



Research Article Received: December 10, 2022

Accepted: December 20, 2022

ISSN 2304-6295 Published: December 29, 2022

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

Grishin, Ilya V. <sup>1\*[0000-0002-9014-2680]</sup> Petropavlovskikh, Olga K. <sup>1[0000-0002-3022-8271]</sup> Ibragimova, Aniia A. <sup>1[0000-0002-1875-8771]</sup>

<sup>1</sup>Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Correspondence:\* email il6357grishin@yandex.ru; contact phone +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. The necessity of research is due to the fact that 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 cracks. This, in turn, is due to the fact that the stress-strain state of the roadway of metal bridges has its own, insufficiently studied, features. Method. The main research method is use of software package that implements the finite element method. During modeling, shell finite elements are used to model the metal span, and threedimensional 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 considered at different temperatures, on which they largely depend. **Results**. As a result of modeling superstructure section, it was found that tensile stress do indeed occur 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 are, which can lead to cracks in the future. 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, while at sub-zero temperatures, the highest tensile stresses always occur above the main beam. Taking into account that cracks in asphalt concrete arise as a result of 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 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 соответствии с требованиями СП 35.13330.2011 «Свод правил. Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84\*»: «Конструкции дорожной одежды и ортотропной плиты должны исключать появление трещин в покрытии над главными балками стальных пролетных строений». Особенно актуальна данная проблема применительно к металлическим мостам с ортотропной плитой, настил которой имеет значительно меньшую изгибную жесткость, чем плиты железобетонных мостов. Для исключения появления трещин в межремонтные сроки необходимо иметь возможность оценивать напряженно-деформированное состояние (НДС) ездового полотна. Однако разработанных методов определения НДС асфальтобетонных покрытий металлических мостов, учитывающих все особенности их работы, не существует.

Grishin, I.; Petropavlovskikh, O.; Ibragimova, A. Stress-strain state of asphalt concrete pavements of steel bridges under traffic load; 2022; *Construction of Unique Buildings and Structures;* **105** Article No 10509. doi: 10.4123/CUBS.105.09



Поскольку асфальтобетон является основным несущим слоем нежестких дорожных одежд, рационально 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. Одними из первых исследованием этих вопросов занимались такие отечественные ученые, как Коган Б.И., Корсунский М.Б., Никишин В.С., Раппопорт Р.М., Шапиро Г.С., Туроверов К.К. и др., рассматривавшие эту проблему как решение ο напряженно-деформированном состоянии задачи теории упругости слоистого полупространства. Результатом решения поставленной задачи явилось представление перемещений многослойной конструкции в виде чаши прогиба. При этом, как указывается в многорафии Радовского Б.С. «Проектирование дорожных одежд для движения большегрузных автомобилей», 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 уменьшаются. Это вызвано тем, что входящие в состав монолитных слоев органические вяжущие обладают ярко выраженными реологическим 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 °C; 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 этих расчетных моделей или улучшению согласования расчетных моделей и экспериментов, что видно из анализа научных работ. Например, в работах [1], [2], [3] производится сравнение теоретических и экспериментальных напряжений, возникающих в подстилающем слое грунта, а также уточнение параметров расчета по условию сдвигоустойчивости грунтового основания. В работах [4], [5] исследуются модели, определяющие упругий прогиб нежестких дорожных одежд, в частности, с учетом поврежденности асфальтобетона. В работах [6], [7], [8] рассматриваются особенности динамической работы дорожной одежды. Исследования, не направленные непосредственно на анализ расчетных моделей, например [9], [10], посвященные анализу износостойкости асфальтобетонных покрытий и модификациям грунтовых оснований, косвенно также опираются на три основные расчетные модели, обозначенные выше.

Аналогичная ситуация прослеживается и в зарубежных исследованиях, направленных как на анализ НДС нежестких асфальтобетонных покрытий [11], [12], так и на анализ модификаций материалов дорожной одежды [13], [14].

Однако анализ приведенных выше исследований приводит к выводу, 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 мостов 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 мостов, 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 этой теме.

Применительно к железобетонным мостам этот вопрос рассматривался Щербаковым А.Г. и Овчинниковым И.Г. [15], [16], построившими математическую модель ездового полотна, рассматриваемого в виде многослойной плиты. При этом предполагалась верной гипотеза Кирхгофа-Лява, асфальтобетон рассматривался как разномодульный материал, учитывались

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

Stress-strain state of asphalt concrete pavements of steel bridges under traffic load;



температурные напряжения в асфальтобетоне и влияние хлоридосодержащей 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. [17,18] для полимербетонного покрытия, уложенного по ортотропной плите проезжей части. Однако, автором работы не рассматривался аспект, обусловленный требованием СП 35.13330.2011 требующий исключать появление трещин в покрытии над главными балками стальных пролетных строений.

В рамках исследований Телегина М.А. и Овчинникова И.Г. [19], [20], [21] 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 данных исследования основное внимание уделялось совместной работе ортотропной плиты и стенок пролетного строения.

С 2010 г. данный вопрос исследуется Поляковым С.Ю. и Яшновым А.Н. в работах [22], [23], [24] 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 (МКЭ); метода конечных элементов экспериментальное определение деформации асфальтобетонных покрытий мостов; учет реологических особенностей асфальтобетона с помощью модели Hirsch T., модифицированной Pellinen T., Christensen D. и Bonaquist R. B 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 Т. можно оценить модуль упругости при динамическом воздействии колеса в широком спектре температур. Однако, с нашей точки зрения, не смотря большой вклад, внесенный данными исследователями, были учтены не все особенности работы асфальтобетона при его кладке на ортотропную плиту, что будет показано ниже.

Нами, в частности, рассматривалась ранее работа асфальтобетонных покрытий при воздействии температурной нагрузки [25] и 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 отечественных авторов можно сделать вывод о разнообразии методов, используемых для описания работы асфальтобетона ездового полотна при транспортной нагрузке и отсутствия полной картины этого явления.

Аналогичная картина наблюдается у зарубежных исследователей, несмотря на значительно более обширные накопленные экспериментальные данные. Особенно следует исследовательскую работу, ведущуюся в этом направлении в Делфтском отметить технологическом университете, представленную в работах [27], [28], [29], [30] 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 за рубежом в ортотропных плитах используются в основном продольные ребра замкнутого профиля, имеющие более высокую жесткость на кручение и изгиб. Тогда как в отечественном мостостроении широкое применение имеют полосовые продольные ребра. Эта разница приводит к отличию работы асфальтобетона, 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, целью нашей работы было исследовать особенности работы ездового полотна, уложенного на ортотропную плит с полосовыми продольными ребрам. При этом учитывалась зависимость модуля упругости асфальтобетона от времени приложения колесной нагрузки и температуры путем использования модифицированной модели Hirsch T., подтвердившей свою применимость к подобного рода задачам в исследованиях Полякова С.Ю. и Яшнова А.Н.

# 2 Methods

Основным методом достижения поставленной цели являлось моделирование с помощью МКЭ секции пролетного строения металлического моста для определения модуля упругости асфальтобетона при температурах -10 °C, 0 °C и +20 °C. При этом за основу взятые 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 [22], [23], [24]. Данные исследователи применяли модифицированную модель для динамического модуля упругости асфальтобетона Hirsch T. Рассматривались, среди прочих, следующие варианты асфальтобетонных покрытий мостов:

- 1. Двухслойное асфальтобетонное покрытие моста через р. Тобол. Нижний слой толщиной 60 мм асфальтобетон типа Б марки I, верхний слой толщиной 50 мм асфальтобетон ШМА-15. При этом принимались 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 принимались 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 ration of asphalt concrete type B mark I (data by Polyakoy S.Y., Yashnoy 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 ration 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 °C и 0 °C отличаются в 1.5-2 раза, тогда как модуль упругости при +20 °C отличается более чем в 10 раз. При этом принимаемые динамические значения модуля упругости асфальтобетона были получены аналитически с помощью модели Hirsch T., которая разрабатывалась на основе экспериментальных данных. По-видимому, такое значительное понижение модуля упругости объясняется особенностями литого асфальтобетона. В результате нами принимались значения модуля упругости асфальтобетона, показанные в таблице 3, из которой можно видеть, что модуль упругости при +20 °C был несколько увеличен. Выбор нами

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

Stress-strain state of asphalt concrete pavements of steel bridges under traffic load;



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 случае, 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 принимался равным 2·10<sup>11</sup> МПа, а коэффициент Пуассона равным 0.3. Модуль упругости и коэффициент Пуассона защитно-сцепляющего слоя показаны в таблице 4 и также принимались 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

Tuble 47 recepted checkery modulus and releven e rule er protective danoerre layer					
	Температура, °С				
	-10	0	+20		
Модуль упругости асфальтобетона, МПа	2300	1240	20		
Коэффициент Пуассона	0.35	0.35	0.35		

Расчет выполнялся на примере металлического пролетного строения, близкого по своим геометрическим параметрам к пролетному строению моста через р. Каму у с. Сорочьи Горы. Пролетное строение имело 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 350мм, остальные геометрические параметры повторяют характеристики ортотропной плиты. Каждая стенка подкреплена тремя продольными ребрами с внешней стороны высотой 180 мм и толщиной 14 мм. Первой, второе и третье продольное ребро отстоит от низа стенка 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 был выбран расчетный комплекс ANSYS Workbench. При этом для моделирования металлической конструкций использовались четырехузловые оболочечные конечные элементы (КЭ) SHELL181, а для моделирования защитно-сцепляющего и асфальтобетонного слоев объемные восьмиузловые КЭ SOLID185. Для стыковки объемных и оболочечных КЭ использовались контактные КЭ, как для стыковки некоторых оболочечных КЭ друг с другом. По толщине защитно-сцепляющего слоя принимался 1 конечный элемент. По толщине асфальтобетона принималось 4 конечных элемента. По торцам секции пролетного строения узлы КЭ не имели возможности перемещений или кручений, т.е. рассматривалось 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 предполагали линейно-упругую работу материалов.

В качестве нагрузки рассматривалась трехосная тележка, с нагрузкой 7.68 т на две задние оси и 3.36 т на переднюю ось. Контакт колеса с поверхностью асфальтобетона рассматривался в виде равномерно распределенной нагрузки, приложенной к прямоугольному пятну контакта. Для задних осей пятно контакта имело размеры 0.6 м (поперек оси моста) на 0.2 м (вдоль оси моста) 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.

Рассматривалось все комбинации параметров загружения 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.





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 °C, A=3.75 м, B=5.289 м. Результаты показаны в Паскалях, отдельно указателями 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 °C, 0 °C и +20 °C, соответственно. Анализируя представленные результаты можно заметить, что при температурах -10 °C и 0 °C картина, в целом, соответствует описанному в диссертации Полякова С.Ю., а также в работах зарубежных авторов [27], [28], [29], [30] и в диссертации Medani T.O. А именно, что направление наибольших главных напряжений совпадает с направлением наибольших растягивающих напряжений в верхней фибре асфальтобетона, а наибольшие растягивающие напряжения в озникают 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 Дровалевой О.В.

Однако при температуре +20 °C (рис. 6) картина распределения напряжений сильно меняется и, на наш взгляд, является качественно иной. Можно видеть из рис. 6а, что при значительном отдалении колеса о стенки главной балки максимум напряжений возникает в области рядом с колесом. 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 А=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

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

Stress-strain state of asphalt concrete pavements of steel bridges under traffic load;



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.

Следует при этом отметить, что использованная Поляковым С.Ю. и Яшновым А.Н. модель динамического модуля упругости асфальтобетона Hirsch T., модифицированная Pellinen T., Christensen D. и Bonaquist R., создана для минимальной частоты приложения нагрузки 0.1 Гц, что видно, например, из работы [31]. Данная частота соответствует времени приложения нагрузки к асфальтобетону, равному 10 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 °C. 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 рассмотрения возможности применения другой модели динамического модуля упругости асфальтобетона, а именно усовершенствованной модели Witczak M.W., описанной в работе [32]. Эта модель имеет то преимущество, что опирается на значительно более полных исследованиях и учитывает возможность использования модификаторов битума.



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

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

Stress-strain state of asphalt concrete pavements of steel bridges under traffic load; 2022; *Construction of Unique Buildings and Structures;* **105** Article No 10509. doi: 10.4123/CUBS.105.09





Рис. 4 - Распределение наибольших главных напряжений (единицы измерения Па) в верхней фибре асфальтобетона в области, прилегающей к створе стенки главной балки при температуре - 10 °C: а) при B=5.289 м; б) при B=4.349 м; в) при B=3.569 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 °C: a) at V = 5.289 m; b) at V = 4.349 m; c) at V = 3.569 m



Рис. 5 - Распределение наибольших главных напряжений (единицы измерения Па) в верхней фибре асфальтобетона в области, прилегающей к створе стенки главной балки при температуре 0 °C: а) при B=5.289 м; б) при B=4.349 м; в) при B=3.569 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 ° C: a) at B =5.289 m; b) at B =4.349 m; c) at B=3.569 m



Рис. 6 - Распределение наибольших главных напряжений (единицы измерения Па) в верхней фибре асфальтобетона в области, прилегающей к створе стенки главной балки при температуре +20 °C: 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





Рис. 7 - Распределение наибольших главных напряжений (единицы измерения Па) в верхней фибре асфальтобетона при температуре +20 °C, B=5.289 м, A=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, B =5.289 m, A=2.25 м.

# 4 Conclusions

- 1. При достаточно высокой температуре окружающей среды картина распределения НДС меняется, и область максимальных напряжений перемещается от стенки главной балки к колесу.
- 2. 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.
- 3. Направление наибольших главных напряжений совпадает с направлением наибольших растягивающих напряжений в верхней фибре асфальтобетона.
- 4. При достаточно низких температурах область максимальных напряжений находится над стенкой главной балки.

### References

- 1. Aleksandrov A. S., Smirnov A. V., Semenova T. V. Stress Investigation in Pavement Layers and a New Nalculation Model. Materials Science Forum. 2019. 945. Pp. 813–820. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.945.813.
- Aleksandrov A.S., Kalinin A.L., Semenova T.V. Determination of the first critical load for road structures. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2022. 1(86). Pp. 116-131.
- Aleksandrov, A.S., Semenova, T.V., Aleksandrova, N.P. Calculation of Residual Deformations of Granulated Materials from Exposure to Repeated Loads. Materials Science Forum. 2020. 992. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.992.828.
- 4. Chusov, V., Aleksandrova, N., Ignatov, V. Calculation of road clothes by elastic deflection criteria taking into account damage to asphalt concrete. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. 687. DOI:10.1088/1757-899X/687/2/022037.

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

Stress-strain state of asphalt concrete pavements of steel bridges under traffic load;



- Chusov, V., Aleksandrova, N., Semenova, T. Accounting of Damage of Asphalt Concrete in the Criteria for Calculating the Pavement. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. 1079. DOI:10.1088/1757-899X/1079/5/052016.
- 6. Smirnov, A. V., Bazhenova, A. Yu., Demin, A. S. About the criteria for the dynamic strength of the roadway of highway. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Stroitel'stvo. 2017. 9(705). Pp. 25-35.
- Smirnov, A.V., Bazhenova, A.Yu., Demin, A.S. On the criteria for the dynamic strength of the roadway. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii INNOVACIONNYE FAKTORY RAZVITIYA TRANSPORTA. TEORIYA I PRAKTIKA. Sibirskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya. 2018. Pp. 110-114.
- Smirnov, A.V, Sechkin, G.I., Kuznetsov I.S. Creation of a computational complex for determining the elastic deflection of road structures. Obrazovanie. Transport. Innovacii. Stroitel'stvo : sbornik nauchnyh trudov nacional'noj nauchno-prakticheskoj konferencii, Omsk, 19–20 aprelya 2018 goda. – Omsk: Sibirskij gosudarstvennyj avtomobil'no-dorozhnyj universitet (SibADI). 2018. Pp. 387-389.
- 9. Gayfutdinov, R., Baimukhametov, G., Hafizov, E. Pavement wear process and abrasive wear resistance of asphalt concrete. E3S Web of Conferences. 2021. 274. DOI:10.1051/e3sconf/202127402008.
- Vdovin, E., Stroganov, V., Konovalov, N. Modification of Road Soil Cement with Activated Fillers. Lecture Notes in Civil Engineering. 2020. 150. Pp. 335-345. DOI: 10.1007/978-3-030-72404-7\_33.
- 11. Lijun S. The structural behavior of overlaid asphalt pavements. Structural Behavior of Asphalt Pavements. 2016. Pp. 501-547. DOI: 10.1016/B978-0-12-849908-5.00007-9.
- 12. Yu Liu, Peifeng Su, Miaomiao Li, Zhanping You, Mohan Zhao. Review on evolution and evaluation of asphalt pavement structures and materials. Journal of Traffic and Transportation Engineering. 2020. 7. Pp. 573-579. DOI: 10.1016/j.jtte.2020.05.003.
- Eskandarsefat, S., Venturini, L., Ciarlitti, A., Sogno, E., Ottonelli, I. Asphalt Concrete Modification with Plastomers: A Case Study Conducted 7 Years after Construction. Infrastructures. 2022. 7(29). DOI: 10.3390/infrastructures7030029.
- 14. Eskandarsefat, S., Dondi, G., Sangiorgi, C. Recycled and rubberized SMA modified mixtures: A comparison between polymer modified bitumen and modified fibres. Construction and Building Materials. 2019. 202. Pp. 681-691. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.01.045.
- 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. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Stroitel'stvo. 2003. 10(538). Pp. 86-92.
- 16. Sherbakov, A.G., Naumova, G.A., Ovchinnikov, I.G., Bochkarev, A.V. Applied mechanics of pavements on bridge structures. Volgogradskij gosudarstvennyj arhitekturno-stroitel'nyj universitet. 2006. P. 220.
- 17. Sudomoin, A. S. Some aspects of joint operation of steel orthotropic plate and pavement on drawbridge spans. Voprosy nadezhnosti mostovyh konstrukcij: Mezhvuzovskij tematicheskij sbornik trudov. 1984. Pp. 45-55.
- 18. Sudomoin A. S. On the stress-strain state of a layer of polymer concrete pavement laid on an orthotropic slab of a roadway. Sovershenstvovanie konstrukcij i metodov rascheta avtodorozhnyh mostov: Mezhvuzovskij tematicheskij sbornik trudov. 1986. Pp. 52-60.
- 19. Ovchinnikov, I. G., Ovchinnikov, I. I., Telegin M. A., Khokhlov, S.V. Application of asphalt concrete pavement on bridges (foreign experience). Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya. 2014. 1. Pp. 110-131.
- 20. Telegin, M.A., Ovchinnikov, I.G. Study of joint operation of a steel orthotropic slab with pavement on it with their different parameters. Transportnye sooruzheniya. 2015. 2(6).
- 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: Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii TRANSPORTNYE SISTEMY SIBIRI. Sibirskij federal'nyj universitet. 2016. Pp. 151-156.
- 22. Yashnov, A.N, Polyakov, S. Yu. Experimental determination of stress-strain state of asphalt pavement on metal bridges. Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2018. 3(39). Pp. 93-106.
- 23. Polyakov, S.Yu. 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

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

Stress-strain state of asphalt concrete pavements of steel bridges under traffic load;



gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2020. 2. Pp. 174-184. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-2-174-184.

- 24. Dubina, S., Dzhafarov, R., Yashnov, A., Polyakov, S., Nikolskii, V., Dudareva, T., Krasotkina, I. Construction of Asphalt Pavement for Orthotropic Steel Deck Bridge. 2021. Pp. 504-514. DOI:10.1007/978-3-030-72404-7\_49.
- Grishin, I., Kayumov, R., Ivanov, G. Asphalt concrete pavements of bridges under thermal stress. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 890. DOI:10.1088/1757-899X/890/1/012032.
- 26. Grishin, I., Kayumov, R., Ivanov, G., Petropavlovckikh, O. Computational Model of Rib-Reinforced Plate. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 890. DOI:10.1088/1757-899X/890/1/012036.
- 27. Medani, T.O., Xueyan, L., Huurman, M., Skarpas, A., Molenaar, A. 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. 2008. 44. Pp. 552–563. DOI:10.1016/j.finel.2008.01.013.
- 28. Liu, X., Medani, T., Skarpas, A., Huurman, M., Molenaar, A. Experimental and numerical characterization of a membrane material for orthotropic steel deck bridges: Part 2. Finite Elements in Analysis and Design. 2008. 44. Pp. 580-594. DOI:10.1016/j.finel.2008.01.012.
- 29. Xueyan, L., Kasbergen, C., Li, J., Scarpas, T. Modelling of membrane bonding response: part 1 development of an adhesive contact interface element. International Journal of Pavement Engineering. 2020. 23. Pp. 1-14. DOI:10.1080/10298436.2020.1763992.
- Xueyan, L., Kasbergen, C., Li, J., Scarpas, T., Tzimiris, G. Modelling of membrane bonding response: part 2 finite element simulations of membrane adhesion tests. International Journal of Pavement Engineering. 2020. 23. Pp. 1-12. DOI:10.1080/10298436.2020.1763993.
- 31. Christensen, D., Bonaquist, R., Improved Hirsch model for estimating the modulus of hot-mix asphalt. Road Materials and Pavement Design. 2015. 16(2). Pp. 254-274. DOI: 10.1080/14680629.2015.1077635.
- 32. Javed, B., Witczak, M.W., Development of a new revised version of the Witczak E Predictive Model for hot mix asphalt mixtures. 2006. 75. Pp. 381-424.