

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

2023, Том 10, № 4 / 2023, Vol. 10, Iss. 4 <https://t-s.today/issue-4-2023.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/12SATS423.pdf>

DOI: 10.15862/12SATS423 (<https://doi.org/10.15862/12SATS423>)

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

Оценка работы пролетного строения 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: Быкова Наталья Михайловна, e-mail: Bikova_nm@irgups.ru

Аннотация. Анализ аварий железнодорожных мостов показывает, что на современном этапе увеличивается число аварий и механических повреждений пролетных строений, связанных с ударами транспортных средств. Нормы проектирования мостов рекомендуют проверять мостовые сооружения на живучесть, нормы эксплуатационного контроля такие вопросы не охватывают. Для оценки работы пролетного строения однопутного железнодорожного моста с повреждением элемента фермы в рамках диссертационного исследования «Оценка эксплуатационной надежности металлических пролетных строений с повреждениями и методы их мониторинга» проведено численное исследование изменения напряженно-деформированного состояния типового пролетного строения расчетной длиной 66 м с ездой понизу при условии полного или частичного отказа различных элементов ферм по

причине механического повреждения. В результате исследования выявлен характер перераспределения напряженно-деформированного состояния пролетного строения. Установлено, что пространственное перераспределение напряженно-деформированного состояния происходит по пути повышения напряжений в элементах решетки параллельной фермы и продольных связей. По контролю допустимых напряжений и прогибов живучесть пролетного строения сохраняется в пределах 70 % исключения из работы одного из элементов одной фермы. Определены элементы, для которых механические повреждения наиболее опасны.

Ключевые слова: аварии; живучесть; фермы; железнодорожные мосты; повреждения элементов; перераспределение напряжений

Assessment of the railway bridge superstructure work with a truss member damage

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. The railway bridge accidents analysis shows that at the present stage the number of superstructure accidents and mechanical damage associated with vehicle impacts is increasing. The standards of bridge design recommend checking bridge structures for survivability, the operation inspection standards of operational control do not cover such issues. In order to assess a single-track railway bridge superstructure work with damage to a truss member within the thesis research framework «Assessment of operational reliability of metal superstructures with damage and methods of their monitoring», a numerical study of the stress-strain state changes of a typical superstructure with a design length of 66 m with a roadway below under the condition of complete or partial failure of various truss members due

to mechanical damage has been carried out. As a result of the study, the nature of the stress-strain state redistribution of the superstructure has been revealed. It is established that the spatial redistribution of the stress-strain state occurs along the way of increasing stresses in the parallel truss web members and longitudinal ties. According to the permissible strain and deflections control, the superstructure survivability is preserved within 70 % of the exclusion from work of one of the truss members. The members for which mechanical damage is the most dangerous are determined.

Keywords: accidents; survivability; railway bridges; trusses; members damage; redistribution of stresses

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

Безопасность мостов на железной дороге на всем жизненном цикле «проектирование — строительство — эксплуатация — капитальный ремонт — реконструкция» обеспечивается соблюдением требований и рекомендаций нормативно-технической и нормативно — правовой документации, основой которой является Федеральный закон «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» от 30.12.2009 № 384-ФЗ.¹

При этом в качестве критерия механической безопасности сооружений является недопущение создания предельного состояния по прочности и устойчивости, характеризующееся потерей устойчивости формы или положения, разрушения, нарушения эксплуатационной пригодности.

На стадии проектирования в зависимости от степени ответственности сооружения механическая безопасность подтверждается численными расчетами, экспериментальными испытаниями, моделированием и оценкой рисков опасных природных процессов и техногенных воздействий, которые могут возникнуть на стадии строительства и эксплуатации. При этом расчетные модели на любой стадии жизненного цикла должны учитывать все внешние факторы, определяющие напряженно-деформированное состояние конструкций, особенности статической пространственной работы элементов, характер проявления геометрической, физической и контактной нелинейности работы, реологические нелинейные свойства материалов, возможные отклонения геометрических параметров и образование трещин, особенности влияния на сооружение изменений при переходе на разные этапы жизненного цикла.

Для сооружений повышенного уровня ответственности вводится требование учета аварийной расчетной ситуации. Отмечается малая вероятность возникновения и небольшая продолжительность таких ситуаций. Но достижение предельных состояний конструкций при аварийных ситуациях (взрыв, столкновение, пожар, авария, отказ одной из несущих строительных конструкций) может быть чревато тяжелыми последствиями.

¹ Технический регламент о безопасности зданий и сооружений: Федеральный закон № 384-ФЗ: [Принят Государственной Думой 23 декабря 2009 года. Одобрен Советом Федерации 25 декабря 2009 года]. — КонсультантПлюс: <https://www.consultant.ru/> (дата обращения 09.12.23). — Режим доступа: для авториз. пользователей. — Текст: электронный.

Уровень ответственности определяется по классу сооружения в соответствии с ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований»², согласно которому надежность строительных конструкций, как способность выполнять требуемые функции в течение расчетного срока эксплуатации, проверяется для стадий строительства, эксплуатации, ремонта, реконструкции, аварийных ситуаций в исключительных условиях работы. При этом надежность для каждого случая обеспечивается методами расчетов по предельным состояниям, оптимальным конструированием, контролем исполнения конструктивных решений, материалов и технологий изготовления и монтажа конструкций, контролем технического состояния всех конструктивных элементов, нормальных условий эксплуатации, исключающих возникновение аварийных ситуаций и прогрессирующего обрушения сооружений.

Таким образом, сооружение должно быть как надежным, обеспечивающим выполнение требуемых функций в течение расчетного срока эксплуатации, так и безопасным, не представляющим угрозы людям и окружающей среде.

Это важное требование применительно к мостам детализируется известным комплексом сводов правил на стадии изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации. Но даже при самом качественном проектировании и строительном исполнении мостового сооружения, при эксплуатации его техническое состояние зависит, прежде всего, от его содержания.

Содержание мостов на железной дороге имеет целью предупреждение появления или развития неисправностей и повреждений в сооружениях. В случае, если возникают повреждения, снижающие несущую способность конструкций, для безопасности движения поездов предусматривается: организация режимных наблюдений; устранение повреждений или неисправностей; временное усиление поврежденных элементов; введение ограничений для движения поездов, а при необходимости — закрытие сооружения для пропуска грузов. В сложных случаях привлекаются мостоиспытательные станции, обследовательские, научно-исследовательские и проектные организации. До проведения специальных обследовательских работ максимальная скорость движения поездов устанавливается в соответствии с

² ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований: Межгосударственный стандарт: издание официальное: принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 14 ноября 2014 г. N 72-П): Дата введения 2015-07-01 / разработан Открытым акционерным обществом "Научно-исследовательский центр "Строительство" (ОАО "НИЦ "Строительство") — институт: Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций имени В.А. Кучеренко (ЦНИИСК имени В.А. Кучеренко). — КонсультантПлюс: <https://www.consultant.ru/> (дата обращения 09.12.23). — Режим доступа: для авториз. пользователей. — Текст: электронный.

Приложением А Инструкции³ в соответствие с перечнем повреждений, который включает наличие трещин с определенными параметрами, в металлических конструкциях — наличие 30 % коррозии и отсутствия 10 % болтов. Для мостов с пониженной грузоподъемностью предусматривается особый режим наблюдения, решаются вопросы усиления или замены конструкций.

Таким образом, концепция обеспечения безопасности и надежности мостов выстроена на организационном и техническом исполнении технологий изысканий — проектирования — строительства — эксплуатации мостов в соответствие с проработанными рекомендациями и требованиями нормативно — технической документации. При этом критерием механической безопасности рассматривается недопущение предельных состояний конструкций по прочности и устойчивости.

Новым рекомендуемым требованием в нормах проектирования мостов введено Приложение 7 СП 35.13330-2011⁴, 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 (усилия от временных нагрузок принимают с коэффициентом 0,5). 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.

Очевидно, что в развитие рекомендаций норм проектирования, строительства и эксплуатации мостов в части исключения прогрессирующего обрушения необходимы научные исследования в этом направлении. Для оценки актуальности проблемы и учитывая, что даже редкое событие аварии приводит к тяжелым последствиям, ниже приведен анализ повреждений и аварий железнодорожных мостов.

³ Инструкция по содержанию искусственных сооружений: Распоряжение ОАО «РЖД» от 03.11.2021 № 2376/р. — КонсультантПлюс: <https://www.consultant.ru/> (дата обращения 09.12.23). — Режим доступа: для авториз. пользователей. — Текст: электронный.

⁴ 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. № 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 аварий железнодорожных мостов

Overview of railway bridge accidents

Анализ аварий был выполнен в работах [1–13]. По приведенным в указанных источниках данным составлена таблица 1, включающая аварии железнодорожных мостов и их причины.

Таблица 1 / Table 1

Аварии железнодорожных мостов

Accidents of railway bridges

№	Наименование моста <i>Bridge name</i>	Место расположения <i>Location</i>	Год аварии <i>Year of accident</i>	Причина <i>Cause</i>	Источник <i>Source</i>
1	Ж.д. мост Ди <i>Dee Railway Bridge</i>	Канада, Канал Дежаржан <i>Canada, Desjardins Canal</i>	1857	Обрушение моста из-за дополнительных усилий вследствие излома передней оси локомотива <i>Bridge collapse due to additional forces caused by the front axle tilt of the locomotive</i>	[8]
2	Ж.д. мост <i>Railway bridge</i>	США, р. Соквойт, Штат Нью-Йорк <i>USA, Sauquoit River, New York</i>	1858	Обрушение моста при проходе двух поездов, ошибка проектирования <i>Bridge collapse when two trains passed, design error</i>	[9]
3	Мост Булл <i>Bull Bridge</i>	Великобритания, г. Булбридж <i>Great Britain, Bulbridge</i>	1860	Обрушение моста вследствие разрушения чугунных пролетов <i>Bridge collapse due to failure of cast iron spans</i>	[7]
4	Мост ч/р Кевду <i>Bridge over Kevda river</i>	Россия, Моршано-Сызранская ж.д. <i>Russia, Morshano-Syzran railway</i>	1875	Обрушение пролетного строения из-за потери устойчивости верхних поясов без горизонтальных связей <i>Collapse of the superstructure due to loss of stability of the upper girders without lateral brace</i>	[6]
5	Tay Rail Bridge <i>Tay Rail Bridge</i>	Англия, Dundee <i>England, Dundee</i>	1879	Обрушение 13 пролетов с чугунными фермами в результате нерасчетной ветровой нагрузки <i>Collapse of 13 spans with cast iron trusses as a result of uncalculated load due to wind pressure</i>	[6]
6	Munchenstein-Brucke <i>Munchenstein-Brucke</i>	Швейцария, р. Бирс, г. Базель <i>Switzerland, Birs river, Basel</i>	1891	Обрушение ферм из сварочного железа в результате потери устойчивости средних раскосов пониженной жесткости (рассчитаны как растянутые) <i>Collapse of welded iron trusses as a result of loss of stability of medium struts of reduced stiffness (designed as tensile)</i>	[6]
7	Ж.д. мост <i>Railway bridge</i>	США, г. Мидвил <i>USA, Meadville</i>	1902	Обрушение моста с поездом в результате удара негабаритного груза о ферму <i>Collapse of a bridge with a train as a result of an oversized load hitting a truss</i>	[8]

№	Наименование моста <i>Bridge name</i>	Место расположения <i>Location</i>	Год аварии <i>Year of accident</i>	Причина <i>Cause</i>	Источник <i>Source</i>
8	Pont de Quebec Квебекский мост Совм. Езда <i>Pont de Quebec Quebec bridge Co-operative driving</i>	Канада, р. Святого Лаврентия <i>Canada, St. Lawrence River</i>	1907 2016	Обрушение моста при строительстве – потеря устойчивости сжатых стержней ферм при недостаточности горизонтальных связей. <i>Bridge collapse during construction — loss of stability of compressed truss bars with insufficient horizontal bracing</i> Строительство — обрушение подвесной центральной фермы <i>Construction — collapse of suspended centre truss</i>	[6]
9	Романовский мост <i>Romanov Bridge</i>	р. Волга, г. Зеленодольск <i>Volga river, Zelenodolsk</i>	1912	Обрушение моста вследствие ледохода со сносом насыпных дамб, уменьшающих длину моста <i>Bridge collapse due to ice drift with demolition of embankment dams reducing the bridge length</i>	[8]
10	Ж.д. мост <i>Railway bridge</i>	Франция, р. Луара <i>France, Loire river</i>	1907	Обрушение моста с поездом вследствие отрыва проезжей части от фермы <i>Collapse of a bridge with a train due to detachment of the carriageway from the truss</i>	[7]
11	Мозырский мост <i>Mozyr bridge</i>	р. Припять <i>Pripyat River</i>	1925	Авария в виде потери устойчивости сжатых элементов при испытании реконструируемого моста после пожара <i>Accident in the form of loss of stability of compressed elements during bridge testing under reconstruction after a fire</i>	[8]
12	Саратовский мост <i>Saratov bridge</i>	р. Волга <i>Volga River</i>	1934	Обрушение в результате деформации металлических ферм при строительстве <i>Collapse due to metal trusses deformation during construction</i>	[6]
13	Ж.д. путепровод <i>Railway overpass</i>	Россия, г. Кинель, Самарская обл. <i>Russia, Kinel, Samara region</i>	1964	Повреждение стойки фермы снегоочистителем <i>Damage of the truss post by a snowplough</i>	[8]
14	Сызранский мост <i>Syzran bridge</i>	Россия, р. Волга, Самарская область <i>Russia, Volga River, Samara Region</i>	1980	Аварийная ситуация с навалом судна на опору <i>Accidental situation with a berthing impact with a support</i>	[9]
15	Ж.д. мост <i>Railway bridge</i>	Россия, р. Волга, г. Ульяновск <i>Russia, Volga River, Ulyanovsk</i>	1983	Смещение фермы, сход поезда в результате прохода теплохода в несудоходном пролете <i>Truss displacement, train derailment as a result of a motor vessel passing through a unnavigable span</i>	[9]
17	Ж.д. мост ч/р Big Bayou Canot <i>Railway bridge over the river Big Bayou Canot</i>	США, Штат Алабама <i>USA, State of Alabama</i>	1993	Обрушение фермы с поездом в результате навала буксира-толкача по реке <i>Collapse of a truss with a train as a result of a push towboat berthing impact in the river</i>	[9]

№	Наименование моста <i>Bridge name</i>	Место расположения <i>Location</i>	Год аварии <i>Year of accident</i>	Причина <i>Cause</i>	Источник <i>Source</i>
16	Ж.д. мост <i>Railway bridge</i>	Россия, р. Пышма, Свердловская область <i>Russia, Pyshma River, Sverdlovsk Region</i>	2001	Обрушение металлических балок при проходе 500-т крана во время ремонтных работ. Мосту 87 лет <i>Collapse of metal girders when a 500t crane was passing through during repair work. The bridge is 87 years old</i>	[7]
18	Kinzua Viaduck <i>Kinzua Viaduck</i>	США, р. Кинза, Штат Пельсинвания <i>Kinza River, USA, Pelsinvania</i>	2003	Обрушение во время торнадо, мосту 103 года, коррозия болтов <i>Collapse during tornado, bridge 103 years old, corrosion of bolts</i>	[7]
19	Ж.д. мост <i>Railway bridge</i>	Россия, р. Свирь, Карелия <i>Russia, Svir river, Karelia</i>	2004	Авария в результате столкновения плавучего крана с мостом <i>Accident due to collision of barge crane with bridge</i>	[9]
20	Ж.д. путепровод <i>Railway overpass</i>	Россия, Рязанская область <i>Russia, Ryazan region</i>	2006	Обрушение путепровода в результате удара негабаритного груза по опоре <i>Collapse of an overpass as a result of an oversized load hitting a support</i>	[8]
21	Ж.д. мост <i>Railway bridge</i>	Россия, г. Орша <i>Russia, Orsha</i>	2007	Частичное обрушение балок в результате столкновения негабаритного груза с пролетным строением <i>Partial girders collapse as a result of collision of an oversized load with the superstructure</i>	[8]
22	Ж.д. мост <i>Railway bridge</i>	Россия, р. Иртыш, Омская область <i>Russia, Irtysh River Omsk region</i>	2008	Обрушение фермы 110 м в результате схода вагонов грузового поезда <i>Collapse of 110 m truss as a result of goods train wagons derailment</i>	[8]
23	Совмещенный мост <i>Combined bridge</i>	Бельгия, г. Антверпен <i>Belgium, Antwerp</i>	2008	Повреждение висячего моста судном <i>Damage to a suspension bridge by a vessel</i>	[9]
24	Ж.д. мост <i>Railway bridge</i>	Казахстан <i>Kazakhstan</i>	2010	Разрушение и повреждение 8 железнодорожных мостов в результате прорыва плотины от большой воды снеготаяния и осадков <i>Destruction and damage to 8 railway bridges as a result of dam failure from high water snowmelt and precipitation</i>	[8]
25	Ж.д. мост <i>Railway bridge</i>	Россия, р. Абакан, Хакасия <i>Russia, Abakan River, Khakassia</i>	2011	Обрушение ферм моста в результате подмыва опоры <i>Collapse of bridge trusses as a result of the piers scouring</i>	[8]
26	Ж.д. путепровод <i>Railway overpass</i>	Санкт-Петербург <i>St. Petersburg</i>	2011	Авария в результате ДТП <i>Accident as a result of a road traffic accident</i>	[13]
27	Ж.д. мост <i>Railway bridge</i>	Мурманская область <i>Murmansk region</i>	2020	Обрушение моста в результате паводка <i>Bridge collapse due to flooding</i>	[13]

Составлена авторами по данным источников [1–13] / Compiled by the authors according to the sources [1–13]

В таблице не приведены данные по авариям на автодорожных и пешеходных мостах. Автомобильных дорог намного больше, чем железнодорожных магистралей, соответственно аварий на автодорожных и городских мостах на порядок больше. Аварии на пешеходных мостах чаще всего ведут к наиболее тяжелым последствиям.

Анализируя аварии на всех видах мостов России, авторы работы [13] в качестве основных причин выделяют: природные воздействия — 41 %; ошибки содержания мостов — 19 %; ошибки строительные — 12 %; превышение допустимой нагрузки — 12 %; дорожно-транспортные происшествия — 11 %; навал судов — 2 %; ошибки проектно-изыскательских работ — 1,8 %; неизвестные причины — 0,6 %.

Здесь же приводится анализ причин по разным источникам в других странах, из которого можно сделать вывод, что даже в одной стране, например, США, в разные периоды времени количественные показатели вклада разных причин аварий существенно отличаются.

В работах [10; 11] дифференцированы причины 98 аварий автодорожных мостов за период с 2006 по 2017 гг., отмечается, что 86 % случаев относятся к разрушениям эксплуатируемых мостовых сооружений, остальные — к строящимся мостам.

В работе Платонова А.С. [2] отмечается, что за 180 лет выделяется три причины аварий мостов: 60 % — вследствие катастрофических природных воздействий, 30 % — ошибки проектирования и строительства, 10 % — результат неудовлетворительной эксплуатации. Относительно массовых причин аварий металлических конструкций выделяются: местная и общая неустойчивость сооружений; хрупкое разрушение металлопроката, соединений и конструкций в целом, пожароуязвимость.

Из приведенных в таблице 1 случаев аварий железнодорожных мостов 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).

Нетрудно заметить, что, несмотря на выстроенную систему безопасности, систему нормативно-технического контроля на любой стадии жизненного цикла мостов, в мире неуклонно растет количество аварий мостов. Если в начале рассматриваемого периода аварии случались по причине несовершенных свойств материалов: чугуна, сварочного железа; недостаточной изученности влияния ветровой нагрузки, неучета особенностей работы сжатых элементов, то в 21 веке наблюдается очевидный перевес причин в сторону воздействий транспортной техники, управляемой человеком. К таким случаям относится навал судов, иногда по объективным погодным условиям. Много аварий происходит в местах

пересечения дорог на путепроводах. Не редкие случаи, связанные с дорожно-транспортными происшествиями, с ударами негабаритного груза. На железных дорогах всегда существуют риски сходов поездов, в том числе, по причине непредсказуемого дорожного вандализма.

Мосты сети железных дорог России включают более 11 тысяч металлических пролетных строений. Конструкции, запроектированные под нагрузки по старым нормам, встречаются в небольшом количестве. Основная часть металлических мостов представлена пролетными строениями, запроектированные под нагрузку С14 ($P = 35$ тс на ось и $k = 14$ тс/м) 1962 г.

По статической схеме наиболее распространены балочные (разрезные и неразрезные) со сплошностенчатыми балками и сквозными фермами, реже встречаются рамные, арочные, вантовые и висячие. По типу соединения элементов — в основном болтосварного соединения, редко — в клепаном и клепано-сварном исполнении.

Балки со сплошной стенкой и ездой поверху применяются для пролетов от 2,7 до 55,0 м. Общее количество таких конструкций составляет 65 %. Для Российской территории характерна речная сеть с широкими реками, поэтому большую долю в мостах занимают большепролетные до 158 м пролетные строения со сквозными главными фермами. Это мосты через Волгу, Обь, Енисей, Амур и другие. Примером могут служить пролетные строения мостового перехода через р. Обь на 18–19 км линии Обь-Проектная [14; 15]. Повреждения таких мостов имеют высокие риски остановки движения поездов по главному магистральному ходу «запад — восток».

Наиболее распространенными повреждениями элементов ферм являются коррозия металла при плохом содержании, расстройство болтовых соединений, потеря устойчивости сжатых элементов, механические повреждения, трещины в местах концентрации напряжений.

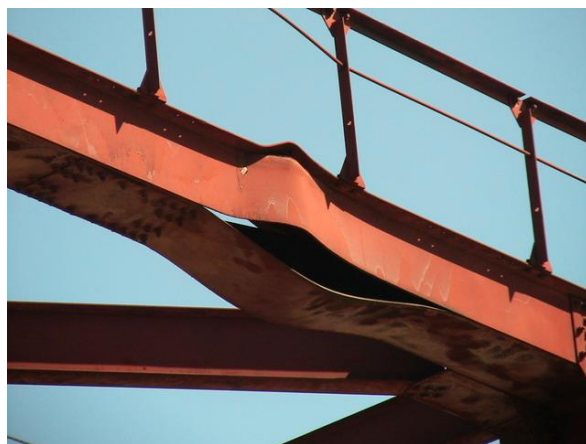


Рисунок 1. Разрыв сварных швов верхнего пояса фермы [16]

Figure 1. Weld seam rupture of the upper truss chord [16]

Примером может служить раскрытие сварных швов в элементе верхнего пояса пролетного строения со сквозными главными фермами (рис. 1) [16]. Причиной предположительно был толчок сейсмогенного характера по устою, в результате которого была заблокирована подвижная опорная часть, пролетное строение получило дополнительное усилие сжатия, усиленное динамикой удара, которое превысило несущую способность элемента по сварным швам.

Другими примерами являются нередкие повреждения ферм ударами негабаритного груза. Чаще всего страдают в этом случае подвески, стойки и раскосы. От плавучего транспорта — нижние пояса ферм.

Анализируя состояние вопроса с аварийностью мостов в увязке с существующей системой обеспечения безопасности, можно сделать следующие выводы:

1. Сеть железных и автомобильных дорог сгущается, растет количество новых мостов при том, что обширный фонд существующих мостов стареет.
2. Существующая система обеспечения безопасности мостов имеет несомненный прогресс в развитии методов проектирования, технологий строительства и регламентов содержания. Но, труднопредсказуемые «сверхпроектные» сочетания нагрузок и воздействий, а также, сложно управляемый «человеческий фактор» водителей транспортных средств создают риски аварий мостов.
3. Развитие системы безопасности мостов в условиях вероятных рисков аварий возможно по пути внедрения новых требований в нормативно-технические документы по проектированию мостов, включающих обязательное моделирование работы сооружений в потенциально аварийных условиях.

Для реализации 3 пункта необходимы предварительные научные исследования по формализации аварийных условий как расчетных факторов, исследование особенностей пространственной и нелинейной работы сооружения, создание технических решений и технологий повышения «живучести» сооружения, получившего определенные повреждения.

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 стало

увеличиваться. Труднопредсказуемые «сверхпроектные» сочетания нагрузок и воздействий, а также, сложно управляемый «человеческий фактор» водителей транспортных средств являются причинами увеличения числа аварий мостов.

Учитывая, что на железных дорогах широко распространены пролетные строения со сквозными главными фермами, которые нередко страдают от ударов негабаритных грузов, представляется актуальными исследования механической работы таких мостов при выключении отдельных элементов из работы. Имеются примеры подобных экспериментальных исследований [17].

Васильев А.И. 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.⁵

Целью научного исследования поставлена работы пролетного строения железнодорожного моста с повреждением элемента фермы.

Методы исследования: численное моделирование и натурные экспериментальные испытания

Research methods: numerical modeling and full-scale experimental tests

Для исследования механической работы однопутного железнодорожного моста со сквозными главными фермами проведено численное исследование изменения напряженно-деформированного состояния пролетного строения при условии полного или частичного отказа различных элементов ферм по причине механического повреждения. При определении грузоподъемности металлических мостов согласно требованиям руководящих документов учитываются такие повреждения, как коррозия, кривизна искривления, пробоины, вмятины и трещины. Кроме учета искривления, перечисленные повреждения учитываются в изменении геометрических характеристик сечения. Такой отказ, как исключение элемента из работы пролетного строения при определении грузоподъемности не рассматривается, хотя, как показывает анализ отказов, он нередко встречается в практике эксплуатации мостов.

⁵ Васильев, А.И. Основы теории надежности мостов: учебное пособие / А.И. Васильев. — М.: МАДИ, 2021. — 96 с.

Расчет выполнен в программно-вычислительном комплексе Midas Civil, который основан на методе конечных элементов (МКЭ) и предназначен для численного исследования на ЭВМ напряженно-деформированного состояния мостовых сооружений. Численная модель пролетного строения с ездой понизу расчетной длиной $l = 66$ м по типовому проекту № 3.501.2-139 для железнодорожного моста показана на рисунке 2.

Геометрические параметры ферм, размеры поперечных сечений соответствуют данным типового проекта. Длина панели $d = 8,25$ м. Расстояние между фермами $B_{\phi} = 5,7$ м. Высота фермы равна 11,25 м. Расстояние между продольными балками принято $B = 1,9$ м. Поперечные балки расположены между узлами параллельных ферм. В модели также использованы решетки верхних и нижних продольных связей, поперечных связей. Для обычного исполнения принята сталь 15ХСНД по ГОСТ 6713, класс С345.

Все элементы ферм моделировались балочного типа, чтобы, учитывая нестандартный характер работы пролетного строения, не исключить изгибные напряжения. Соединения в узлах приняты жесткими, отражающие работу соединения в узлах элементов ферм на фасонках, накладках и высокопрочных болтах.

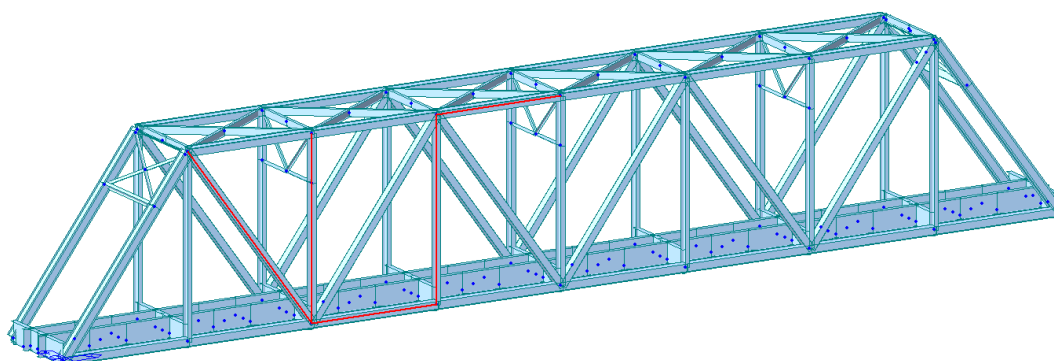


Рисунок 2. Модель пролетного строения 66 м (рисунок авторов)

Figure 2. 66 m Superstructure model (figure by the authors)

Нагрузка от собственного веса определялась в модели автоматически по характеристикам материалов и размерам конструкций. Мостовое полотно задано в соответствие с СП 35.13330.2011 при езде на железобетонных плитах с двумя тротуарами 22,6 кН/м. Временная вертикальная нагрузка приложена как эквивалентная равномерно распределенная нагрузка, соответствующая классу нагрузок $K = 8$ схемы СК. Загружение подвижной нагрузкой осуществлялось по линиям влияния, функционал приложения такой нагрузки реализован в ПК Midas Civil. Коэффициенты надежности и динамические коэффициенты приняты равным единице.

Работа численной модели без повреждений проверена испытаниями под проходящими локомотивами известной массы на железнодорожных мостах через реки Солзан, Бабха.

Принято допущение об упругой работе конструктивных материалов. Обосновать это можно тем, что при появлении повреждений можно предположить, что сначала произойдет перераспределение усилий между элементами в связи с пространственным характером работы пролетного строения и только после этого проявится геометрическая или физическая нелинейность элементов. Целью было исследование перераспределения пространственной работы сооружения.

Повреждения в виде исключения работы одного элемента учитывались для всех элементов верхних, нижних поясов, раскосов и стоек(подвесок) правой фермы, на рисунке 2 выделены элементы с максимальным влиянием на работу конструкции. Моделирование развития повреждения в разных долях от 0 до 100 процентов осуществлялось снижением модуля упругости, эквивалентным снижением жесткости элемента.

Для оценки влияния повреждений элементов пространственной фермы вводятся индексы, характеризующие отношения напряжений и перемещений (прогибов) в конструктивных элементах поврежденной конструкции к тем же параметрам при том же нагружении и отсутствии повреждений. Повреждение снижает жесткость элемента, что ведет к пространственному перераспределению усилий.

Контролируемые индексы можно выразить следующими формулами:

$$\gamma_{ik} = \frac{\sigma_{ik}'}{\sigma_i} \text{ и } \lambda_{ik} = \frac{y_{ik}'}{y_i}, \quad (1)$$

где γ_i — относительное изменение напряжения в i -м элементе при повреждении k -го элемента; σ_{ik}' — абсолютное значение напряжения в i -м элементе при повреждении k -го элемента; σ_i — абсолютное значение напряжения в i -м элементе при отсутствии повреждений и отклонений; λ_{ik} — относительное изменение перемещений i -й фермы при повреждении k -го элемента; y_{ik}' — абсолютное значение перемещений фермы при повреждении k -го элемента; y_i — абсолютное значение перемещений фермы при отсутствии повреждений и отклонений.

Таким образом, индексы γ_{ik} и λ_{ik} позволяют выявить какие элементы в большей степени реагируют на развитие повреждений, индексы контролируются в конкретных характерных точках. При отсутствии повреждений индексы равны 1.

Рассматриваются напряжения, характерные для механической работы элементов (сжатие, растяжение, изгиб).

Предельные нормальные напряжения в сжатых и растянутых элементах фермы ограничены значениями:

$$\begin{aligned}\sigma_{uc} &= \varphi R_y m, \\ \sigma_{ut} &= R_y m,\end{aligned}\tag{2}$$

где R_y — расчетное сопротивление металла 15ХСНД по пределу текучести, принято равным 295 МПа; m — коэффициент условий работы, для железнодорожных мостов принимается равным 0,9; φ — коэффициент продольного изгиба, определяемый для сжатых элементов по листам типового проекта фермы 3.501.2-139 вып. 0-3.

На рисунке 3 показаны графики индексов γ_{ik} при снижении частичном отключении элементов верхнего, нижнего поясов, раскосов, стоек и подвесок. Разными цветами показана степень повреждения. Графики построены для элементов, в максимальной степени изменяющих напряжения в пролетном строении. Отсчитывая от левого конца фермы, для верхнего пояса — это средний элемент, для нижнего — третий элемент, для раскоса-второй нисходящий, стойка первая, подвеска вторая.

На рисунке 4 приведены абсолютные значения напряжений и прогибов при исключении элементов ферм. По горизонтали в процентах показано снижение жесткости поврежденного элемента от проектного значения. Красным пунктиром показано ограничение по напряжениям для элементов с максимальными изменениями напряжений (элементы верхних, нижних связей, раскоса). Зеленым пунктиром показан предельный прогиб по требованию СП 35.13330.2011 от временной нагрузки.

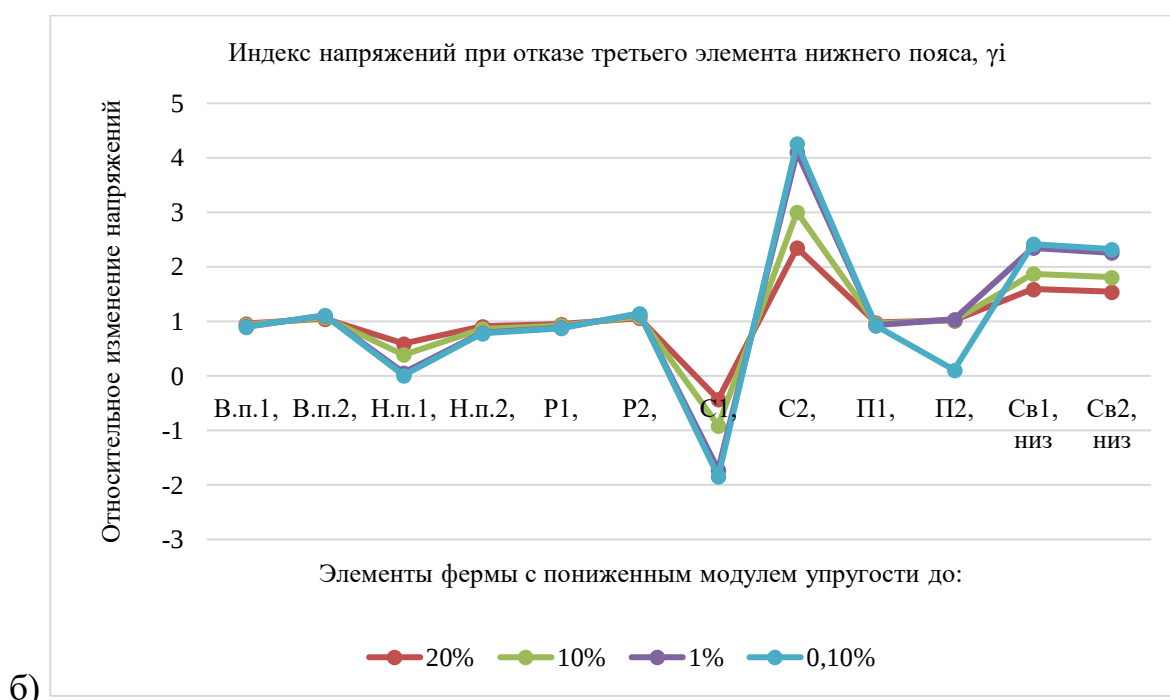
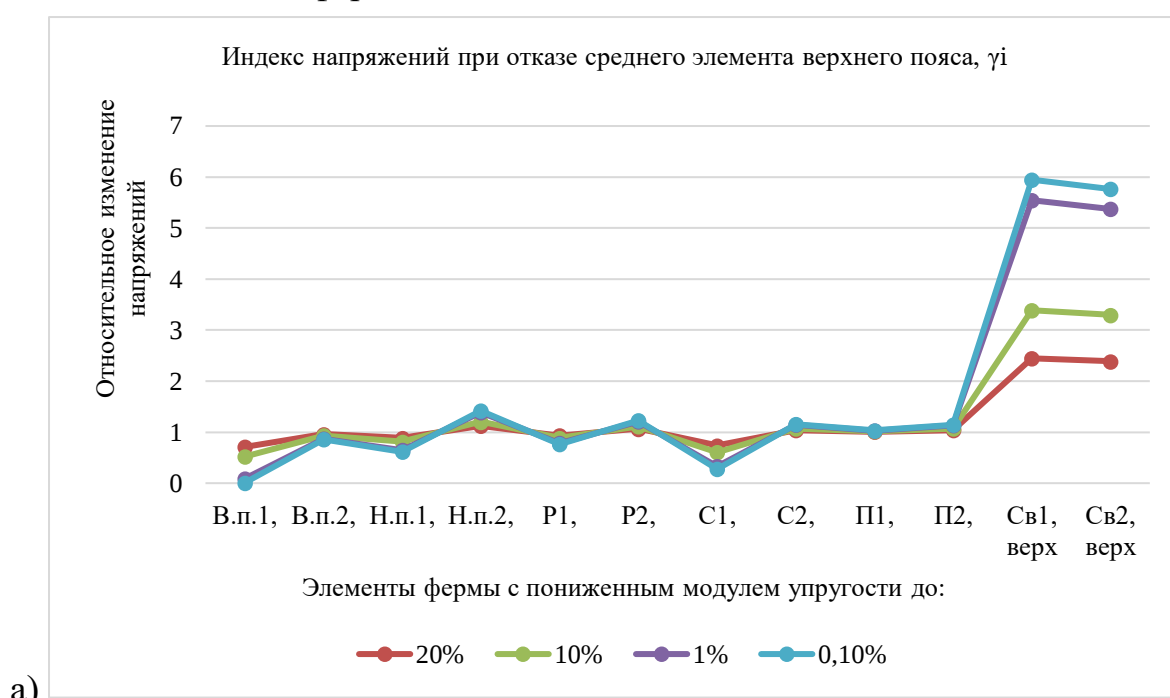
Результаты исследования

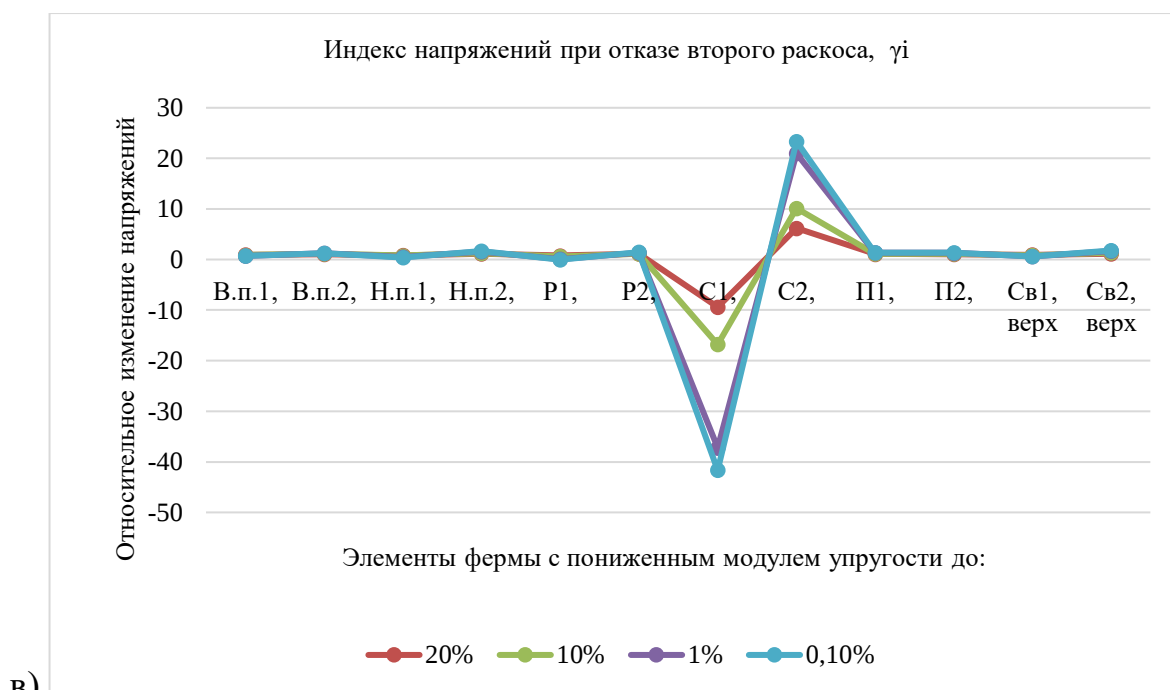
Research results

Анализ индексов напряжений показал, что полное или частичное исключение элементов фермы в результате механического повреждения, в большей степени оказывает влияние на разные элементы пространственной конструкции, а именно:

- повреждение элемента верхнего пояса снизило напряжения в этом элементе, ближней стойке поврежденной правой фермы, но при этом увеличились напряжения в верхних продольных связях;
- повреждение элемента нижнего пояса снизило напряжения в этом элементе, стойке и подвеске поврежденной фермы, но при этом резко увеличиваются напряжения в стойке параллельной фермы, в меньшей степени увеличиваются напряжения в нижних продольных связях;

- при повреждении элемента раскоса перераспределились напряжения в элементах раскоса, верхнего и нижнего поясов — уменьшились в поврежденной ферме, увеличились в параллельной ферме, резко возросли напряжения в стойках, причем в параллельной ферме стойка получилась сжатой;
- исключение стойки мало отражается на работе остальных элементов ферм.





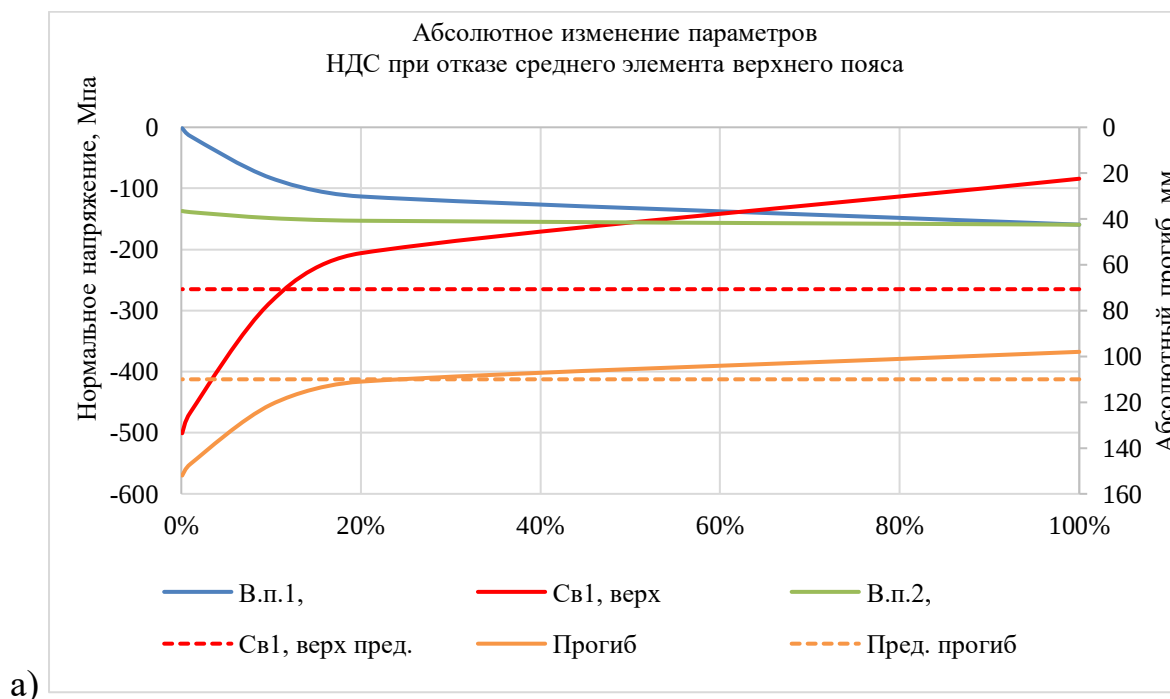
в)

B.n.1, B.n.2 — верхний пояс правой и левой фермы; H.n.1, H.n.2 — нижний пояс правой и левой фермы; P1, P2 — раскосы фермы; C1, C2 — стойки фермы; П1, П2 — подвески фермы; Св1, Св2 — связи фермы)

B.n.1, B.n.2 — top chord of the right and left truss; H.n.1, H.n.2 — bottom chord of the right and left truss; P1, P2 — truss post; C1, C2 — truss struts; П1, П2 — truss slings; Св1, Св2 — truss connections

Рисунок 3. Индексы напряжений при исключении элементов ферм (рисунки авторов)

Figure 3. Stress index at exclusion of truss members (figures by the authors)



а)

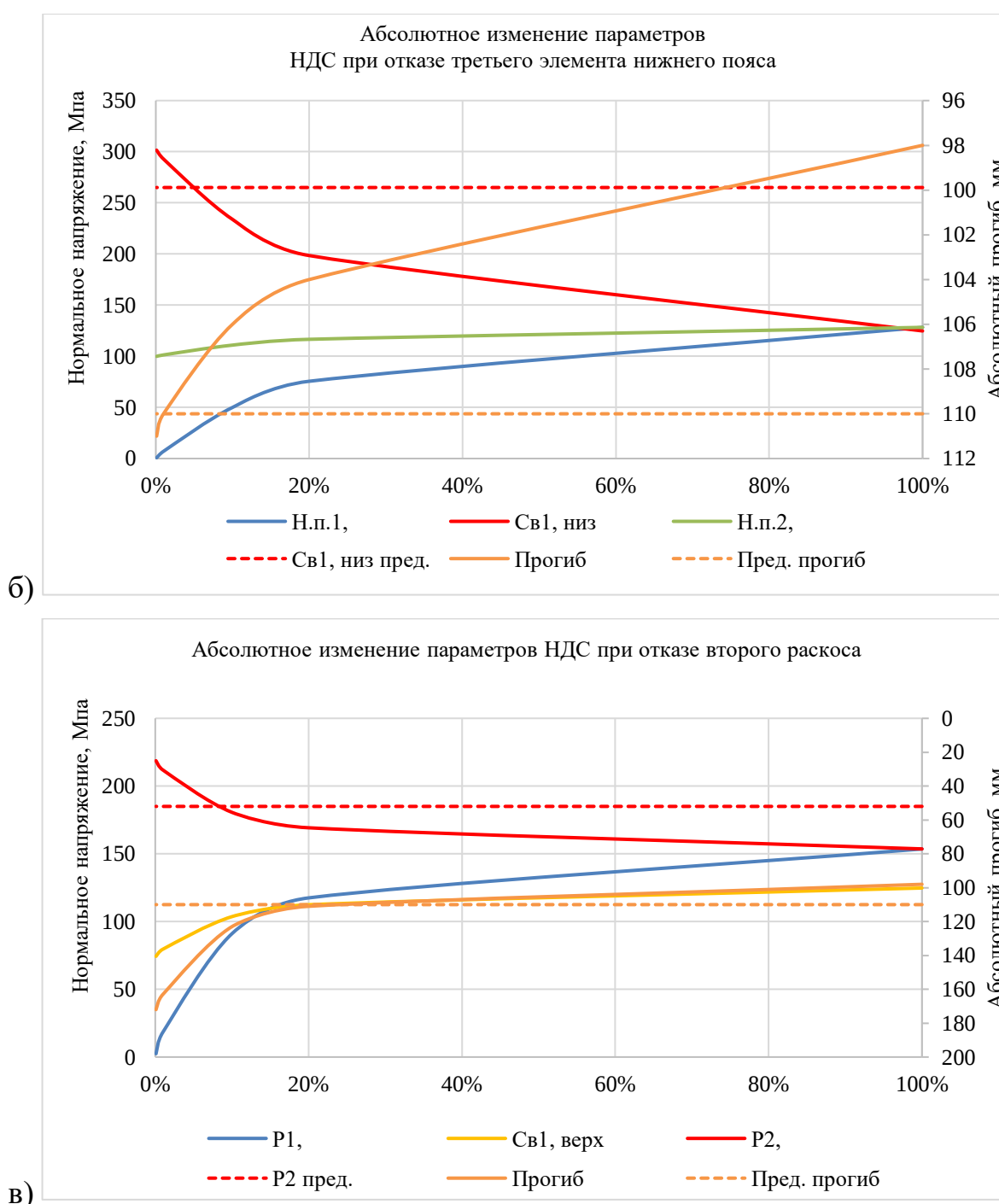


Рисунок 4. Абсолютные изменения напряжений и перемещений при исключении элементов ферм (рисунки авторов)

Figure 4. Absolute changes of stresses and displacements at exclusion of truss members (figure by the authors)

Исследование показало, что при учете вертикальных нагрузок с учетом временной обращающейся нагрузки С-8 повреждение любого одного элемента не приводит к перераспределению напряжений, близким к предельным по формуле (2), если жесткость поврежденного элемента находится в пределах 90 %. Если жесткость снижена более, чем на 90 %, то предельное состояние может наступить в верхних связях при

повреждении верхнего пояса, нижних связях при повреждении элемента нижнего пояса, раскоса неповрежденной фермы при отказе раскоса на противоположной ферме.

Предельный прогиб может возникнуть при снижении жесткости верхнего пояса до 70 %.

Выводы

Conclusions

1. Выстроенная система нормативно-технического и технологического контроля строительства и эксплуатации железнодорожных мостов, несомненно, обеспечивает безопасность в течение их жизненного цикла. 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.

2. Если нормы проектирования мостов рекомендуют проверять мостовые сооружения на живучесть, то нормы эксплуатационного контроля такие вопросы не охватывают, очевидно, в связи с недостаточной изученностью проблем этого направления.

3. 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:

- пространственное перераспределение напряженно-деформированного состояния происходит по пути повышения напряжений в элементах решетки параллельной фермы и продольных связей;
- по контролю допустимых напряжений и прогибов живучесть пролетного строения сохраняется в пределах 70 % исключения из работы одного из элементов одной фермы.

4. Знание характера перераспределения напряжений позволяет в дальнейшем исследовать наиболее эффективные меры для повышения живучести подобных пролетных строений, в том числе, находящихся в эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Harik, I.E.** United States Bridge Failures, 1951–1988 / I.E. Harik, A.M. Shaaban, H. Gesund, G.Y.S. Valli, S.T. Wang. — DOI [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3828\(1990\)4:4\(272\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3828(1990)4:4(272)) // Journal of Performance of Constructed Facilities. — 1990. — Т 4. — № 4. — С. 272–277. — URL: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290887-3828%281990%294%3A4%28272%29>. (дата обращения: 02.10.2023).
2. **Платонов, А.С.** Уроки аварий металлических конструкций мостов / А.С. Платонов // Транспортное строительство. — 2009. — № 6. — С. 6–9. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12775636>. — EDN JRPXVN. (дата обращения: 02.10.2023).
3. **Scheer, J.** Failed Bridges: Case Studies, Causes and Consequences / J. Scheer. — Берлин: Wilhelm Ernst & Sohn, 2010. — 30 с. — URL: <https://download.e-bookshelf.de/download/0000/6026/90/L-G-0000602690-0002363946.pdf> (дата обращения: 02.10.2023).
4. Реестр аварий зданий и сооружений 2001–2010 годов / К.И. Еремин, Н.А. Махутов, Г.А. Павлова, Н.А. Шишкина. — М.: б.и., 2011. — 318 с.
5. **Козырева, Л.В.** Аварии мостовых сооружений / Л.В. Козырева, Е.В. Китарева // Техническое регулирование в транспортном строительстве. — 2015. — № 1. — С. 37–42. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22937588>. — EDN THYNLF. (дата обращения: 02.10.2023).
6. **Майстренко, И.Ю.** Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 1 / И.Ю. Майстренко, И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.15862/13TS417> // Транспортные сооружения. — 2017. — Т 4. — № 4. — С. 13TS417. — URL: <https://t-s.today/13TS417.html>. — EDN NRLEKT. (дата обращения: 02.10.2023).
7. **Овчинников, И.Г.** Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 2 / И.Г. Овчинников, И.И. Овчинников, И.Ю. Майстренко [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.15862/14TS417> // Транспортные сооружения. — 2017. — Т 4. — № 4. — С. 14TS41. — URL: <https://t-s.today/14TS417.html>. — EDN YPUCTS. (дата обращения: 02.10.2023).
8. **Майстренко, И.Ю.** Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 3 / И.Ю. Майстренко, И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.15862/08SATs118> // Транспортные сооружения. — 2018. — Т 5. — № 1. — С. 08SATs118. — URL: <https://t-s.today/08SATs118.html>. — EDN XNZIGL. (дата обращения: 02.10.2023).
9. **Овчинников, И.И.** Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 4 / И.И. Овчинников, И.Ю. Майстренко, И.Г. Овчинников [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.15862/05SATs118> // Транспортные сооружения. — 2018. — Т 5. — № 1. — С. 05SATs118. — URL: <https://t-s.today/05SATs118.html>. — EDN UPMKLI. (дата обращения: 02.10.2023).
10. **Кузнецова, С.В.** Причины аварий мостовых сооружений на территории РФ и стран СНГ / С.В. Кузнецова, А.В. Козлов // Дороги и мосты. — 2018. — № 1. — С. 16. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37001856>. — EDN YXTZUL. (дата обращения: 18.10.2023).
11. **Дергунов, С.А.** Аварии мостовых сооружений и их причины / С.А. Дергунов, А.Б. Сатюков, А.Ю. Спирина, С.В. Сериков. — DOI <https://doi.org/10.35803/1694-5298.2019.2.289-294> // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры имени Н. Исанова. — 2019. — № 2. — С. 289–294. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41415338>. — EDN PMHELU. (дата обращения: 18.10.2023).
12. **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: 18.10.2023).
13. **Богданов, И.Я.** Анализ аварий и отказов мостовых сооружений на территории Российской Федерации / И.Я. Богданов, В.А. Рудских // Дороги и мосты. — 2022. — № 1. — С. 227–259. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49091734>. — EDN EEWEYK. (дата обращения: 18.10.2023).

14. **Bykova, N.** System approach to operating transport structures geodynamic safety estimation / N. Bykova, A. Yashnov, R. Semenov. — DOI <https://doi.org/10.1051/mateconf/201926502004> // International Geotechnical Symposium “Geotechnical Construction of Civil Engineering & Transport Structures of the Asian-Pacific Region” (GCCETS 2018). Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, July 4–7, 2018 / Под ред. S. Kudryavtsev, C. Yoo, A. Zhussupbekov (Eds.) Южно-Сахалинск: EDP Sciences, 2019. — С. 2004. — URL: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2019/14/mateconf_gccets2018_02004/mateconf_gccets2018_02004.html. (дата обращения: 18.10.2023).
15. **Yashnov, A.N.** Experimental determination of stress-strain state of asphalt pavement on metal bridges / A.N. Yashnov, S.Yu. Polyakov // Russian Journal of Building Construction and Architecture. — 2018. — № 3. — С. 93–106. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35306889>. — EDN XUCNAD. (дата обращения: 18.10.2023).
16. **Старцев, А.Г.** Численное исследование работы металлического пролетного строения со сквозными главными фермами с поврежденным верхним поясом / А.Г. Старцев, Д.А. Зайнагабдинов // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. — 2017. — Т 1. — С. 562–569. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29381295>. — EDN YSYSOB. (дата обращения: 18.10.2023).
17. **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: 18.10.2023).

Сведения об авторах:

Быкова Наталья Михайловна — кандидат технических наук, доцент, 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 — кандидат технических наук, доцент, 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: 08.12.2023. Принята к публикации: 25.01.2024. Опубликовано онлайн: 09.02.2024.

Работа выполнена в рамках подготовки диссертационного исследования А.А. Забияки по теме: «Оценка эксплуатационной надежности металлических пролетных строений с повреждениями и методы их мониторинга» по специальности 2.1.8 «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей»

REFERENCES

1. Harik I.E., Shaaban A.M., Gesund H., Valli G.Y.S., Wang S.T. United States Bridge Failures, 1951–1988. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 1990; 4(4): 272–277. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3828\(1990\)4:4\(272\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3828(1990)4:4(272)).
2. Platonov A.S. Lessons of Failures of Metal Designs of Bridges. *Transport construction*. 2009; (6): 6–9. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12775636> (accessed 2nd October 2023). (In Russ., abstract in Eng.).
3. Scheer J. Failed Bridges: Case Studies, Causes and Consequences. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn; 2010. Available at: <https://download.e-bookshelf.de/download/0000/6026/90/L-G-0000602690-0002363946.pdf> (accessed 2nd October 2023). (In Eng.).

4. Eremin K.I., Makhutov N.A., Pavlova G.A., Shishkina N.A. Reyestr avariya zdaniy i sooruzheniy 2001–2010 godov [Register of accidents of buildings and structures 2001–2010]. Moscow: 2011. (In Russ.).
5. Kozyreva L.V., Kitar E.V. Accident Bridges. *Technical regulation in transport construction*. 2015; (1): 37–42. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22937588> (accessed 2nd October 2023). (In Russ., abstract in Eng.).
6. Maystrenko I.Y., Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Kokodeev A.V. Failures and collapses of bridge constructions, analysis of their causes. Part 1. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2017; 4(4): 13TS417. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/13TS417>.
7. Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I., Maystrenko I.Y., Kokodeev A.V. Failures and collapses of bridge constructions, analysis of their causes. Part 2. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2017; 4(4): 14TS41. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/14TS417>.
8. Maystrenko I.Y., Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Uspanov A.M. Failures and collapses of bridge constructions, analysis of their causes. Part 3. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2018; 5(1): 08SATS118. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/08SATS118>.
9. Ovchinnikov I.I., Maystrenko I.Y., Ovchinnikov I.G., Uspanov A.M. Failures and collapses of bridge constructions, analysis of their causes. Part 4. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2018; 5(1): 05SATS118. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/05SATS118>.
10. Kuznetsova S.V., Kozlov A.V. [Causes of accidents of bridge structures in the Russian Federation and CIS countries]. *Dorogi i mosty*. 2018; (1): 16. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37001856> (accessed 18th October 2023). (In Russ.).
11. Dergunov S.A., Satyukov A.B., Spirina A.Y., Serikov S.V. Accidents of the Bridge Structures and Their Reasons. *The Herald of Kyrgyz State University of Construction, Transport and Architecture Named After N. Isanov*. 2019; (2): 289–294. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.35803/1694-5298.2019.2.289-294>.
12. 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>.
13. Bogdanov I.Ya., Rudskikh V.A. Analysis of Bridge Accidents and Failures in The Russian Federation. *Dorogi i mosty*. 2022; (1): 227–259. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49091734> (accessed 18th October 2023). (In Russ., abstract in Eng.).
14. Bykova N., Yashnov A., Semenov R. System approach to operating transport structures geodynamic safety estimation. In: S. Kudryavtsev, C. Yoo and A. Zhussupbekov (Eds.). *International Geotechnical Symposium “Geotechnical Construction of Civil Engineering & Transport Structures of the Asian-Pacific Region” (GCCETS 2018)*. Yuzhno-Sakhalinsk, Russia, July 4–7, 2018. Yuzhno-Sakhalinsk: EDP Sciences; 2019. p. 2004. Available at: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2019/14/mateconf_gccets2018_02004/mateconf_gccets2018_02004.html (accessed 18th October 2023). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201926502004>.
15. Yashnov A.N., Polyakov S.Yu. Experimental determination of stress-strain state of asphalt pavement on metal bridges. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2018; (3): 93–106. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35306889> (accessed 18th October 2023). (In Russ., abstract in Eng.).
16. Startsev A.G., Zaynagabdinov D.A. [Numerical study of the operation of a metal span with through main trusses and a damaged upper chord]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona = Transport infrastructure of the Siberian region*. 2017; 1: 562–569. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29381295> (accessed 18th October 2023). (In Russ.).
17. Tusnin A.R., Berger M.P. Tests of Damaged Flat Trusses. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [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>.

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. Zabiyaka — 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: 18th December 2023. Revised: 25th January 2024. Published online: 9th February 2024.

The work was carried out as part of the preparation of A.A. 's dissertation research. Zabiyaki on the topic: «Assessment of the operational reliability of metal spans with damage and methods for their monitoring» in specialty 2.1.8 «Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels»