

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2024, Том 16, № 3 / 2024, Vol. 16, Iss. 3 <https://esj.today/issue-3-2024.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/47SAVN324.pdf>

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Соколова, О. Я. Моделирование прогрессирующего разрушения железнодорожного мостового сооружения / О. Я. Соколова, И. И. Овчинников, А. Н. Маринин // Вестник евразийской науки. — 2024. — Т. 16. — № 3. —

URL: <https://esj.today/PDF/47SAVN324.pdf>

For citation:

Sokolova O.Ya., Ovchinnikov I.I., Marinin A.N. Modeling of progressive failure of a railroad bridge structure. *The Eurasian Scientific Journal*. 2024;16(3): 47SAVN324. Available at: <https://esj.today/PDF/47SAVN324.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.)

УДК 624.21

Соколова Ольга Ярославовна

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия
E-mail: sokolova.olya2000@mail.ru

Овчинников Илья Игоревич

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия
Доцент базовой кафедры «АО Мостострой-11»

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Уфа, Россия

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Саратов, Россия

Доцент кафедры «Транспортное строительство»

Доктор технических наук, доцент

E-mail: bridgeart@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8370-297X>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=177132

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57191523104>

Маринин Александр Николаевич

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия

ФГБОУ ВО «Краснодарский государственный технологический университет», Краснодар, Россия

Доцент

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: a-marinin@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1848-730X>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=625628

Моделирование прогрессирующего разрушения железнодорожного мостового сооружения

Аннотация. Мостовые сооружения являются важным объектом транспортной инфраструктуры каждого региона. Аварии на мостах могут привести к травмам и гибели людей, к серьезным разрушениям инфраструктуры, что потребует значительных затрат на восстановление, к перерывам в дорожном движении, нарушению и транспортной инфраструктуры, что будет негативно влиять на экономику региона, а также может отрицательно сказаться на работе предприятий и организаций. Аварии транспортных сооружений остаются недостаточно исследованными. В статье рассмотрены термины прогрессирующее разрушение и живучесть, а также требования нормативной документации в части защиты от прогрессирующего разрушения. В статье проводится моделирование прогрессирующего разрушения пролетного строения железнодорожного моста с целью

исследования его непроеKTного поведения в различных ситуациях. Для этого создана модель в программном комплексе midas Civil, проверена правильность создания пролетного строения путем проверок по первой и второй группам предельных состояний, а затем проведена проверка на живучесть в соответствии с требованиями нормативной документации. После проведения анализа работы конструкции при проверке живучести авторами были предложены варианты повышения несущей способности конструкции и её элементов различными способами, путем увеличения площади сечения элементов и уменьшением расчетной длины сжатых элементов.

Ключевые слова: аварии мостов; прогрессирующее разрушение; живучесть; моделирование; расчет; мостовое сооружение; железнодорожный мост; ферма; пролетное строение; расчет живучести

Введение

Мало кто задумывается, какую роль играют мостовые сооружения и сколько времени затрачивается на преодоление различных преград объездными дорогами.

Мосты занимают важное место в жизни человека, поскольку являются незаменимыми связующими звеньями коммуникаций, соединяющие в единую сеть подобные транспортные системы. Также благодаря им возможно свободное передвижение людей, транспортных средств и грузов через естественные или искусственные преграды.

1. Причины и последствия аварий и разрушений мостовых сооружений

Аварии искусственных сооружений в последнее время стали обычным явлением. Аварии и разрушения мостов могут привести:

- к перерывам в дорожном движении и нарушению транспортной инфраструктуры, что будет негативно влиять на экономику региона, а также может отрицательно сказаться на работе предприятий и организаций;
- к травмам и гибели людей;
- к проведению судебной экспертизы для выяснения причин аварии;
- к аварийному ремонту сооружения и созданию объездных путей;
- к серьезным разрушениям инфраструктуры, что потребует значительных затрат на восстановление.

Таким образом, предотвращение аварий на мостах важно для обеспечения безопасности, сохранения экономических ресурсов и поддержания нормального функционирования транспортной инфраструктуры города или региона.

В наше время случаи аварий и разрушений строительных объектов, а также транспортных сооружений, становятся все более распространенными, о чем указано в ряде публикаций [1–3]. В работах [4–7] авторы проанализировали большое количество аварий и разрушений мостовых сооружений, на основании которых были выделены следующие причины:

- ошибки на стадии проектирования и строительства;
- недостаточность (некорректность) расчетов;
- отсутствие мониторинга на стадии эксплуатации;

- перегрузка конструкций;
- деградация материала и неблагоприятные воздействия;
- недостаточная надежность соединений;
- навал судов;
- воздействие экстремальных нагрузок.

Систематизация информации об авариях и разрушениях транспортных сооружений, изучение причин их появления, доведение этой информации до специалистов, занимающихся проектированием, строительством и эксплуатацией транспортных сооружений, позволит уменьшить количество аварий, снизить тяжесть их последствий [7].

Таким образом, решение проблемы прогрессирующего разрушения мостовых сооружений требует комплексного подхода и интенсивного усилия. Это включает в себя регулярное обслуживание и диагностику мостов, использование высококачественных материалов и методов строительства, улучшение технологий мониторинга и контроля, а также соблюдение норм и стандартов, как при проектировании, так и при строительстве и эксплуатации.

2. Прогрессирующее разрушение

Для начала разберемся с понятием прогрессирующее разрушение и живучесть. Термин прогрессирующего разрушения, описанный в ГОСТ 27751-2014¹, определяется как, последовательное (цепное) разрушение несущих строительных конструкций, приводящее к обрушению всего сооружения или его частей вследствие начального локального повреждения. Ущерб от прогрессирующего разрушения не пропорционален ущербу, инициировавшему это разрушение.

Согласно СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы»² живучесть — это способность сооружения выполнять свои основные функции при повреждении или разрушении отдельных элементов.

Очень подробно термин живучести разобран в работе [8]. Под живучестью подразумевается — способность конструкции сохранять свою прочность и надежность при воздействии различных внешних факторов.

А прогрессирующее разрушение, это то, к чему может привести отсутствие живучести конструкции.

В своде правил² содержится такое требование по недопущению прогрессирующего обрушения мостов, как выполнение реалистичных расчетов, учитывающих условия эксплуатации и строительства мостов, конструктивная схема которых не допускает прогрессирующего разрушения из-за локальных повреждений, наступивших в результате экстремальных природных или техногенных воздействий.

В приложении 7 СП 35.13330² для проверки непроектного поведения конструкции есть проверка живучести, которая подразумевает под собой недопущение прогрессирующего разрушения, из-за локального разрешения. Но носит она рекомендательных характер и не

¹ ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения»: дата введения 2015-07-01. — Москва: Стандартинформ, 2019. — 14 с.

² СП 35.13330.2011 Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84* (с Изменением N 1, 2, 3): дата введения 2010-12-28. — Москва: Стандартинформ, 2019. — 346 с.

является обязательной проверкой при проектировании. В этом приложении говорится, что мостовые сооружения рекомендуется проверять на живучесть по 1 группе предельных состояний конструкции, при выходе из строя отдельных элементов.

При проверке мостовых сооружений на живучесть в СП 35.13330² предлагается рассматривать следующие расчетные случаи:

- а) обрушение пролетного строения в одном из пролетов (рис. 1);

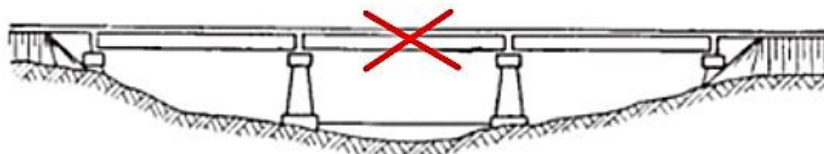


Рисунок 1. Схема обрушения пролетного строения мостового сооружения (составлено авторами)

- б) обрушение опоры (рис. 2);



Рисунок 2. Схема обрушения опоры мостового сооружения (составлено авторами)

- в) выход из строя одной из стоек стоечной опоры (рис. 3);

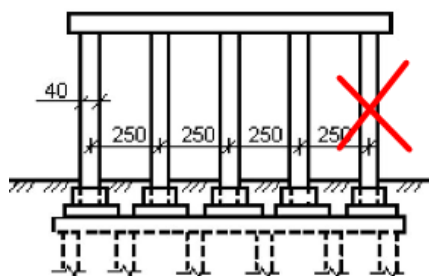


Рисунок 3. Схема выхода из строя одной из стоек стоечной опоры мостового сооружения (составлено авторами)

- г) выход из строя крайней балки в балочном пролетном строении (рис. 4);

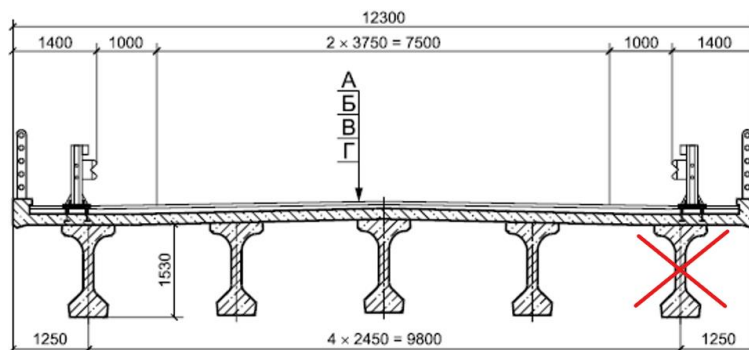


Рисунок 4. Схема выхода из строя крайней балки в балочном пролетном строении мостового сооружения (составлено авторами)

- д) выход из строя одного из элементов решетки сквозного пролетного строения (рис. 5);

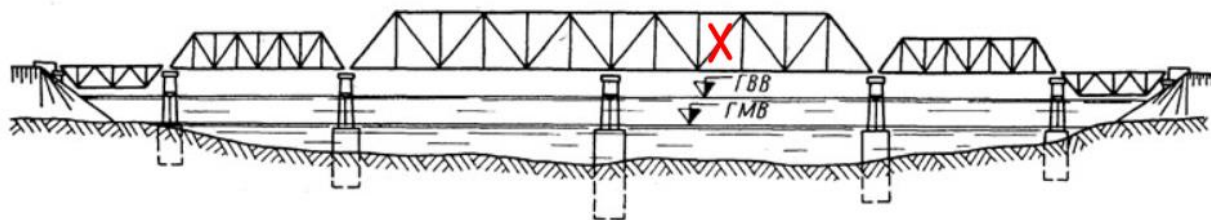


Рисунок 5. Схема выход из строя одного из элементов решетки сквозного пролетного строения мостового сооружения (составлено авторами)

В вантовых и висячих мостах следует выполнять два варианта проверки на разрыв гибких элементов: при разрыве одного гибкого элемента и последовательном разрыве двух гибких элементов (рис. 6).

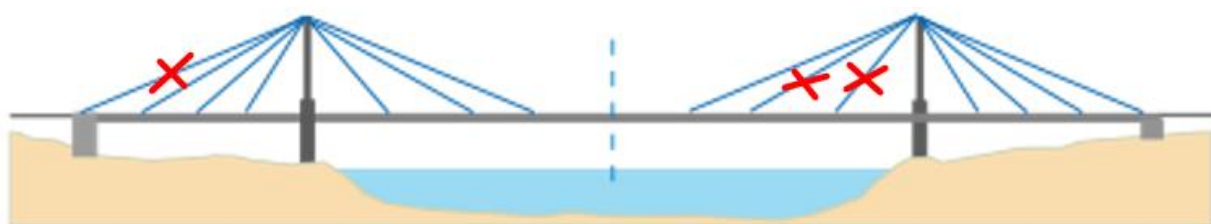


Рисунок 6. Схема вантового моста при разрыве одного гибкого элемента и последовательном разрыве двух гибких элементов (составлено авторами)

Также рекомендуется перед возобновлением эксплуатации мостов, в которых имеет место выход из строя отдельных элементов, выполнять расчеты по измененной расчетной схеме для определения допустимых величин подвижных нагрузок и порядка их пропуска по этим мостам.

Создание расчетных моделей может помочь рассмотреть все возможные варианты прогрессирующего разрушения мостов и помочь предупреждению на стадии проектирования, после исследования их непроектного поведения в различных ситуациях. Для этого далее будет проведено моделирование проверки на живучесть в соответствии с приложением 7 СП 35.13330.2011² в программном комплексе midas Civil. Трехмерное моделирование представляет собой уникальный и эффективный способ получения полной и детальной информации о модели. Программные комплексы позволяют создавать расчетные модели, которые учитывают поведение конструкции в целом в различных условиях — от обычной эксплуатации до чрезвычайных ситуаций.

3. Создание модели пролетного строения моста для моделирования прогрессирующего разрушения

Для моделирования прогрессирующего разрушения был выбран ферменный железнодорожный мост с ездой понизу расчетным пролетом 55 метров, запроектированного реального транспортного объекта: «Второй главный путь на перегоне Дюанка-Токи Дальневосточной железной дороги».

Для моделирования выбрана программа midas Civil, так как является одним из наиболее популярных и востребованных инженерных программных решений для расчета и моделирования конструкций, в том числе железнодорожных мостов, согласно работе [9]. Также одним из ключевых преимуществ при выборе использования midas Civil для расчета

железнодорожных мостов стала возможность автоматического задания подвижной вертикальной железнодорожной нагрузки в соответствии с СП 35.13330.2011², что позволит значительно ускорить расчеты.

Модель железнодорожного моста была создана по типовому проекту серии 3.501.2-139³ (рис. 7).

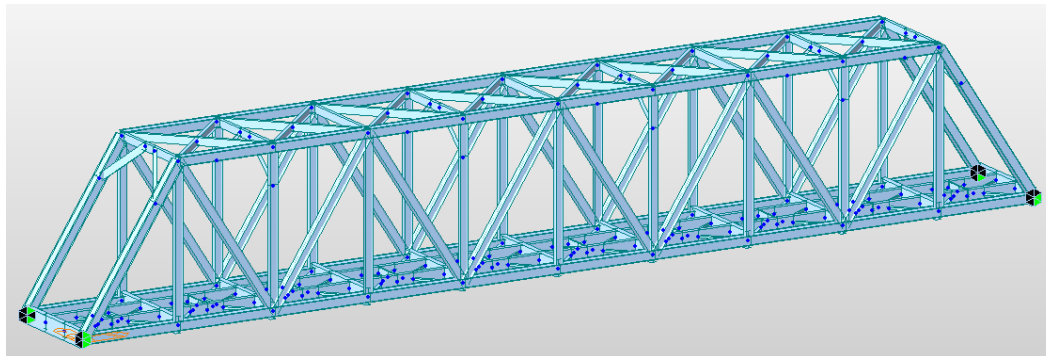


Рисунок 7. Расчетная модель пролетного строения железнодорожного моста (составлено авторами)

В качестве материала принимается сталь марки 10ХСНД по ГОСТ 6713-2021⁴ в соответствии с Серией 3.501.2-139.³ Согласно таблице 8.5 СП 35.13330.2011² расчетное сопротивление стали марки 10ХСНД по пределу текучести равно 350 МПа.

После создания расчетной модели были собраны нагрузки, созданы с ними различные сочетания и проведены проверки по двум группам предельных состояний.

Расчет центрально растянутых стержней фермы на прочность выполняется по формуле 8.4 СП 35.13330.2011²:

$$\frac{N}{A} \leq R_y m \quad (1)$$

где N — продольная сила, кН; A — площадь сечения, м²; R_y — расчетное сопротивление стали растяжению, сжатию, изгибу по пределу текучести, кН/м²; m — коэффициент условий работы конструкции.

Продольные усилия в элементах были получены в ПК midas Civil. Для расчета из каждой группы были выбраны элементы с максимальными абсолютными продольными усилиями. Результаты расчета по прочности представлены в таблице 1:

Согласно таблице, условие прочности выполняется для всех элементов, т. к. значение коэффициента использования в последнем столбце таблицы не больше единицы.

Расчет устойчивости сжатых элементов выполняется по формуле 8.35 СП 35.13330.2011²:

$$\frac{N}{A} \leq \varphi R_y m, \quad (2)$$

где φ — коэффициент продольного изгиба.

³ Серия 3.501.2-139 «Пролетные строения для железнодорожных мостов с ездой понизу, пролетами 33–110 м, металлические, со сварными элементами замкнутого сечения и монтажными соединениями на высокопрочных болтах в обычном и северном исполнении». — Текст: электронный. — URL: <https://docs.cntd.ru/document>

⁴ ГОСТ 6713-2021 Прокат из конструкционной стали для мостостроения. Технические условия (с Поправками). — Текст: электронный. — URL: <https://docs.cntd.ru/document> — 18 с.

Таблица 1

Проверка по прочности стержней фермы

Группа элементов	N, кН	R_y , кН/м ²	m	A, м ²	N/AR _y m
Нижний пояс (НП1)	3 336,81	350 000	0,9	0,0212	0,50
Нижний пояс (НП2)	3 899,11	350 000	0,9	0,02296	0,54
Раскос (Р2)	3 797,39	350 000	0,9	0,01725	0,70
Раскос (Р4)	2 351,55	350 000	0,9	0,0124	0,60
Подвески (П1)	1 111,78	350 000	0,9	0,0102	0,35
Стойки (С1)	52,69	350 000	0,9	0,0092	0,02

Составлена авторами

Результаты расчета представлены в таблице 2:

Таблица 2

Расчет устойчивости стержней фермы

Группа элементов	N, кН	R_y , кН/м ²	m	A, м ²	l_{ef} , м	λ	ϕ	N/ ϕ AR _y m
Верхний пояс (ВП1)	-4 483,12	350 000	0,9	0,023	5,5	27,80	0,884	-0,70
Верхний пояс (ВП2)	-6 455,07	350 000	0,9	0,0265	5,5	28,04	0,884	-0,88
Опорный раскос (Р1)	-4 910,8	350 000	0,9	0,0253	7,724	39,30	0,852	-0,72

Составлена авторами

Условие устойчивости для элементов верхнего пояса фермы и опорных раскосов выполняется.

Допустимый прогиб для пролетного строения железнодорожного моста длиной $l = 55$ метров согласно п. 5.43 СП 35.13330.2011² составляет 75,21 мм. Прогиб пролетного строения 72,19 мм является допустимым, и проверка по 2 группе предельных состояний выполняется (рис. 8).

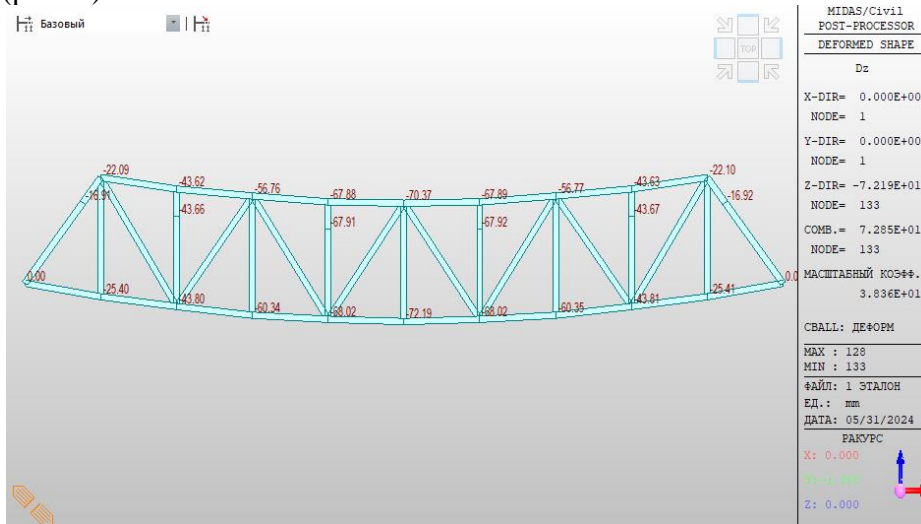


Рисунок 8. Перемещение узлов пролетного строения (составлено авторами)

Таким образом расчетная модель создана верно и удовлетворяет нормативным требованиям.

4. Моделирование прогрессирующего разрушения пролетного строения по приложению 7 СП 35.13330.2011²

Проведем проверку живучести модели пролетного строения железнодорожного моста согласно приложению 7 СП 35.13330.2011.²

Согласно п. 7.2 приложения 7 СП 35.13330.2011² проверку пролетного строения железнодорожного ферменного моста на живучесть следует проводить путем рассмотрения случая выхода из строя одного из элементов решетки сквозного пролетного строения. Моделирование состояло из следующих основных этапов:

1. Были выбраны элементы решетки фермы моста для исключения по отдельности и дальнейшего анализа поведения всего пролетного строения (рис. 9).

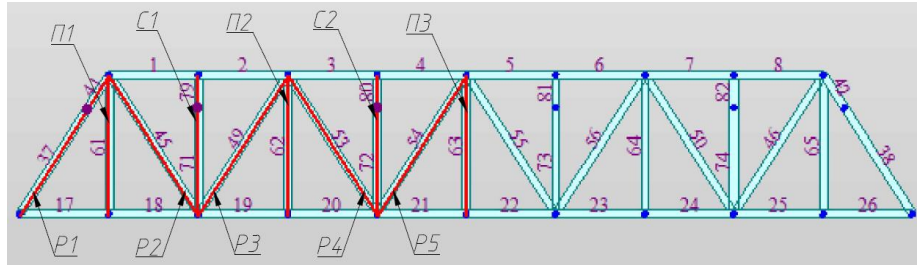


Рисунок 9. Обозначение выбранных элементов и их номеров для расчета на живучесть (составлено авторами)

2. Усилия от временных нагрузок были приняты с коэффициентом 0,5.
3. Затем проведен расчет и анализ выхода выбранных элементов из строя, учитывая их влияние на остальные элементы моста.

Проверка по прочности и устойчивости проводилась путем сравнения полных напряжений в элементах с расчетным сопротивлением стали по пределу текучести.

При достижении напряжений в элементе значения расчетного сопротивления стали равного 350 МПа считалось, что наступает его выход из строя и элемент исключался из совместной работы конструкции.

В результате расчет пролетного строения железнодорожного моста показал, что проверка по живучести в соответствии с СП 35.13330.2011² не выполняется.

Повреждение таких элементов, как раскос P1, P2, P3 или P4 (рис. 9) приведет к прогрессирующему разрушению всей конструкции, так как напряжения превысят допустимые (рис. 10–13).

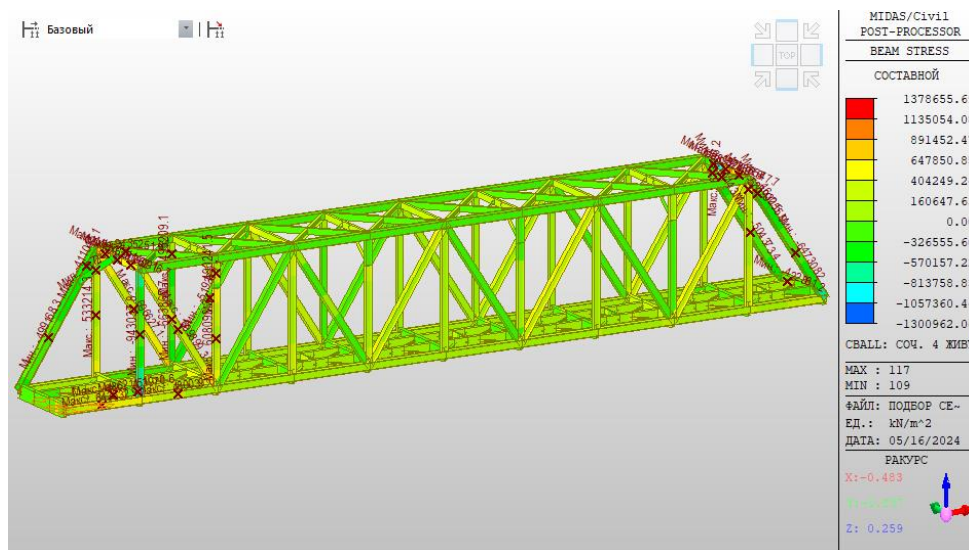


Рисунок 10. Значения полных напряжений при удалении опорного раскоса P1 (составлено авторами)

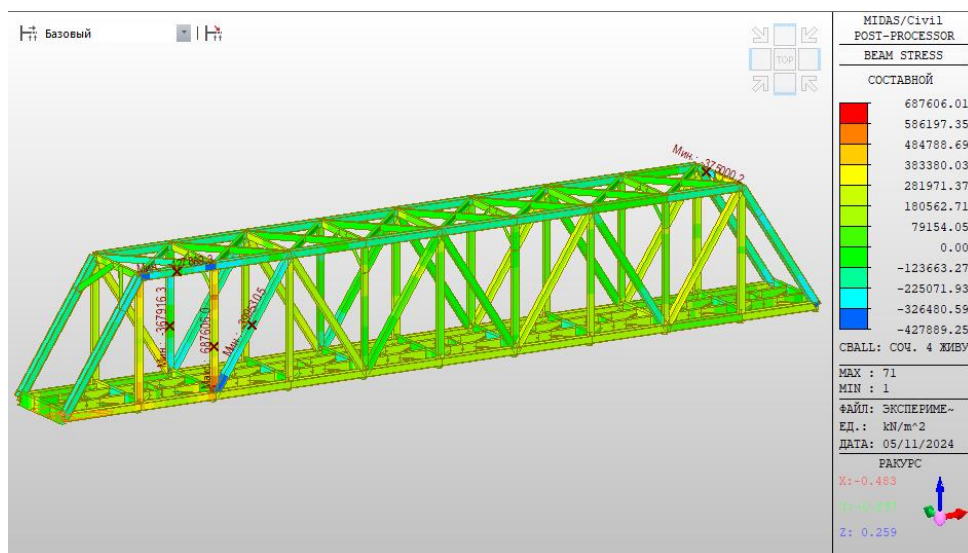


Рисунок 11. Значения полных напряжений при удалении раскоса P2 (составлено авторами)

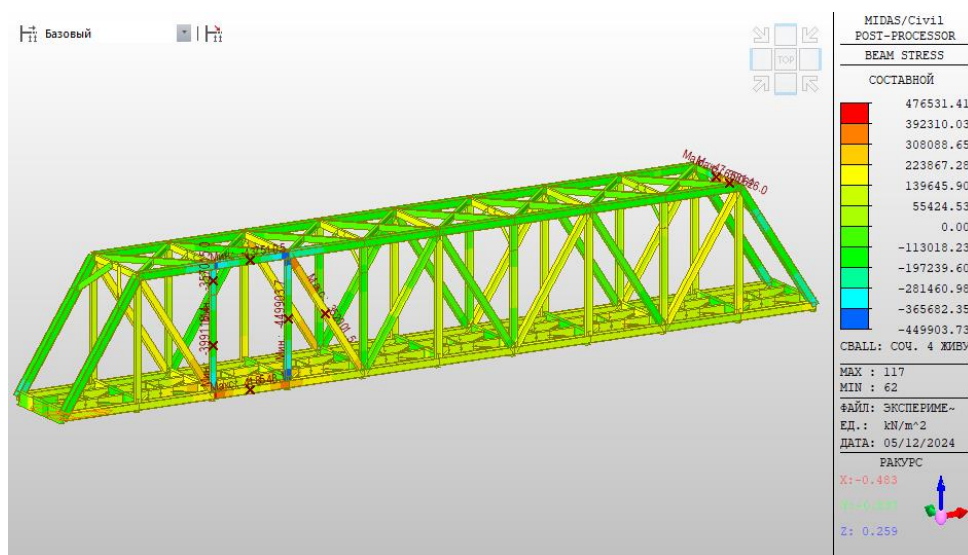


Рисунок 12. Значения полных напряжений при удалении раскоса P3 (составлено авторами)

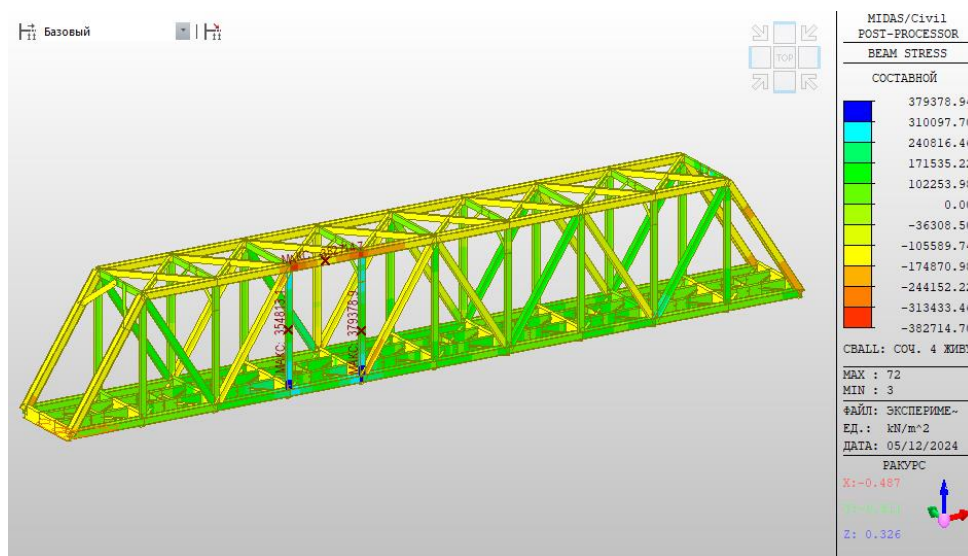


Рисунок 13. Значения полных напряжений при удалении раскоса P4 (составлено авторами)

При удалении подвесок П1, П2, П3 (рис. 9) напряжения в элементах не превысят предельных значений, следовательно, исключение из работы данных элементов не приведет к прогрессирующему разрушению конструкции моста.

При исключении из совместной работы пролетного строения стоек С1 и С2 (рис. 9) напряжения в элементах не превысят предельного значения, следовательно, исключение из работы данных элементов также не приведет к прогрессирующему разрушению конструкции.

Таким образом, требуется повышение несущей способности конструкции пролетного строения моста, чтобы при выходе из строя элементов сквозной решетки пролетного строения не наступало прогрессирующее разрушение и выполнялся расчет на живучесть.

Для этого, используя программный комплекс, подберём сечения для элементов конструкции пролетного строения.

Были подобраны сечения для двух случаев: без учета разрушения опорного раскоса и с учетом его разрушения. Повышение несущей способности пролетного строения, путем повышения площади сечений, для прохождения проверки на живучесть без учета выхода из строя опорного раскоса приведет к увеличению веса пролетного строения с 1 310 кН до 1 595,6 кН на 21,8 % (285,6 кН), а с учетом выхода из строя опорного раскоса — с 1 310 кН до 1 948,2 кН на 48,72 % (638,2 кН).

Важно отметить, что увеличение веса конструкции непосредственно влияет на общую стоимость строительства. Первым и наиболее заметным последствием будет увеличение затрат на материалы.

Кроме того, увеличение веса конструкции приведет к изменениям в технологии возведения. Стандартные методы и оборудование, которые использовались для строительства более легких конструкций, могут оказаться недостаточно эффективными или даже неспособными справиться с более массивными элементами. Это может потребовать привлечения специализированных специалистов и дорогостоящего оборудования.

Так же увеличение веса конструкции, приведет к увеличению нагрузки на фундамент и другие опорные конструкции.

Таким образом увеличение веса конструкции даже на 20 %, приведет не только к увеличению затрат на материалы на эти 20 %, но и к увеличению затрат на строительство, изменение (усиление) остальных конструктивных элементов, что в итоге может привести к существенному увеличению стоимости строительства.

Поэтому при проектировании строительных конструкций необходимо учитывать не только их надежность и прочность, но и оптимизировать их вес и использовать эффективные решения, чтобы минимизировать затраты на материалы и строительство. Для этого далее рассмотрим еще один способ повышения несущей способности уменьшением свободной длины элементов.

5. Уменьшение свободной длины раскосов

Рассмотрим еще один способ повышения живучести конструкции пролетного строения, описанный в работе [10], как введение дополнительных элементов в конструкцию решетки фермы. Установка дополнительных раскосов снижает расчетную длину сжатых раскосов, увеличивая тем самым их несущую способность.

Для того чтобы модель пролетного строения проходила проверку живучести по приложению 7 СП 35.13330.2011², добавим раскосы, как показано на рисунке 14 и посмотрим на поведение конструкции при проверке на живучесть.

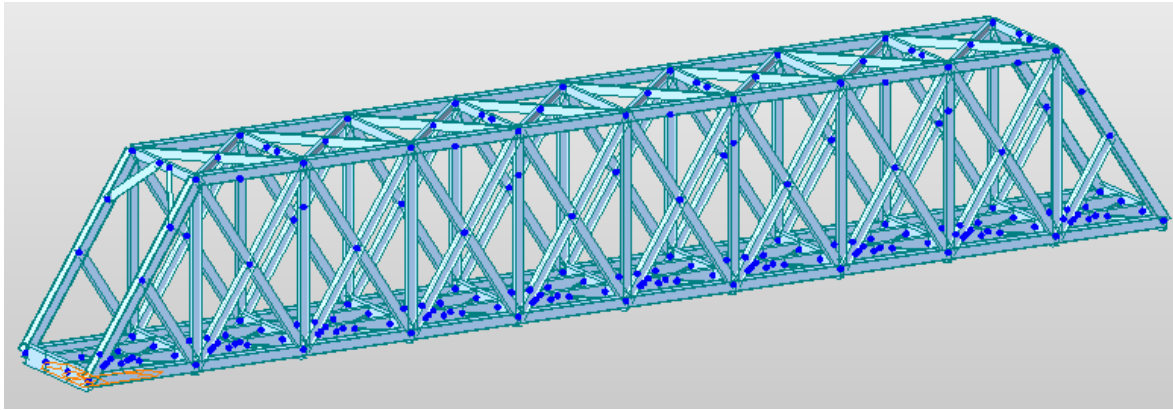


Рисунок 14. Модель с дополнительными раскосами (составлено авторами)

Сечения добавленных раскосов соответствует сечению раскоса P4 и P5 (рис. 9). Вес конструкции пролетного строения при добавлении дополнительных раскосов увеличился с 1 310 кН до 1 484,2 кН на 13,3 % (174,2 кН).

Проведем два различных вида проверок на живучесть:

1. В первом случае будем считать, что у нас четыре отдельных раскоса, и будем убирать каждый по отдельности. Элементы при проверке показаны на рисунке 15 на примере одной секции фермы пролетного строения.

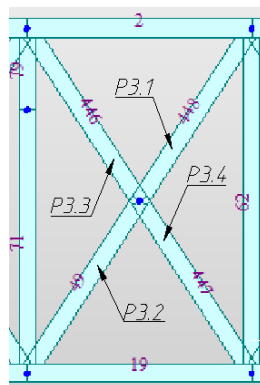


Рисунок 15. Отдельные элементы при проверке по первому варианту (составлено авторами)

2. Во второй случае будем убирать одновременно все раскосы в секции, считая, что при повреждении раскоса, дополнительные раскосы выйдут из строя вместе с ним (рис. 16).

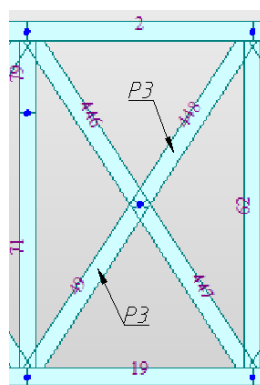


Рисунок 16. Объединение элементов при проверке по второму варианту (составлено авторами)

Для удобства определения, из какой части убираются элементы при расчете, разделим ферму на секции с соответствующим номером раскоса, как показано на рисунке 17.

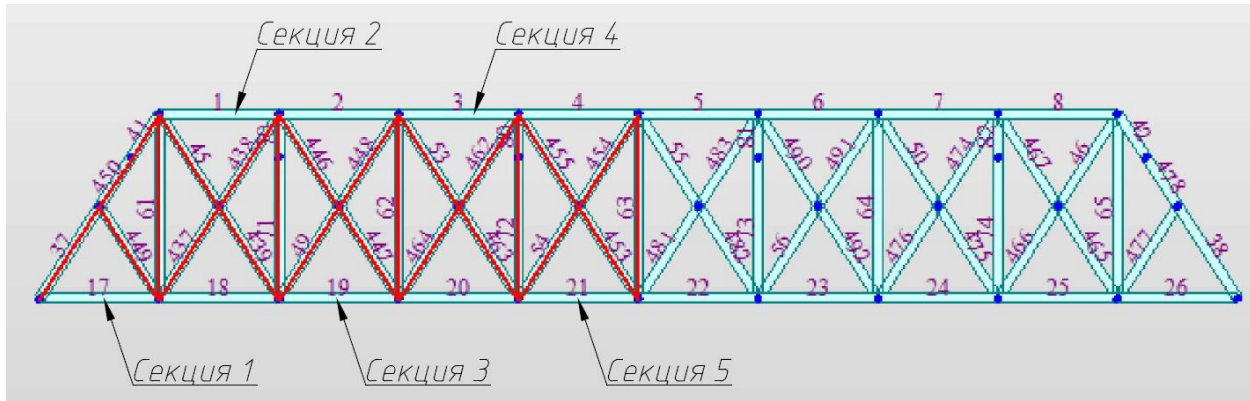


Рисунок 17. Разделение фермы на секции (составлено авторами)

Проверка живучести по первому способу показала, что уменьшение свободной длины элементов действительно значительно усилило конструкцию пролетного строения, и к прогрессирующему разрушению приведет только удаление опорного раскоса. Значения полных напряжений в конструкции при удалении части опорного раскоса P1 представлены на рисунке 18.

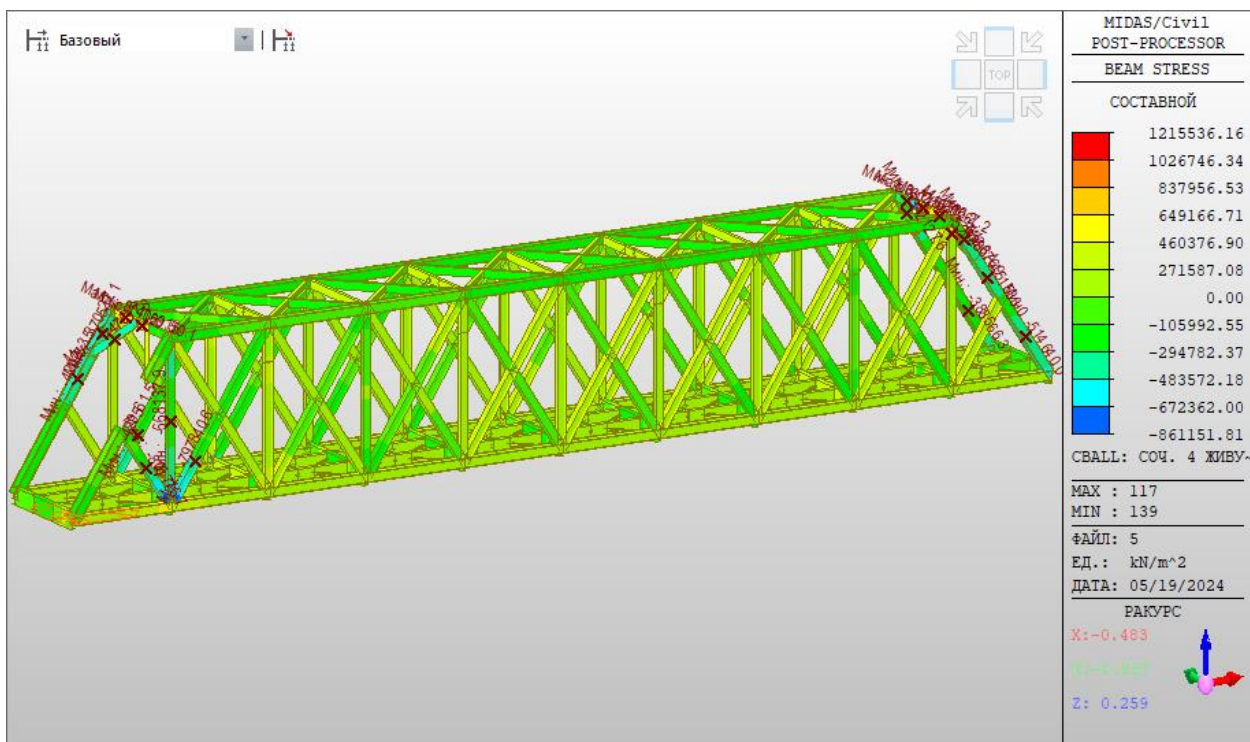


Рисунок 18. Значения полных напряжений при удалении части опорного раскоса P1 (составлено авторами)

Усилим конструкцию за счет увеличения сечений напряженных элементов, чтобы выполнялась проверка живучести, при выходе из работы элементов опорного раскоса.

Такое повышение несущей способности конструкции с добавлением раскосов и увеличение сечений, для проверки живучести с учетом выхода из работы опорных раскосов приведет к увеличению веса пролетного строения с 1 310 кН до 1 891 кН на 44,35 % (581 кН).

Теперь проведем второй вариант проверки на живучесть с исключением всех раскосов из секции. Проверка всех элементов сквозной решетки фермы показала, что повреждение раскосов хотя бы из одного секций 1–4 приведет к прогрессирующему разрушению всей конструкции моста.

Также подберем сечения для выполнения проверки живучести. Были подобраны сечения для двух случаев: без учета разрушения опорного раскоса и с учетом. Повышение несущей способности пролетного строения, путем повышения площади сечений и добавлением дополнительных раскосов, для прохождения проверки на живучесть без учета выхода из строя опорного раскоса приведет к увеличению веса пролетного строения с 1 310 кН до 1 705,2 кН на 30,17 % (395,2 кН), с учетом выхода из строя опорного раскоса — с 1 310 кН до 1 916 кН на 46,26 % (606 кН).

Данные из расчетов были сведены в таблицу 3 в которой представлен процент повышения веса конструкции пролетного строения по сравнению с первоначальной конструкцией.

Таблица 3

**Процент повышения веса конструкции
для выполнения проверки на живучесть конструкции пролетного строения**

	Изначальная конструкция	Конструкция с дополнительными раскосами	
		1 проверка (исключение отдельных элементов)	2 проверка (исключение элементов всей секции)
Без учета выхода из строя опорных раскосов	21,80 %	13,30 %	30,17 %
С учетом выхода из строя опорных раскосов	48,72 %	44,35 %	46,26 %

Составлена авторами

Проверка живучести стала выполняться с добавлением дополнительных раскосов, которые повысили вес конструкции на 13 %, но, если предусматривать вариант выхода из работы раскосов совместно с дополнительными раскосами это потребует увлечения веса конструкции на 30,17 %. Таким образом, без учета выхода при проверке из работы опорных раскосов, повышение сечений элементов изначальной конструкции приведет к меньшему увеличению веса конструкции — на 21,8 %.

При учете выхода из работы опорных раскосов при проверке немного менее затратным вариантом является добавление дополнительных раскосов, что приведет к увеличению веса пролетного строения на 44,35 либо 46,26, в отличии 48,72 %, при увеличении площади изначальных сечений конструкции.

Важно заметить, что с дополнительными раскосами, для прохождения проверки живучести, требуется меньший процент увеличения веса.

Вывод

По результатам выполненных исследований можно сделать следующие основные выводы:

1. В отечественной нормативной документации по проектированию мостовых сооружений есть требование по предотвращению прогрессирующего разрушения (СП 35.13330.2011), в котором также в рекомендуемом приложении есть различные расчетные случаи проверки конструкций на живучесть.

2. Проведенное моделирование расчета на живучесть в соответствии с нормами конструкции пролетного строения железнодорожного моста показало, что проверка не выполняется. В связи с чем в статье были предложены 6 вариантов повышения несущей способности конструкции путем увеличения поперечных сечений и уменьшением свободной длины элементов для выполнения проверки живучести.

3. Сравнение предложенных вариантов увеличения несущей способности конструкции показало, что с добавлением дополнительных раскосов требуется меньшее увеличение веса всей конструкции, что будет более экономически и конструктивно целесообразно.

4. Важно отметить, что увеличение веса конструкции для недопущения прогрессирующего разрушения непосредственно влияет на общую стоимость строительства. Увеличение веса конструкции даже на 20 %, приведет не только к увеличению затрат на материалы на эти 20 %, но и к увеличению затрат на строительство, изменение остальных конструктивных элементов и технологию возведения, что в итоге может привести к существенному увеличению стоимости строительства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Реестр аварий зданий и сооружений 2001–2020 годов / К.И. Еремин, Н.А. Махутов, Г.А. Павлова, Н.А. Шишкина. — Москва, 2011. — 320 с. — Текст: непосредственный.
2. Безопасность эксплуатируемых зданий и сооружений: [монография] / под редакцией В.И. Теличенко, К.И. Еремина. — Москва, 2011. — 428 с. — Текст: непосредственный.
3. Енджиевский, Л.В. История аварий и катастроф: монография / Л.В. Енджиевский, А.В. Терешкова. — Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. — 440 с. — Текст: непосредственный.
4. Майстренко, И.Ю. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 1 / И.Ю. Майстренко, И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников [и др.] // Транспортные сооружения. — 2017. — Т 4. — № 4. — URL: <https://t-s.today/PDF/13TS417.pdf>. — DOI: 10.15862/13TS417. (дата обращения: 21.05.2024).
5. Овчинников, И.Г. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 2 / И.Г. Овчинников, И.И. Овчинников, И.Ю. Майстренко [и др.] // Транспортные сооружения. — 2017. — Т 4. — № 4. — URL: <https://t-s.today/PDF/14TS417.pdf>. — DOI: 10.15862/14TS417. (дата обращения: 21.05.2024).
6. Майстренко, И.Ю. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 3 / И.Ю. Майстренко, И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников [и др.] // Транспортные сооружения. — 2018. — Т 5. — № 1. — URL: <https://t-s.today/PDF/08SATS118.pdf>. — DOI: 10.15862/08SATS118. (дата обращения: 21.05.2024).
7. Овчинников, И.И. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 4 / И.И. Овчинников, И.Ю. Майстренко, И.Г. Овчинников [и др.] // Транспортные сооружения. — 2018. — Т 5. — № 1. — URL: <https://t-s.today/PDF/05SATS118.pdf>. — DOI: 10.15862/05SATS118. (дата обращения: 21.05.2024).

8. Быкова, Н.М. Повышение «живучести» железнодорожного моста с повреждением элемента фермы / Н.М. Быкова, Т.М. Баранов, А.А. Забияка // Транспортные сооружения. — 2024. — Т 11. — № 1. — URL: <https://t-s.today/PDF/05SATS124.pdf>. — DOI: 10.15862/05SATS124. (дата обращения: 22.05.2024).
9. Адылов, А.М. Обеспечение достоверности результатов компьютерного моделирования поведения мостовых конструкций / А.М. Адылов, И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников [и др.] // Транспортные сооружения. — 2019. — Т 6. — № 3. — URL: <https://t-s.today/PDF/32SATS319.pdf>. — DOI: 10.15862/32SATS319. (дата обращения: 22.05.2024).
10. Колесников, В.Д. Методы усиления металлических конструкций уменьшением расчетной длины сжатых элементов / В.Д. Колесников. — Текст: непосредственный // Молодой ученый. — 2020. — № 21(311). — С. 503–510. — URL: <https://moluch.ru/archive/311/70417/> (дата обращения: 18.05.2024).

Sokolova Olga Yaroslavovna

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia
E-mail: sokolova.olya2000@mail.ru

Ovchinnikov Ilya Igorevich

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia
Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia
E-mail: bridgeart@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8370-297X>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=177132

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57191523104>

Marinin Alexander Nikolaevich

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia
Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia
E-mail: a-marinin@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1848-730X>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=625628

Modeling of progressive failure of a railroad bridge structure

Abstract. Bridge structures are an important part of the transportation infrastructure of every region. Accidents on bridges can lead to injuries and fatalities, to serious damage to infrastructure, which will require significant costs for restoration, to interruptions in road traffic, disruption and transport infrastructure, which will have a negative impact on the economy of the region, and can also adversely affect the work of enterprises and organizations. Accidents of transportation structures remain insufficiently researched. The article considers the terms progressive destruction and survivability, as well as the requirements of regulatory documentation in terms of protection against progressive destruction. The article simulates the progressive failure of the span of a railway bridge in order to study its non-design behavior in various situations. For this purpose, a model was created in the midas Civil software package, the correctness of the span structure creation was checked by checking the first and second groups of limit states, and then a survivability test was carried out in accordance with the requirements of regulatory documentation. After analyzing the performance of the structure during the survivability test, the authors proposed options to increase the load-bearing capacity of the structure and its elements in various ways, by increasing the cross-sectional area of the elements and reducing the design length of the compressed elements.

Keywords: bridge accidents; progressive failure; survivability; modeling; calculation; bridge structure; railway bridge; truss; span; survivability calculation