



Research Article

Received: October 29, 2023

Accepted: November 29, 2023

Published: December 16, 2023

ISSN 2304-6295

Stress-strain state of asphalt concrete pavements of steel bridges

Grishin, Ilya Valerevich ^{1*} Petrovavlovskikh, Olga Konstantinovna ¹ Ibragimova, Aniiia Airatovna ¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation; il6357grishin@yandex.ru (G.I.V.); olga_konst@mail.ru (P.O.K.); anyia13@mail.ru (I.A.A.)

Correspondence:* email il6357grishin@yandex.ru; contact phone [+79872623801](tel:+79872623801)

Keywords:

Asphalt; Steel bridge; Finite element modeling; Bridge deck pavement; Cracks in asphalt

Abstract:

The object of research is the stress-strain state of asphalt concrete pavements of steel bridges with an orthotropic slab under traffic load. Research is necessary because one of the main problems of steel bridge deck pavements is the formation of longitudinal cracks in asphalt concrete above the main beams of superstructures. At the same time, there are no instructions in the engineering standards to prevent the appearance of such a crack. The lack of clear instructions, in turn, is because the stress-strain state of the roadway of metal bridges has features that have not been studied sufficiently. **Method.** The primary research method uses a software package that implements the finite element method. During modeling, shell finite elements are used to model the metal span, and three-dimensional finite elements are used to model the protective-cohesive and asphalt concrete layers. A three-axle truck was considered as a wheel load under various loading schemes. In addition, the physical and mechanical parameters of the protective layer and asphalt concrete were evaluated at different rent temperatures, on which they largely depend. **Results.** As a result of modeling the superstructure section, it was found that tensile stress occurs in the upper fiber of asphalt concrete above the main beam. And the closer the wheel is to the main beam, the greater this stress can lead to future cracks. However, a phenomenon has been found that at sufficiently high temperatures, the highest tensile stresses in the top fiber of asphalt concrete occur near the wheel. In contrast, the highest tensile stresses always occur above the main beam at sub-zero temperatures. Considering that cracks in asphalt concrete arise as a result of the gradual accumulation of damage and assuming that the traffic load moves mainly along the wheel path zone, it can be concluded that the spacing of the wheel path and walls of the main beams in space can lead to an increase in the service life of asphalt concrete pavements of metal bridges.

1 Introduction

В металлических мостах с ортотропной плитой, настил которой имеет значительно меньшую изгибную жесткость, чем плиты железобетонных мостов, существует опасность появления продольных трещин в покрытии над главными балками стальных пролетных строений. Для исключения их появления в межремонтные сроки необходимо иметь возможность оценивать напряженно-деформированное состояние (далее - НДС) ездового полотна. Однако в рамках библиографического поиска авторам не удалось найти разработанные методы определения НДС асфальтобетонных покрытий металлических мостов, учитывающих все особенности их работы.

Поскольку асфальтобетон является основным несущим слоем нежестких дорожных одежд, целесообразно было бы применить наработки из этой области к мостовым сооружениям, тем более что применительно к нежестким дорожным одеждам вопрос определения ее НДС исследован значительно более глубоко. Применительно к автомобильным дорогам проблема появления трещин в асфальтобетоне рассматривалась как решение задачи теории упругости о

Grishin, I.; Petrovavlovskikh, O.; Ibragimova, A.

Stress-strain state of asphalt concrete pavements of steel bridges;

2023; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **109** Article No 10924. doi: 10.4123/CUBS.109.24



напряженно-деформированном состоянии слоистого полупространства. Результатом решения поставленной задачи явилось представление перемещений многослойной конструкции в виде чаши прогиба. При этом, как указывается в монографии Радовского Б.С. [1], продольные и поперечные деформации вдоль оси движущейся нагрузки не равны между собой: поперечные деформации больше, а их максимум смещен в сторону, противоположную направлению движения. Кроме того, в указанной монографии Радовского Б.С. описаны особенности динамической работы асфальтобетонных нежестких покрытий, проявляющиеся в том, что с увеличением скорости движения колеса вертикальное давление на подстилающий грунт от вышележащих слоев дорожной одежды уменьшается. Это вызвано тем, что входящие в состав монолитных слоев органические вяжущие обладают ярко выраженными реологическими свойствами. Из всего вышеописанного следует, в частности, вывод, что при воздействии колеса на нежесткое покрытие точки с наибольшими напряжениями будут подвергаться знакопеременным нагрузкам.

Дальнейшие исследования, продолжающие вышеописанное направление, привели к тому, что все возможные сочетания нагрузок и физико-механических параметров были сведены, применительно к проектированию нежестких дорожных одежд, к трем основным видам расчетов: расчету по упругому прогибу при умеренной весенней температуре 10 °С; расчету по условию сдвигоустойчивости грунтового основания при дальнейшем повышении температуры в конце весеннего периода; расчету монолитных слоев покрытий по усталостному разрушению. В настоящее время исследования в этой области посвящены, как правило, уточнению параметров расчетных моделей или улучшению согласования расчетных моделей и экспериментов, что видно из анализа научных работ. Например, в работах [2], [3], [4] производится сравнение теоретических и экспериментальных напряжений, возникающих в подстилающем слое грунта, а также уточнение параметров расчета по условию сдвигоустойчивости грунтового основания. В работах [5], [6] исследуются модели, определяющие упругий прогиб нежестких дорожных одежд, в частности, с учетом поврежденности асфальтобетона. В публикациях [7], [8], [9] рассматриваются особенности динамической работы дорожной одежды. Исследования, не направленные непосредственно на анализ расчетных моделей, например [10], [11], посвященные анализу износостойкости асфальтобетонных покрытий и модификациям грунтовых оснований, косвенно также опираются на три основные расчетные модели, обозначенные выше.

Аналогичная ситуация прослеживается и в исследованиях, направленных как на анализ НДС нежестких асфальтобетонных покрытий [12], [13], так и на анализ модификаций материалов дорожной одежды [14], [15].

Однако на основе анализа приведенных выше исследований можно сделать вывод, что в покрытиях автомобильных дорог монолитные асфальтобетонные слои имеют, как правило, наибольшую жесткость из всех слоев нежесткой дорожной одежды, обеспечивая тем самым прочность конструкции. В то время как в ездовом полотне мостовых сооружений прочность конструкции обеспечивается значительно более жесткой плитой пролетного строения, а асфальтобетонное покрытие обеспечивает только гидроизоляцию несущих конструкций, удобство и безопасность движения и служит слоем износа. Кроме того, ездовое полотно совместно с несущей конструкцией является многослойной плитой, а не многослойным полупространством. Учитывая неравномерную жесткость некоторых видов несущих конструкций мостовых сооружений, непосредственно контактирующих с покрытием, и особенности их закреплений, можно видеть, что асфальтобетон в таких условиях будет работать совершенно иначе, нежели в нежесткой дорожной одежде. Эти отличия также просматриваются и в научных работах, посвященных исследуемой теме.

Применительно к железобетонным мостам этот вопрос рассматривался Щербаковым А.Г. и Овчинниковым И.Г. [16], [17], построившими математическую модель ездового полотна, рассматриваемого в виде многослойной плиты. При этом предполагалась верной гипотеза Кирхгофа-Лява, асфальтобетон рассматривался как разномодульный материал, учитывались температурные напряжения в асфальтобетоне и влияние хлоридсодержащей среды. Однако не учитывалась некоторые реологические особенности асфальтобетона.

Применительно к металлическим мостам вопрос построения расчетных моделей инженерными методами рассматривался рядом исследователей, в частности, Судомоиным А.С. для полимербетонного покрытия, уложенного по ортотропной плите проезжей части. Однако автором работы не рассматривался аспект, обусловленный требованием исключения трещин в покрытии над главными балками стальных пролетных строений.



В рамках исследований Телегина М.А. и Овчинникова И.Г. [18], [19], [20] рассматривалась совместная работа металлической ортотропной плиты с асфальтобетонным покрытием, на основе чего делался, в частности, вывод о том, что растягивающие напряжения в верхней фибре асфальтобетона над главной балкой будут увеличиваться при приближении колеса транспортной нагрузки к створу стенки главной балки. Однако в этих исследованиях основное внимание уделялось совместной работе ортотропной плиты и стенок пролетного строения.

С 2010 г. данный вопрос исследовался специалистами из Сибирского государственного университета путей сообщения (СГУПС) - Поляковым С.Ю. и Яшновым А.Н. в работах [21], [22], [23] и диссертации Полякова С.Ю. «Совершенствование метода расчета долговечности асфальтобетонного покрытия на ортотропной плите мостов по критерию усталостного разрушения». Данные работы посвящены образованию трещин в асфальтобетонных покрытиях мостов, а основными инструментами исследования являются: моделирование с помощью метода конечных элементов (далее - МКЭ); экспериментальное определение деформации асфальтобетонных покрытий мостов; учет реологических особенностей асфальтобетона с помощью модели Hirsch T., модифицированной Pellinen T., Christensen D. и Bonaquist R. В результате построения модели МКЭ и проведения экспериментов было подтверждено, что растягивающие напряжения в верхней фибре асфальтобетона в створе стенки главной балки действительно растут при приближении колеса к створу. Также было выяснено, что трещины в асфальтобетоне появляются только от многократного приложения нагрузки. В связи с этим для прогнозирования времени образования трещин были использованы данные из диссертации Дровалевой О.В. «Усталостная долговечность асфальтобетона при воздействии интенсивных транспортных нагрузок». Кроме того, были получены важные экспериментальные данные о деформации асфальтобетона ездового полотна при транспортной нагрузке и выяснено, что с помощью вышеупомянутой модели Hirsch T. можно оценить модуль упругости при динамическом воздействии колеса в широком спектре температур. В исследовании [24], выполненном Поляковым С.Ю. в соавторстве с другими специалистами СГУПС, изучается влияние геосетки, положенной между слоями асфальтобетона, на его работу в составе ездового полотна. При этом отмечается возможный положительный эффект от использования геосеток. Однако с нашей точки зрения не смотря на большой вклад, внесенный данными исследователями, были учтены не все особенности работы асфальтобетона при его укладке на ортотропную плиту, что будет показано далее.

Ранее нами рассматривалась работа асфальтобетонных покрытий при воздействии температурной нагрузки [25]. Кроме того, нами разрабатывается модель работы ортотропной плиты совместно с уложенным ездовым полотном, однако она на данный момент является незавершенной и учитывает только металлический настил [26].

Резюмируя анализ работ российских авторов, можно сделать вывод о разнообразии методов, используемых для описания работы асфальтобетона ездового полотна при транспортной нагрузке и отсутствии полной картины этого явления.

Аналогичная картина наблюдается у западных исследователей, несмотря на значительно более обширные накопленные экспериментальные данные. Это видно, например, из работы [27], где приводятся экспериментальные данные о циклическом нагружении асфальтобетонного покрытия по схеме пятиточечного изгиба и делается вывод о накоплении значительного количества повреждений в верхней фибре асфальтобетона, приводящих в конечном счете к появлению трещины, однако отмечается необходимость дальнейших исследований в данном направлении. К такому же выводу можно прийти, анализируя работу [28], где приводится экспериментальный анализ склонности к образованию трещин в щебеночно-мастичных и литых асфальтобетонных смесях, являющихся основными видами асфальтобетона, используемыми на металлических мостах. Особенно следует отметить исследование, ведущееся в этом направлении в Делфтском технологическом университете, представленное в работах [29], [30], [31], [32] и в диссертации 2006 г. Medani T.O. «Design principles of surfacings on orthotropic steel bridge decks». В данных исследованиях более детально рассматриваются особенности работы асфальтобетонных покрытий мостов с ортотропной плитой, с детальным учетом всех особенностей материала с реологическими свойствами. Однако на западе в ортотропных плитах используются в основном продольные ребра замкнутого профиля, имеющие более высокую жесткость на кручение и изгиб. Тогда как в российском мостостроении широкое применение имеют полосовые продольные ребра. Эта разница приводит к отличию работы асфальтобетона,

Grishin, I.; Petropavlovskikh, O.; Ibragimova, A.

Stress-strain state of asphalt concrete pavements of steel bridges;

2023; *Construction of Unique Buildings and Structures*; 109 Article No 10924. doi: 10.4123/CUBS.109.24



поскольку при использовании продольных ребер замкнутого профиля растяжение в верхней фибре асфальтобетона возникает в створе стенок ребер, тогда как при использовании продольных ребер незамкнутого профиля наибольшие растягивающие напряжения возникают в створе стенки главной балки.

Таким образом, **цель исследования** заключается в изучении особенностей работы ездового полотна, уложенного на ортотропную плиту с полосовыми продольными ребрами с учетом зависимости модуля упругости асфальтобетона от времени приложения колесной нагрузки и температуры путем использования модифицированной модели Hirsch T.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие **задачи**:

1. На основе анализа проведенных в данном направлении исследований задаться деформативными свойствами асфальтобетона с учетом их изменения в зависимости от температуры и времени приложения нагрузки.

2. Построить конечно-элементную модель секции пролетного строения, используя для моделирования металлических элементов мостового сооружения оболочечные элементы, а для моделирования асфальтобетона и защитно-сцепляющего слоя объемные конечные элементы. В качестве нагрузки использовать трехосное транспортное средство, принимая пятно контакта с поверхностью асфальтобетона в виде прямоугольника.

3. Перемещая транспортное средство в продольном и поперечном направлениях, проанализировать изменение напряженно-деформированного состояния асфальтобетонного покрытия при изменяющейся температуре. При этом будут анализироваться растягивающие напряжения, как основная причина возникновения трещин в асфальтобетонных покрытиях мостов.

Объект исследования – асфальтобетонное покрытие ездового полотна металлических мостов с ортотропной плитой.

Предмет исследования – напряженно-деформированное состояние асфальтобетонного покрытия ездового полотна при переменных температуре и расположении нагрузки.

2 Methods

Основным методом достижения поставленной цели является моделирование секции пролетного строения металлического моста с помощью МКЭ для определения модуля упругости асфальтобетона при температурах $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. МКЭ имеет значительные преимущества при решении данной задачи, поскольку позволяет моделировать металлические конструкции оболочечными (SHELL) элементами, а исследуемую область конструкции, выполненную из асфальтобетона, моделировать при этом объемными (SOLID) элементами. Эти преимущества появились благодаря использованию ANSYS Workbench, где процедура стыковки оболочечных и объемных конечных элементов в значительной степени упрощена, поскольку области их контакта определяются автоматически. Кроме того, реализованный в рамках ANSYS МКЭ позволяет легко менять модуль деформации материалов и, в дальнейших исследованиях, учитывать ползучесть материала.

При этом за основу взяты данные о модуле упругости асфальтобетона и защитно-сцепляющего слоя, использованные Поляковым С.Ю. под руководством Яшнова А.Н. при написании диссертации «Совершенствование метода расчета долговечности асфальтобетонного покрытия на ортотропной плите мостов по критерию усталостного разрушения» и работ [21], [22], [23]. Эти исследователи применяют модифицированную модель для динамического модуля упругости асфальтобетона Hirsch T. Рассматриваются, среди прочих, следующие варианты асфальтобетонных покрытий мостов:

1. Двухслойное асфальтобетонное покрытие моста через р. Тобол. Нижний слой толщиной 60 мм это асфальтобетон типа Б марки I, верхний слой толщиной 50 мм это асфальтобетон ШМА-15. При этом принимаются значения модулей упругости и коэффициентов Пуассона, приведенные в таблице 1.
2. Покрытие Краснофлотского моста р. Северная Двина. Двухслойный литой асфальтобетон толщиной 70 мм на композиционном резино-полимербитумном вяжущем КРПБВ-60, модифицированном добавкой ПОЛИЭПОР-РП. При этом принимаются значения модулей упругости и коэффициентов Пуассона, приведенные в таблице 2.

Таблица 1. Модуль упругости и коэффициент Пуассона асфальтобетона типа Б марки I (по данным Полякова С.Ю., Яшнова А.Н.)

Table 1. Elasticity modulus and Poisson's ratio of asphalt concrete type B mark I (data by Polyakov S.Y., Yashnov A.N.)

	Температура, °С		
	-10	0	+20
Модуль упругости асфальтобетона, МПа	20369	9215	1789
Коэффициент Пуассона	0.18	0.21	0.329

Таблица 2. Модуль упругости и коэффициент Пуассона литого асфальтобетона (по данным Полякова С.Ю., Яшнова А.Н.)

Table 2. Elasticity modulus and Poisson's ratio of mastic asphalt concrete (data by Polyakov S.Y., Yashnov A.N.)

	Температура, °С		
	-10	0	+20
Модуль упругости асфальтобетона, МПа	10090	6950	133
Коэффициент Пуассона	0.21	0.233	0.475

Анализируя данные таблиц 1 и 2, можно заметить, что принятые модули упругости при температурах -10 °С и 0 °С отличаются в 1.5–2 раза, тогда как модуль упругости при +20 °С отличается более чем в 10 раз. При этом принимаемые динамические значения модуля упругости асфальтобетона были получены аналитически с помощью модели Hirsch Т., которая разрабатывалась на основе экспериментальных данных. По-видимому, такое значительное понижение модуля упругости объясняется особенностями литого асфальтобетона. В результате нами принимаются значения модуля упругости асфальтобетона, показанные в таблице 3, из которой можно видеть, что модуль упругости при +20 °С был несколько увеличен. Выбор нами данных, приближенных к таблице 2, обусловлен тем, что Поляков С.Ю. и Яшнов А.Н. принимали при определении модуля упругости асфальтобетона время приложения нагрузки к асфальтобетону, равное 0.05 с, что соответствует достаточно быстрому проходу колеса. В случае же уменьшения скорости движения транспорта по мосту вплоть до нуля модуль упругости асфальтобетона будет уменьшаться. Поэтому в ситуации, если принятые в таблице 3 значения модуля упругости окажутся заниженными, по сравнению с реальными при данных температурах и скоростях нагружения, они позволят приблизительно оценить особенности НДС при пониженных скоростях движения транспорта по мосту. Если же такого занижения нет, то указанные особенности будут характерны и при нормальных скоростях движения.

Таблица 3. Принятые значения модуля упругости и коэффициента Пуассона асфальтобетона

Table 3. Accepted elasticity modulus and Poisson's ratio of asphalt concrete

	Температура, °С		
	-10	0	+20
Модуль упругости асфальтобетона, МПа	10090	6950	170
Коэффициент Пуассона	0.21	0.233	0.475

Модуль упругости стали прием равным $2 \cdot 10^{11}$ МПа, а коэффициент Пуассона равным 0.3. Модуль упругости и коэффициент Пуассона защитно-сцепляющего слоя показаны в таблице 4 и также принимаются на основе работ Полякова С.Ю. и Яшнова А.Н.

Таблица 4. Принятые значения модуля упругости и коэффициента Пуассона защитно-сцепляющего слоя

Table 4. Accepted elasticity modulus and Poisson's ratio of protective-adhesive layer

	Температура, °С		
	-10	0	+20

Модуль упругости битума, МПа	2300	1240	20
Коэффициент Пуассона	0.35	0.35	0.35

Расчет выполняется на примере металлического пролетного строения, близкого по своим геометрическим параметрам к пролетному строению автодорожного моста через реку Каму у села Сорочьи Горы в Республике Татарстан. Пролетное строение имеет коробчатый вид, с двумя вертикальными стенками толщиной 20 мм, высотой 3636 мм и расстоянием между ними 5340 мм. Стенки объединены понизу ортотропной плитой с настилом толщиной 16 мм, полосовыми продольными ребрами высотой 200 мм, толщиной 14 мм и шагом 410 мм. Поперечные ребра нижней плиты имеют стенку высотой 610 мм и толщиной 12 мм, и полку шириной 300 мм и толщиной 12 мм. По верху стенки объединены ортотропной плитой с настилом толщиной 16 мм, полосовыми продольными ребрами высотой 180 мм, толщиной 14 мм и шагом 340 мм. С левой стороны коробчатого сечения имеется консоль вылетом 3869 мм, с правой стороны консоль вылетом 4207 мм. Шаг продольных полосовых ребер консолей 350 мм, остальные геометрические параметры повторяют характеристики ортотропной плиты. Каждая стенка подкреплена тремя продольными ребрами с внешней стороны высотой 180 мм и толщиной 14 мм. Первое, второе и третье продольное ребро отстоит от низа стенки на 568 мм, 1362 мм и 2862 мм, соответственно. Кроме того, стенки подкреплены поперечными ребрами высотой 250 мм и толщиной 12 мм, в местах пересечения с поперечными ребрами нижней и верхней плит. Поперечные ребра имеют шаг 3000 мм. Для расчета выбрана секция пролетного строения длиной 9000 мм, общий вид показан на рис. 1.

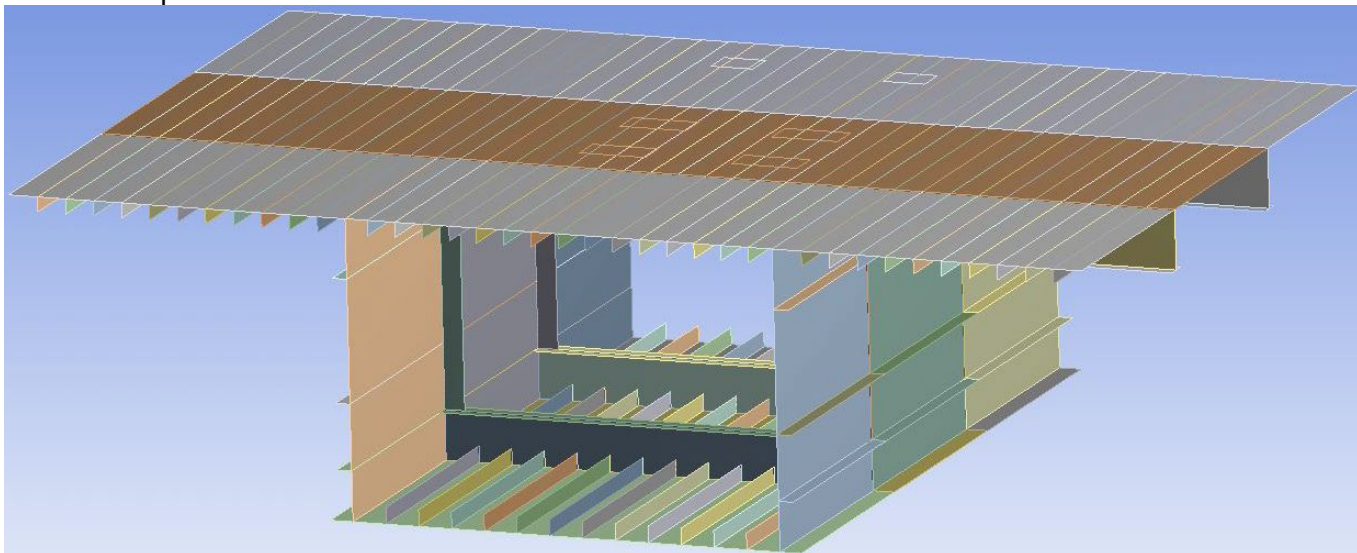


Рис. 1 - Общий вид секции пролетного строения
Fig. 1 - General view of the superstructure section

Для реализации МКЭ применяется расчетный комплекс ANSYS Workbench v.15.0 (<https://www.ansys.com/>). При этом для моделирования металлической конструкции используются четырехузловые оболочечные конечные элементы (далее - КЭ) SHELL181, а для моделирования защитно-сцепляющего и асфальтобетонного слоев объемные восьмиузловые КЭ SOLID185. Для стыковки объемных и оболочечных КЭ используются контактные КЭ, как для стыковки некоторых оболочечных КЭ друг с другом. По толщине защитно-сцепляющего слоя принимается 1 конечный элемент. По толщине асфальтобетона принимается 4 конечных элемента. По торцам секции пролетного строения узлы КЭ не имеют возможности перемещений или кручений, т.е. рассматривается их жесткое защемление. Это связано с тем, что совместная работа ездового полотна и ортотропной плиты осуществляется в основном от местных деформаций, а не от общих деформаций пролетного строения. Все типы КЭ предполагают линейно-упругую работу материалов.

В качестве нагрузки рассматривается трехосная тележка, с нагрузкой 7680 кг на две задние оси и 3360 кг на переднюю ось. Контакт колеса с поверхностью асфальтобетона рассматривается в виде равномерно распределенной нагрузки, приложенной к прямоугольному пятну контакта. Для задних осей пятно контакта имеет размеры 0.6 м (поперек оси моста) на 0.2 м (вдоль оси моста)

Grishin, I.; Petropavlovskikh, O.; Ibragimova, A.

Stress-strain state of asphalt concrete pavements of steel bridges;

2023; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **109** Article No 10924. doi: 10.4123/CUBS.109.24

с интенсивностью нагрузки 0.32 МПа, что соответствует спаренному колесу. Для передней оси пятно контакта имело размеры 0.3 м (поперек оси моста) на 0.2 м (вдоль оси моста) с интенсивностью нагрузки 0.28 МПа, что соответствует одиночному колесу.

Рассматривались все комбинации параметров загрузки А и В, в соответствии с рис. 2. При этом параметр А принимал следующие значения: 3.75 м; 3 м; 2.9 м; 2.8 м; 2.6 м; 2.25 м; 1.7 м; 1.6 м. Параметр В принимал следующие значения: 5.289 м; 4.349 м; 3.869 м; 3.569 м; 3.269 м; 3 м; 2.7 м.

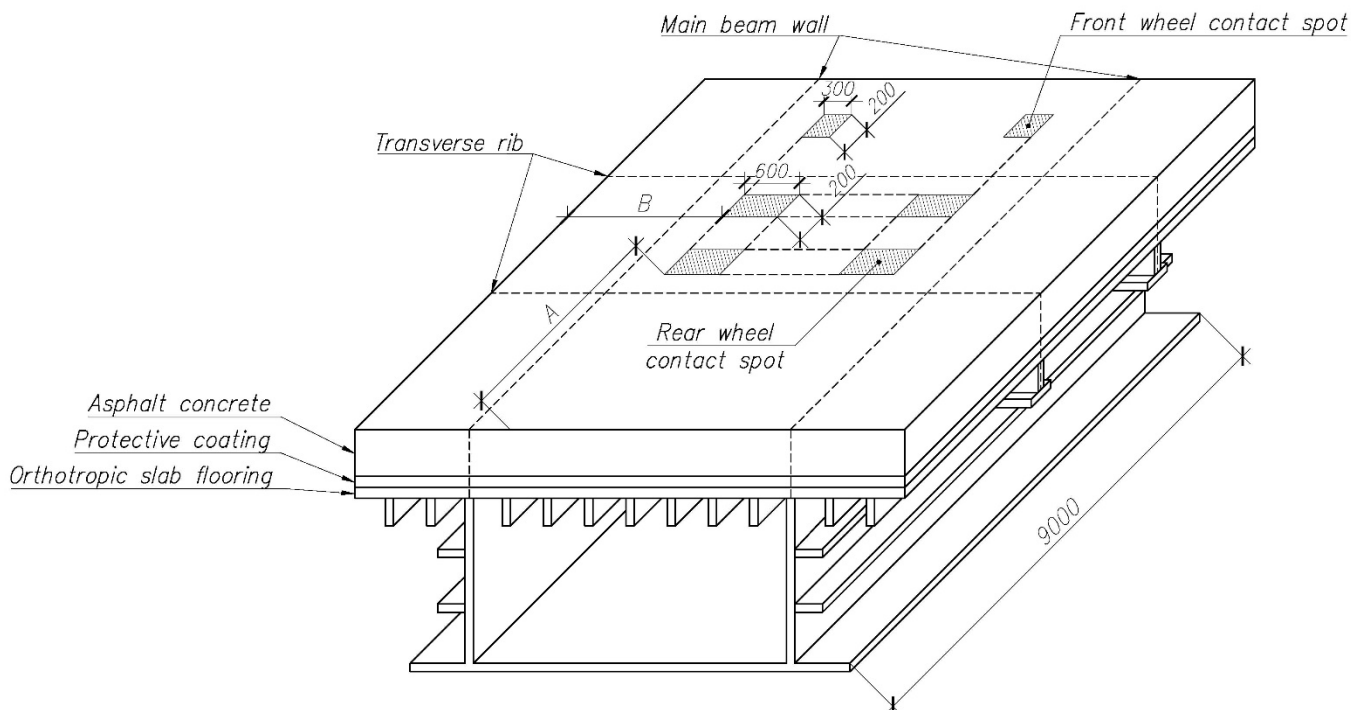


Рис. 2 - Схема загрузки секции пролетного строения моста
Fig. 2 - Loading scheme of a bridge span section

3 Results and discussion

В результате проведенных расчетов было получено множество картин распределения наибольших главных напряжений в верхней фибре асфальтобетона в пределах секции. Для примера, на рис. 3 приведено распределение напряжений при $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $A=3.75\text{ м}$, $B=5.289\text{ м}$. Результаты показаны в паскалях, отдельно указаны напряжения, возникающие над стенкой главной балки моста. В дальнейшем на рисунках мы будем указывать только интересующие нас участки секции.

На рис. 4, 5, 6 показаны распределения наибольших главных напряжений (единицы измерения Па) в верхней фибре асфальтобетона при температурах $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, соответственно.

Анализируя представленные результаты, можно заметить, что при рассмотрении напряжений над стенкой главной балки картина, в целом, соответствует описанному в диссертации Полякова С.Ю. [29], где приведены результаты экспериментального определения деформаций на мосту через р. Тобол. При этом деформации достигали величины $1.2 \cdot 10^{-3}$ при температуре, меняющейся от $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$, т.е. при средней температуре $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это соответствует полученному нами результату, показанному на рис. 6в, где деформации достигают величины $0.98 \cdot 10^{-3}$ при установке колеса рядом со стенкой главной балки. Картина, предполагающая, что наибольшие растягивающие напряжения возникают над ребрами жесткости, также соответствует показанной в работах авторов из Дельфтского Технологического Университета [30], [31], [32], [33], где данное распределение положено в основу исследования касательных напряжений между защитно-сцепляющим слоем и металлическим настилом. Аналогичный подход представлен в диссертации Medani Т.О. [34], где, в частности, приводится сравнение экспериментальных напряжений в литом асфальтобетоне, полученных на стенде LINTRACK, с расчетными результатами, полученными на программном обеспечении SAP3D,

реализующем МКЭ. По результатам моделирования, проведенного Medani Т.О., напряжения в верхней фибре асфальтобетона, расположенной над продольным ребром жесткости замкнутого профиля, достигает величины 2.2 МПа при нагрузке 50 кН, прикладываемой на одиночное колесо, движущееся со скоростью 2 км/ч и при температуре 0 °С. В нашем случае результаты при аналогичных условиях моделирования показаны на рис. 4б, где напряжения достигают величины 1.55 МПа. Принятая Medani нагрузка на колесо не поддается точному переводу в напряжения, прикладываемые на площадку контакта колеса с поверхностью покрытия. Однако, основываясь на фотографии стенда LINTRACK, приблизительно размер отпечатка колеса может быть принят равным 0.2х0.4 м. В этом случае на поверхность покрытия прикладываются средние напряжения 0.625 МПа, что несколько больше приложенных нами 0.32 МПа. Этим, а также расхождением в конфигурации мостового полотна и ребер жесткости объясняется некоторое различие результатов Medani (2.2 МПа) и наших результатов (1.55 МПа), являющихся, тем не менее, сравнимыми величинами. По результатам проведенного анализа можно сделать вывод, что направление наибольших главных напряжений совпадает с направлением наибольших растягивающих напряжений в верхней фибре асфальтобетона, а наибольшие растягивающие напряжения возникают в створе стенки главной балки, как показано на рис. 4. Это и объясняет, чем вызваны требования СП 35.13330.2011. Также подтверждается высказанное в диссертации Полякова С.Ю. замечание о том, что напряжения в верхней фибре асфальтобетона над стенкой главной балки не меняют своего знака, что накладывает ограничения на возможность использования результатов Дровалева О.В. [35].

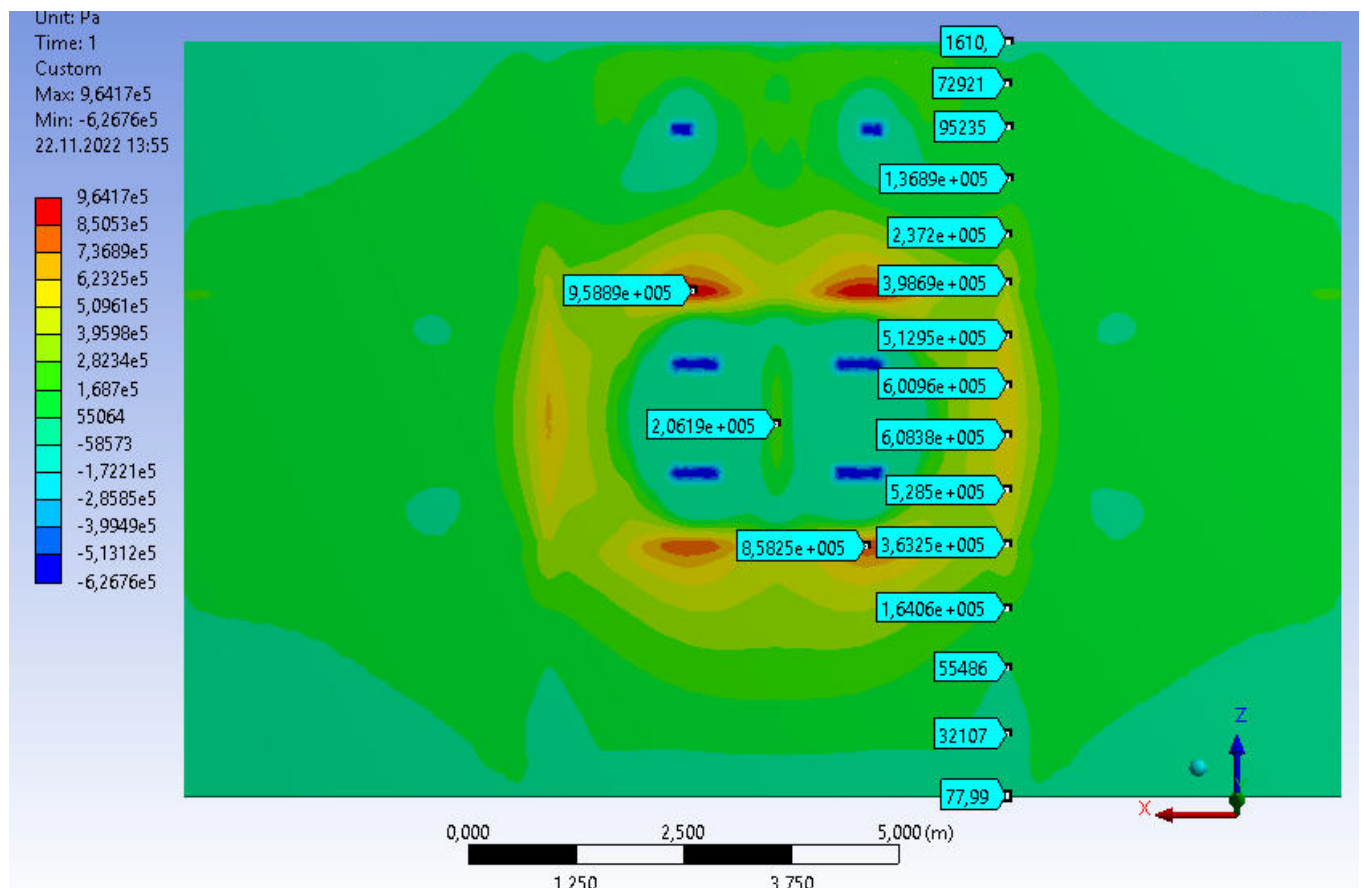


Рис. 3 - Наибольшие главные напряжения (единицы измерения Па) в верхней фибре асфальтобетона при -10 °С, A=3.75 м, B=5.289 м

Fig. 3 - The greatest main stress (units of measurement Pa) in the upper fiber of asphalt concrete at -10 °C, A = 3.75 m, B=5.289 m

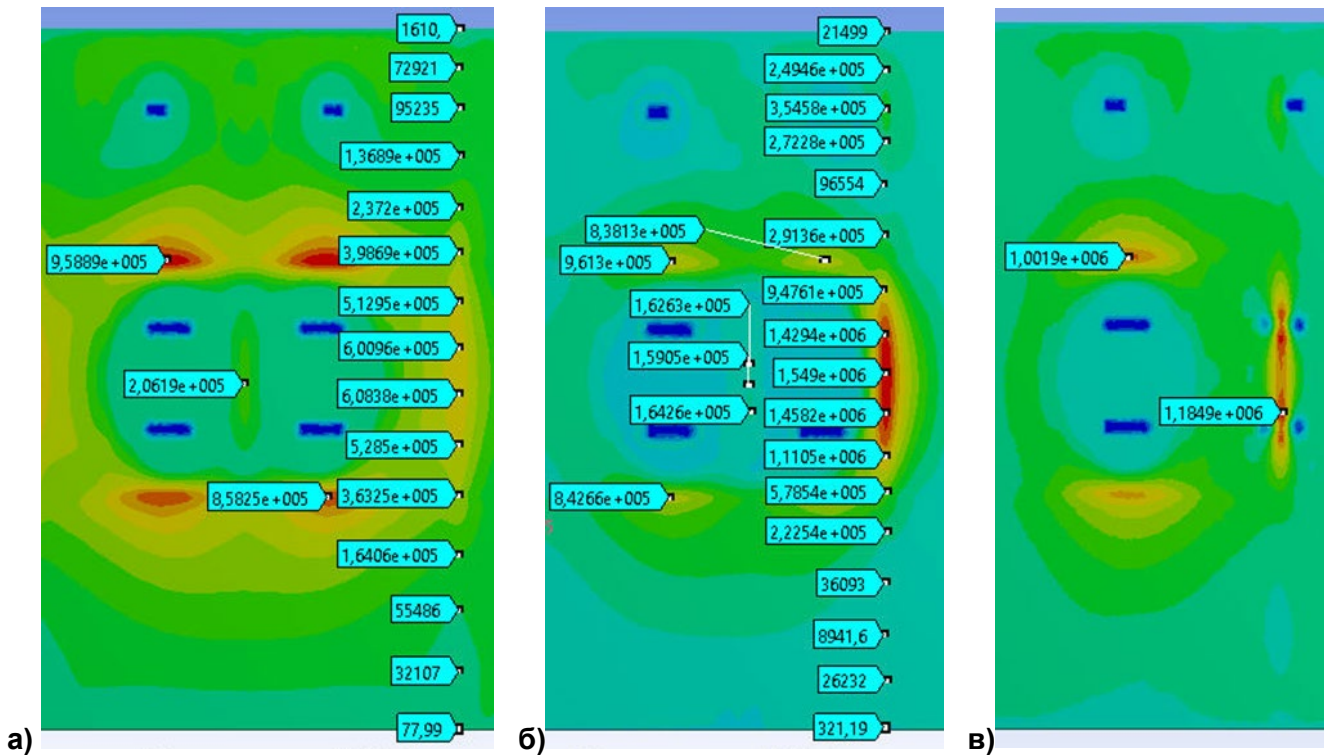


Рис. 4 - Распределение наибольших главных напряжений (единицы измерения Па) в верхней фибре асфальтобетона в области, прилегающей к створу стенки главной балки при температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$: а) при $V=5.289\text{ м}$; б) при $V=4.349\text{ м}$; в) при $V=3.569\text{ м}$

Fig. 4 - The distribution of the greatest principal stress (units of measurement Pa) in the upper fiber of asphalt concrete in the area adjacent to the main beam wall at a temperature of $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$: а) at $V = 5.289\text{ м}$; б) at $V = 4.349\text{ м}$; в) at $V = 3.569\text{ м}$

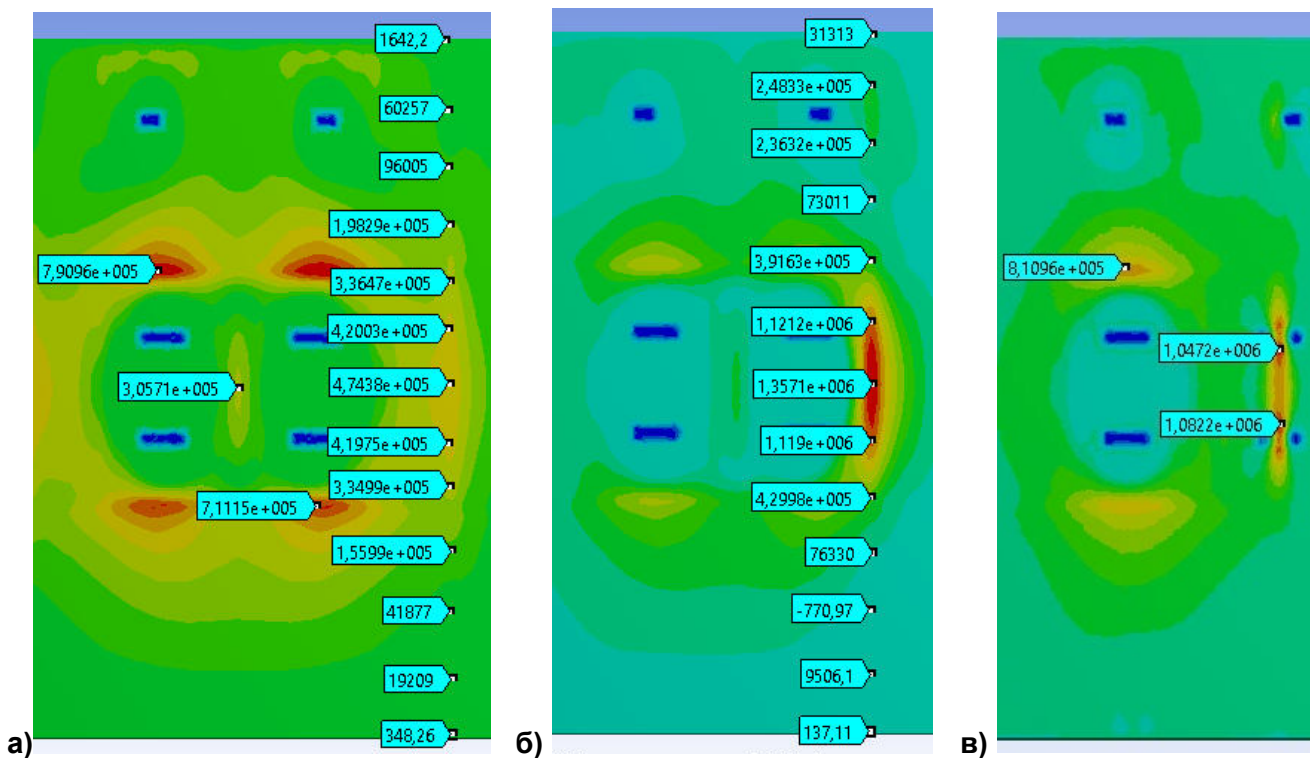


Рис. 5 - Распределение наибольших главных напряжений (единицы измерения Па) в верхней фибре асфальтобетона в области, прилегающей к створу стенки главной балки при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$: а) при $V=5.289\text{ м}$; б) при $V=4.349\text{ м}$; в) при $V=3.569\text{ м}$

Fig. 5 - Distribution of the greatest principal stress (units of measurement Pa) in the upper fiber of asphalt concrete in the area adjacent to the main beam wall at $0\text{ }^{\circ}\text{C}$: а) at $V = 5.289\text{ м}$; б) at $V = 4.349\text{ м}$; в) at $V = 3.569\text{ м}$

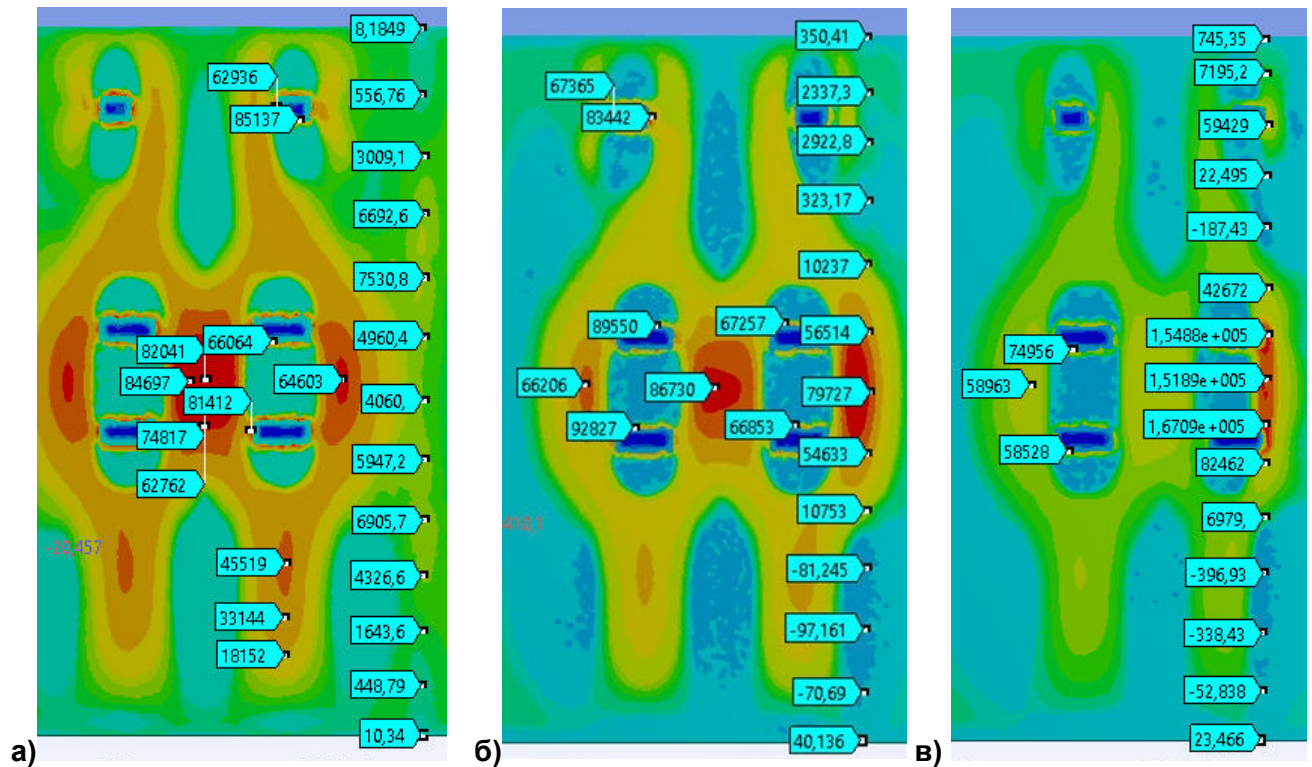


Рис. 6 - Распределение наибольших главных напряжений (единицы измерения Па) в верхней фибре асфальтобетона в области, прилегающей к створу стенки главной балки при температуре +20 °С: а) при $B=5.289$ м; б) при $B=4.349$ м; в) при $B=3.869$ м

Fig. 6 - Distribution of the greatest principal stress (units of measurement Pa) in the upper fiber of asphalt concrete in the area adjacent to the main beam wall at +20 °C: a) at $B = 5.289$ m; b) at $B = 4.349$ m; c) at $B = 3.869$ m

Однако при температуре +20 °С (рис. 6) картина распределения напряжений сильно меняется и, на наш взгляд, является качественно иной. Можно видеть из рис. 6а, что при значительном отдалении колеса от стенки главной балки максимальные деформации возникают в области рядом с колесом, достигая величины $0.48 \cdot 10^{-3}$. Тогда как над стенкой главной балки деформации будут всего лишь $0.42 \cdot 10^{-4}$, т.е. на порядок меньше. А сравнивая рис. 6а, 6б, 6в, показывающие изменение НДС с перемещением нагрузки поперек моста, видно, что область наибольших напряжений следует за колесом.

Аналогичная картина возникает и при перемещении колеса вдоль оси моста, как показано на рис. 7, где параметр $A=2.25$ м. Данная особенность ранее не была отмечена приведенными выше авторами и, на наш взгляд, может повлиять на конструирование ездового полотна. Поскольку в случае, если зона наибольших напряжений расположена над стенкой главной балки, вне зависимости от положения нагрузки и температуры, накопление повреждений всегда будет происходить в этом месте. Однако если при повышении температуры ситуация меняется и зона максимальных напряжений, а следовательно, и накопления повреждений, сдвигается к колесу, рационально было бы разнести в пространстве полосу наката и стенку главной балки. Это привело бы к тому, что над стенкой главной балки повреждения не накапливались бы при отрицательных температурах, что, в свою очередь, привело бы к повышению срока службы покрытия. В пользу этого говорит также дополнительный фактор, заключающийся в том, что наибольшее накопление повреждений происходит именно при положительных температурах.

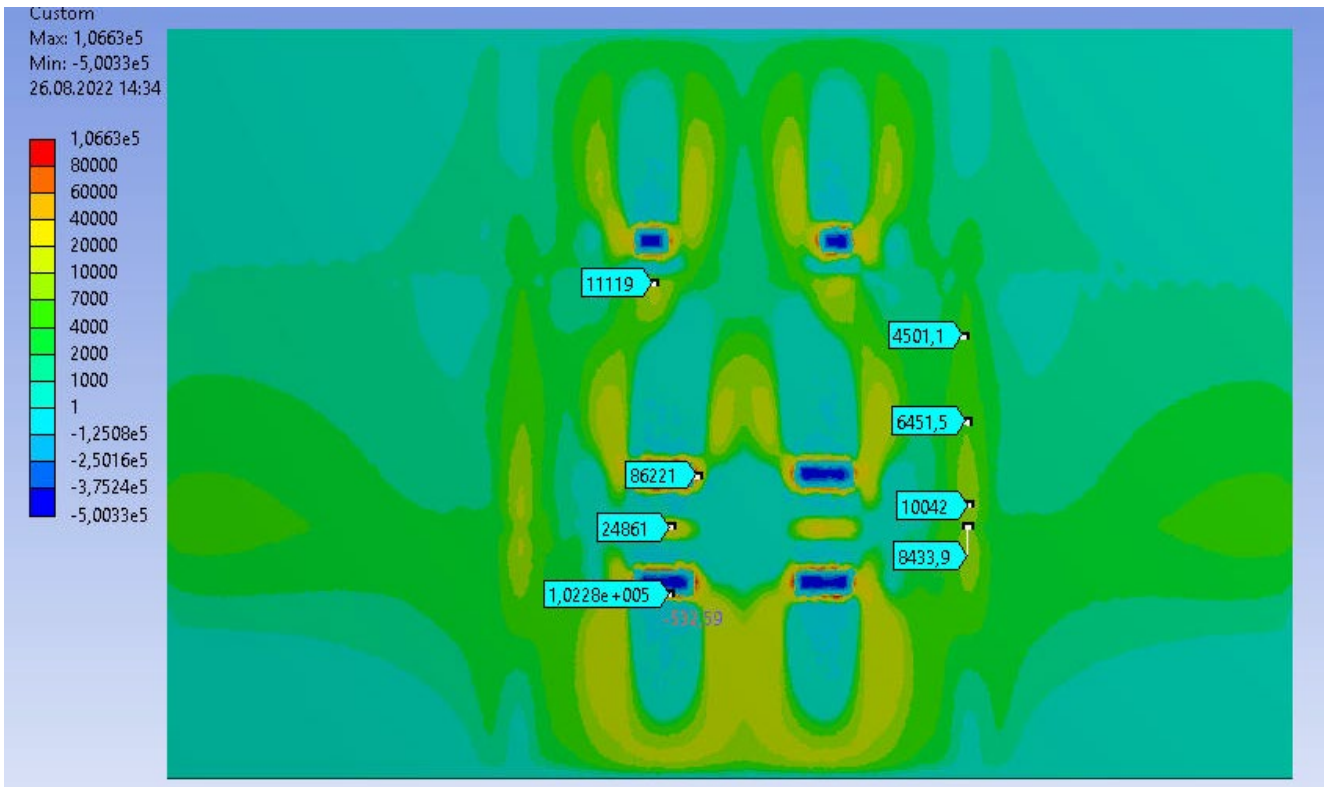


Рис. 7 - Распределение наибольших главных напряжений (единицы измерения Па) в верхней фибре асфальтобетона при температуре +20 °С, В=5.289 м, А=2.25 м.

Fig. 7 - Distribution of the greatest principal stress (units of measurement Pa) in the upper fiber of asphalt concrete at +20 °C, В =5.289 m, А=2.25 m.

Следует при этом отметить, что использованная Поляковым С.Ю. и Яшновым А.Н. [21] модель динамического модуля упругости асфальтобетона Hirsch Т., модифицированная Pellinen Т., Christensen D. и Vonaquist R. [36], [37] определяет его зависимость от следующих основных параметров:

- VMA – объем пустот между зернами минерального заполнителя в уплотненной асфальтобетонной смеси, которые могут быть заполнены битумом, выраженный в процентах от общего объема смеси;

- VFA – процент всех возможных пустот, которые фактически заполнены битумом;

- $|G^*|$ - динамический модуль сдвига битума, Па.

Однако, анализ данных работ показывает, что даже в модифицированной Pellinen Т., Christensen D. и Vonaquist R. форме, модуль деформации результирующей смеси не проверялся на литом асфальтобетоне и на щебеночно-мастичном асфальтобетоне. В отличие от усовершенствованной модели Witczak M.W., описанной в работе [38], справедливой для щебеночно-мастичного асфальтобетона и позволяющей учесть большее количество параметров, а именно:

- V_a – объем пустот в смеси, выраженный в процентах от общего объема смеси, связанный с величинами VMA и VFA уравнением $VFA=(VMA- V_a)/VMA$;

- V_{beff} – объем пустот, занятый битумом, в процентах от общего объема смеси;

- $|G^*|$ - динамический модуль сдвига битума, пси;

- δ – фазовый угол сдвига битума, определяемый одновременно с динамическим модулем сдвига битума на динамическом сдвиговом реометре, измеряемый в градусах;

- ρ_{200} – процент (от массы всего заполнителя) минерального материала, прошедшего через сито №200;

- ρ_4 – процент (от массы всего заполнителя) минерального материала, прошедшего через сито №4;

- ρ_{38} – процент (от массы всего заполнителя) минерального материала, прошедшего через сито №38;

- ρ_{34} – процент (от массы всего заполнителя) минерального материала, прошедшего через сито №34.

Grishin, I.; Petropavlovskikh, O.; Ibragimova, A.

Stress-strain state of asphalt concrete pavements of steel bridges;

2023; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **109** Article No 10924. doi: 10.4123/CUBS.109.24



Из приведенного выше можно видеть, что модель Witczak M.W. позволяет частично учитывать особенности гранулометрического состава. Кроме того, модель Witczak M.W. опирается на более полные исследования и учитывает возможность использования модификаторов битума, что в совокупности делает ее потенциально более пригодной для определения динамического модуля упругости литого и щебеночно-мастичного асфальтобетона.

Модель Hirsch Т. создана для минимальной частоты приложения нагрузки 0.01 Гц, что видно, например, из работы [37]. Данная частота соответствует времени приложения нагрузки к асфальтобетону, равному 100 с. Учитывая, что пятно контакта колеса с покрытием вдоль оси моста составляет 0.2 м, такое время приложения нагрузки соответствует довольно медленному продвижению транспортных средств по мосту. Кроме того, летом при воздействии солнечного излучения асфальтобетон может нагреваться до +50 °С. Данные факторы говорят в пользу возможности возникновения обнаруженной нами особенности НДС асфальтобетонных покрытий мостов в летние периоды, если и не при всех скоростях движения транспорта по мосту, то, во всяком случае, при его замедленном движении. Более детальное моделирование особенностей НДС ездового полотна должно включать учет ползучести асфальтобетона при остановке транспорта, а также рассмотрение возможности применения модели динамического модуля упругости асфальтобетона Witczak M.W.

4 Conclusions

1. Полученные при моделировании напряжения и деформации сравнимы с величинами, полученными ранее другими исследователями, и подтверждены экспериментально, из чего можно сделать вывод о приемлемом уровне соответствия полученных результатов реальной картине напряженно-деформированного состояния ездового полотна.

2. При температурах от -10 °С до 0 °С наибольшие растягивающие напряжения возникают над стенкой главной балки при различных положениях транспортного средства и принимают следующие значения: от 0.47 МПа до 1.55 МПа – при 0 °С; от 0.61 МПа до 1.55 МПа – при -10 °С. Данная картина соответствует устоявшимся представлениям о поверхности влияния растягивающих напряжений над стенками главных балок.

3. При температуре +20 °С картина распределения напряжений существенно меняется и при отдалении транспортного средства от стенки главной балки наибольшие напряжения возникают у колеса, достигая величины 0.08 МПа.

4. Учитывая обнаруженные особенности НДС, для повышения срока службы асфальтобетонных покрытий металлических мостов может оказаться эффективным разнесение в пространстве стенки главной балки и полосы наката на этапе проектирования.

5. При всех температурах наиболее существенный вклад к наибольшим главным напряжениям вносят напряжения σ_x , где ось x направлена поперек моста.

Таким образом, были исследованы особенности работы ездового полотна, уложенного на ортотропную плиту с полосовыми продольными ребрами. При этом учитывалась зависимость модуля упругости асфальтобетона от времени приложения колесной нагрузки и температуры, путем использования модифицированной модели Hirsch Т., подтвердившей свою применимость к подобного рода задачам в исследованиях Полякова С.Ю. и Яшнова А.Н.

References

1. Radovskij, B.S. Design of asphalt pavements for heavy vehicles. ISBN: 5-7705-0154-5. URL: <https://dwg.ru/dnl/11496?ysclid=lg9mprhdsu807365747> (date of application: 25.12.2022).
2. Aleksandrov, A. S., Smirnov, A. V., Semenova, T. V. (2019) Stress Investigation in Pavement Layers and a New Calculation Model. *Materials Science Forum*, Trans Tech Publications, **945**, 813–820. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.945.813>.
3. Aleksandrov, A.S., Kalinin, A.L., Semenova, T.V. (2022) Determination of the first critical load for road structures, URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_48207434_30940987.pdf (date of application: 25.12.2022).
4. Aleksandrov, A.S., Semenova, T.V., Aleksandrova, N.P. (2020) Calculation of Residual Deformations of Granulated Materials from Exposure to Repeated Loads. *Materials Science Forum*, Trans Tech Publications, **992**, 828-835. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.992.828>.



5. Chusov, V., Aleksandrova, N., Ignatov, V. (2019) Calculation of road clothes by elastic deflection criteria taking into account damage to asphalt concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, **687**, 022037. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/687/2/022037>.
6. Chusov, V., Aleksandrova, N., Semenova, T. (2021) Accounting of Damage of Asphalt Concrete in the Criteria for Calculating the Pavement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, **1079**, 052016. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1079/5/052016>.
7. Smirnov, A. V., Bazhenova, A. Yu., Demin, A. S. About the criteria for the dynamic strength of the roadway of highway. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_32284511_76322762.pdf (date of application: 24.12.2022).
8. Smirnov, A.V., Bazhenova, A.Yu., Demin, A.S. On the criteria for the dynamic strength of the roadway. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_35230757_87324197.pdf (date of application: 24.12.2022).
9. Smirnov, A.V., Sechkin, G.I., Kuznetsov I.S. Creation of a computational complex for determining the elastic deflection of road structures. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_35240538_54545113.pdf (date of application: 24.12.2022).
10. Gayfutdinov, R., Baimukhametov, G., Hafizov, E. (2021) Pavement wear process and abrasive wear resistance of asphalt concrete. *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, **274**, 02008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127402008>.
11. Vdovin, E., Stroganov, V., Konovalov, N. (2020) Modification of Road Soil Cement with Activated Fillers. *Lecture Notes in Civil Engineering*, Springer, **150**, 335-345. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72404-7_33.
12. Lijun, S. The structural behavior of overlaid asphalt pavements. *Structural Behavior of Asphalt Pavements*, 501-547. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-849908-5.00007-9>.
13. Yu, L., Peifeng, S., Miaomiao, L., Zhanping, Y., Mohan, Z. (2020) Review on evolution and evaluation of asphalt pavement structures and materials. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, Periodical Offices of Chang'an University, **7**, 573-579. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.05.003>.
14. Eskandarsefat, S., Venturini, L., Ciarlitti, A., Sogno, E., Ottonelli, I. (2022) Asphalt Concrete Modification with Plastomers: A Case Study Conducted 7 Years after Construction. *Infrastructures*, MDPI, **7**, 29. <https://doi.org/10.3390/infrastructures7030029>.
15. Eskandarsefat, S., Dondi, G., Sangiorgi, C. (2019) Recycled and rubberized SMA modified mixtures: A comparison between polymer modified bitumen and modified fibres. *Construction and Building Materials*, **202**, 681-691. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.045>.
16. Ovchinnikov, I. G., Saharova, I. D., Shcherbakov, A. G. Features of the design of the clothing of the riding cloth on bridge structures in modern conditions. ISBN: 5-98276-138-9. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18250223&ysclid=lbqytq6rp9714682558> (date of application: 25.12.2022).
17. Sherbakov, A.G., Naumova, G.A., Ovchinnikov, I.G., Bochkarev, A.V. Applied mechanics of pavements on bridge structures. ISBN: 5-98276-138-9. URL: <https://dwg.ru/lib/2289> (date of application: 25.12.2022).
18. Ovchinnikov, I. G., Ovchinnikov, I. I., Telegin M. A., Khokhlov, S.V. Application of asphalt concrete pavement on bridges (foreign experience). URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_22562996_52623879.pdf (date of application: 24.12.2022).
19. Telegin, M.A., Ovchinnikov, I.G. Research of simultaneous working of a steel orthotropic plate with road pavement on it at their various parameters. URL: <https://t-s.today/PDF/02TS215.pdf> (date of application: 24.12.2022).
20. Ovchinnikov, I.G., Ovchinnikov, I.I., Telegin, M.A. Evaluation of the applicability of various materials for the construction of pavements on bridges with a metal orthotropic roadway deck. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26667544&pff=1> (date of application: 24.12.2022).
21. Yashnov, A.N., Polyakov, S. Yu. Experimental determination of stress-strain state of asphalt pavement on metal bridges. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_35088146_17610452.pdf (date of application: 25.12.2022).
22. Polyakov, S. Yu. (2020) Improving the design of the roadway of metal bridges, taking into account the peculiarities of the nature of the work of the clothing of the roadway. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta, FGBOU VO «TGASU»*, **2**, 174-184. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2020-22-2-174-184>.



23. Dubina, S., Dzhafarov, R., Yashnov, A., Polyakov, S., Nikolskii, V., Dudareva, T., Krasotkina, I. (2021) Construction of Asphalt Pavement for Orthotropic Steel Deck Bridge. *International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering*, Springer, **150**, 504-514. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72404-7_49.
24. Panichev, A., Usoltsev, A., Ivanov, A., Poljakov, S. (2022) Increasing the durability of pavement on operational steel spans by reinforcement with composite materials. *Transportation Research Procedia*, **63**, 1927-1935. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.213>
25. Grishin, I., Kayumov, R., Ivanov, G. (2020) Asphalt concrete pavements of bridges under thermal stress. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, **890**, 012032. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/890/1/012032>.
26. Grishin, I., Kayumov, R., Ivanov, G., Petropavlovskikh, O. (2020) Computational Model of Rib-Reinforced Plate. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, **890**, 012036. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/890/1/012036>.
27. Hoang, V.H., Nguyen, Q.T., Tran, A.T., Tran, T.C.H., Do, T.A. (2022) Mechanical behavior of the asphalt wearing surface on an orthotropic steel bridge deck under cyclic loading. *Case Studies in Construction Materials*, **16**, e00836. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00836>
28. Budziński, B., Mieczkowski, P., Słowik, M., Mielczarek, M., Bilski, M., Fornalczyk, S. (2023) Assessment of the low-temperature performance of asphalt mixtures for bridge pavement. *Road Materials and Pavement Design*, **24**, 409-423. <https://doi.org/10.1080/14680629.2023.2181002>
29. Polyakov, S. Yu. (2013) Improvement of methods for calculating the durability of asphalt concrete pavement on an orthotropic bridge slab according to the criterion of fatigue failure. URL: http://www.stu.ru/science/theses_get_file.php?id=1567&name=1527.pdf
30. Medani, T.O., Xueyan, L., Huurman, M., Scarpas, A., Molenaar, A. (2008) Experimental and numerical characterization of a membrane material for orthotropic steel deck bridges: Part 1: Experimental work and data interpretation. *Finite Elements in Analysis and Design*, **44**, 552–563. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2008.01.013>.
31. Liu, X., Medani, T., Scarpas, A., Huurman, M., Molenaar, A. (2008) Experimental and numerical characterization of a membrane material for orthotropic steel deck bridges: Part 2. Development and implementation of a nonlinear constitutive model. *Finite Elements in Analysis and Design*, **44**, 580-594. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2008.01.012>.
32. Xueyan, L., Kasbergen, C., Li, J., Scarpas, T. (2020) Modelling of membrane bonding response: part 1 development of an adhesive contact interface element. *International Journal of Pavement Engineering*, Taylor & Francis, **23**, 1-14. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1763992>.
33. Xueyan, L., Kasbergen, C., Li, J., Scarpas, T., Tzimiris, G. (2020) Modelling of membrane bonding response: part 2 finite element simulations of membrane adhesion tests. *International Journal of Pavement Engineering*, Taylor & Francis, **23**, 1-12. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1763993>.
34. Medani, T.O. (2006) Design principles of surfacings on orthotropic steel bridge decks. URL: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A3fba5dde-f774-4114-bebc-d7cc6fc85bb9>
35. Drovaleva, O.V. (2009) Fatigue life of asphalt concrete under the influence of intensive traffic loads URL: <https://www.dissercat.com/content/ustalostnaya-dolgovechnost-asfaltobetona-pri-vozdeistvii-intensivnykh-transportnykh-nagruzok/read>
36. Christensen, D., Hirsch, T., Bonaquist, R. Hirsch model for estimating the modulus of asphalt concrete. *Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions*, **72**, 97-121. URL: https://www.researchgate.net/publication/279903329_Hirsch_model_for_estimating_the_modulus_of_asphalt_concrete
37. Christensen, D., Bonaquist, R. (2015) Improved Hirsch model for estimating the modulus of hot-mix asphalt. *Road Materials and Pavement Design*, Taylor & Francis, **16(2)**, 254-274. <https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1077635>
38. Javed, B., Witczak, M.W., Development of a new revised version of the Witczak E Predictive Model for hot mix asphalt mixtures. URL: https://www.researchgate.net/publication/320386088_Development_of_a_New_Revised_Version_of_the_Witczak_E_Predictive_Models_for_Hot_Mix_Asphalt_Mixtures (date of application: 25.12.2022).