

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

2024, Том 11, № 3 / 2024, Vol. 11, Iss. 3 <https://t-s.today/issue-3-2024.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/16SATS324.pdf>

DOI: 10.15862/16SATS324 (<https://doi.org/10.15862/16SATS324>)

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

Обоснование необходимости внесения изменений в нормативную базу при расчете пролетных строений мостов на температурное климатическое воздействие

¹Гриднев С.Ю., ^{2,3}Овчинников И.Г., ⁴Подлесных И.С.

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия

²ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия

³ФГАОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

⁴ООО ГК «Вика Инжиниринг», Воронеж, Россия

Автор, ответственный за переписку: Гриднев Сергей Юрьевич, e-mail: gridnev_s_y@rambler.ru

Аннотация. Ставилась задача обоснования необходимости внесения изменений в существующую нормативную базу при расчете пролетных строений автодорожных мостов на температурное климатическое воздействие. Усовершенствована методика расчета пролетных строений, учитывающая реальное воздействие солнечной радиации. В рамках исследования построены уточненные конечно-элементные модели, которые учитывают изменение прочностных характеристик слоев дорожной одежды и сдвиговую жесткость между ними. Выполнены численные исследования по результатам измерений температурных полей элементов пролетного строения и их верификация с помощью инструментальных измерений. Сопоставлены полученные результаты с результатами по рекомендациям нормативных документов. Результаты сравнительных численных расчетов, полученные с использованием усовершенствованной методики, показали существенное

превышение внутренних усилий в пролетных строениях по сравнению с результатами по рекомендациям нормативных документов, а также выявили пространственный характер деформирования. Достоверность полученных результатов была подтверждена с помощью обширных натурных экспериментальных измерений на существующем объекте, что подчеркивает необходимость пересмотра и обновления действующих положений нормативных документов при расчете пролетных строений автодорожных мостов на температурное климатическое воздействие для повышения надежности, безопасности и долговечности мостовых конструкций.

Ключевые слова: пролетное строение; железобетонная плита; ортотропная плита; солнечная радиация; натурные измерения; температурные поля; пространственное деформирование

Justification for the necessity of amendments to the regulatory framework in the calculation of bridge span structures under thermal climate impact

¹Sergey Yu. Gridnev, ^{2,3}Igor G. Ovchinnikov, ⁴Igor S. Podlesnykh

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

³Ufa State Oil Technical University Russia, Ufa, Russia

⁴ООО ГК «Vika Inzhiniring», Voronezh, Russia

Corresponding author: Sergey Y. Gridnev, e-mail: gridnev_s_y@rambler.ru

Abstract. This paper aims to justify the necessity of amending the existing regulatory framework for calculating the span structures of road bridges concerning thermal climate impacts. The methodology for calculating span structures has been improved to account for the actual effects of solar radiation. Within the framework of this study, refined finite element models have been developed, which consider the changes in strength characteristics of pavement layers and the shear rigidity between them. Numerical investigations have been conducted based on measurements of temperature fields in the elements of the span structure, along with their verification through instrumental measurements. The results obtained have been compared with those derived from regulatory document recommendations. The comparative numerical calculations, utilizing the

enhanced methodology, revealed a significant increase in internal forces within span structures compared to the outcomes based on regulatory recommendations, as well as identified a spatial character of deformation. The validity of the obtained results was confirmed through extensive field experimental measurements at an existing structure, underscoring the need for a review and update of current regulatory provisions when calculating road bridge span structures under thermal climate impact to enhance the reliability, safety, and durability of bridge constructions.

Keywords: span structure; reinforced concrete slab; orthotropic slab; solar radiation; field measurements; temperature fields; spatial deformation

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

Согласно постановлению Правительства РФ от 30 мая 2017 г. «О нормативах финансовых затрат и Правилах расчета размера бюджетных ассигнований федерального бюджета на капитальный ремонт, ремонт и содержание автомобильных дорог федерального значения» межремонтные сроки эксплуатации федеральных автомобильных дорог I–IV категории увеличены до 12 лет, а капитального ремонта — до 24 лет.

Пролетные строения автодорожных мостов, как и большинство строительных конструкций, подвержены воздействию теплового потока солнечного излучения (принятого называть солнечной радиацией), которое оказывает существенное влияние на напряженно-деформированное состояние (НДС) сооружения. В процессе эксплуатации пролетные строения воспринимают суточные и годовые колебания температур, сопровождающиеся несимметричным нагревом элементов от воздействия солнечной радиации.

Объектами исследования являются пролетные строения с металлической ортотропной плитой проезжей части и сталежелезобетонные пролетные строения, которые оказываются чувствительными к несимметричным температурным воздействиям, так как являются внутренне многократно статически неопределимыми системами. Поэтому воздействие солнечной радиации может приводить к перераспределению внутренних усилий и напряжений в них в течение суток и года. При этом каждый тип пролетного строения характеризуется своими особенностями распределения НДС при неравномерном нагреве элементов.

К сожалению, действующие нормативные документы по расчету пролетных строений на тепловой поток солнечного излучения не учитывают реально имеющее место несимметричное воздействие солнечного излучения, а предполагают только симметричное воздействие на элементы сооружения. Так соответствии с СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы» (п. 6.27) для расчета перемещений в мостах всех систем при определении усилий во внешне статически неопределимых системах необходимо учитывать нормативное температурное климатическое воздействие путем дополнительного нагрева на 10°C освещенного солнцем поверхностного слоя толщиной 15 см (включая одежду ездового полотна). При расчете сталежелезобетонных пролетных строений необходимо учитывать неравномерное распределение температуры по сечению элементов от изменения температуры воздуха и солнечной радиации. Также в СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» (п. 13) отмечается, что требуется учитывать изменение во времени средней температуры и перепад температуры по сечению элемента.

Задачей исследования являлось совершенствование методики расчета НДС пролетных строений на воздействие солнечной радиации при неравномерном нагреве их конструктивных элементов с целью определения достоверного НДС и обоснования необходимости внесения изменений в нормативную базу при расчете пролетных строений мостов на температурное климатическое воздействие.

Анализ состояния проблемы

Analyzing the state of the problem

Изучению температурных воздействий на строительные конструкции посвящен ряд исследований Беляева Н.М., Богословского В.Н., Горещкого Л.И., Исаченко В.П., Кондратьева К.Я., Тихонова А.Н. и др. Актуальными являются и работы, в которых исследуется зависимость механических и температурных свойств материалов от температурных воздействий. Подобные работы были выполнены Н.Л. Охлоцковым, В.В. Петровым, М.С. Корнишиным, С.П. Тимошенко и др.

В работах [1–5] были предложены различные рекомендации по учету солнечной радиации и распределения температуры в элементах пролетного строения мостовых сооружений. В этих исследованиях отмечено, что солнечная радиация оказывает значительное влияние на НДС мостового сооружения и должна учитываться при расчете. В статье [6] проведен анализ распределения температуры в пролетном строении с использованием конечно-элементных (КЭ) программных комплексов, выделены наиболее неблагоприятные случаи воздействия солнечной радиации и изучено ее влияние на прочность конструкции. В работах [7; 8] отмечено, что постоянное воздействие температуры окружающей среды приводит к изменению механических свойств материалов слоев дорожной одежды из-за неравномерного прогрева по толщине многослойной конструкции и по площади поверхности. Приведен пример распределения теплового поля в слоях дорожной одежды и железобетонной плите. В целом, анализ научных исследований показывает, что изменяющиеся во времени температурные воздействия, зависящие, в том числе от температуры воздуха и положения солнца, оказывают влияние на НДС конструкций. При этом существующая методика расчета пролетных строений мостовых сооружений на температурные воздействия требует совершенствования и развития.

В работе [9] определено перераспределение внутренних усилий в элементах сталежелезобетонного пролетного строения и металлического пролетного строения с ортотропной плитой проезжей части при неравномерном изменении температурного поля от воздействия солнечной радиации. Статья [10] посвящена совершенствованию методов

расчёта пролётных строений мостов при неравномерном нагреве от воздействия солнечной радиации и учете сдвиговой жесткости в слоях дорожной одежды.

В работах [11; 12] проведено численное исследование НДС слоев дорожной одежды при действии на нее нагрузки и положительной температуры.

Предложенная методика позволяет проводить численный анализ НДС многослойной дорожной одежды мостового полотна при разных типах нагрузки, а также при равномерном и неравномерном распределении температуры по толщине.

Усовершенствованная методика расчета НДС пролётных строений

Improved methodology for calculating stressed-strained state of spanning structures

Усовершенствованная авторами методика расчета НДС пролётных строений мостовых сооружений на воздействие солнечной радиации представляет собой комплексный подход, включающий три ключевых раздела:

- натурные измерения температурных полей на поверхности элементов и определение характера их распределения в слоях дорожной одежды;
- численные исследования с помощью конечно-элементных моделей поведения пролётных строений для выполнения анализа особенностей воздействия солнечной радиации;
- верификация результатов расчетного анализа НДС пролётного строения путем сопоставления с результатами инструментальных измерений деформированного состояния главных балок пролётного строения для подтверждения достоверности и эффективности разработанной методики.

Блок-схема предлагаемой методики расчета НДС пролётных строений на воздействие солнечной радиации приведена на рисунке 1.

В ходе многочисленных натурных измерений получены температурные поля в пролётном строении в разное время года.

На каждом этапе выполнялись измерения температуры поверхности точек асфальтобетонного покрытия и главных балок при различных показателях температуры воздуха и углах падения солнечных лучей с помощью стационарно установленных контактных термометров и переносных бесконтактных пирометров.

Солнечная радиация учитывается как суммарный результат воздействия прямого солнечного излучения и рассеянной солнечной энергии, приводящего к изменению температуры поверхности элементов пролетного строения. Количество точек измерения выбрано исходя из нормативных рекомендаций для исследования тепловых процессов. Положение солнца определяется по азимуту и высоте солнца над горизонтом.

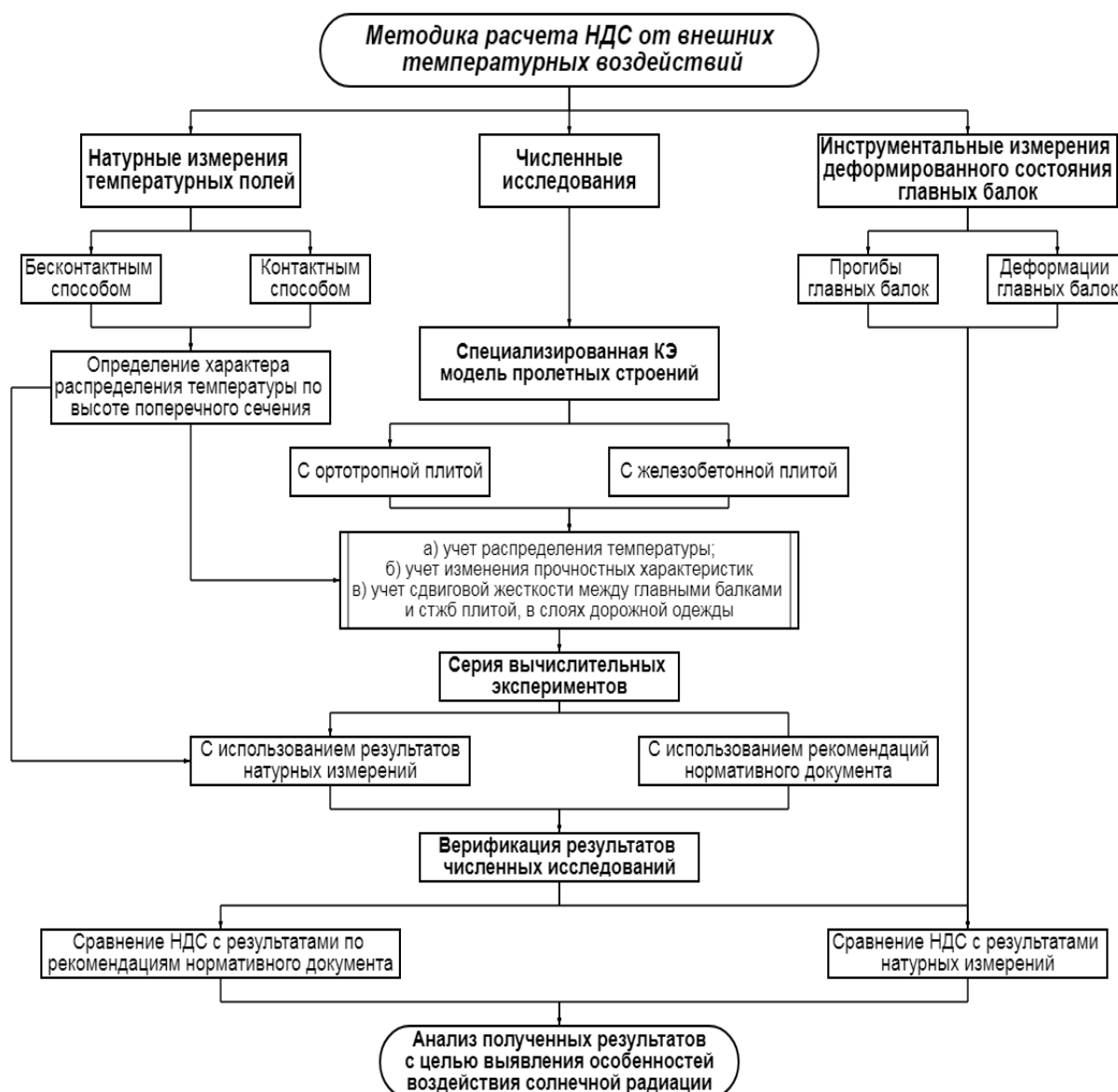


Рисунок 1. Блок-схема усовершенствованной методики расчета НДС на воздействие солнечной радиации (разработан авторами)

Figure 1. Block diagram of the improved methodology for calculating stressed-strained state on the impact of solar radiation (developed by the authors)

Максимальные значения температурных полей в элементах пролетного строения, полученные в результате натурных измерений в летнее время года, представлены на рисунке 2.

Кинетика изменения максимальной температуры главных балок и асфальтобетонного покрытия представлено на рисунке 3.

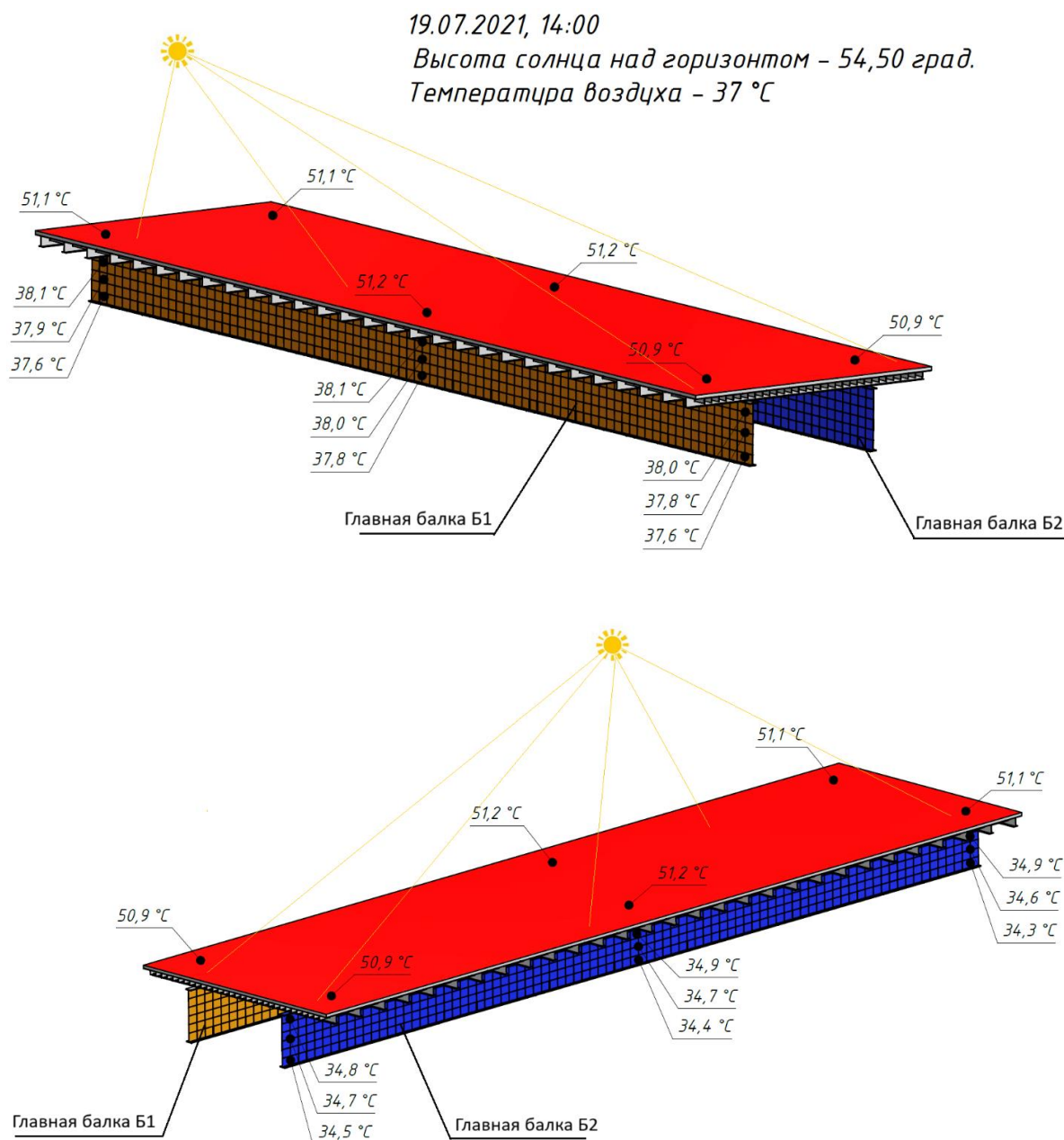


Рисунок 2. Максимальные значения температурных полей, полученных в результате натурных измерений в летнее время года (разработан авторами)

Figure 2. Maximum values of temperature fields obtained as a result of field measurements in summer time (developed by the authors)

Максимальная температура асфальтобетонного покрытия составила 51,2°C при температуре воздуха 36°C.

В этот же момент времени температура в главных балках Б1 и Б2 составила 38,1°C и 34,9°C соответственно.

Разница в температуре нагрева элементов пролетного строения в один и тот же момент времени достигла 31,8 %.

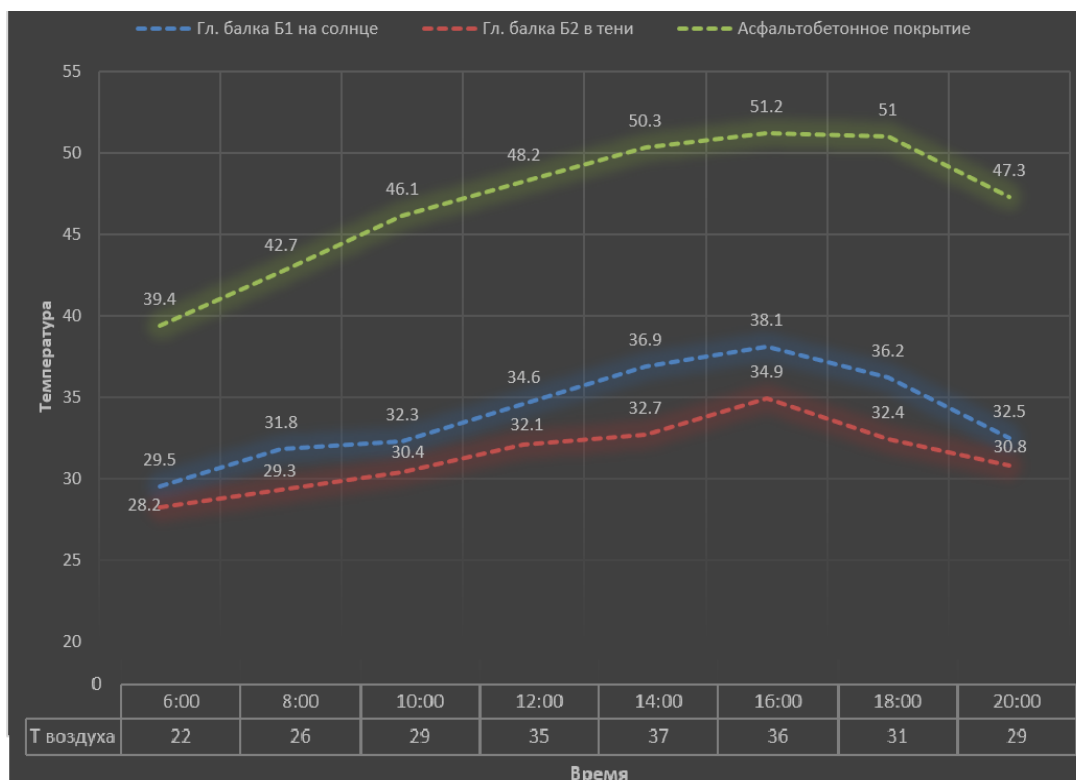


Рисунок 3. Изменение максимальной температуры элементов в течение дня (разработан авторами)

Figure 3. Variation of the maximum temperature of the elements during the day (developed by the authors)

Расчетная схема

Design diagram

Построены специализированные конечно-элементные модели двух типов пролетных строений в программном комплексе ЛИРА-САПР, позволяющие учитывать воздействие изменяющихся во времени температурных полей, полученных по результатам натурных измерений и уточненных в программном комплексе ELCUT. В принятой КЭ модели слои дорожной одежды учитываются как конструктивные элементы пролетного строения для адекватной оценки НДС с позиции сохранности асфальтобетона. Использование КЭ модели пролетного строения с дорожной одеждой позволяет определить достоверную картину распределения температурных полей, которую невозможно получить по рекомендациям нормативного документа. Для повышения достоверности определения НДС в элементах пролетного строения выполнен расчет с учетом сдвиговой жесткости между главными балками и железобетонной плитой проезжей части, а также в слоях дорожной одежды [13–16]. На рисунке 4 показан фрагмент КЭ модели пролетного строения с ортотропной плитой проезжей части.

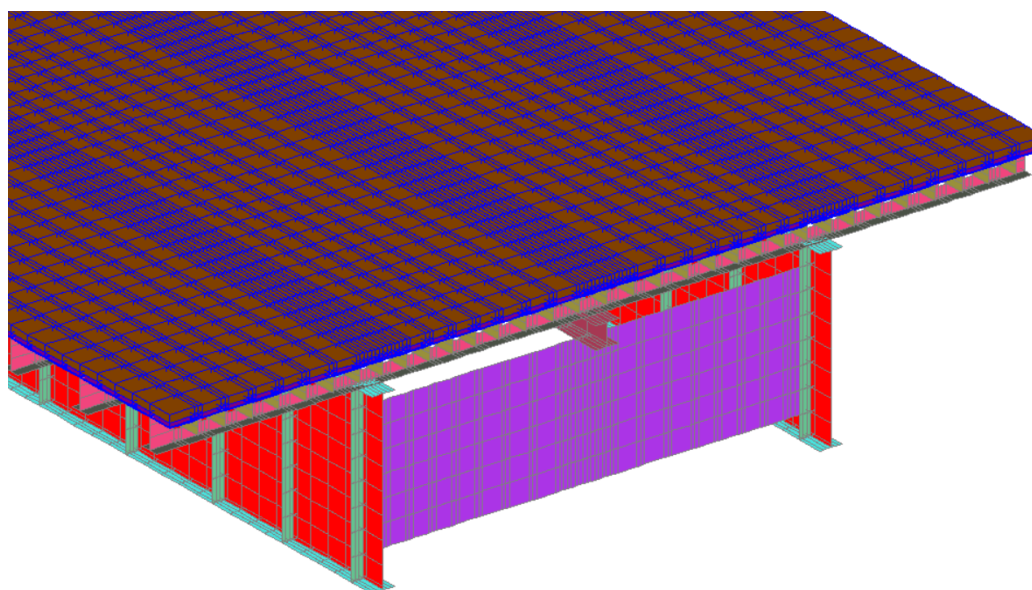


Рисунок 4. Фрагмент КЭ модели пролетного строения с ортотропной плитой проезжей части (разработан авторами)

Figure 4. Fragment of the finite-element model of the span structure with orthotropic plate (developed by the authors)

Результаты численных исследований

Numerical investigation results

Выполнена серия расчетов НДС пролетных строений на совместное действие временной автомобильной нагрузки и солнечной радиации, учитываемой на основе рекомендаций нормативного документа и натурных измерений.

Диаграммы изгибающих моментов в главных балках в разное время года только от временной нагрузки, от временной нагрузки и солнечной радиации по нормативному документу, от временной автомобильной нагрузки и солнечной радиации по данным натурных измерений представлены на рисунке 5.

Неравномерное воздействие солнечной радиации в течение дня и в течение года вызывает дополнительные напряжения и деформации в элементах пролетных строений. При расчете только на временную автомобильную нагрузку максимальные изгибающие моменты в главных балках Б1 и Б2 составили 6,11 Кн*м и 5,49 Кн*м соответственно. При дополнительной температурной нагрузке на основании рекомендаций нормативного документа изгибающие моменты в главных балках увеличились на 12,27 % и 12,2 % и составили 6,86 Кн*м и 6,16 Кн*м соответственно. Разница в максимальном изгибающем моменте между главными балками в одинаковый момент времени составила 14 %. Максимальные изгибающие моменты при расчете на основе натурных

измерений в жаркое время года превышают результаты на основании рекомендаций нормативного документа на 11,07 % для главной балки Б1 и на 8,44 % для главной балки Б2.

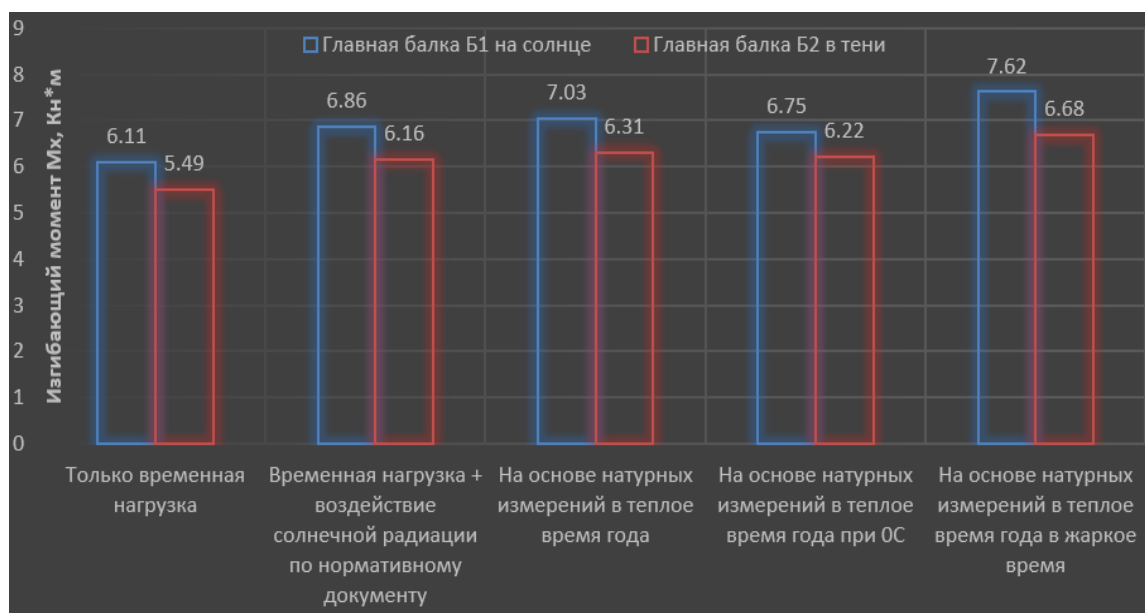


Рисунок 5. Максимальные изгибающие моменты M_x в главных балках от действия разных факторов (разработан авторами)

Figure 5. Maximum bending moments M_x in the main beams due to different factors (developed by the authors)

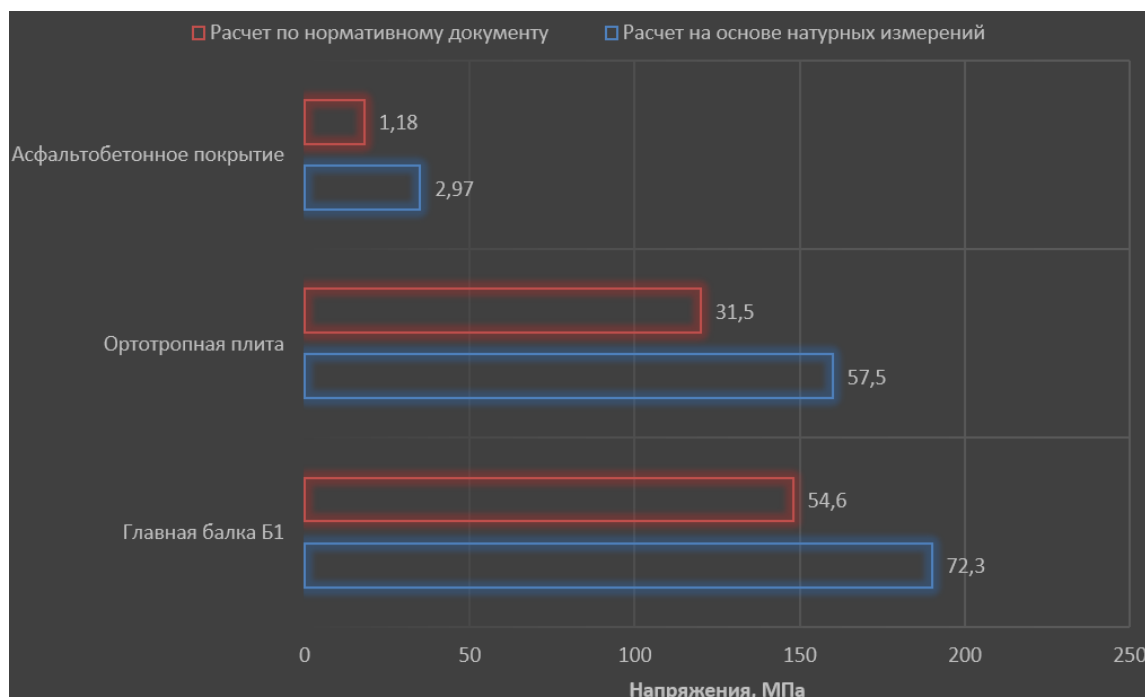


Рисунок 6. Сравнение максимальных напряжений в элементах пролетного строения, полученных по расчету СП и на основании натурных измерений (разработан авторами)

Figure 6. Comparison of the maximum stresses in the span structure elements obtained by the code of regulations calculation and on the basis of field measurements (developed by the authors)

Сравнение максимальных напряжений в асфальтобетонном покрытии, ортотропной плите проезжей части и главной балке Б1, полученных расчетом с использованием рекомендаций нормативного документа и на основании натурных измерений представлено на рисунке 6.

Напряжения во всех элементах от реального воздействия солнечной радиации значительно превосходят напряжения, полученные в результате расчета по нормативному документу. Результаты численных исследований показали, что методика расчета, рекомендуемая нормативными документами для учета воздействия солнечной радиации, в ряде случаев не позволяет получать достоверное НДС пролетного строения. Это доказывает, что выполненные исследования нуждаются в дальнейшем развитии и более глубоком изучении особенностей влияния температуры на пролетные строения мостов.

Верификация результатов определения НДС

Verification of the results of stressed-strained state determination

Для подтверждения достоверности проведенных численных расчетов НДС от воздействия солнечной радиации выполнена верификация результатов сравнением с данными, полученными при помощи инструментальных измерений на существующем объекте.

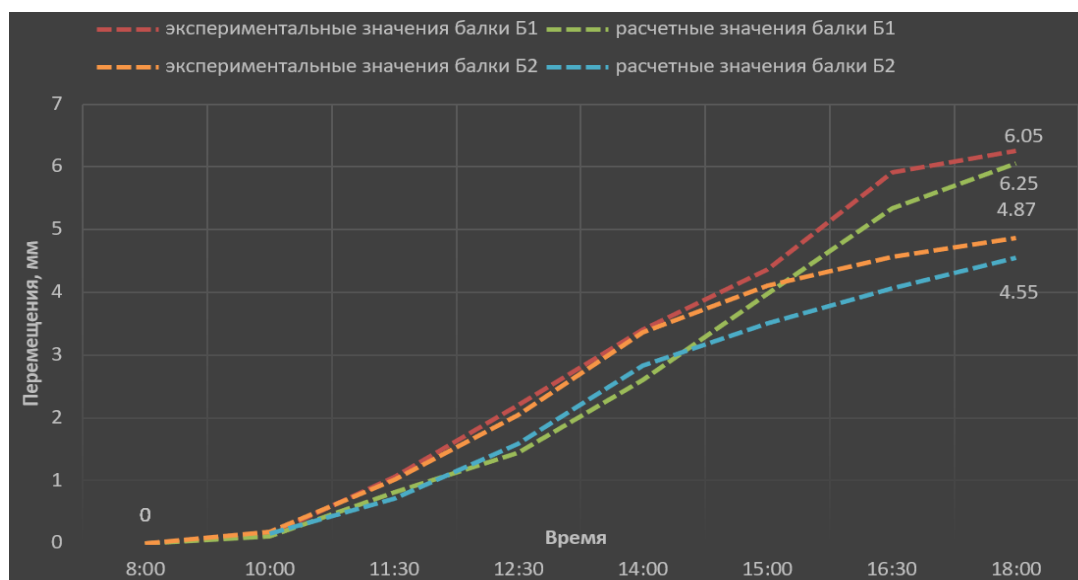


Рисунок 7. Графики изменения прогибов главных балок в течение дня, полученные расчетом и в ходе эксперимента (разработан авторами)

Figure 7. Graphs of the main beam deflections variation during the day, obtained by calculation and experiment (developed by the authors)

Измерены прогибы и деформации главных балок пролетного строения при воздействии солнечной радиации и определен характер изменения напряженно-деформированного состояния пролетного

строения в течение дня. Совмещенные графики перемещений главных балок, полученные по результатам инструментальных измерений и численных расчётов в среде КЭ комплекса показаны на рисунке 8. На обоих этапах измерения характер изменения перемещения главных балок подтверждается расчетом МКЭ, причем во всех случаях расчетные перемещения меньше экспериментальных.

В итоговой таблице 1 приведены основные результаты численных исследований. Показаны максимальные напряжения, изгибающие моменты в элементах пролетных строений. Наглядно продемонстрирован прирост напряжений при учете воздействия солнечной радиации совместно с временной нагрузкой. Также показана разница в результатах, полученных по рекомендациям СП и с использованием разработанной методики.

Таблица 1 / Table 1

Основные результаты численных исследований

Main results of numerical investigations

Тип нагрузки Type of load	Автомобильная нагрузка Automobile load	Автомобильная нагрузка + воздействие солнечной радиации по нормативному документу Automobile load + solar radiation exposure according to the normative document	Автомобильная нагрузка + учет воздействия солнечной радиации с использованием разработанной методики Automobile load + accounting of solar radiation impact using the developed methodology		
Элемент пролетного строения Element of span structure			Теплое время в диапазоне 17–24°C Warm time between 17–24°C	Холодное время в диапазоне -7–0°C Cold time -7–0°C	Жаркое время в диапазоне 27–37°C Hot time in the range of 27–37°C
Металлическое пролетное строение Metal spanning structure					
Главная балка на солнце (изгибающий момент Мх, кН*м) Main beam in the sun (bending moment Мх, kN*m)	6,11	6,86 (+12,3 %)	7,03	6,75	7,62 (+24,7 %)
Главная балка в тени (изгибающий момент Мх, кН*м) Main beam in the shade (bending moment Мх, kN*m)	5,49	6,16 (+12,2 %)	6,31	6,22	6,68 (+21,7 %)
Ортотропная плита (изгибающий момент Му, кН*м) Orthotropic plate (bending moment My, kN*m)	9,05	9,52 (+5,2 %)	9,39	8,41	10,8 (+19,3 %)
Верхний слой дорожной одежды — литой асфальтобетон (растягивающие напряжения σх, МПа) Top layer of pavement — cast asphalt concrete (tensile stress σx, MPa)	1,02	1,16 (+13,7 %)	1,23	0,916	1,3 (+23,8 %)

Сталежелезобетонное пролетное строение Steel reinforced concrete span structure					
	-//-	-//-	1 случай низкое положение солнца 1 case low sun position	2 случай среднее положение солнца 2 case average sun position	3 случай высокое положение солнца 3 case high sun position
Главная балка на солнце (изгибающий момент M_x , кН*м) Main beam in the sun (bending moment M_x , kN*m)	1,18	1,25	1,22	1,4 (+12 %)	1,05
Главная балка в тени (изгибающий момент M_x , кН*м) Main beam in the shade (bending moment M_x , kN*m)	0,89	1,12	1,16	1,33 (+18,7 %)	0,764
Железобетонная плита (изгибающий момент M_y , кН*м) Reinforced concrete slab (bending moment M_y , kN*m)	7,16	7,53	7,82	9,36 (+24,3 %)	7,65
Верхний слой дорожной одежды — плотный асфальтобетон тип Б (растягивающие напряжения σ_x , МПа) The top layer of the pavement is dense asphalt concrete type B (tensile stress σ_x , MPa)	0,96	1,1	1,04	1,19 (+8,2 %)	1,1

Разработана авторами / Developed by the authors

Выводы по результатам выполненных исследований

Conclusions on the results of the performed research

1. С использованием результатов натурных измерений температурных полей элементов пролетного строения в разное время года выполнены численные расчеты НДС элементов пролетного строения от воздействия солнечной радиации, достоверность которых подтверждена инструментальными измерениями на существующем объекте.

2. Выявлены значительные дополнительные напряжения в элементах двух пролетных строений, которые существенно превышают значения, полученные при расчетах по рекомендациям действующих нормативных документов. Это указывает на необходимость пересмотра существующих нормативов, чтобы учесть реальные климатические воздействия и обеспечить более точное прогнозирование поведения мостовых конструкций.

3. Показан пространственный характер деформирования, что подтверждено выполненными экспериментальными исследованиями.

Таким образом, использование результатов натурных измерений и численных расчётов позволило получить уточненное НДС элементов пролетного строения под воздействием солнечной радиации и дать обоснование необходимости внесения изменений в нормативную базу при расчете автодорожных мостов на температурное климатическое воздействие с целью повышения их прочности и долговечности.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Афанасьев, В.С.** Устранение влияния температурного воздействия на динамические параметры пролетных строений балочных мостов / В.С. Афанасьев. — DOI <https://doi.org/10.15862/10SATS219> // Транспортные сооружения. — 2019. — Т.6. — № 2. — С. 10SATS219. — URL: <https://t-s.today/10SATS219.html>. — EDN BTBUGD. (дата обращения: 14.10.2024).
2. **Мельникова, И.С.** Моделирование воздействия температуры и транспортных нагрузок на возникновение и развитие трещин в асфальтобетонных дорожных покрытиях / И.С. Мельникова // Наука и техника. — 2012. — № 4. — С. 44–52. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23244583>. — EDN TOREUF. (дата обращения: 14.10.2024).
3. **Лившиц, А.В.** Факторы, оказывающие влияние на неравномерный температурный нагрев пролетного строения моста. Оценка напряженно деформированного состояния металлического пролетного строения / А.В. Лившиц, В.О. Мишутин // Проблемы проектирования, строительства, диагностики и технического содержания объектов железнодорожного транспорта: Материалы всероссийской научно-практической конференции, Чита, 24 октября — 2013 года / Чита: Забайкальский институт железнодорожного транспорта — филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Иркутский университет путей сообщения", 2013. — С. 11–19. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25593236&pff=1>. — EDN VOBMEH. (дата обращения: 14.10.2024).
4. **Мишутин, В.О.** Необходимость учета температурных деформаций при проектировании и строительстве мостовых конструкций / В.О. Мишутин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2014. — № 3. — С. 203–208. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22514631>. — EDN SYRWRL. (дата обращения: 14.10.2024).
5. **Мишутин, В.О.** Оценка воздействия солнечной радиации на напряженно-деформированное состояние металлического пролетного строения моста / В.О. Мишутин // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. — 2014. — Т.1. — С. 641–647. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21817085>. — EDN SJKZYN. (дата обращения: 14.10.2024).
6. **Jiang, C.R.** Research of Temperature Field of Long Span Concrete Box Girder Bridge Caused by Solar Radiation / C.R. Jiang, J.M. Ren, Z.L. Wang. — DOI <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.256-259.1635> // Applied Mechanics and Materials. — 2013. — Т.256. — С. 1635–1639. — URL: <https://www.scientific.net/AMM.256-259.1635>. (дата обращения: 14.10.2024).
7. **Овчинников, И.Г.** Особенности конструкции одежды ездового полотна на мостовых сооружениях в современных условиях / И.Г. Овчинников, И.Д. Сахарова, А.Г. Щербаков // Известия высших учебных заведений. Строительство. — 2003. — № 10. — С. 86–92. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18250223>. — EDN PJJPSN. (дата обращения: 14.10.2024).
8. **Иванова, А.А.** Рекомендации по измерению и прогнозированию температуры дорожной одежды / А.А. Иванова. — DOI <https://doi.org/10.15393/j102.art.2017.1104> // StudArctic Forum. — 2017. — Т.1. — № 5. — С. 99–111. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29824283>. — EDN ZCQTQB. (дата обращения: 14.10.2024).

9. **Подлесных, И.С.** Особенности перераспределения внутренних усилий в элементах разрезных пролетных строений автодорожных мостов при воздействии солнечной радиации / И.С. Подлесных, С.Ю. Гриднев. — DOI <https://doi.org/10.36622/VSTU.2023.3.71.011> // Научный журнал строительства и архитектуры. — 2023. — № 3. — С. 101–110. — URL: <https://vestnikvgasu.wmsite.ru/vypuski/vypusk-3-71-2023/osobennosti-pereraspredelenija-vnutrennih-usilij-v>. — EDN BQONUY. (дата обращения: 14.10.2024).
10. **Подлесных, И.С.** Методика расчета пролетных строений автодорожных мостов при воздействии солнечной радиации с учетом сдвиговой жесткости в слоях дорожной одежды / И.С. Подлесных, С.Ю. Гриднев. — DOI <https://doi.org/10.36622/VSTU.2023.72.4.011> // Научный журнал строительства и архитектуры. — 2023. — № 4. — С. 133–141. — URL: <https://vestnikvgasu.wmsite.ru/vypuski/vypusk-4-72-2023/metodika-rascheta-proletnyh-stroenij-avtodorozhnyh>. — EDN XJDMHW. (дата обращения: 14.10.2024).
11. **Овчинников, И.Г.** Модель воздействия внешних факторов на дорожную одежду мостовых сооружений / И.Г. Овчинников, О.К. Иванов, И.И. Овчинников, В.А. Илюшкин // Транспортное строительство. — 2009. — № 5. — С. 23–25. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23283846>. — EDN TPNNPJ. (дата обращения: 14.10.2024).
12. **Овчинников, И.И.** Моделирование напряженно-деформированного состояния многослойных конструкций при совместном действии нагрузки, температуры и агрессивной среды применительно к дорожным покрытиям на мостовых сооружениях / И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников, Е.В. Зинченко // Дороги и мосты. — 2012. — № 2. — С. 134–152. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18395694>. — EDN PMOJQX. (дата обращения: 14.10.2024).
13. **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>. — EDN YPUHVJ. (дата обращения: 14.10.2024).
14. **Козлов, А.В.** Расчет сталежелезобетонных мостов с учетом податливости сдвигового соединения железобетонной плиты со стальной балкой / А.В. Козлов, А.С. Егорычев // Дороги и мосты. — 2019. — № 1. — С. 111–128. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45648788>. — EDN GFVVD. (дата обращения: 14.10.2024).
15. **Еремин, В.Г.** Аналитические зависимости, учитывающие сдвиг между железобетонными и стальными конструктивными элементами мостов в неразрезных многопролетных балках / В.Г. Еремин, А.В. Козлов. — DOI <https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.56.4.010> // Научный журнал строительства и архитектуры. — 2019. — № 4. — С. 109–120. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41745219>. — EDN GAGNYT. (дата обращения: 14.10.2024).
16. **Еремин, В.Г.** Analytical expressions, taking into account the shift between the concrete and steel structural elements of bridges in continuous multi-span beams / В.Г. Еремин, А.В. Козлов. — DOI <https://doi.org/10.25987/VSTU.2020.45.1.008> // Russian Journal of Building Construction and Architecture. — 2020. — № 1. — С. 98–110. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42416814>. — EDN ISPFZC. (дата обращения: 14.10.2024).

Сведения об авторах:

Гриднев Сергей Юрьевич — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Строительная механика», ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия, e-mail: gridnev_s_y@rambler.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2018-6255>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=502901

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57196441906>

Овчинников Игорь Георгиевич — доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия, ФГАОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Уфа, Россия, e-mail: bridgesar@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0617-3132>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=2922

WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/J-5539-2013>

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=7102605749>

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57191523105>

Подлесных Игорь Сергеевич — кандидат технических наук, инженер-конструктор, ООО ГК «Вика Инжиниринг», Воронеж, Россия, e-mail: 94igor@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0590-356X>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1102283

Статья получена: 28.10.2024. Принята к публикации: 02.12.2024. Опубликовано онлайн: 13.12.2024.

REFERENCES

1. Afanasev V.S. Elimination of the effect of temperature on the dynamic parameters of bridge beams. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2019;6(2): 10SATS219. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/10SATS219>.
2. Melnikova I. Simulation of Temperature and Transport Load Impact on Formation and Development of Cracks on Asphalt-Concrete Road Surfaces. *Science and Technique*. 2012;(4): 44–52. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23244583> (accessed 14th October 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
3. Livshits A.V., Mishchutin V.O. [Factors Affecting Uneven Temperature Heating of the Bridge Span Structure. Assessment of the Stress-Strained State of the Metal Span Structure]. In: [*Problems of design, construction, diagnostics and technical maintenance of railway transport facilities: Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference, Chita, October 24, 2013*]. Chita: Transbaikal Institute of Railway Transport — branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "Irkutsk University of Railway Engineering"; 2013. p. 11–19. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25593236&pff=1> (accessed 14th October 2024). (In Russ.).
4. Mishutin V.O. The Necessity of The Account of Temperature Deformation Design and Construction of Bridge Structures. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 2014;(3): 203–208. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22514631> (accessed 14th October 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
5. Mishutin V.O. [Assessment of the impact of solar radiation on the stress-strain state of the metal bridge superstructure]. *Transport infrastructure of the Siberian region*. 2014;1: 641–647. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21817085> (accessed 14th October 2024). (In Russ.).
6. Jiang C.R., Ren J.M., Wang Z.L. Research of Temperature Field of Long Span Concrete Box Girder Bridge Caused by Solar Radiation. *Applied Mechanics and Materials*. 2013;256: 1635–1639. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.256-259.1635>.
7. Ovchinnikov I.G., Sakharova I.D., Shcherbakov A.G. [Features of the design of the road surface on bridge structures in modern conditions]. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2003;(10): 86–92. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18250223> (accessed 14th October 2024). (In Russ.).
8. Ivanova A. Recommendations on Temperature Measurement and Forecasting of Road Surfacing. *StudArctic Forum*. 2017;1(5): 99–111. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15393/j102.art.2017.1104>.
9. Podlesnykh I.S., Gridnev S.Yu. Features of Redistribution of Internal Forces in The Elements of Split Spans of Road Bridges Under the Influence of Solar Radiation. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2023;(3): 101–110. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.36622/VSTU.2023.3.71.011>.
10. Podlesnykh I.S., Gridnev S.Yu. Method of Calculating the Superstructures of Road Bridges under the Influence of Solar Radiation, Taking into Account the Shear Stiffness in the Layers of Road Clothing. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2023;(4): 133–141. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.36622/VSTU.2023.72.4.011>.
11. Ovchinnikov I.G., Ivanov O.K., Ovchinnikov I.I., Iljushkin V.A. Model of External Factors Influence on Pavements of Bridge Constructions. *Transport construction*. 2009;(5): 23–25. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23283846> (accessed 14th October 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
12. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Zinchenko E.V. [Modeling the stress-strain state of multilayer structures under the combined action of load, temperature and aggressive environment as applied to road surfaces on bridge structures]. *Roads and bridges*. 2012;(2): 134–152. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18395694> (accessed 14th October 2024). (In Russ.).

13. 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 14th October 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
14. Kozlov A.V., Egorychev A.S. Calculation of Steel and Concrete Composite Bridges Taking into Account the Compliance of Shear Connection of Reinforced Concrete Slab with Steel Beam. *Roads and bridges*. 2019;(1): 111–128. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45648788> (accessed 14th October 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
15. Yeremin V.G., Kozlov A.V. Analytical dependence of the shift from the shear stiffness of the seam between the concrete slab and steel beam in bridge spans. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2019;(4): 70–81. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.44.4.006>.
16. Yeremin V.G., Kozlov A.V. Analytical expressions, taking into account the shift between the concrete and steel structural elements of bridges in continuous multi-span beams. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2020;(1): 98–110. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.25987/VSTU.2020.45.1.008>.

Information about the authors:

Sergey Yu. Gridnev — Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia, e-mail: gridnev_s_y@rambler.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2018-6255>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=502901
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57196441906>

Igor G. Ovchinnikov — Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia, Ufa State Oil Technical University, Ufa, Russia, e-mail: bridgesar@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0617-3132>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=2922
WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/J-5539-2013>
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=7102605749>
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57191523105>

Igor S. Podlesnykh — OOO GK «Vika Inzhiniring», Voronezh, Russia, e-mail: 94igor@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0590-356X>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1102283

Submitted: 28th October 2024. Revised: 2nd December 2024. Published online: 12th December 2024.