

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

2022, №1, Том 9 / 2022, N 1, Vol. 9 <https://t-s.today/issue-1-2022.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/07SATS122.pdf>

DOI: 10.15862/07SATS122 (<https://doi.org/10.15862/07SATS122>)

Экспериментальное исследование режима работы гибких штыревых упоров сталежелезобетонного пролётного строения существующего автодорожного моста

Козак Н.В.

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Козак Николай Викторович, e-mail: kozak.spbgasu@gmail.com

Аннотация. В статье автором опубликованы результаты натурного эксперимента на существующем сталежелезобетонном автодорожном мосту, проведенного с целью определения фактических параметров режима работы элементов объединения — гибких штыревых упоров. Данная работы была проведена в рамках диссертационного исследования автора в области совершенствования способов проверки выносливости элементов объединения сталежелезобетонных пролетных строений и является развитием проведенного ранее комплексного сравнительного анализа существующих моделей проверок выносливости. В статье дано подробное описание условий проведения и методов двухстадийного эксперимента, включающего в себя краткосрочную и долгосрочную части, а также детальное описание использованных алгоритмов обработки экспериментальных данных по каждому из этапов. По итогам проведения краткосрочной части эксперимента при сравнении с результатами конечно-элементного моделирования работы упоров подтверждена возможность применения существующих расчетных моделей для описания фактической работы модели. Также в рамках

краткосрочной части по результатам проведенных динамических испытаний с проездом подвижной нагрузки через порожек выявлено наличие значительной динамической составляющей компоненты возникающих усилий в упорах объединения. В ходе проведения второй долгосрочной части эксперимента производилась непрерывная запись напряжений в элементах объединения от прохождения по мосту регулируемой транспортной потока. В статье приведены как непосредственные данные съемок (тензограммы), так и результаты их дальнейшей обработки с точки зрения анализа накопления повреждений; также проведено сравнение величин накапливаемых повреждений от фактических транспортных нагрузок с ожидаемым величинами при расчете по некоторым нормам проектирования. В заключении статьи сформированы промежуточные выводы по результатам эксперимента и обозначены направления для будущей работы в рамках данного исследования.

Ключевые слова: мост; сталежелезобетон; элемент объединения; гибкий штыревой упор; упор; динамика; долговечность; выносливость; усталость; ресурс; повреждения

Operating regime investigational study of steel-reinforced concrete superstructure flexible pin stops of the existing road bridge

Nikolai V. Kozak

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia

Corresponding author: Nikolai V. Kozak, e-mail: kozak.spbgasu@gmail.com

Abstract. In the article, the author published the full-scale experiment results on an existing steel-reinforced concrete road bridge, carried out to determine the actual parameters of the operation regime of the interconnection elements — flexible pin stops. This work was carried out as part of the author's dissertation research in the field of improving methods for testing the elements' endurance of the steel-reinforced concrete superstructures interconnection and is a development of the previously conducted comprehensive comparative analysis of existing models for testing endurance. The article gives a detailed description of the conditions for conducting and methods of a two-stage experiment, which includes short-term and long-term parts, as well as a detailed description used for processing experimental data for each of the stages. Based on the results of the experiment's short-term part, when compared with the results of finite element modeling of the operation of the stops, the possibility of using existing computational models to describe the actual model operation was confirmed. Also, within the framework

of the short-term part, according to the conducted dynamic tests results with the moving load passage through the threshold, the presence of a significant dynamic component of the resulting forces in the interconnection stops was revealed. During the second long-term part of the experiment, a continuous recording of stresses in the interconnection elements from the passage of an unregulated traffic flow over the bridge was made. The article presents both direct survey data (tensograms) and the results of their further processing in terms of damage accumulation analysis; also, the accumulated damages values from actual traffic loads are compared with the expected values in the calculation according to some design standards. Intermediate conclusions based on the experiment results are formed and directions for future work within the scope of this study are indicated.

Keywords: bridge; steel-reinforced concrete; interconnection element; flexible pin stop; stop; dynamics; durability; endurance; fatigue; service life; damage

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

Одной из важнейших отличительных особенностей условий работы мостовых конструкций является нестационарный динамический характер их режима нагруженности. Транспортные нагрузки перемещаются вдоль моста с определенной и не всегда постоянной скоростью, распределение транспорта в поперечном направлении характеризуется в том числе случайными величинами, а возможные неровности покрытия значительно увеличивают динамическую составляющую воздействия нагрузки. При подобных режимах эксплуатации, включающих большое количество циклов изменения усилий и напряжений в элементах, все более актуальными являются вопросы характера работы конструкций во времени в целом и выносливости конструкций в частности [1; 2].

Применительно к широко распространённым ныне сталежелезобетонным пролетным строениям одним из наименее изученных остается вопрос фактической работы и выносливости узлов объединения в целом и, в частности, гибких штыревых упоров как их наиболее распространенного типа [3; 4].

В большинстве проводимых исследований по вопросу изучения деталей работы гибких штыревых упоров рассматриваются лабораторные условия (классические push-out тесты), которые в полной мере не моделируют фактические режимы работы с многоосными загрузками и значительными динамическими эффектами [5–10].

Ранее в рамках выполняемого автором диссертационного исследования был проведен анализ существующих методов проверки выносливости в целом и выносливости упоров в частности [11]. Результаты анализа нормативов проектирования 8 стран и регионов показали наличие как минимум 3 значительно различающихся моделей проверки выносливости, при этом модель, используемая в России, не предполагает проверки выносливости элементов объединения. Модели проверки выносливости упоров, используемые в Еврокоде, украинских, австралийских, китайских и японских нормативах являются частным случаем общей модели проверки выносливости и используют в качестве основы полученные экспериментальным путём кривые усталости для элементов объединения. Модели проверки упоров, применяемые в США и Канаде, значительно отличаются от соответствующих общих моделей проверок и базируются на результатах фундаментальных исследований Фишера 1966 года [12].

Для возможности использования результатов лабораторных исследований при оценке выносливости работы конструкции под реальными нагрузками во всех моделях используются различные системы корректирующих приближенных коэффициентов, учитывающих интенсивность транспортного потока, динамические эффекты, особенности режима эксплуатации [4].

Проведенный ранее теоретический анализ применения 4 различных методик проверки выносливости упоров показал значительное расхождение в результатах оценки (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Результаты применения 4 различных методик проверки выносливости
Results of 4 different endurance test methods

Нормативный документ (Страна) Regulatory document (Country)	Использование выносливости при числе загрузок (% от возможной нагрузки) Endurance usage with the number of load cases (% of possible load)		
	N = 2E+6	N = 4E+7	N = 1E+8
СП (Россия) Saint Petersburg (Russia)	21 %	33 %	72 %
Еврокод Eurocode	46 %	67 %	100 %
AASHTO LRFD (США) AASHTO LRFD (USA)	20 %	76 %	85 %
ДБН (Украина) A building code (Ukraine)	27 %	39 %	43 %

Составлена автором / Compiled by the author

В рамках проводимых исследований по совершенствованию российской методики автором предлагается использование модифицированной структуры модели проверки по формуле 1, включающей в себя различные корректирующие коэффициенты, подобные используемым в Еврокодах:

$$\tau_{max}^N \leq \gamma'_w(\Delta\tau_c) \cdot R_y \cdot (m) \quad (1)$$

где в правой части: $\gamma'_w(\Delta\tau_c)$ — коэффициент понижения расчетного сопротивления для проверки выносливости, связанный с применяемыми в EN предельными размахами напряжений $\Delta\tau_c$; R_y — расчетное сопротивление материала; (m) — комплексные коэффициенты условий; в левой части: $\tau_{max}^N = \tau_{max} \cdot k_N$ — максимальные касательные напряжения от проектных нагрузок, приведенные к проектному числу циклов нагружения.

Для дальнейшей проработки параметров предлагаемой модели проверки было принято решение провести полноразмерный эксперимент на реальном автодорожном мосту. Перед экспериментом были поставлены следующие задачи:

1. Определение фактических напряжений в гибких штыревых упорах, возникающих при воздействии на них подвижных нагрузок с целью верификации используемых расчетных моделей определения усилий на элементы объединения.
2. Определение показателей фактического динамического коэффициента усилий, воздействующих на элементы объединения, наиболее подверженные динамическим нагрузкам (для дальнейшего обсуждения необходимости применения динамического коэффициента к проектным нагрузкам).
3. Определение фактических повреждений, получаемых гибкими штыревыми упорами за период эксплуатации моста (для дальнейшего обсуждения предлагаемых к использованию моделей нагрузки).

Методы

Methods

С учетом поставленных задач был запланирован двухэтапный эксперимент. Первый этап (краткосрочный) включал в себя запись данных при проезде по мосту транспортной нагрузки с известными характеристиками; второй этап (долгосрочный) включал в себя запись данных фактического транспортного потока.

В качестве контролируемых элементов эксперимента были выбраны гибкие штыревые упоры конструкций сталежелезобетонного (СТЖБ), пролетного строения, расположенные над крайней опорой вблизи деформационного шва, как подверженные наибольшему динамическому воздействию.

Объект эксперимента

Experiment subject

Для проведения эксперимента был выбран автодорожный мост через реку Вуокса в Ленинградской области (Россия), в 200 километрах от Санкт-Петербурга. По мосту проходит федеральная дорога А-121, соединяющая г. Выборг (Россия) и г. Иматра (Финляндия). С 2019 года мост находится в состоянии капитального ремонта с полной заменой конструкций пролетного строения. В 2021 году на мосту было открыто движение транзитного транспорта. Общий вид моста представлен на рисунке 1.

Пролетное строение моста — неразрезное СТЖБ, перекрывающее 5 пролетов над рекой; береговые участки перекрыты железобетонными сборными пролетными строениями. В поперечном сечении СТЖБ пролетное строение состоит из 4 стальных двутавровых балок (сталь 15ХСНД), объединенных поперечными стальными связями и монолитной железобетонной плитой (бетон В40). Стальные балки и железобетонная плита объединены между собой посредством гибких штыревых упоров высотой 0,18 м и диаметром 0.022 м. Общая схема конструкции приведена на рисунке 2а.

В качестве основных исследуемых элементов были выбраны центральные упоры № 2 на балке В2 над опорой № 1 (рис. 2б).

Оборудование для эксперимента

Experimental facilities

Для изучения напряженного состояния (НДС) гибких штыревых упоров была применена цифровая система динамических измерений, разработанная коллективом авторов на основе сертифицированных компонентов (рис. 3а, 3б).

В процессе устройства железобетонной плиты пролетного строения на гибкие штыревые упоры были установлены тензодатчики (рис. 4а, 4б) по предварительно разработанной схеме (рис. 5а). Всего было установлено 20 контрольных точек для настоящих и последующих исследований работы упоров надопорного узла.



Рисунок 1. Общий вид моста (фотография сделана автором)

Figure 1. General view of the bridge (photo taken by the author)

Для задачи защиты тензорезисторов от внешних воздействий в процессе строительства была применена многослойная система защиты, включающая в себя заливку эпоксидной смолой в гибкой пластиковой опалубке и герметизацию с использованием битумных клейких лент.

Использованные тензорезисторы расположены на главной контролируемой детали с двух противоположенных сторон (точка 1 — со стороны предполагаемого растяжения, точка 2 — со стороны сжатия).

Для контроля адекватности используемых расчетных моделей фактической работе конструкции были использованы тензодатчики сдвиговых напряжений на стенках балок В1 и В2 над опорой 1 и тензодатчики нормальных напряжений по нижнему поясу балок В1 и В2 в середине пролета. Схема используемых датчиков приведена на рисунке 5б.

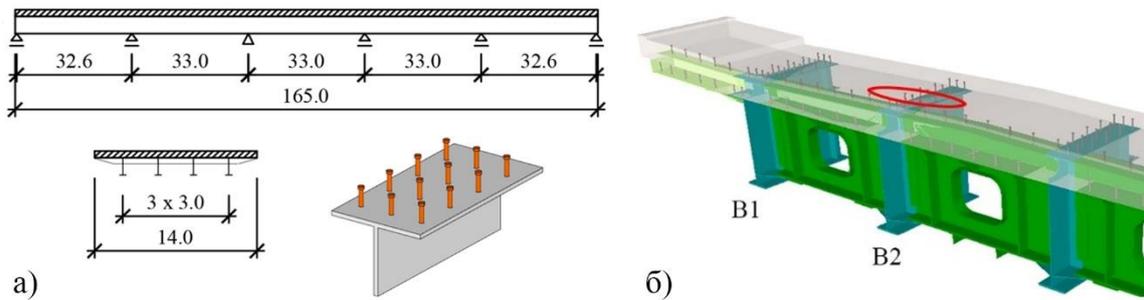


Рисунок 2. Общая схема пролетного строения (а) и узел пролетного строения с выделением группы контролируемых деталей (б) (разработан автором)

Figure 2. The superstructure general scheme (a) and the node of the superstructure with the selection of a controlled parts group (b) (developed by the author)

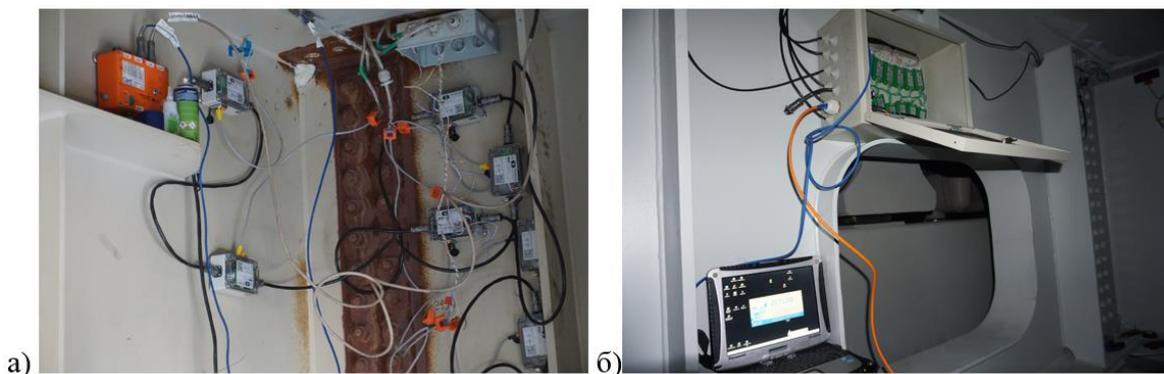


Рисунок 3. Цифровая измерительная система, общий вид. Подключение для детального мониторинга одной группы упоров на первом этапе (а) и для одновременного мониторинга нескольких групп упоров на втором этапе (б) (фотографии сделаны автором)

Figure 3. Digital measuring system, general view. Connection for detailed monitoring of one stops group at the first stage (a) and for simultaneous monitoring of several stops groups at the second stage (b) (photos made by the author)

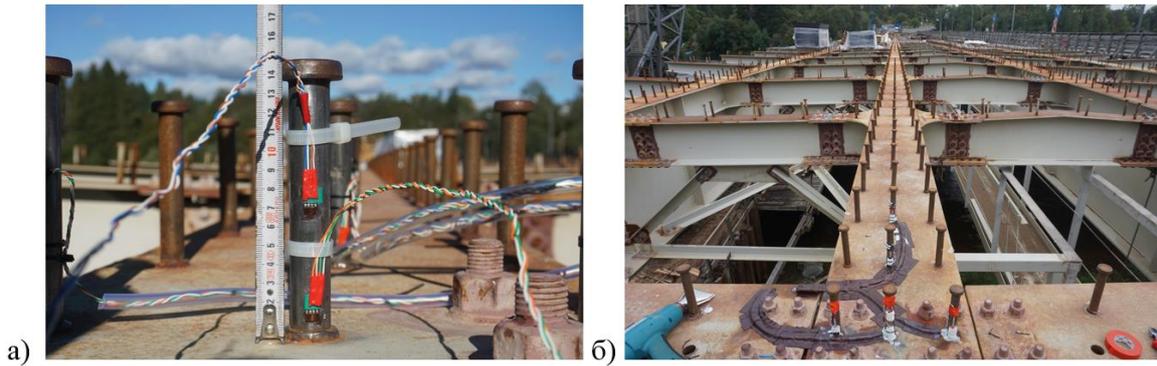


Рисунок 4. Тензорезисторы, установленные на гибкие штыревые упоры (фотографии сделаны автором)

Figure 4. Tensoresistor mounted on flexible pin stops (photos taken by the author)

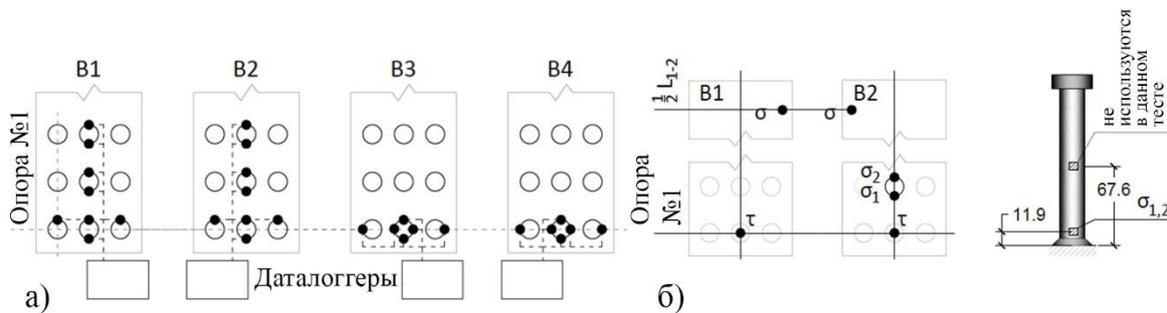


Рисунок 5. Принципиальная схема установки всех тензорезисторов в плане (а) и схема установки тензорезисторов, используемых в текущем эксперименте (б) (разработан автором)

Figure 5. Installation layout diagram of all strain gauges in plan (a) and installation diagram of strain gauges used in the current experiment (b) (developed by the author)

Условия проведения эксперимента

Experiment conditions

1 этап эксперимента / 1 stage of the experiment.

Первый этап эксперимента был проведен летом 2021 г. Движение по мосту было полностью перекрыто; в качестве транспортной нагрузки был использован подъемный кран на автомобильном шасси КАМАЗ общей массой 21 тонна. Нагрузка перемещалась по заранее разработанной схеме в прямом и обратном направлениях с различными положениями по ширине моста и скоростями (рис. 6а). Для контроля скорости подвижной нагрузки использовались GPS-маячки (рис. 6б).

2 этап эксперимента / 2 stage of the experiment.

На втором этапе запись данных производилась непрерывно в течении двух периодов: с 18:00 02.09.2021 по 17:59 04.09.2021 (2 суток) и с 00:00 02.12.2021 по 23:59 06.12.2021 (5 суток). В течении первого периода на мосту было открыто транзитное рабочее движение по левой стороне (реверсивное движение с интервалом пропуска 2 минуты), в течении второго периода мост функционировал в стандартном режиме. Данные по фактической интенсивности движения в период 02.09.2021 18:00–19:00 приведены в таблице 2.



Рисунок 6. Проход одиночной нагрузки (а) и инструмент мониторинга скорости движения нагрузки (б) (фотография и снимок экрана сделаны автором)

Figure 6. Single load passage (a) and load speed monitoring tool (b) (photo and screenshot by the author)

Таблица 2 / Table 2

**Интенсивность движения
Traffic intensity**

Тип т/с Vehicle type	На Иматру To Imatra	На Выборг To Vyborg	Всего Total
Легковой автомобиль Passenger vehicle	72	74	146
Одиночный грузовик Single-unit truck	6	2	8
Тягач с полуприцепом Articulated vehicle	24	12	36
Автобус Bus	1	1	2

Составлена автором / Compiled by the author

Обработка экспериментальных данных

Experimental data processing

Полученные посредством тензодатчиков в периоды 1 и 2 этапов результаты эксперимента были записаны цифровой измерительной системой и затем подвергнуты обработке.

Выделение компонента напряжений от воздействия сжимающих сил / Stress component separation from the impact of the compressive forces.

Ввиду того, что конструкция упора подвержена воздействиям не только изгиба и поперечной силы, но и нормальной силы, возникающей при ударе колес транспортных средств о расположенный вблизи деформационный шов, полученные экспериментальные данные для точек 1, 2 были обработаны для определения указанных компонентов напряжений друг от друга на основании следующих формул (2):

$$T = \frac{\sigma_1 - \sigma_2'}{k_{1T} - k_{2T}}; \sigma_N = \sigma_1 - T \cdot k_{1T}; N = \sigma_N \cdot F = \sigma_N \cdot 0.38 \quad (2)$$

где σ_{Ti} — компонента напряжения от воздействия поперечной силы и изгиба; σ_N — компонента напряжения от воздействия продольной силы (рис. 7); σ_1 — измеренное напряжение в точке 1; σ_2' — измеренное напряжение в точке 2 с учетом автоматизированной синхронизации записей по контрольным событиям; N , T — продольная и сдвигающая силы соответственно; k_{1T} , k_{2T} , k_{T1} и k_{T2} — коэффициенты перерасчета в соответствии с таблицей 3; F — площадь сечения упора.

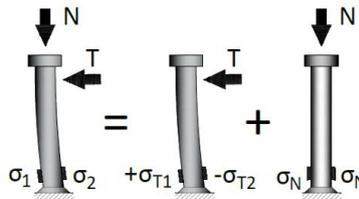


Рисунок 7. Составляющие напряженного состояния упор (разработан автором)

Figure 7. Stop's stress state components (developed by the author)

Спектральный анализ нагруженности элементов / Elements loading spectral analysis.

Количественные данные о величинах размахов и фактической частоте возникающих циклов изменения напряжений были получены на основе проведения спектрального анализа с использованием классического метода дождя (rainflow method) [13]. Для фильтрации шумов и малых колебаний применено условие игнорирования колебаний с амплитудой менее 1 МПа, а для оптимизации процессов вычисления значимыми приняты наибольшие 500 размахов (группировка с чувствительностью 0.1 МПа). Для наглядности итоговые результаты анализа сгруппированы по интервалам в 0.5 МПа.

Анализ повреждений упоров / Stop's damage analysis.

Анализ повреждений производился по классической теории линейного накопления повреждений Пальмгрена-Майнера. Принята стандартная модель кривой усталости для проверки касательных

напряжений в гибких штыревых упорах по Еврокоду (без зоны неограниченной выносливости, коэффициент наклона $m = 8$, $\Delta\tau_c = 90$ МПа). Для перехода от экспериментальных данных к касательным напряжениям использовались коэффициенты перерасчета (табл. 3).

Конечно-элементное моделирование

Finite element modeling

Сопоставление полученных экспериментальных данных и результатов расчета с использованием существующих нормативных моделей произведено по разработанным конечно-элементным моделям двух уровней.

Модель пролетного строения / Superstructure model.

Конечно-элементная модель СТЖБ пролетного строения (модель макроуровня) была использована для получения расчетных усилий сдвига на элементы объединения от различных подвижных нагрузок. Модель реализована в SOFiSTiK 2020 с применением смешанного плитно-стержневого метода (рис. 8а), узлы объединения при этом были заданы как податливые связи [14–16]. При построении модели использованы следующие гипотезы:

1. Податливость связей объединения считается постоянной (жесткость связи $K = 200000$ кН/м) и не зависит от уровня нагружения элемента объединения.
2. Влияние трения по контакту плита-балка не учитывается.

Для нагружения модели подвижными и проектными нагрузками использованы поверхности влияния и разработанный скрипт пакетной обработки данных.

Модель узла объединения / Interconnection Node Model.

Так как по технологическим причинам тензодатчики на упорах были установлены выше на высоту сварного шва, для получения контрольных величин использованы результаты конечно-элементного моделирования.

Для получения данных по распределению напряжений в теле упора разработана модель в ANSYS 2019 (модель микроуровня), моделирующая сдвиг плиты относительно верхнего пояса балки (рис. 8б) [17; 18].

Для учета пластичности бетона была использована нелинейная модель Друкера-Прагера [19; 20]. Проведены ступенчатые загрузки возрастающей нагрузкой от 1 кН до 1000 кН с последующей обработкой данных.

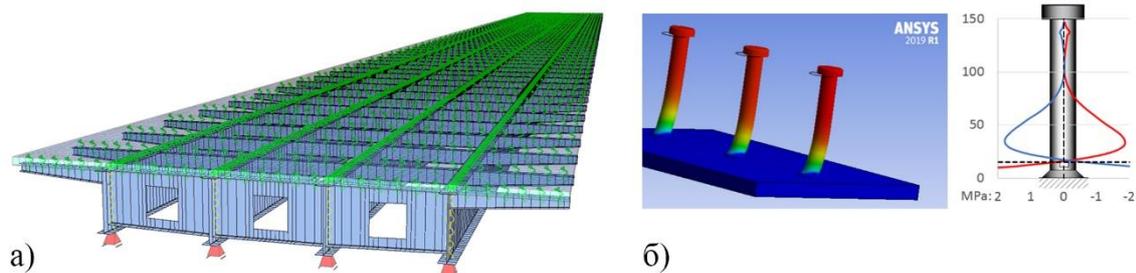


Рисунок 8. КЭ-модель пролетного строения (а) и КЭ-модель узла объединения и характерные эпюры напряжений (б) (разработан автором)

Figure 8. Finite Element Model of the span (a) and Finite Element Model of the interconnection node and characteristic stress strain diagrams (b) (developed by the author)

При построении и анализе модели узла объединения использованы следующие гипотезы:

1. Модель плиты принята как бетонное тело без стержней арматуры.
2. Модуль упругости бетона принят соответствующим проектному ($E = 34500$ МПа).
3. Численные соотношения для напряжений принимались с усреднением на характерных участках вне зон низких и высоких сдвиговых усилий.

В таблице 3 приведены полученные в результате анализа численные соотношения между прогнозируемыми напряжениями в точках установки датчиков (точки 1, 2), с максимальными нормальными, сдвиговыми напряжениями и усилиями сдвига.

Таблица 3 / Table 3

**Соотношения между сдвигающей силой и напряжениями
Relationships between shear force and stresses**

№ точки Point number	σ_i [МПа] σ_i [MPa]	τ_{max} [МПа] τ_{max} [MPa]	T [кН] T [kN]
1	-0.51	6.02	1.00
2	+0.14		

Составлена автором / Compiled by the author

Сравнение данных

Data comparison

Для анализа полученных экспериментальных данных в качестве сравнительной базы использовались результаты расчета конечно-элементных моделей.

Работа конструкции под единичной подвижной нагрузкой / Structure operation under a single moving load.

Для анализа работы элементов объединения под воздействием единичной испытательной нагрузки был произведен квазистатический расчет величины сдвигового усилия на элемент объединения. Поверхность влияния для контролируемого элемента объединения была загружена проездом модели испытательной нагрузки (грузовик КАМАЗ) с заданной скоростью.

Для возможности сравнения с экспериментальными данными полученные диаграммы сдвиговых усилий $T(t)$ были преобразованы в диаграммы $\sigma(t)$ нормальных напряжений в соответствующих точках с использованием коэффициентов перерасчета.

Работа конструкции под нагрузкой от транспортного потока / Structure operation under the load from the traffic flow.

Для сопоставления экспериментальных расчетных величин повреждений элементов объединения с расчетными величинами повреждений от различных нормативных проектных нагрузок был проведен следующий анализ. Путем загрузки поверхностей влияния соответствующими расчетными нормативными нагрузками получены диаграммы $T(t)$ для одного цикла загрузений по нормам проектирования России, Украины, США и по Еврокодам. Характеристики использованных нагрузок приведены в таблице 4.

Таблица 4 / Table 4

**Список проектных нагрузок
Design loads list**

Нормативный документ (страна) Regulatory document (country)	Модель нагрузки Load Model	Нагрузка Load	Дин.коэфф. 1+ μ Dynamic factor 1+ μ	Другие коэфф. Other coefficients
СП (Россия) Saint Petersburg (Russia)	A14	2 полосы x 2x 140kN	1.00	1.07
Еврокод Eurocode	FLM3	4x 120kN	1.25	1.25
AASHTO LRFD (США) AASHTO LRFD (USA)	Fatigue Truck	2x 164kN + 41kN	1.00	0.75
ДБН (Украина) A building code (Ukraine)	A15	2x 150kN	1.00	0.85

Составлена автором / Compiled by the author

Так как проверку выносливости упоров в существующих методиках предлагается выполнять по максимальным касательным напряжениям, диаграммы $T(t)$ были преобразованы в диаграммы $\tau_{max}(t)$ путем использования рекомендованной в нормативах формулы (3).

$$\tau_{max}(t) = \frac{4}{3} \cdot F^{-1} \cdot T(t) \quad (3)$$

где $F = 0.00038 \text{ m}^2$ — площадь поперечного сечения упора.

Для полученных зависимостей $\tau_{max}(t)$ выполнен спектральный анализ с использованием метода дождя, а затем по классической теории линейного накопления повреждений Пальмгрена-Майнера определены расчетные повреждения за один цикл нагрузки.

Определение ресурса элементов объединения по выносливости / Determining the elements resource of the association by endurance.

Ожидаемая величина истощения ресурса элементов объединения рассчитана исходя их расчетного числа циклов по формуле (4)

$$R_{SL} = D_L \cdot N_{L,SL} \cdot 100\% \quad (4)$$

где D_L — повреждение за 1 цикл нагружения; $N_{L,SL}$ — количество циклов нагружения за проектный срок эксплуатации.

Расчётное число циклов, при этом, в соответствии с существующими методиками, было принято равным расчетному числу при проходе тяжелой нагрузки.

В первом приближении в рамках данного эксперимента расчетное число проходов тяжелой нагрузки было подсчитано по данным почасовых наблюдений на объекте (данные приведены в таблице 2); модель расчета приведена в формуле 5:

$$N_{L,SL} = N_{1h} \cdot 24 \cdot 365 \cdot N_y = 26280000 \quad (5)$$

где $N_{1h} = 30$ — среднее количество циклов за 1 час; $N_y = 100$ — проектный срок службы моста.

Результаты

Results

Результаты 1 этапа испытаний

Results of the 1st testing stage

На рисунке 9а приведена характерная диаграмма фактических нормальных напряжений $\sigma_1(t)$ в точке 1 при проезде испытательной нагрузки со скоростью 20 км/ч на 1 этапе испытаний, на рисунке 9б — соответствующая диаграмма для $\sigma_2(t)$. На рисунке 9в приведена диаграмма рассчитанной нормальный силы $N(t)$. На рисунке 9г показана диаграмма рассчитанной фактической сдвиговой силы $T(t)$ (красный график) и

диаграмма расчетной сдвиговой силы $T_{des}(t)$ (синий график), полученная по результатам конечно-элементного анализа.

На рисунке 9д приведены характерные диаграммы сдвиговых сил $T_T(t)$ для скоростей 10–60 км/ч. Фактические динамические коэффициенты $(1+\mu)$, полученный в ходе обработки данных диаграмм рисунка 9д, приведены в таблице 5.

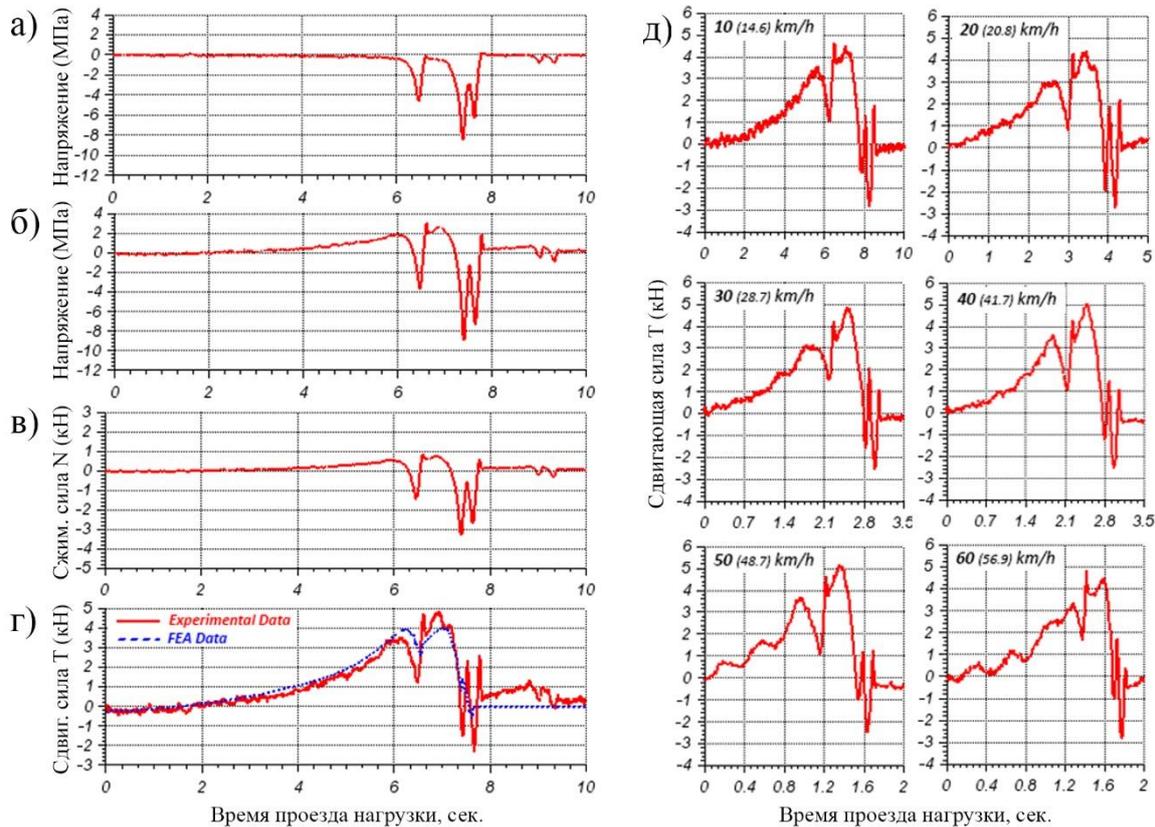


Рисунок 9. Характерных диаграммы напряжений и усилий на упоры (а–г) и Характерных диаграммы сдвигающих сил в зависимости от скорости движения (д) (разработан автором)

Figure 9. Characteristic diagrams of stresses and strain on stops (a–d) and Characteristic diagrams of shear forces depending on the movement speed (d) (developed by the author)

Таблица 5 / Table 5

**Фактические динамические коэффициенты
 Actual dynamic coefficients**

Скорость [км/ч] Speed [km/h]	14.6	20.8	28.7	41.7	48.7	56.9
$(1+\mu)$ для T_T $(1+\mu)$ for T_T	1.06	1.28	1.33	1.17	1.22	1.33

Составлена автором / Compiled by the author

Результаты 2 этапа испытаний

Results of the 2nd stage of testing

На рисунке 10а приведены диаграммы фактических нормальных напряжений $\sigma_1(t)$ в точке 1 от транспортного потока за период с 0:00 03.09.2021 до 0:00 04.09.2021; на рисунке 10б приведена аналогичная диаграмма для нормальных напряжений $\sigma_2(t)$ в точке 2. На рисунке 10в приведена диаграмма рассчитанной фактической сдвигающей силы $T(t)$ за этот же период.

На рисунке 11 приведены диаграммы фактических напряжений $\sigma_1(t)$ от транспортного потока за период с 00:00 02.12.2021 по 23:59 06.12.2021 (а — за первые двое суток, б — за вторые двое суток, в — за последние сутки), на рисунке 12 — аналогичные диаграммы для сдвигающей силы. На рисунке 13 приведены ежедневные спектрограммы рассчитанных размахов сдвигающей силы T потока за период с 00:00 02.12.2021 по 23:59 06.12.2021.

На рисунке 14 приведены гистограммы зависимости величины накопления повреждений от времени суток за периоды с 00:00 02.09.2021 по 23:59 02.09.2021 и с 00:00 02.12.2021 по 23:59 06.12.2021 с выделением пиковых часов: на рисунке 14а — за каждые сутки, на рисунке 14б — средние значения.

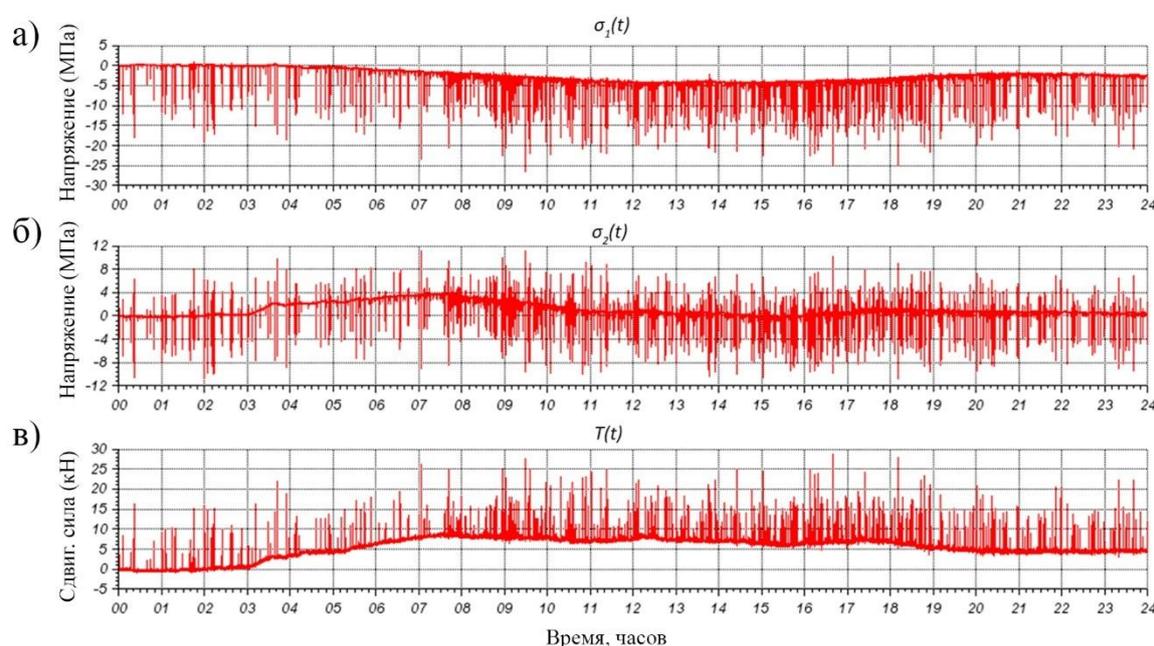


Рисунок 10. Диаграмма фактических напряжений и сдвигающих сил за сутки (разработан автором)

Figure 10. Diagram of actual stresses and shear forces per day (developed by the author)

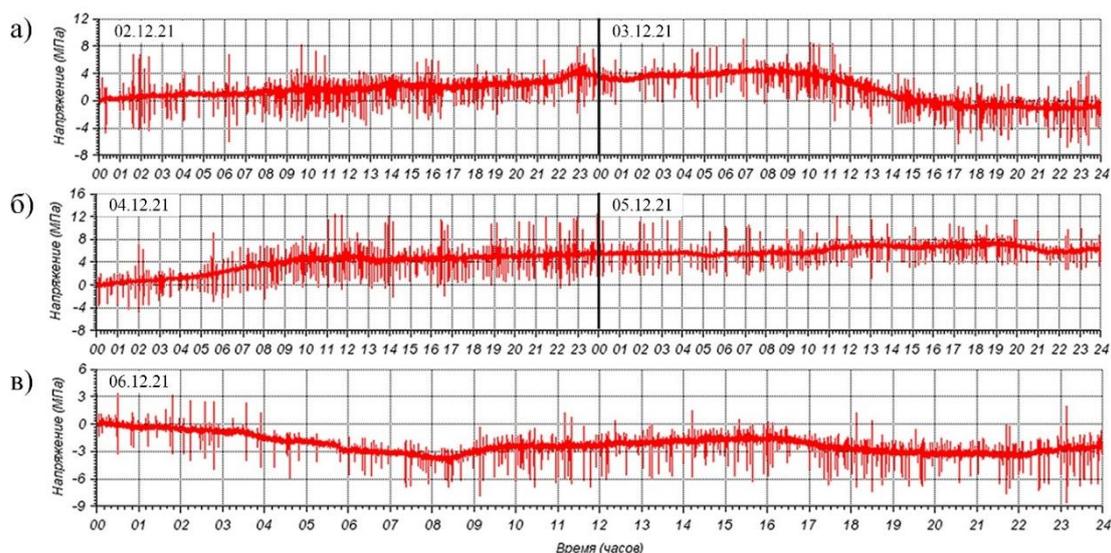


Рисунок 11. Диаграммы фактических напряжений (разработан автором)

Figure 11. Diagrams of actual stresses (developed by the author)

Среднее накопленное повреждение за данный временной интервал (24 часа) составило 0.0000029, максимальное значение — 0.0000042, дисперсия величины — 0.0000011. Наибольшее ожидаемое значение величины повреждения по верхней границе трех среднеквадратичных отклонений (с вероятностью 99 %), таким образом, составляет 0.0000062.

В таблице 6 приведены результаты сравнения величин накопленных повреждений за 1 сутки и соответствующих показателей ожидаемого истощения ресурса элементов объединения на основании экспериментальных данных (по среднему значению) и при использовании проектных нагрузок из методик ряда стран.

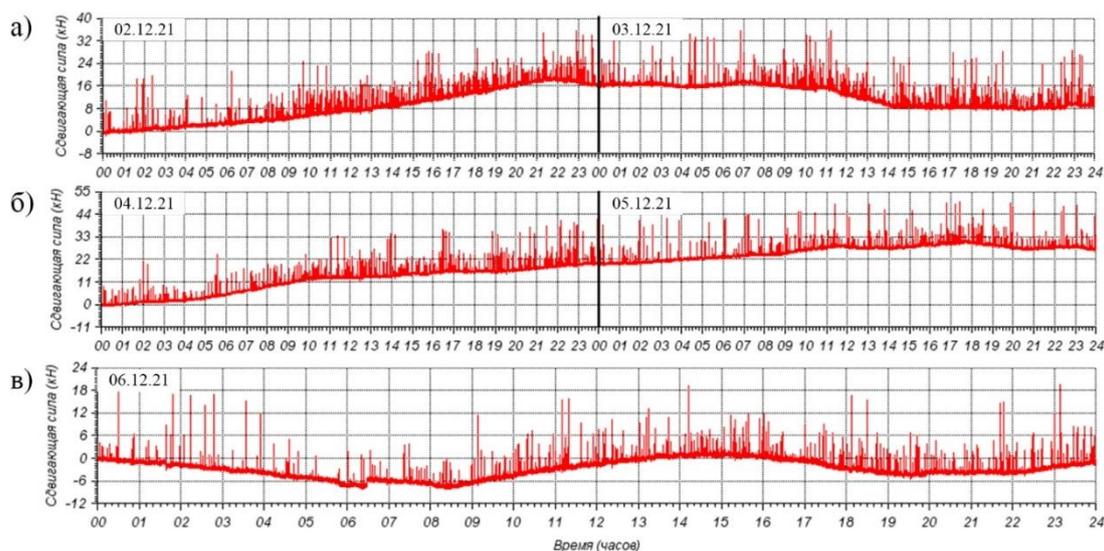


Рисунок 12. Диаграммы фактических сдвигающих сил (разработан автором)

Figure 12. Diagrams of actual shear forces (designed by the author)

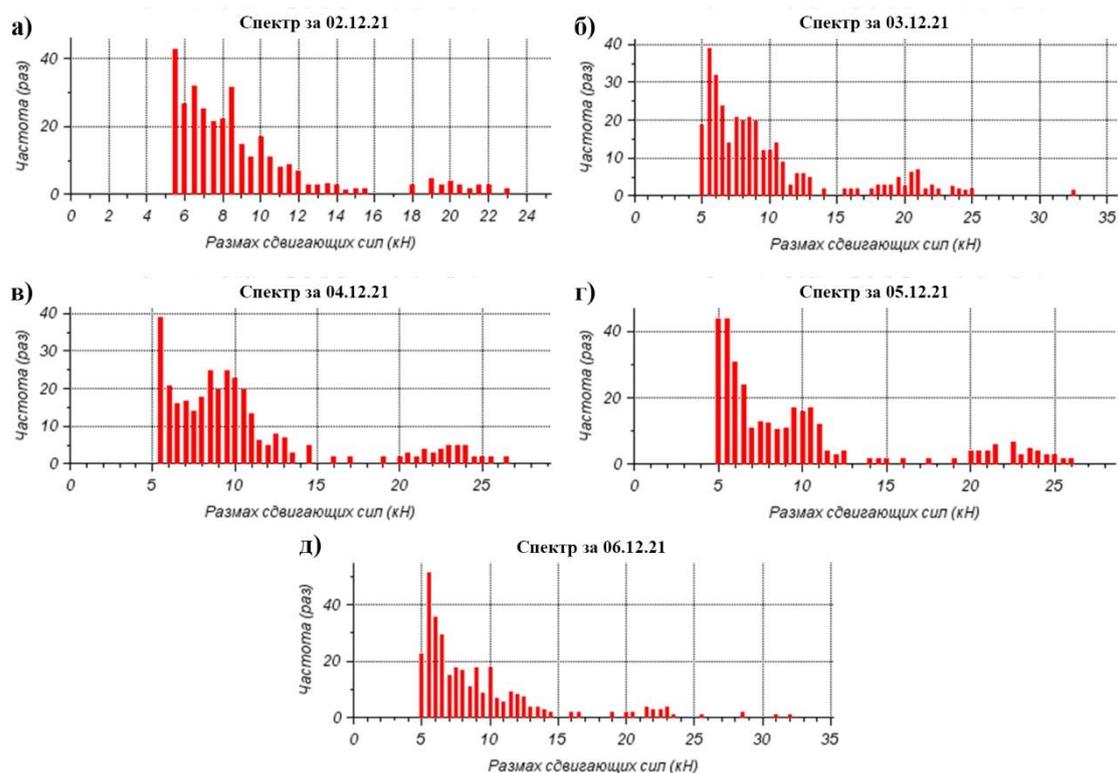


Рисунок 13. Спектрограммы размахов сдвигающих сил по суткам (разработан автором)

Figure 13. Spectrograms of the shear forces ranges by day (developed by the author)

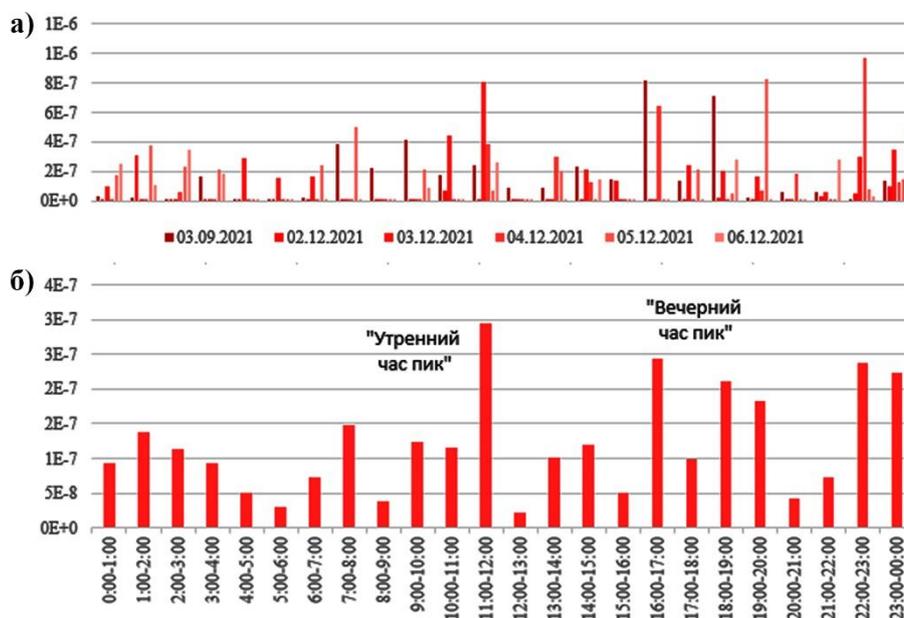


Рисунок 14. Гистограммы накопления повреждения в течении суток: значения величин по суткам (а) и средние величины (б) (разработан автором)

Figure 14. Histograms of damage accumulation during the day: daily values (a) and average values (b) (developed by the author)

Таблица 6 / Table 6

**Накопленные повреждения и ожидаемое
исчерпание ресурса по некоторым методикам**
Accumulated damage and expected resource exhaustion by some methods

Нормативный документ (страна) Regulatory document (country)	D_{day} Повреждения за день D_{day} Damage per day	R_{SL} Ожидаемое исчерпание ресурса R_{SL} Expected resource exhaustion
Экспериментальные данные Experimental data	2.9E-06	10.65 %
СП (Россия) Saint Petersburg (Russia)	2.0E-06	7.32 %
Еврокод Eurocode	1.3E-05	47.45 %
AASHTO LRFD (США) AASHTO LRFD (USA)	1.9E-07	0.69 %
ДБН (Украина) A building code (Ukraine)	8.6E-09	0.03 %

Составлена автором / Compiled by the author

Анализ результатов

Results analysis

Полученные в ходе проведенного эксперимента результаты проанализированы применительно к задачам, поставленным в начале данного этапа исследований:

Модель работы элементов объединения

The operation model of interconnection elements

Результаты 1 этапа эксперимента подтвердили, что гибкие штыревые упоры, расположенные в надпорной области вблизи деформационного шва, работают как на сдвиг, так и на сжатие-растяжение. Полученные в ходе эксперимента величины сдвиговых усилий близки к расчетным значениям (соответствие 90–105 %), что свидетельствует о приемлемой точности моделей описания работы сталежелезобетонных конструкций (модели пролетного строения с упругими связями). При этом, опираясь на предыдущие исследования, необходимо заметить, что используемые в большинстве нормативных документов рекомендации по нахождению величины сдвига упоров через поперечную силу для объединенного сечения приводят к незначительно завышенным значениям в сравнении с использованными моделями с упругими связями.

Динамические эффекты

Dynamic effects

Сравнительный анализ исследованных нормативных методик проверок определения выносливости упоров вблизи деформационных швов доказывает, что динамический коэффициент большей единицы может быть принят только при проверке их по Еврокодам: $(1+\mu) = 1.25$; в остальных методиках величина динамического коэффициента (по умолчанию при проверках выносливости) принимается равной единице.

Анализ экспериментальных результатов фактической нагрузки испытанного моста показал наличие значимых динамических эффектов при проезде каждой тяжелой транспортной нагрузки. Рассчитанный фактический динамический коэффициент для сдвиговых усилий находится в диапазоне $(1+\mu) = 1.06 - 1.33$ и зависит от скорости прохождения нагрузки (рис. 15).

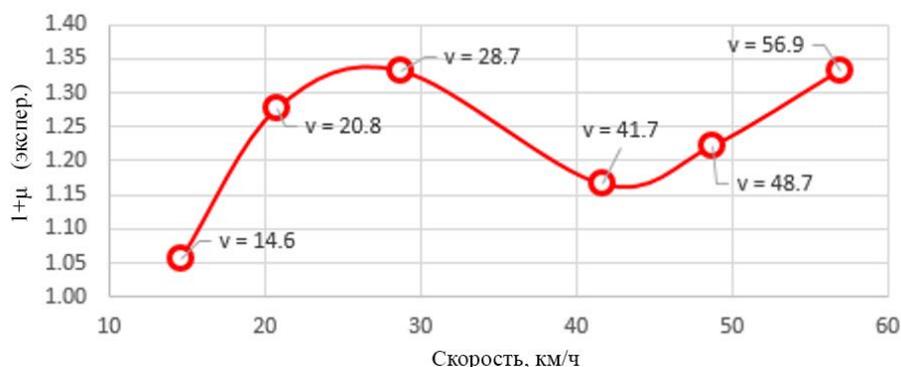


Рисунок 15. Зависимость между фактическим динамическим коэффициентом и скоростью транспорта (разработан автором)

Figure 15. Dependence between the actual dynamic factor and the speed of transport (developed by the author)

Полученные данные свидетельствуют о статистической регулярности повышения величины сдвиговых усилий на элементы объединения. Авторам представляется целесообразным использование существующей модели Еврокода с применением повышенного динамического коэффициента при определении расчетной нагрузки для элементов объединения на участках повышенного динамического воздействия (на конструкциях пролетного строения в надпорных зонах, у деформационных швов).

Результаты непрерывного мониторинга

Results of continuous monitoring

Полученные в результате непрерывной записи данные о напряжениях в гибких штыревых упорах позволяют проанализировать фактический режим их работы. На суточных диаграммах отчетливо видны всплески напряжений в момент проезда тяжелых нагрузок (тягачей с полуприцепами, одиночных грузовиков, автобусов), легкие же нагрузки практически не оставляют следов. Также по диаграммам заметны интервалы часов-пик (8:00–11:00 и 16:00–19:00) с повышенной частотой прохождения нагрузок. С помощью спектрального анализа было выявлено, что за сутки происходит порядка 700 и более циклов колебаний (рис. 10). Данные величины близки к фактической интенсивности движения тяжелых нагрузок за сутки $N_{\text{fact}} = 730$ (данные по фактической общей интенсивности с учетом состава движения указаны в таблице 2). Таким образом, для гибких штыревых упоров при определении выносливости необходимо рассматривать каждую проходящую тяжелую нагрузку.

В ходе проведенных теоретических исследований показателей остаточного ресурса гибких штыревых упоров при воздействии фактических и ряда нормативных нагрузок был получен широкий диапазон значений — от близких к нулю для нагрузок по стандартам AASHTO LRFD до 47.45 % — при применении модели Еврокода; работа фактических нагрузок при этом характеризуется показателем остаточного ресурса 10.65 %. Наиболее близкой по значению рассматриваемого показателя остаточного ресурса является стандартная нагрузка A14 российских норм проектирования (7.32 %).

Важно отметить, что для моделей временных нагрузок по AASHTO LRFD, СП и DBN получены меньшие значения показателей ресурса, чем для случая воздействия фактических транспортных нагрузок, что свидетельствует о чрезмерной «мягкости» перечисленных моделей расчета.

Замечание к качеству расчетных моделей

Remarks on the quality of computational models

Следует отметить, что полученные результаты получены в условиях применения расчетных моделей с рядом допущений (гипотезы о постоянной жёсткости связей для модели макроуровня, гипотезы о модели неизменности качества бетона, упрощенности метода обработки результатов для модели микроуровня и гипотезы о распределении напряжений в упорах).

На дальнейших этапах исследования предусмотрена возможность перехода к более общим условиям при уточненных границах вводимых допущений.

Заключение

Conclusion

Полномасштабный эксперимент, проведенный автором экспериментально-теоретические работы, позволили получить актуальные данные о работе гибких штыревых упоров СТЖБ пролетных строений мостов от воздействия реальных транспортных нагрузок. Полученные результаты позволили верифицировать используемые в практике методы конечно-элементного моделирования работы упоров объединения.

Анализ полученных данных позволяет выявить наличие и влияние на ресурс конструкции пролетного строения значимого динамического воздействия компонента в виде сдвиговых усилий, прикладываемых к элементам объединения на участках воздействия на конструкцию пролетного строения повышенной динамической нагрузки. Автор обосновывается необходимость применения повышенного коэффициента при определении нагрузки и расчетных ресурсов элементов.

Результаты анализа непрерывно записанных данных о напряженном состоянии упоров при воздействии на них проходящего транспортного потока позволили произвести сопоставление фактических нагрузок с существующими нормативными данными по критериям получаемых повреждений и определения их ресурса по выносливости.

На дальнейших этапах экспериментально-теоретических исследований автором предусмотрены уточнения используемых гипотез и методик, а также увеличение объемов статистических данных исследований по другим схемам мостов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Быстров, В.А. Проблемы обоснования режимов фактической динамической нагруженности и ресурса долговечности конструкций сталежелезобетонных автодорожных и городских мостов / В.А. Быстров, Н.В. Козак, Д.А. Ярошутин. — DOI <https://doi.org/10.15862/06SATS419> // Транспортные сооружения. — 2019. — Т.6. — № 4. — С. 06SATS419. — URL: <https://t-s.today/06SATS419.html> (дата обращения: 10.12.2021).

2. **Быстров, В.А.** Динамическая нагруженность и определение ресурса долговечности элементов конструкций сталежелезобетонных и стальных автодорожных и городских мостов / В.А. Быстров, Д.А. Ярошутин // Инновации и долговечность объектов транспортной инфраструктуры (материалы, конструкции, технологии): Материалы II Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 14 ноября 2019 года / Под редакцией М.П. Клековкиной. — Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2020. — С. 9–16. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42909844> (дата обращения: 10.12.2021).
3. **Imrose, B.M.** Various Types of Shear Connectors in Composite Structures: A Review / M.B. Imrose. — DOI <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1903.0563>. — Сеул: Chung-Ang University, 2015. — 5 с. — URL: https://www.researchgate.net/publication/275340980_Various_Types_of_Shear_Connectors_in_Composite_Structures_A_Review (дата обращения: 10.12.2021).
4. **Корнеев, М.М.** Сталежелезобетонные мосты. Теоретическое и практическое пособие по проектированию / М.М. Корнеев. — СПб.: ПГУПС, 2015. — 400 с.
5. **Johnson, R.P.** Resistance of stud shear connectors to fatigue / R.P. Johnson. — DOI [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(99\)00082-6](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(99)00082-6) // Journal of Constructional Steel Research. — 2000. — Т 56. — № 2. — С. 101–116. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143974X99000826> (дата обращения: 10.12.2021).
6. **Hassanin, A.I.** The Effects of Shear Stud Distribution on the Fatigue Behavior of Steel–Concrete Composite Beams / A.I. Hassanin, H.F. Shabaan, A.I. Elsheikh. — DOI <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04702-4> // Arabian Journal for Science and Engineering. — 2020. — Т 45. — № 10. — С. 8403–8426. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13369-020-04702-4> (дата обращения: 10.12.2021).
7. **Henderson, I.E.J.** Dynamic behaviour of steel-concrete composite beams with different types of shear connectors. Part I: Experimental study / I.E.J. Henderson, X.Q. Zhu, B. Uy, O. Mirza. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.08.035> // Engineering Structures. — 2015. — Т 130. — № 15. — С. 298–307. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029615005404> (дата обращения: 10.12.2021).
8. **Xu, C.** Fatigue Behavior of the Group Stud Shear Connectors in Steel-Concrete Composite Bridges / C. Xu, K. Sugiura, Q. Su. — DOI [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001261](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001261) // Journal of Bridge Engineering. — 2018. — Т 23. — № 8. — С. 4018055. — URL: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29BE.1943-5592.0001261> (дата обращения: 24.12.2021).
9. **Xue, W.** Static Behavior and Theoretical Model of Stud Shear Connectors / W. Xue, M. Ding, H. Wang, Z. Luo. — DOI [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(2008\)13:6\(623\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2008)13:6(623)) // Journal of Bridge Engineering. — 2008. — Т 13. — № 6. — С. 623–634. — URL: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%291084-0702%282008%2913%3A6%28623%29> (дата обращения: 24.12.2021).
10. **Wang, B.** Comparison of Static and Fatigue Behaviors between Stud and Perfobond Shear Connectors / B. Wang, Q. Huang, X. Liu. — DOI <https://doi.org/10.1007/s12205-018-1303-0> // KSCE Journal of Civil Engineering. — 2019. — Т 23. — № 1. — С. 217–227. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12205-018-1303-0> (дата обращения: 24.12.2021).
11. **Козак, Н.В.** Комплексный анализ существующих методик проверки выносливости гибких штыревых упоров сталежелезобетонных автодорожных мостов по нормативам ряда стран / Н. В. Козак. — DOI <https://doi.org/10.15862/10SATS221> // Транспортные сооружения. — 2021. — Т 8. — № 2. — С. 10SATS221. — URL: <https://t-s.today/10SATS221.html> (дата обращения: 24.12.2021).
12. **Slutter, R.G.** Fatigue Strength of Shear Connectors: Fritz Laboratory Reports / R.G. Slutter, J.W. Fisher. — Бетлехем, Пенсильвания: Lehigh University, 1966. — 44 с. — URL: https://digital.lib.lehigh.edu/fritz/pdf/316_2.pdf (дата обращения: 24.12.2021).
13. **Rédl, J.** Processing of stress dataset with rain-flow counting method / J. Rédl, D. Páleš. — DOI <https://doi.org/10.15414/meraa.2018.04.01.9-17> // Mathematics in Education, Research and Applications. — 2018. — Т 4. — № 1. — С. 9–17. — URL: <http://meraa.uniag.sk/docs/2018-01/redl-pales.html> (дата обращения: 24.12.2021).

14. **Козлов, А.В.** Расчет сталежелезобетонных мостов с учетом сдвига плиты по верхнему поясу балки / А.В. Козлов // Строительная механика и конструкции. — 2018. — № 4. — С. 64–71. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36545559> (дата обращения: 24.12.2021).
15. **Козак, Н.В.** Сравнительный анализ кэ моделей и оптимизация построения поверхностей влияния для элементов объединения сталежелезобетонных пролетных строений с использованием Sofistik и Python / Н.В. Козак. — DOI <https://doi.org/10.23968/BIMAC.2021.019> // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры: материалы IV Международной научно-практической конференции / под общ. ред. А.А. Семенова Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2021. — С. 148–156. — URL: https://doc.spbgasu.ru/ipo/BIM_2021.pdf (дата обращения: 24.12.2021).
16. **Sai Shraddha, P.** Study on Ductility Behavior of Different Types of Shear Connectors in Composite Structural Elements / P. Sai Shraddha, C. Sudha, M. Lakshmi pathy // International Journal of Civil Engineering and Technology. — 2017. — Т 8. — № 4. — С. 339–353. — URL: https://iaeme.com/Home/article_id/IJCIET_08_04_040 (дата обращения: 15.01.2022).
17. **Subramani, T.** Study on Behaviour of Stud Type Shear Connector in Composite Beam Using ANSYS / T. Subramani, A. Periasamy. — DOI <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.10.15629> // International Journal of Engineering & Technology. — 2018. — Т 7. — № 3.10. — С. 54–58. — URL: <https://www.sciencepubco.com/index.php/ijet/article/view/15629> (дата обращения: 15.01.2022).
18. **Pawar, V.S.** Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Column with ANSYS / V.S. Pawar, P.M. Pawar // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). — 2016. — Т 3. — № 6. — С. 2290–2296. — URL: <https://www.irjet.net/archives/V3/i6/IRJET-V3I6419.pdf> (дата обращения: 15.01.2022).
19. **López Cela, J.J.** Analysis of reinforced concrete structures subjected to dynamic loads with a viscoplastic Drucker-Prager model / J.J. López Cela. — DOI [https://doi.org/10.1016/S0307-904X\(98\)10050-1](https://doi.org/10.1016/S0307-904X(98)10050-1) // Applied Mathematical Modelling. — 1998. — Т 22. — № 7. — С. 495–515. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X98100501> (дата обращения: 15.01.2022).
20. **Ведерникова, А.А.** Численное моделирование трубобетонных элементов конструкций круглого сечения / А.А. Ведерникова. — DOI <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2018-15-6-14-18> // Вестник гражданских инженеров. — 2018. — № 6. — С. 14–18. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36853416> (дата обращения: 15.01.2022).

Сведения об авторах:

Козак Николай Викторович — аспирант, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: kozak.spbgasu@gmail.com
LinkedIn: www.linkedin.com/in/kozaknikolai/
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7707-4388>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1018546
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57207108767>

Статья получена: 04.02.2022. Принята к публикации: 05.06.2022. Опубликовано онлайн: 19.06.2022.

REFERENCES

1. Bystrov V.A., Kozak N.V., Yaroshutin D.A. Problems of real dynamically loading mode and structure fatigue mode determination in composite steel-concrete city and road bridges. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2019; 6(4): 06SATS419. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/06SATS419>.
2. Bystrov V.A., Yaroshutin D.A. Dynamic Loading and Residual Resource Determination of Steel and Steel-Concrete Structural Elements of Road and City Bridges. In: *[Innovations and durability of transport infrastructure facilities (materials, structures, technologies): Proceedings of the II All-Russian Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, November 14, 2019]*. Saint Petersburg: St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering; 2020. p. 9–16. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42909844> (accessed 10th December 2021). (In Russ., abstract in Eng.)

3. Imrose B. Muhit Various Types of Shear Connectors in Composite Structures: A Review. Seoul: Chung-Ang University; 2015. Available at: https://www.researchgate.net/publication/275340980_Various_Type_s_of_Shear_Connectors_in_Composite_Structures_A_Review (accessed 10th December 2021). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1903.0563>.
4. Korneyev M.M. Stalezhelezobetonnyye mosty. Teoreticheskoye i prakticheskoye posobiye po proyektirovaniyu [Steel-reinforced concrete bridges. Theoretical and practical design guide]. St. Petersburg: Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University; 2015. (In Russ.).
5. Johnson R.P. Resistance of stud shear connectors to fatigue. *Journal of Constructional Steel Research*. 2000; 56(2): 101–116. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(99\)00082-6](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(99)00082-6).
6. Hassanin A.I., Shabaan H.F., Elsheikh A.I. The Effects of Shear Stud Distribution on the Fatigue Behavior of Steel-Concrete Composite Beams. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2020; 45(10): 8403–8426. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04702-4>.
7. Henderson I.E.J., Zhu X.Q., Uy B., Mirza O. Dynamic behaviour of steel-concrete composite beams with different types of shear connectors. Part I: Experimental study. *Engineering Structures and Technologies*. 2015; 130(15): 298–307. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.08.035>.
8. Xu C., Sugiura K., Su Q. Fatigue Behavior of the Group Stud Shear Connectors in Steel-Concrete Composite Bridges. *Journal of Bridge Engineering*. 2018; 23(8): 4018055. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001261](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001261).
9. Xue W., Ding M., Wang H., Luo Z. Static Behavior and Theoretical Model of Stud Shear Connectors. *Journal of Bridge Engineering*. 2008; 13(6): 623–634. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(2008\)13:6\(623\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2008)13:6(623)).
10. Wang B., Huang Q., Liu X. Comparison of Static and Fatigue Behaviors between Stud and Perfobond Shear Connectors. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2019; 23(1): 217–227. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s12205-018-1303-0>.
11. Kozak N.V. Comprehensive analysis of existing endurance testing methods of flexible dowel crutches of composite reinforced concrete road bridges according to the standards of a number of countries. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2021; 8(2): 10SATS221. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/10SATS221>.
12. Slutter R.G., Fisher J.W. Fatigue Strength of Shear Connectors: Fritz Laboratory Reports. Bethlehem, Pennsylvania: Lehigh University; 1966. Available at: https://digital.lib.lehigh.edu/fritz/pdf/316_2.pdf (accessed 24th December 2021). (In Eng.).
13. Rédl J., Pálež D. Processing of stress dataset with rain-flow counting method. *Mathematics in Education, Research and Applications*. 2018; 4(1): 9–17. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15414/meraa.2018.04.01.9-17>.
14. Kozlov A.V. Structural Analysis of Steel- Concrete Composite Bridges with Account of Slab Shift on The Upper Beam Chord. *Structural mechanics and structures*. 2018; (4): 64–71. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36545559> (accessed 24th December 2021). (In Russ., abstract in Eng.).
15. Kozak N.V. Using Sofistik and Python to Carry Out Comparative Analysis of Fe Models and Optimize the Creation of Influence Surfaces for Shear Connectors in Composite Steel-Concrete Superstructures. In: *BIM IN CONSTRUCTION & ARCHITECTURE: Proceedings of IV International Conference*. Saint Petersburg: St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering; 2021. p. 148–156. Available at: https://doc.spbgasu.ru/ipo/BIM_2021.pdf (accessed 24th December 2021). (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.23968/BIMAC.2021.019>.
16. Sai Shraddha P., Sudha C., Lakshmipathy M. Study on Ductility Behavior of Different Types of Shear Connectors in Composite Structural Elements. *International Journal of Engineering and Technology*. 2017; 8(4): 339–353. Available at: https://iaeme.com/Home/article_id/IJCIET_08_04_040 (accessed 15th January 2022). (In Eng.).
17. Subramani T., Periasamy A. Study on Behaviour of Stud Type Shear Connector in Composite Beam Using ANSYS. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018; 7(3.10): 54–58. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.10.15629>.

18. Pawar V.S., Pawar P.M. Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Column with ANSYS. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2016; 3(6): 2290–2296. Available at: <https://www.irjet.net/archives/V3/i6/IRJET-V3I6419.pdf> (accessed 15th January 2022). (In Eng.).
 19. López Cela J.J. Analysis of reinforced concrete structures subjected to dynamic loads with a viscoplastic Drucker-Prager model. *Applied Mathematical Modelling*. 1998; 22(7): 495–515. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S0307-904X\(98\)10050-1](https://doi.org/10.1016/S0307-904X(98)10050-1).
 20. Vedernikova A.A. Numerical Simulation of Concrete Filled Steel Tube Columns with Circular Sections. *Bulletin of Civil Engineers*. 2018; (6): 14–18. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2018-15-6-14-18>.
-

Information about the authors:

Nikolai V. Kozak — Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia, e-mail: kozak.spbgasu@gmail.com

LinkedIn: www.linkedin.com/in/kozaknikolai/

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7707-4388>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1018546

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57207108767>

Submitted: 4th February 2022. Revised: 5th June 2022. Published online: 19th June 2022.