм в виде ударных воздействий являются элементы решетки ферм и решетки связей. Методами численного анализа показан эффект повышения живучести пролетного строения с ездой

понижу расчетной длиной 66 м с поврежденными элементами нижнего пояса и раскосов за счет повышения несущей способности нижних продольных связей и раскосов соответственно. Это один из путей повышения живучести проектируемых пролетных строений со сквозными главными фермами, другие пути требуют проведения дальнейших исследований.

3. Для эксплуатируемых железнодорожных мостов в случае проявления случайных повреждений в результате ударов грузов рекомендованы оперативные и плановые мероприятия по обеспечению их живучести в режиме пропуска поездов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Быкова, Н.М.** Оценка работы пролетного строения железнодорожного моста с повреждением элемента фермы / Н.М. Быкова, Т.М. Баранов, А.А. Забияка. — DOI https://doi.org/10.15862/12SAT_S423 // Транспортные сооружения. — 2023. — Т 10. — № 4. — С. 12SATS423. — URL: <https://t-s.today/12SATS423.html>. (дата обращения: 16.01.2024).
2. **Макаров, С.О.** Разбор элементов, составляющих боевую силу судов / Контр.-адм. С. Макаров. — Санкт-Петербург: тип. Мор. м-ва., 1894. — 106 с. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01003668064> (дата обращения: 16.01.2024).
3. **Волик, Б.Г.** Эффективность, надежность и живучесть управляющих систем / Б.Г. Волик, И.А. Рябинин // Автомат. и телемех. — 1984. — № 12. — С. 151–160. — URL: https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jmid=at&paperid=4913&option_lang=rus. (дата обращения: 16.01.2024).
4. **Черкесов Г.Н.** Методы и модели оценки живучести сложных систем / Г.Н. Черкесов. — Москва: Знание, 1987. — 116 с. — URL: https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_rc_548949/ (дата обращения: 16.01.2024).
5. **Анисимов, И.И.** Подход к оцениванию живучести сложных организационно — технических систем различного назначения / И.И. Анисимов, А.А. Толмачев, С.В. Чащин // Научные технологии в космических исследованиях Земли. — 2013. — Т 5. — № 4. — С. 24–28. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22897412>. — EDN THBRCX. (дата обращения: 16.01.2024).
6. **Махутов, Н.А.** Оценка живучести сложных технических систем / Н.А. Махутов, В.П. Петров, Д.О. Резников // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. — 2009. — № 3. — С. 47–66. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=14451997>. — EDN MEGOYJ. (дата обращения: 16.01.2024).
7. **Махутов, Н.А.** Многоуровневая оценка живучести сложных технических систем с учетом масштабно-структурной иерархии процессов накопления повреждений и разрушения / Н.А. Махутов, Д.О. Резников. — DOI <https://doi.org/10.12737/23757> // Безопасность в техносфере. — 2016. — Т 5. — № 4. — С. 3–17. — URL: <https://naukaru.ru/ru/nauka/article/14797/view>. — EDN YGHMDH. (дата обращения: 16.01.2024).
8. **Карпенко, Н.И.** О концептуально-методологических подходах к обеспечению конструктивной безопасности / Н.И. Карпенко, В.И. Колчунов // Строительная механика и расчет сооружений. — 2007. — № 1. — С. 4–8. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25874278>. — EDN VUFJPJ. (дата обращения: 16.01.2024).
9. **Тамразян, А.Г.** Анализ риска обрушения зданий и сооружений от критических дефектов и различных техногенных воздействий / А.Г. Тамразян. — Москва: МГСУ, 2004. — 106 с.
10. **Еремин, К.И.** Предотвращение разрушений строительных металлических конструкций / К.И. Еремин. — Магнитогорск: МГТУ имени Г.И. Носова, 2004. — 235 с. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01002507729> (дата обращения: 16.01.2024).

11. **Ларионов, Е.А.** Влияние режима нагружения на силовое деформирование бетона / Е.А. Ларионов, В. М. Бондаренко // Бетон и железобетон. — 2004. — № 6. — С. 27–30.
12. **Клюева, Н.В.** К построению критериев живучести коррозионно повреждаемых железобетонных конструктивных систем / Н.В. Клюева, Н.Б. Андросова // Строительная механика и расчет сооружений. — 2009. — № 1. — С. 29–34. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11779564>. — EDN JXUBXN. (дата обращения: 16.01.2024).
13. **Колчунов, В.И.** К оценке живучести железобетонных рам при потере устойчивости отдельных элементов / В.И. Колчунов, Н.О. Прасолов, М.В. Моргунов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. — 2007. — № 4. — С. 40–44. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11532264>. — EDN JSJQD. (дата обращения: 16.01.2024).
14. **Попеско, А.И.** Феноменологическая модель расчета строительных конструкций при коррозионных воздействиях / А.И. Попеско, О.И. Анцыгин // Строительная механика и расчет сооружений. — 2006. — С. 94–98.
15. **Гениев, Г.А.** Экспериментально-теоретические исследования неразрезных балок при аварийном выключении из работы отдельных элементов / Г.А. Гениев, Н.В. Клюева // Известия высших учебных заведений. Строительство. — 2000. — № 10. — С. 21–26. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25822932>. — EDN VTCEAX. (дата обращения: 28.01.2024).
16. **Adam, J.M.** Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century / J.M. Adam, F. Parisi, J. Sagaseta, X. Lu. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.06.082> // Engineering Structures. — 2018. — № 173. — С. 122–149. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029618306849>. (дата обращения: 28.01.2024).
17. **Перельмутер, А.В.** Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций / А.В. Перельмутер. — 2. изд., перераб. и доп. — Киев: Изд-во УкрНИИПроектстальконструкция, 2007. — 215 с. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01000365455> (дата обращения: 28.01.2024).
18. **Перельмутер, А.В.** Прогрессирующее обрушение и методология проектирования конструкций / А.В. Перельмутер // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. — 2004. — № 6. — С. 42–45.
19. **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: 28.01.2024).
20. **Еремеев, П.Г.** Предотвращение лавинообразного (прогрессирующего) обрушения несущих конструкций уникальных большепролетных сооружений при аварийных воздействиях / П.Г. Еремеев // Строительная механика и расчет сооружений. — 2006. — № 2. — С. 65–72. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27313629>. — EDN WZSHTX. (дата обращения: 28.01.2024).
21. **Пономарев, В.Н.** О необходимости системного подхода к научным исследованиям в области комплексной безопасности и предотвращения аварий зданий и сооружений / В.Н. Пономарев, В.И. Травуш, В.М. Бондаренко, К.И. Еремин // Предотвращение аварий зданий и сооружений. — 2013. — URL: https://pamag.ru/prensa/necessiy_sys-appro. (дата обращения: 28.01.2024).
22. **Александров, А.В.** Критерии выявления наиболее опасных элементов и их использование в задачах устойчивости конструкций / А.В. Александров, А.В. Матвеев // Труды Четвертой научно-практической конференции «Безопасность движения поездов» / Москва: МИИТ, 2003. с. III-1 — III-2.
23. **Осипов, В.О.** О резервах несущей способности по устойчивости сжатых элементов металлических ферм / В.О. Осипов, А.В. Мещеряков // Вестник МИИТа. — 2001. — № 6. — С. 48–54.
24. **Туснин, А.Р.** Испытания плоских ферм с повреждениями / А.Р. Туснин, М.П. Бергер. — DOI <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2019.10.12-19> // Промышленное и гражданское строительство. — 2019. — № 10. — С. 12–18. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41328993>. — EDN KTTQEN. (дата обращения: 28.01.2024).
25. **Васильев А.И.** Основы теории надежности мостов / А.И. Васильев. — Москва: МИИТ, 2021. — 96 с.

26. **Масленников, А.М.** Некоторые аспекты динамики вантового моста / А.М. Масленников, Б.О. Рагех // Вестник гражданских инженеров. — 2014. — № 1. — С. 37–43. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21510007>. — EDN SCSHJP. (дата обращения: 28.01.2024).
27. **Wolff, M.** Cable loss and progressive collapse in cable-stayed bridges / M. Wolff, U. Starossek. — DOI <https://doi.org/10.1080/15732480902775615> // Bridge Structures. — 2009. — Т 5. — № 1. — С. 17–28. — URL: <https://content.iospress.com/articles/bridge-structures/brs5-1-02>. (дата обращения: 28.01.2024).
28. **Jaydeep, R.R.** Progressive Collapse Analysis of Cable Stayed Bridge considering Different Cable Geometry / R.R. Jaydeep, K.J. Dipak // International Journal of Emerging Technologies and Innovative Research. — 2017. — Т 4. — № 4. — С. 385–389. — URL: <https://jetir.org/view?paper=JETIR1704086>. (дата обращения: 28.01.2024).

Сведения об авторах:

Быкова Наталья Михайловна — доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительство железных дорог, мостов и тоннелей», ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», Иркутск, Россия, e-mail: Bikova_nm@irgups.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0676-4752>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=633145

Баранов Тимофей Михайлович — доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительство железных дорог, мостов и тоннелей», ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», Иркутск, Россия, e-mail: Baranov-87@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3981-6413>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=926740

Забияка Андрей Андреевич — аспирант кафедры «Строительство железных дорог, мостов и тоннелей», ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», Иркутск, Россия, e-mail: 89247167007@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9289-1534>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1179674

Статья получена: 04.02.2024. Принята к публикации: 04.04.2024. Опубликовано онлайн: 18.04.2024.

REFERENCES

1. Bikova N.M., Baranov T.M., Zabiya A.A. The superstructure behavior assessment of the railway bridge with truss element damage. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2023; 10(4): 12SATS423. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/12SATS423>.
2. Makarov S.O. [Analysis of the elements that make up the combat power of ships]. Saint Petersburg: Printing house of the maritime ministry; 1894. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01003668064> (accessed 16th January 2024). (In Russ.).
3. Volik B.G., Ryabinin I.A. Effectiveness, Reliability and Viability of Control Systems. *Autom. Remote Control*. 1984; (12): 151–160. Available at: https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=at&paperid=4913&option_lang=rus (accessed 16th January 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
4. Cherkosov G.N. [Methods and models for assessing the survivability of complex systems]. Moscow: Znaniye; 1987. Available at: https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_rc_548949/ (accessed 16th January 2024). (In Russ.).
5. Anisimov I., Tolmachyov A., Chashchin S. The Approach to Estimation of Survivability of The Difficult Organiza-Tional — Technical Systems of Different Function. *High Technologies in Earth Space Research. H&ES Research*. 2013; 5(4): 24–28. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22897412> (accessed 16th January 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
6. Makhutov N.A., Petrov V.P., Reznikov D.O. Assesment of Complex Technical Systems Robustness. *Safety and emergencies problems*. 2009; (3): 47–66. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=14451997> (accessed 16th January 2024). (In Russ., abstract in Eng.).

7. Makhutov N., Reznikov D. Multilevel Survivability Assessment of Complex Technical Systems with Account for Large-Scale and Structural Hierarchy of Damages and Destruction Accumulation Processes. *Safety in Technosphere*. 2016; 5(4): 3–17. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.12737/23757>.
8. Karpenko N.I., Kolchunov V.I. [On conceptual and methodological approaches to ensuring structural safety]. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2007; (1): 4–8. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25874278> (accessed 16th January 2024). (In Russ.).
9. Tamrazyan A.G. Analiz riska obrusheniya zdaniy i sooruzheniy ot kriticheskikh defektov i razlichnykh tekhnogennykh vozdeystviy [Analysis of the risk of collapse of buildings and structures from critical defects and various man-made impacts]. Moscow: Moscow State University of Civil Engineering; 2004. (In Russ.).
10. Eremin K.I. [Preventing destruction of building metal structures]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University; 2004. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01002507729> (accessed 16th January 2024). (In Russ.).
11. Larionov E.A., Bondarenko V.M. Vliyaniye rezhima nagruzheniya na silovoye deformirovaniye betona [Influence of loading mode on force deformation of concrete]. *Beton i zhelezobeton = [Concrete and reinforced concrete]*. 2004; (6): 27–30. (In Russ.).
12. Klyuyeva N.V., Androsova N.B. Towards the construction of survivability criteria for corrosion-damaged reinforced concrete structural systems. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2009; (1): 29–34. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11779564> (accessed 16th January 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
13. Kolchunov V.I., Prasolov N.O., Morgunov M.V. Valuation Appreciation of Vitality of Reinforced Concrete Frames When Some Elements Lose Stability. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2007; (4): 40–44. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11532264> (accessed 16th January 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
14. Popesko A.I., Antsygin O.I. Fenomenologicheskaya model' rascheta stroitel'nykh konstruktsiy pri korrozionnykh vozdeystviyakh [Phenomenological model for calculating building structures under corrosive influences]. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2006; 94–98 (In Russ.).
15. Geniyev G.A., Klyuyeva N.V. [Experimental and theoretical studies of continuous beams during emergency shutdown of individual elements]. *News of higher educational institutions. Construction*. 2000; (10): 21–26. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25822932> (accessed 28th January 2024). (In Russ.).
16. Adam J.M., Parisi F., Sagaseta J., Lu X. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century. *Engineering Structures*. 2018; (173): 122–149. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.06.082>.
17. Perel'muter A.V. [Selected problems of reliability and safety of building structures]. Kyiv: UkrNIIProyektstal'konstruktsiya; 2007. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01000365455> (accessed 28th January 2024). (In Russ.).
18. Perel'muter A.V. Progressiruyushcheye obrusheniye i metodologiya proyektirovaniya konstruktsiy [Progressive collapse and structural design methodology]. *Seysmostoykoye stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy = [Earthquake-resistant construction. Safety of structures]*. 2004; (6): 42–45. (In Russ.).
19. Karakhanyan 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>.
20. Eremeyev P.G. [Prevention of avalanche-like (progressive) collapse of load-bearing structures of unique long-span structures during emergency impacts]. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2006; (2): 65–72. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27313629> (accessed 28th January 2024). (In Russ.).
21. Ponomarev V.N., Travush V.I., Bondarenko V.M., Eremin K.I. [On the need for a systematic approach to scientific research in the field of integrated safety and accident prevention of buildings and structures]. *Predotvrashcheniye avariyy zdaniy i sooruzheniy = [Prevention of accidents of buildings and structures]*. 2013. Available at: https://pamag.ru/prensa/necessiy_sys-appro (accessed 28th January 2024). (In Russ.).

22. Aleksandrov A.V., Matveyev A.V. Kriterii vyyavleniya naiboleye opasnykh elementov i ikh ispol'zovaniye v zadachakh ustoychivosti konstruktsey [Criteria for identifying the most dangerous elements and their use in problems of structural stability]. In: *Trudy Chetvertoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Bezopasnost' dvizheniya poyezdov» [Proceedings of the Fourth Scientific and Practical Conference "Train Safety"]*. Moscow: Russian University of Transport (MIIT); 2003.
23. Osipov V.O., Meshcheryakov A.V. O rezervakh nesushchey sposobnosti po ustoychivosti szhatykh elementov metallicheskih ferm [On the load-bearing capacity reserves for the stability of compressed elements of metal trusses]. *Vestnik MIITA = [Bulletin of MIIT]*. 2001; (6): 48–54. (In Russ.).
24. Tusnin A.R., Berger M.P. Tests of Damaged Flat Trusses. *Industrial and Civil Engineering*. 2019; (10): 12–18. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2019.10.12-19>.
25. Vasil'yev A.I. Osnovy teorii nadezhnosti mostov [Fundamentals of bridge reliability theory]. Moscow: Russian University of Transport (MIIT); 2021. (In Russ.).
26. Maslennikov A.M., Ragekh B.O. Some Aspects of The Cable Stayed Bridge Dynamics. *Bulletin of Civil Engineers*. 2014; (1): 37–43. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21510007> (accessed 28th January 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
27. Wolff M., Starossek U. Cable loss and progressive collapse in cable-stayed bridges. *Bridge Structures*. 2009; 5(1): 17–28. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/15732480902775615>.
28. Jaydeep R.R., Dipak K.J. Progressive Collapse Analysis of Cable Stayed Bridge considering Different Cable Geometry. *International Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*. 2017; 4(4): 385–389. Available at: <https://jetir.org/view?paper=JETIR1704086> (accessed 28th January 2024). (In Russ., abstract in Eng.).

Information about the authors:

Natalya M. Bikova — Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia, e-mail: Bikova_nm@irgups.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0676-4752>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=633145

Timofey M. Baranov — Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia, e-mail: Baranov-87@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3981-6413>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=926740

Andrey A. Zabiya — Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia, e-mail: 89247167007@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9289-1534>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1179674

Submitted: 4th February 2024. Revised: 4th April 2024. Published online: 18th April 2024.