

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>  
Russian journal of transport engineering

2018, №2, Том 5 / 2018, No 2, Vol 5 <https://t-s.today/issue-2-2018.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/12SATS218.pdf>

DOI: 10.15862/12SATS218 (<http://dx.doi.org/10.15862/12SATS218>)

Статья поступила в редакцию 07.05.2018; опубликована 28.06.2018

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Подлесных И.С., Гриднев С.Ю., Барченкова Н.А. Анализ влияния солнечной радиации на напряженно-деформированное состояние сталежелезобетонного пролетного строения автодорожного моста // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2018 №2, <https://t-s.today/PDF/12SATS218.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/12SATS218

**For citation:**

Podlesnykh I.S., Gridnev S.Yu., Barchenkova N.A. (2018). Analysis of influence of solar radiation on the deflected mode of steel-reinforced concrete span. *Russian journal of transport engineering*, [online] 2(5). Available at: <https://t-s.today/PDF/12SATS218.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/12SATS218

**УДК 539.163:624.042:624.271**

**Подлесных Игорь Сергеевич**

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия  
Магистрант кафедры «Строительной механики»  
E-mail: 94igor@mail.ru

**Гриднев Сергей Юрьевич**

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия  
Профессор кафедры «Строительной механики»  
Доктор технических наук, доцент  
E-mail: gridnev\_s\_y@rambler.ru

**Барченкова Надежда Александровна**

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Воронеж, Россия  
Доцент кафедры «Строительной механики»  
Кандидат технических наук  
E-mail: nadia.7194@yandex.ru

**Анализ влияния солнечной радиации  
на напряженно-деформированное состояние  
сталежелезобетонного пролетного  
строения автодорожного моста**

**Аннотация.** Пролетные строения автодорожных мостов подвержены длительным температурно-климатическим воздействиям, в частности от влияния солнечной радиации. В связи с тем, что данная область еще не получила большого развития, необходимы дополнительные исследования в данном направлении. В статье выполнен анализ напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонного пролетного строения при воздействии солнечной радиации с учетом распределения температуры по толщине слоев дорожной одежды и по высоте главных балок. Рассмотрено несколько случаев воздействия солнечной радиации при различном положении солнца и распределении температуры, характерных для летнего времени года на территории Воронежской области. Авторами была разработана конечно-элементная модель пролетного строения, которая учитывает совместную работу слоев дорожной одежды и железобетонной плиты, податливость главных балок, а также

неравномерный нагрев элементов мостового сооружения. Изучен характер распределения температурных полей по высоте слоев дорожной одежды и железобетонной плиты в зависимости от начальной температуры на поверхности конструкции, что позволило уточнить величину напряжений, вызванных воздействием солнечной радиации. Произведен расчет на совместное действие постоянной, температурной и кратковременной автомобильной нагрузки А14. Показана необходимость учета солнечной радиации при расчете пролетных строений. Изучено влияние температурных воздействий на сохранность асфальтобетонного покрытия. Численные исследования показывают, что в верхнем слое дорожной одежды в зоне над главными балками от воздействия солнечной радиации и временной нагрузки возникают растягивающие напряжения, превышающие предел прочности. Это может являться одной из основных причин возникновения продольных трещин.

**Ключевые слова:** сталежелезобетонное пролетное строение; солнечная радиация; дорожная одежда; главные балки; распределение температуры; неравномерный нагрев; напряженно-деформированное состояние

### Введение

Долговечность транспортного сооружения обусловлено целым рядом факторов. Преждевременное разрушение слоев дорожной одежды, наступление предельного состояния несущих конструкций, снижение безопасности пропуска транспортного потока происходит, как правило, из-за низкого качества строительства, ненадлежащей эксплуатации и сверхнормативных динамических нагрузок. В тоже время сооружения находятся в условиях постоянных температурно-климатических воздействий окружающей среды. Как и другие сооружения, автодорожные мосты эксплуатируются в разных климатических условиях, связанных с периодическим колебанием суточных и сезонных температур.

Снижение службы асфальтобетонных покрытий на пролетных строениях автодорожных мостов является в настоящее время серьезной проблемой на пути обеспечения как долговечности одежды ездового полотна, так и связанной с ней долговечности несущих конструкций. Трещины в верхнем слое асфальтобетонных покрытий являются основным видом разрушений дорожной одежды в течение срока эксплуатации. На слои дорожной одежды, а также на сталежелезобетонные пролетные строения действуют, в зависимости от времени года, как максимальные положительные, так и отрицательные температуры. Нагрев элементов пролетного строения зависят от ряда факторов: ориентации пролетного строения относительно положения солнца, рельефа местности, типа поверхности, и т. д. В зависимости от угла воздействия солнечной радиации меняется температура по толщине дорожной одежды, накладной плиты, высоте главных балок. Действующие на пролетное строение постоянные и временные нагрузки в сочетании с температурно-климатическими воздействиями могут привести к появлению предельных напряжений в элементах транспортного сооружения.

### Состояние проблемы

Анализ немногочисленных научных работ, посвященных исследованию влияния солнечной радиации на напряженно-деформированное состояние (НДС) строительных конструкций, показал, что в настоящее время проблема еще не получила должного развития. В работе [1] описана модель воздействия совокупности внешних факторов, включающих и климатические температурные воздействия, на дорожную одежду мостовых сооружений. В работе [2] предложен порядок расчета температурных полей и напряжений в фасадных балках пролетных строений на основании реальных замеров распределения температуры. Приведен пример результата расчета НДС фасадной балки от разницы температур вследствие нагрева

солнечным излучением. В статье [3] изучено НДС металлического пролетного строения с ортотропной плитой при неравномерном нагреве от солнечной радиации. Показано, что воздействие солнечной радиации при определенных углах воздействия создает значительные дополнительные напряжения.

Также выполнен анализ публикаций зарубежных авторов по рассматриваемой тематике. В работах [4-6] изучался характер распределения температуры в мостовых сооружениях от дневного изменения солнечной радиации с целью определения максимального перепада температур. Полученные на основе аналитической модели результаты показали, что нелинейный перепад температуры в сечениях элементов моста может достигать 25 °С. Экстремальные случаи распределения использованы для исследований температурных напряжений в пролетном строении. В статьях [7-9] был проведен анализ распределения температурных полей в пролетном строении с использованием разработанных конечно-элементных моделей и сопоставление с результатами натуральных измерений. Получены напряжения в элементах сооружения от наиболее неблагоприятных случаев воздействия солнечной радиации.

Таким образом, результаты различных исследований показывают, что воздействие солнечной радиации в ряде случаев может оказывать существенное влияние на НДС пролетного строения и его необходимо учитывать при проектировании мостовых сооружений. А методика учета требует совершенствования и развития.

Данная статья расширяет область исследований НДС транспортных сооружений на воздействие солнечной радиации. Авторы продолжают анализ НДС сталежелезобетонного пролетного строения от совместного действия солнечной радиации и временной нагрузки, с позиции сохранности дорожной одежды, взаимного влияния деформирования пролетного строения и дорожной одежды. В статье [10] была разработана конечно-элементная модель, учитывающая совместную работу слоев конструкции дорожной одежды, произведен расчет на действие автомобильной нагрузки и выявлена одна из причин появления продольных трещин в верхнем слое покрытия над главными балками пролетных строений. Данное исследование было продолжено в статье [11], в которой было изучено влияние изменения отрицательной температуры по толщине дорожной одежды при учете податливости главных балок на НДС асфальтобетонного слоя. Были рассмотрены современные типы конструкций дорожной одежды и различные схемы загрузки. Изучен характер распределения максимальных растягивающих напряжений с целью сохранности и долговечности покрытия.

**Цель исследования** заключается в изучении особенностей НДС пролетного строения при воздействии солнечной радиации при различных положительных температурах воздуха и положении солнца в течении светового дня. Необходимо оценить возможность возникновения продольных трещин в верхнем слое дорожной одежды над главными балками.

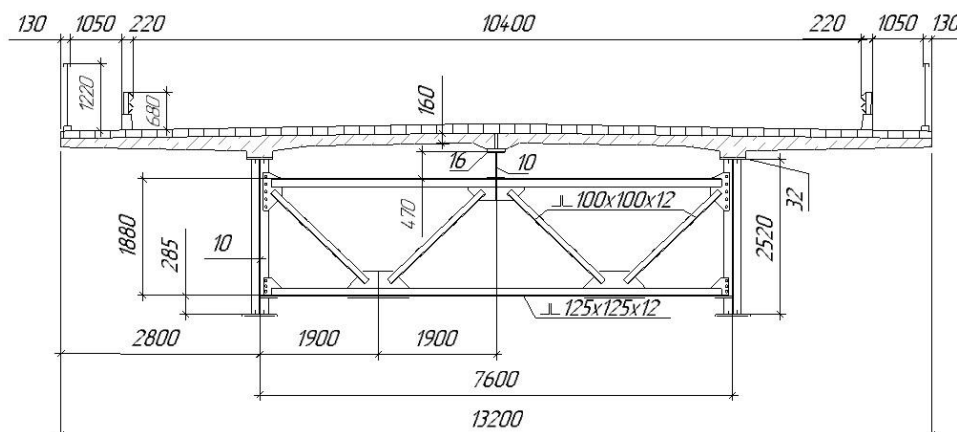
### Описание объекта исследования

Объектом исследования является пролет автодорожного моста через реку Малая Кожва. Общий вид моста, построенного по типовому проекту Ленгипротрансмост серии 3.503-50 инв.№1180/2 «Пролетные строения для автодорожных мостов, сталежелезобетонные разрезные и неразрезные с ездой поверху, пролетами в свету 40,60 и 80 м под габариты Г10 и Г11,5 в обычном и северном исполнении», 1979 г., показан на рисунке 1.



*Рисунок 1. Общий вид моста через реку Малая Кожва (составлено авторами)*

Железобетонная плита проезжей части имеет толщину в пролете 16 см и ширину 13,20 м и опирается на главные балки и прогон. Расстояние между осями главных балок составляет 7,6 м, высота – 2,52 м. Совместная работа стальных балок и железобетонной плиты проезжей части обеспечивается сварными упорами. Главные балки объединены между собой поперечными и продольными связями. Для усиления главных балок по всей их длине установлены горизонтальные и вертикальные ребра жесткости. Домкратные балки выполнены в виде сплошностенчатого сварного двутавра. Поперечное сечение сталежелезобетонного пролетного строения изображено на рисунке 2.



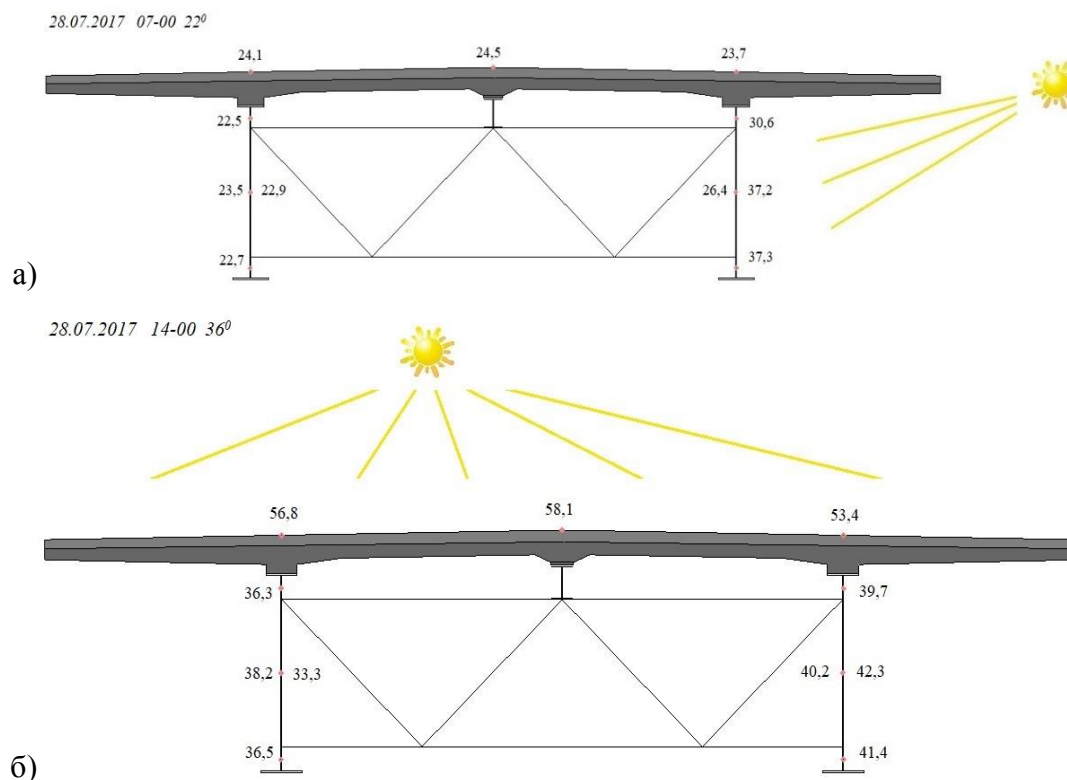
*Рисунок 2. Поперечное сечение сталежелезобетонного пролетного строения (составлен авторами)*

### Подход к учету воздействия солнечной радиации

При воздействии солнечной радиации элементы пролетного строения имеют разную температуру поверхности, которая распределяется неравномерно по высоте и длине пролетного строения, что может приводить к появлению дополнительных напряжений и деформаций. На данном этапе исследования ограничимся изучением влияния положительных температур в летнее время года. Температура воздуха принята соответствующей наиболее жаркому дню июля в Воронеже в 2017 году. Характер распределения температуры по высоте поперечного сечения сталежелезобетонного пролетного строения принят по аналогии с распределением, полученным при натуральных измерениях в [2]. Было рассмотрено три случая воздействия солнечной радиации на пролетное строение (ориентация восток-запад):

1. Солнце низко над горизонтом и происходит нагрев только главной балки (рис. 3а);

2. Солнце находится в промежуточном положении и происходит нагрев железобетонной плиты и главной балки (28.07.2017 9-00 26°);
3. Солнце высоко над горизонтом и происходит нагрев только железобетонной плиты с дорожной одеждой (рис. 3б).



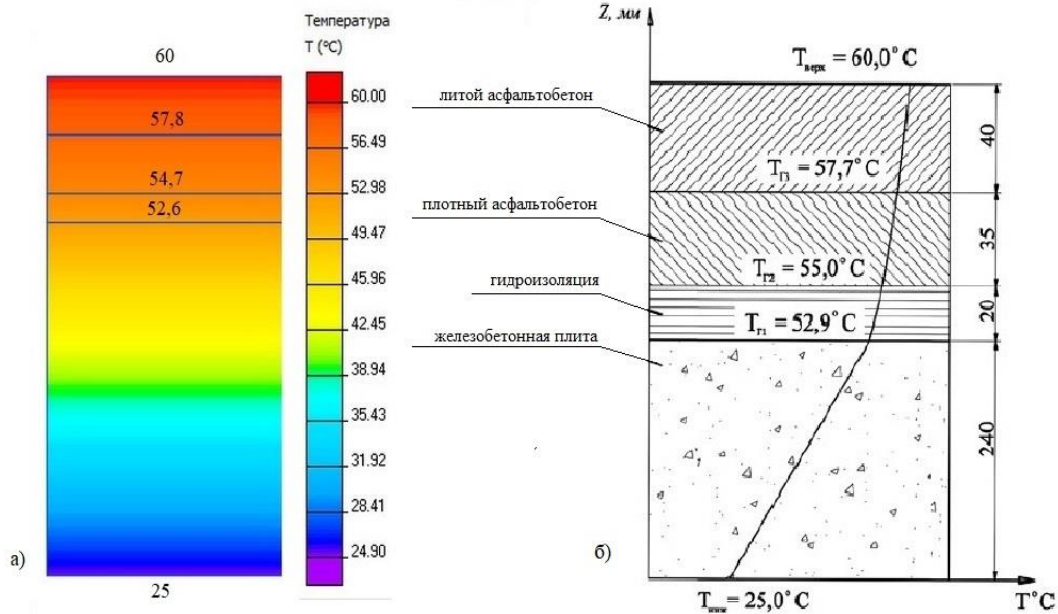
**Рисунок 3.** Воздействие солнечной радиации:

а) на главную балку; б) на железобетонную плиту (составлен авторами)

Распределение температуры в слоях дорожной одежды и накладной плите получено с помощью программы ELCUT Student, которая используется для моделирования электромагнитных, тепловых, и механических полей. Она позволяет выполнять линейный и нелинейный температурный анализ в двумерной и трехмерной постановках. Для этого используются уравнения теплопроводности с граничными условиями в виде заданной температуры, заданного теплового потока на границе, условия радиационного и конвективного теплообмена. Результаты представляются распределением температуры, плотностью теплового потока, а также в виде графиков и таблиц изменения физической величины.

Предварительно был выполнен сравнительный расчет распределения температуры по слоям дорожной одежды и железобетонной плиты для конструкции, использованной в статье [1]. В ней также приведены результаты расчета распределения теплового поля в трехслойном пакете дорожной одежды, уложенной на плите проезжей части. Поле получено с помощью модели стационарного теплопереноса, описанной системой из 8 алгебраических уравнений при заданных граничных условиях на наружных поверхностях. Распределение температуры в слоях дорожной одежды было получено также по программе ELCUT. В модуле программы «теплопроводность» была задана геометрическая модель, характеристики материалов [12] и граничные условия, в виде начальной температуры на верхней и нижней границах, принятых для заданного региона на основании измерений [2].

Сравнение результатов температурных полей по толщине дорожной конструкции приведено на рисунке 4.



**Рисунок 4.** Распределение температуры в слоях дорожной одежды:  
а) программа ELCUT; б) Методика распределения температуры (составлен авторами)

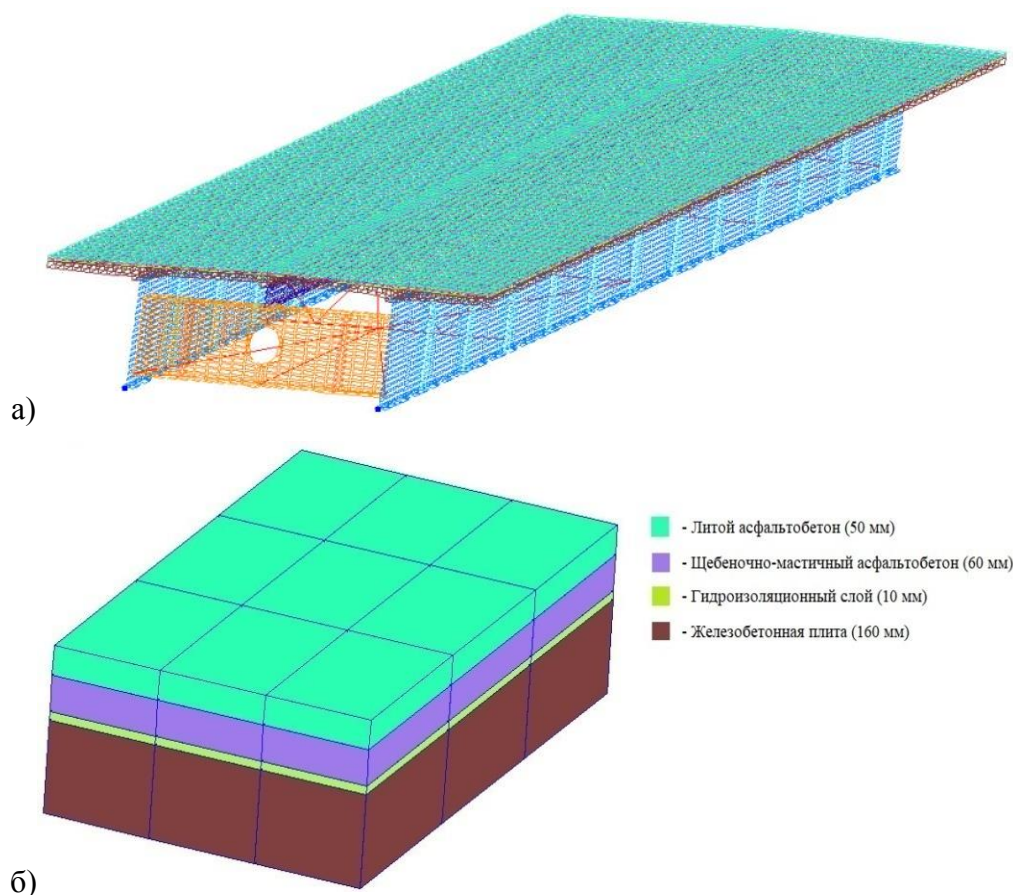
Сравнительный анализ полученных результатов позволил сделать вывод, что распределение температуры в слоях дорожной одежды, полученное с использованием программы, с достаточной точностью совпадает с результатами по разработанной в [1] методике. Это позволяет использовать комплекс ELCUT в дальнейшей работе для изучения характера распределения начальной температуры по слоям дорожной одежды.

### Конечно-элементная модель пролетного строения

Исследования выполнялись с помощью конечно-элементного комплекса «ПК Лира САПР». Для изучения НДС сталежелезобетонного пролетного строения разработана пространственная конечно-элементная модель, включающая следующие конечные элементы (КЭ):

- КЭ оболочки – для моделирования главных балок, прогона, домкратных балок и ребер жесткости;
- объемный КЭ – для моделирования железобетонной плиты и конструкции дорожной одежды;
- стрешневой КЭ – для моделирования продольных и поперечных связей.

Полученная модель пролетного строения со слоями конструкции дорожной одежды представлена на рисунке 5.



**Рисунок 5.** Конечно-элементная модель: а) общий вид пролетного строения; б) конструкция дорожной одежды (составлен авторами)

Основные характеристики материалов конструкций пролетного строения для расчетной модели приведены в таблице 1 [13-15].

**Таблица 1**

**Характеристики конструкций пролетного строения [13-15]**

Тип конструкции	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона	Объемный вес, кН/м <sup>3</sup>
Металлические конструкции	206000	0,3	77,0
Железобетонная плита (класс В30)	32500	0,2	24,5
Гидроизоляционный слой	687	0,3	17,66
Щебеночно-мастичный асфальтобетон	10704	0,22	22,56
Литой асфальтобетон	8503	0,22	22,56

**Порядок выполнения численных исследований**

Для изучения влияния неравномерного нагрева выполнен расчет на совместное действие постоянных нагрузок от собственного веса, кратковременной автомобильной нагрузки А14 [16] и температурно-климатического воздействия. На данном этапе ограничимся исследованием НДС верхнего слоя дорожной одежды. В дальнейшем изучим влияние солнечной радиации на трещиностойкость накладной железобетонной плиты. На рисунке 6 изображена схема расположения автомобильной нагрузки А14 в поперечном сечении, установленной в середине пролета. При этой схеме над главными балками возникают максимальные растягивающие напряжения.

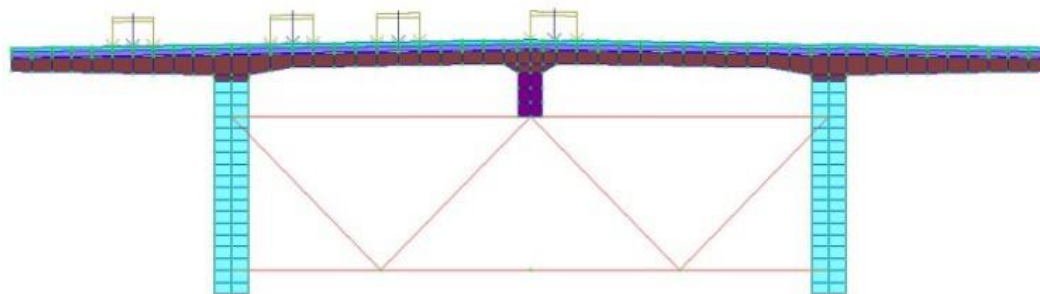


Рисунок 6. Расположение тележек нагрузки A14 (составлен авторами)

### Результаты численных исследований пролетного строения

При расчетах пролетного строения учитывалась податливость главных балок на деформированное состояние железобетонной плиты совместно со слоями дорожной одежды, что позволило уточнить величину напряжений. Результаты НДС пролетного строения приведены на рисунке 7.

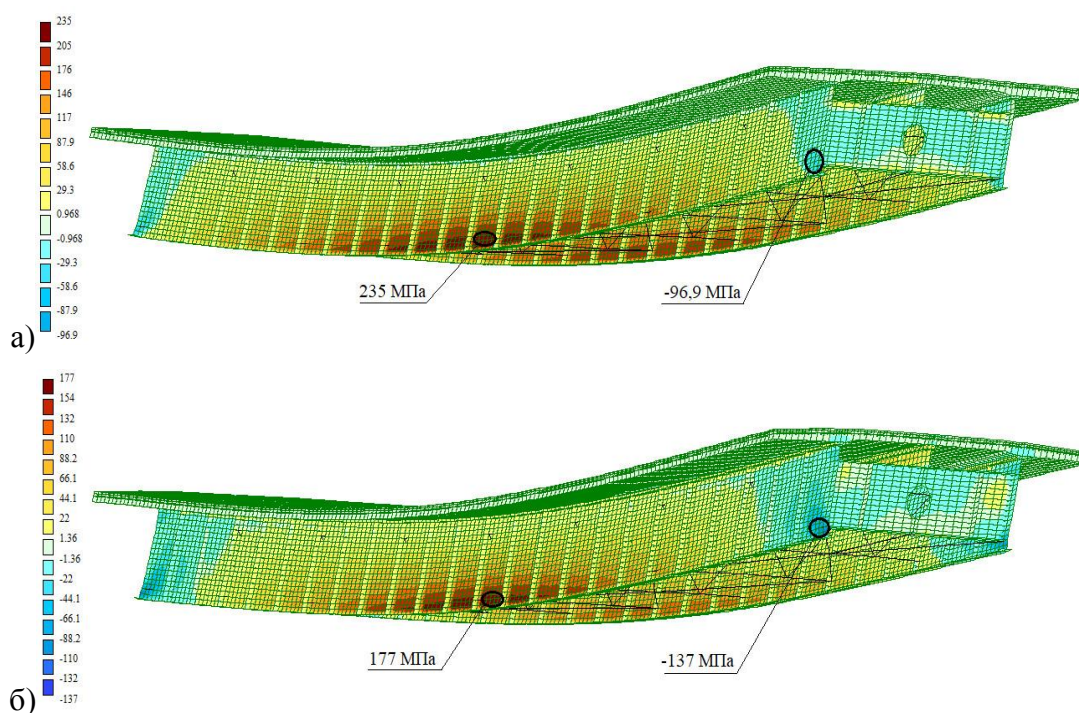
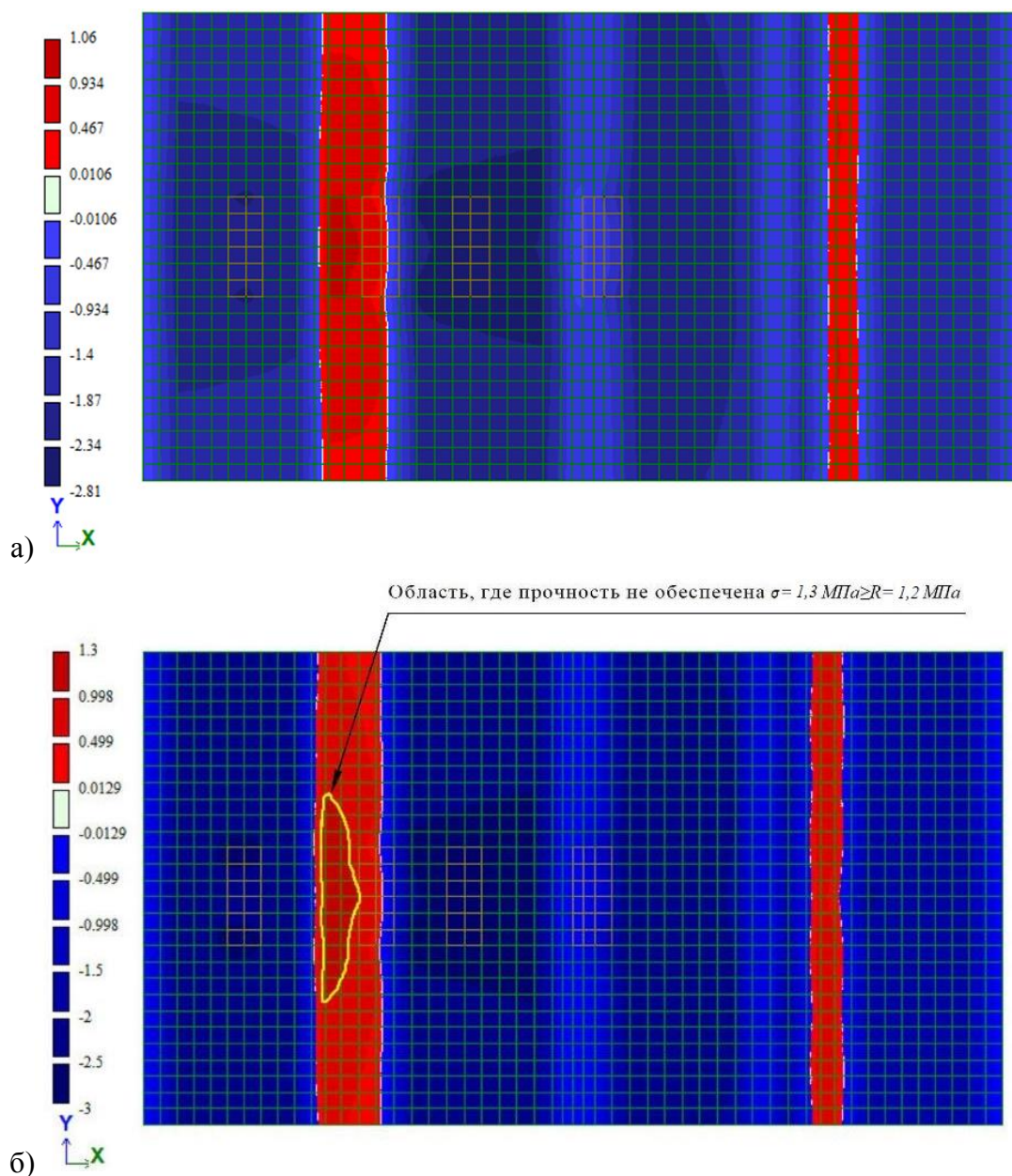


Рисунок 7. НДС пролетного строения: а) при отсутствии воздействия солнечной радиации, б) при воздействии солнечной радиации на железобетонную плиту (составлен авторами)

Анализ результатов показывает, что солнечная радиация существенно меняет напряжения в главных балках. В результате температурных воздействий растягивающие напряжения в главных балках уменьшились на 24,7 % в середине пролета, но увеличились на 41,4 % вблизи опор. При учете совместной работы слоев дорожной одежды и железобетонной плиты можно отметить уменьшение прогибов пролетного строения.

Воздействие солнечной радиации при учете податливости главных балок совместно с железобетонной плитой оказывает влияние на НДС пролетного строения с дорожной одеждой. Сравнение напряжений в верхнем слое асфальтобетонного покрытия дорожного полотна показано на рисунке 8.





**Рисунок 8.** Поля напряжений в литом асфальтобетоне при действии автомобильной нагрузки: а) без учета солнечной радиации; б) с учетом солнечной радиации (составлен авторами)

Красным цветом показаны растягивающие напряжения. Линией желтого цвета отмечена область, где прочность литого асфальтобетона на растяжение не обеспечена.

Максимальные растягивающие напряжения над главными балками без учета солнечной радиации составили 1,06 МПа. При учете солнечной радиации напряжения увеличились на 22,6 % и составили 1,3 МПа.

Результат численных исследований показывает, что в верхнем слое дорожной одежды в середине пролета в зонах над главными балками при одновременном воздействии автомобильной нагрузки и солнечной радиации возникают растягивающие напряжения, превышающие предел прочности на растяжение литого асфальтобетона  $\sigma = 1,3 \text{ МПа} \geq R = 1,2 \text{ МПа}$ . Это может являться причиной образования продольных трещин и дальнейшего интенсивного разрушения асфальтобетонного покрытия. Результаты численных

исследований напряженного состояния пролетного строения при отсутствии и воздействии солнечной радиации приведены в таблице 2.

Таблица 2

**Сравнение напряжений при отсутствии и воздействии солнечной радиации**

Элемент пролетного строения	Напряжения, МПа $\left( \begin{array}{l} \text{растягивающие} \\ \text{сжимающие} \end{array} \right)$			
	При отсутствии воздействия солнечной радиации (только нагрузка А14)	При воздействии солнечной радиации		
		1 случай	2 случай	3 случай
Верхний слой дорожной одежды (литой асфальтобетон)	1,06	1,3 (+22,6 %)	1,08 (+1,9 %)	0,8
	2,81	3	3,48	4,22
Главные балки	235	204	197	177
	96,9	120	124	137

Составлено авторами

**Выводы**

1. Результаты показали, что неравномерный нагрев элементов пролетного строения, вызванный разной интенсивностью и углом действия солнечной радиации в течение светового дня, существенно влияет на характер деформаций и напряжений в пролетном строении.
2. Анализ напряженно-деформированного состояния установил, что максимальные растягивающие напряжения в верхнем слое дорожной одежды наблюдаются в случае воздействия солнечной радиации только на главную балку.
3. Растягивающие напряжения, превышающие предел прочности литого асфальтобетона в зонах над главными балками, могут являться причиной возникновения продольных трещин.

**Заключение**

Разработана конечно-элементная модель, позволяющая выполнять анализ напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонного пролетного строения с учетом распределения температуры по высоте поперечного сечения от различных случаев воздействия солнечной радиации. Произведен расчет на совместное действие постоянной, температурной и кратковременной автомобильной нагрузок. Модель пролетного строения учитывает податливость главных балок и включение в совместную работу дорожной одежды. С помощью программы ELCUT получен характер распределения температуры по слоям дорожной одежды. Произведена оценка возможности возникновения продольных трещин в верхнем слое дорожной одежды над главными балками. Анализ полученных результатов убедительно показывает необходимость учета солнечной радиации при расчете пролетных строений.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. 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.
2. Безбабичева, О.И. Прогнозирование температурных напряжений в фасадных балках мостовых конструкций / О.И. Безбабичева, А.В. Бильченко, А.Г. Кислов //

- Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – 2010. – №33. – С. 28-31.
3. Мишутин, В.О. Необходимость учета температурных деформаций при проектировании и строительстве мостовых конструкций / В.О. Мишутин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2014. – № 3 (43). – С. 203-208.
  4. Walter H. Dilger, Amin Ghali, Mathew Chan, Mo S. Cheung, Marc A. Maes. Temperature Stresses in Composite Box Girder Bridges. Journal of Structural Engineering. – 1983. – Vol. 109, Issue 6.
  5. Enrique Mirambell, Antonio Aguado. Temperature and Stress Distributions in Concrete Box Girder Bridges. Journal of Structural Engineering. – 1990. – Vol. 116, Issue 9.
  6. Yousong Peng, Shizhong Qiang. Analytical Solution to Temperature Variations in Highway Concrete Bridges Due to Solar Radiation. First International Conference on Transportation Engineering. – 2007.
  7. Cun Ren Jiang, Jian Min Ren, Zhuo Ling Wang. Research of Temperature Field of Long Span Concrete Box Girder Bridge Caused by Solar Radiation. Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vols. 256-259 – P. 1635-1639.
  8. Linren Zhou, Yong Xia, James M.W. Brownjohn, Ki Young Koo. Temperature Analysis of a Long-Span Suspension Bridge Based on Field Monitoring and Numerical Simulation. Journal of Bridge Engineering. – 2016. – Vol. 21, Issue 1.
  9. XuMing Song, Hani Melhem, Jun Li, QingYuan Xu, LiJun Cheng. Effects of Solar Temperature Gradient on Long-Span Concrete Box Girder during Cantilever Construction. Journal of Bridge Engineering. – 2016. – Vol. 21, Issue 3.
  10. Подлесных, И.С. Расчет сталежелезобетонных пролетных строений автодорожных мостов с учетом одежды ездового полотна / И.С. Подлесных, С.Ю. Гриднев // Опыт прошлого – взгляд в будущее: 7-я Международная научно-практическая конференция молодых ученых и студентов: материалы конференции. – 2017. – С. 193-198.
  11. Гриднев, С.Ю. Расчет напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонных пролетных строений с учетом распределения температуры в слоях дорожной одежды / С.Ю. Гриднев, И.С. Подлесных // Строительная механика и конструкции. – 2017. – №2(15) – С. 75-84.
  12. Уонг, Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: справочник / Х. Уонг. – М.: Атомиздат, 1979. – 216 с.
  13. Овчинников, И.Г. Эффективные конструкции дорожных одежд с применением асфальтобетона на мостовых сооружениях / И.Г. Овчинников, И.И. Овчинников, М.А. Телегин, С.В. Хохлов // Интернет-журнал "Науковедение". – 2014. – № 1. – С. 1-18.
  14. Гезенцевей, Л.Б. Дорожный асфальтобетон / Л.Б. Гезенцевей. – М.: Транспорт, 1985. – 350 с.
  15. Богуславский, А.М. Асфальтобетонные покрытия / А.М. Богуславский, Л.Г. Ефремов. – М.: МАДИ, 1981. – 145 с.
  16. СНиП 2.05.03-84\* (СП 35.13330.2011) Мосты и трубы (Актуализированная редакция) / Минрегионразвития РФ. – М.: ОАО «ЦПП», 2011. – 339 с.

**Podlesnykh Igor Sergeevich**

Voronezh state technical university, Voronezh, Russia  
E-mail: 94igor@mail.ru

**Gridnev Sergey Yuryevich**

Voronezh state technical university, Voronezh, Russia  
E-mail: gridnev\_s\_y@rambler.ru

**Barchenkova Nadezhda Aleksandrovna**

Voronezh state technical university, Voronezh, Russia  
E-mail: nadia.7194@yandex.ru

## **Analysis of influence of solar radiation on the deflected mode of steel-reinforced concrete span**

**Abstract.** Spans structures of road bridges are subject to the long-lived temperature and climatic influences, in particular from influence of solar radiation. Because this area has not received much development yet, more research is needed in this direction. In the article the analysis of deflected mode of a steel-reinforced concrete span at solar radiation taking into account temperature distribution on road base and on height of the main beams was made. Several cases of influence of solar radiation at various position of the sun and temperature distribution were considered, the characteristic for summer season on the territory of the Voronezh region. The authors developed a finite element model of a span structure which takes into account the joint work of layers of road base and a reinforced concrete slab, pliability of the main beams and also uneven heating of elements of a bridge construction. The character of temperature distribution along the height of layers of road base and a reinforced concrete slab was studied depending on reference temperature on the surface of the structure that allowed to specify the size of stresses caused by influence of a solar radiation. The calculation was made for a combined effect of constant, temperature and temporary automobile load. The need to take into account solar radiation in the calculation of span structures was shown. The influence of temperature impacts on safety of an asphalt concrete was studied. Numerical researches show that in the upper layer of road base there are tensile stresses of ultimate strength from influence of a solar radiation and temporary loading. It can be one of the main reasons for emergence of longitudinal fractures.

**Keywords:** steel-reinforced concrete span; solar radiation; road base; main beams; temperature distribution; uneven heating; deflected mode

### **REFERENCES**

1. Ovchinnikov I.G., Ivanov O.K., Ovchinnikov I.I., Iljushkin V.A. (2009). Model of impact of external factors on road base of bridge constructions. *Transport construction*, 5, pp. 23-25. (in Russian).
2. Bezbabicheva O.I., Bilchenko A.V., Kislov A.G. (2010). Prediction of temperature stresses in front beams of bridge structures. *Science and progress of transport. Messenger of Dnepropetrovsk National University of Railway Transport*, 33, pp. 28-31. (in Russian).
3. Mishutin V.O. (2014). The need to take into account temperature strains at projection and construction of bridge structures. *The modern technologies. System analysis. Model operation*, 3(43), pp. 203-208. (in Russian).

4. Walter H. Dilger, Amin Ghali, Mathew Chan, Mo S. Cheung, Marc A. Maes. (1983). Temperature Stresses in Composite Box Girder Bridges. *Journal of Structural Engineering*. 109(6).
5. Enrique Mirambell, Antonio Aguado (1990). Temperature and Stress Distributions in Concrete Box Girder Bridges. *Journal of Structural Engineering*, 116(9).
6. Yousong Peng, Shizhong Qiang (2007). Analytical Solution to Temperature Variations in Highway Concrete Bridges Due to Solar Radiation. *First International Conference on Transportation Engineering*. (in Russian).
7. Cun Ren Jiang, Jian Min Ren, Zhuo Ling Wang (2013). Research of Temperature Field of Long Span Concrete Box Girder Bridge Caused by Solar Radiation. *Applied Mechanics and Materials*. 256-259, pp. 1635-1639.
8. Linren Zhou, Yong Xia, James M.W. Brownjohn, Ki Young Koo (2016). Temperature Analysis of a Long-Span Suspension Bridge Based on Field Monitoring and Numerical Simulation. *Journal of Bridge Engineering*. 1(21).
9. XuMing Song, Hani Melhem, Jun Li, QingYuan Xu, LiJun Cheng (2016). Effects of Solar Temperature Gradient on Long-Span Concrete Box Girder during Cantilever Construction. *Journal of Bridge Engineering*, 3(21).
10. Podlesnykh I.S., Gridnev S.Yu. (2017). Calculation of steel reinforced concrete spans with account of the road base. *The experience of the past – look to the future*, pp. 193-198. (in Russian).
11. Gridnev S.Yu., Podlesnykh I.S. (2017). Calculation of deflected mode of steel reinforced concrete spans with account of temperature effect in the road base layers. *Structural Mechanics and structures*. 2(15), pp. 75-84. (in Russian).
12. Wong H. (1979). Osnovnye formuly i dannye po teploobmenu dlja inzhenerov: spravochnik. [Basic formulas and data on heat exchange for engineers: reference book.] Moscow: Atomizdat, p. 216.
13. Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov M.A., Telegin I.I., Khokhlov S.V. (2014). Effective constructions of road surface with use of asphalt concrete on bridge structures. *Naukovedenie*, 1, pp. 1-18.
14. Gezentsvey L.B., Boguslavskiy A.M., Efremov L.G. (1985). Dorozhnyj asfal'tobeton. [Road asphalt concrete.] Moscow: Transport, p. 350.
15. Boguslavskiy A.M. (1981). Asfal'tobetonnye pokrytija. [Asphalt pavement.] Moscow: MADI, p. 145.
16. (2011). SNiP 2.05.03-84\* (SP 35.13330.2011) Mosty i truby (Aktualizirovannaja redaktsija). Minregionrazvitija RF. [Building Codes and Regulations 2.05.03-84\* (Set of rules 35.13330.2011) Bridges and tubes (Updated version). Minregionrazvitiya RF.] Moscow: OAO «TsPP», p. 339.