

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

УДК 624.21

DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-2-174-184

С.Ю. ПОЛЯКОВ,

Сибирский государственный университет путей сообщения

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ПРОЕЗЖЕЙ ЧАСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МОСТОВ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ХАРАКТЕРА РАБОТЫ ОДЕЖДЫ ЕЗДОВОГО ПОЛОТНА

Одежда ездового полотна автодорожных мостов – элемент, в течение срока службы воспринимающий миллионы циклов приложения подвижной нагрузки. Поэтому для нее нередко на первый план выходят дефекты усталостного характера, связанные не с недостаточной прочностью, а с малой выносливостью асфальтобетона – нисходящие трещины, возникающие после нескольких лет эксплуатации. Недопущение их появления является актуальной задачей, поскольку их развитие сопряжено с более серьезными неисправностями. Поэтому целью настоящей работы являлось повышение бездефектного срока эксплуатации асфальтобетонного покрытия путем совершенствования методики проектирования конструкции одежды ездового полотна. Для ее достижения выполнен расчет данного элемента на выносливость в широком температурном диапазоне – определены напряженно-деформированное состояние материала при воздействии транспортных средств и уровень напряжений, при котором асфальтобетон способен воспринять необходимое количество циклов приложения нагрузки, выявлена необходимость существенного увеличения жесткости проезжей части. С целью снижения напряжений в покрытии до требуемого уровня рассмотрено несколько способов и оценена их эффективность. Также обозначены проблемы, требующие решения для дальнейшего развития методики расчета одежды ездового полотна и применения ее на практике.

Ключевые слова: мост; пролетное строение; ортотропная плита; одежда ездового полотна; асфальтобетон; напряженно-деформированное состояние; выносливость.

Для цитирования: Поляков С.Ю. Совершенствование конструкции проезжей части металлических мостов с учетом особенностей характера работы одежды ездового полотна // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 2. С. 174–184.
DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-2-174-184

S.Yu. POLYAKOV,
Siberian State Transport University

IMPROVEMENT OF METAL BRIDGE ROADWAY STRUCTURE DEPENDING ON DECK PAVEMENT OPERATING BEHAVIOR

The bridge pavement perceives millions of live load application cycles during its service life. Therefore, fatigue defects often occur in asphalt. These defects are associated with insufficient fatigue strength, for example, top-bottom cracks that appear after several years of operation and grow from top to bottom. These cracks cause more serious defects. It is necessary to prevent their occurrence. The **purpose** of this article is to increase the asphalt service life on bridge superstructures by developing the pavement design method. To achieve this goal, the pavement fatigue strength is analyzed. Firstly, asphalt stress-strain state is determined under the heavy load. Secondly, a safe stress level is prescribed. At this stress level, asphalt receives the required load cycles without failure. A significant increase in the orthotropic steel deck stiffness is determined to be necessary. The **practical significance** is the analysis of several ways to reduce asphalt stresses to the required level. The effectiveness of these methods is evaluated. New problems are identified that will enable the development of the computation method for the bridge pavement and its practical applications. The **originally** includes the pavement fatigue strength analysis on road bridges with regard to the temperature influence on the asphalt fatigue strength.

Keywords: bridge; superstructure; orthotropic steel deck; pavement; asphalt; stress-strain state; fatigue strength.

For citation: Polyakov S.Yu. Sovershenstvovanie konstruktsii proezzhei chasti metallicheskih mostov s uche-tom osobennostei kharaktera raboty odezhdy ezdovogo polotna [Improvement of metal bridge roadway structure depending on deck pavement operating behavior]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2020. V. 22. No. 2. Pp. 174–184. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-2-174-184

Введение

Согласно Постановлению Правительства РФ № 658 от 30.05.2017 г., межремонтные сроки эксплуатации автомобильных дорог федерального значения с усовершенствованным типом покрытия (к которому относится и одежда ездового полотна мостов на федеральных трассах) увеличены до 12 лет, а сроки между капитальными ремонтами – до 24 лет. При этом по результатам наблюдений первые дефекты в асфальтобетоне, уложенном на ортотропную плиту пролетного строения, проявляются существенно раньше – уже в первые несколько лет эксплуатации [1, 2]. Как правило, это продольные и поперечные трещины в местах наибольшей локальной жесткости проезжей части (над стенками главных и, реже, поперечных балок). Недопущение возникновения подобных дефектов в дальнейшем является актуальной задачей, требующей решения.

Цель настоящей работы – увеличение бездефектного срока эксплуатации асфальтобетонного покрытия на ортотропной плите металлических мостов путем совершенствования методики проектирования конструкции ездового полотна. Для ее достижения были поставлены следующие задачи:

– анализ работоспособности имеющихся материалов типовых конструкций ездового полотна;

– определение напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции одежды ездового полотна на ортотропной плите и сравнение расчетных значений силовых факторов с предельными для рассматриваемого материала;

– разработка и анализ мер по продлению срока службы асфальтобетонного покрытия.

Исследования характера работы одежды ездового полотна на ортотропной плите за рубежом берут свое начало еще в конце 1950-х гг. [3]. Длительные обширные наблюдения за поведением покрытия на внеклассных мостах показали наличие прямой зависимости состояния асфальтобетона от жесткости элементов проезжей части [1], чем подтверждается тезис об определяющем влиянии деформаций основания на НДС одежды ездового полотна [4]. Данный факт нашел свое отражение в зарубежной нормативной документации путем ограничения минимальной жесткости ортотропной плиты^{1,2}.

В отечественной нормативной документации в области проектирования мостов учету особенностей характера работы одежды ездового полотна на искусственных сооружениях уделено намного меньше внимания, о чем подробнее сказано в работе [5]. Подобные упомянутым дефекты возникали и на мостах других стран, где трещины также отмечены над стенками продольных коробчатых ребер жесткости [6, 7].

Безусловно, нельзя говорить, что исследований характера работы одежды ездового полотна на искусственных сооружениях в нашей стране не проводится. Данное направление активно развивается И.Г. Овчинниковым с соавторами – О.Н. Распоровым, И.И. Овчинниковым, Е.Д. Ильченко, А.В. Покровским, В.Н. Морозовым, О.А. Деревякиным [8, 9]. Им же совместно с А.Г. Щербаковым, Г.А. Наумовой и А.В. Бочкаревым изучались проблемы расчета многослойных конструкций одежды ездового полотна на мостах при совместном действии нагрузки, температуры и агрессивной хлоридсодержащей среды [10]. Р.А. Каюмовым, И.В. Гришиным и Г.П. Ивановым выполнялась оценка температурных напряжений в покрытии на ортотропной плите [11]. Специалистами АО «Институт Стройпроект» под руководством Н.Н. Беляева изучались причины возникновения трещин в асфальтобетоне на мостах КАД г. Санкт-Петербурга в зимний период [4]. М.А. Телегиным в диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук [1] рассмотрены особенности совместной работы одежды ездового полотна и металлоконструкций пролетного строения.

При этом обозначенная в статье проблема в нашей стране все еще проработана не в полной мере, особенно в сравнении с достигнутыми результатами за рубежом и их внедрением в инженерную практику. Подходы отечественных ученых отличаются разнообразием, но исследования, как правило, являются обособленными друг от друга и не в полной мере учитывают уже имеющийся опыт; специализированные методики расчета одежды ездового полотна на мостах отсутствуют; дефекты как возникали, так и продолжают возникать.

¹ Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 2: Steel Bridges. URL: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1993.2.2006.pdf> (дата обращения: 21.02.2019).

² Manual for design, construction, and maintenance of orthotropic steel deck bridges. US Department of Transportation Federal Highway Administration. 2012. 291 p.

Это послужило причинами для проводимой в настоящее время разработки способа расчета покрытия на ортотропной плите. В его основе, так же как в работе [1], лежит предположение о возникновении рассматриваемых трещин как следствии неспособности асфальтобетона воспринимать воздействие транспортных средств (ТС). При этом предлагается учитывать влияние температуры на механические характеристики рассчитываемого материала и перейти от проверки на прочность к проверке на выносливость, т. к. подобные дефекты, как правило, не образуются сразу, а являются результатом постепенного накопления микрповреждений при многократном приложении нагрузки.

Методы исследования

Расчет на выносливость подразумевает ограничение возникающих напряжений таким уровнем, при котором материал воспринимает требуемое количество циклов приложения нагрузки без разрушения. Применительно к асфальтобетону данную величину можно определить несколькими способами, которые относятся к трем различным группам. Первая из них основана на непосредственном подсчете количества циклов до наступления предельного состояния, вторая – на исследовании диссипации энергии в ходе испытания, третья – на методах механики разрушения [12–16]. В нашей стране в настоящее время наиболее распространены способы, относящиеся к первой группе, на них же основываются и положения зарубежных нормативов.

Подобные испытания для асфальтобетона проводились О.В. Дровалевой [17]. Определялась выносливость асфальтобетона типа Б при различной величине напряжений в зависимости от температуры, изменяющейся в диапазоне от -10 до $+25$ °С. При этом условия испытания для каждого образца были неизменными. В реальности покрытие на мосту подвергается нагружениям в различных климатических условиях, из-за чего единичный проезд одной и той же нагрузки при разных температурах вызовет различную долю повреждений в материале.

Учесть факт зависимости выносливости от температуры позволяет правило Пальмгрена – Майнера о линейном суммировании повреждений, возможность применения которого при расчете нежестких дорожных одежд на земляном полотне отмечалась Б.С. Радовским [18] и Е.В. Угловой [19]. Вариант адаптации данного правила применительно к условиям работы одежды ездового полотна на искусственном сооружении выполнен в одной из прошлых работ [20]. Условие обеспечения достаточной выносливости асфальтобетона в течение заданного срока службы в этом случае имеет вид

$$d = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + 2 \frac{n_3}{N_3} \leq 1, \quad (1)$$

где d – накопленная поврежденность материала после требуемого количества циклов приложения нагрузки; $n_{1,2,3}$ – количество циклов загрузки покрытия в зимний, летний и переходной периоды; $N_{1,2,3}$ – предельное количество циклов до разрушения в зимний, летний и переходной периоды.

Чтобы определить предельное количество циклов, которое может выдерживать асфальтобетон до разрушения, необходимо знать, какие напряжения

возникают в нем при воздействии нагрузки. При этом асфальтобетон – упруго-вязко-пластичный материал, и температура будет влиять не только на его выносливость, но и на НДС покрытия через изменение значений модуля деформации и коэффициента Пуассона.

Характер деформирования асфальтобетона в различных условиях является предметом исследования многих ученых, среди которых Papazian, M. Witczak, Van der Poel, T. Hirsch, D. Christensen, T. Pellinen, R. Bonaquist, Al-Khateeb, Н.Н. Иванов, Н.Н. Беляев, Г.Н. Кирюхин, Б.С. Радовский, Б.Б. Телтаев, В.А. Золотарев, А.М. Кириллов, М.А. Завьялов, А.Г. Щербаков, И.Г. Овчинников и др. [4, 10, 21–25]. Для расчета значений механических характеристик асфальтобетона может быть использована комплексная расчетная модель, которая прошла апробацию на практике и показала удовлетворительную сходимость ожидаемых результатов с полученными в ходе эксперимента [26].

Ранее проведена оценка выносливости типичной одежды ездового полотна на искусственном сооружении с ортотропной плитой проезжей части [20]. Схема поперечного сечения пролетного строения приведена на рис. 1.

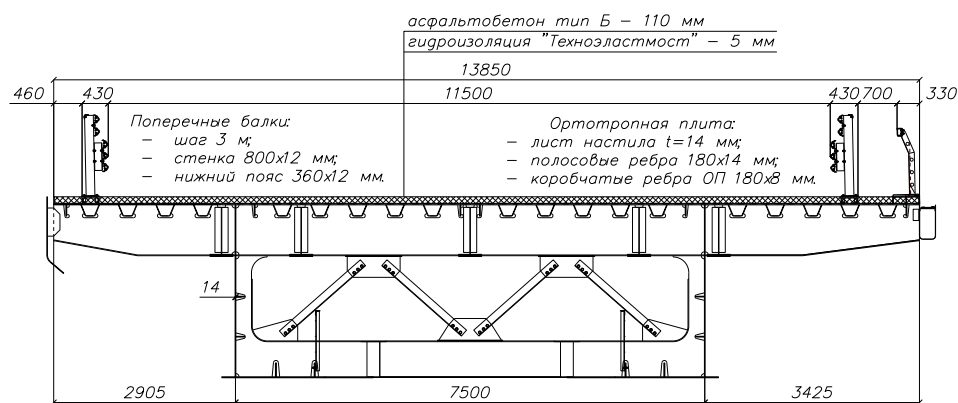


Рис. 1. Поперечное сечение пролетного строения

В результате расчетов установлено, что сумма повреждений, накопленных асфальтобетоном за планируемый срок службы, существенно больше единицы, соответственно, условие обеспечения выносливости не выполнено. Необходимо изменение конструкции с целью снижения напряжений в покрытии. Достичь этого можно несколькими способами.

Первый, наиболее простой и очевидный – это увеличение толщины покрытия. Расчеты показывают, что добиться требуемого снижения напряжений можно, лишь доведя этот параметр до 26,5 см. Тогда значения максимальных поперечных растягивающих напряжений в покрытии: при температуре ($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$) – 0,56 МПа, при $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 0,49 МПа, при $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 0,33 МПа. На основании этого с использованием экспериментальных данных О.В. Дровалевой [17] определено количество циклов, которое сможет воспринять асфальтобетон до разрушения на рассматриваемой конструкции (рис. 2). Подставив полученные данные в формулу (1), оценим поврежденность материала за весь срок службы:

$$d = \frac{375000}{10000000} + \frac{375000}{900000} + 2 \frac{375000}{2100000} = 0,811 < 1.$$

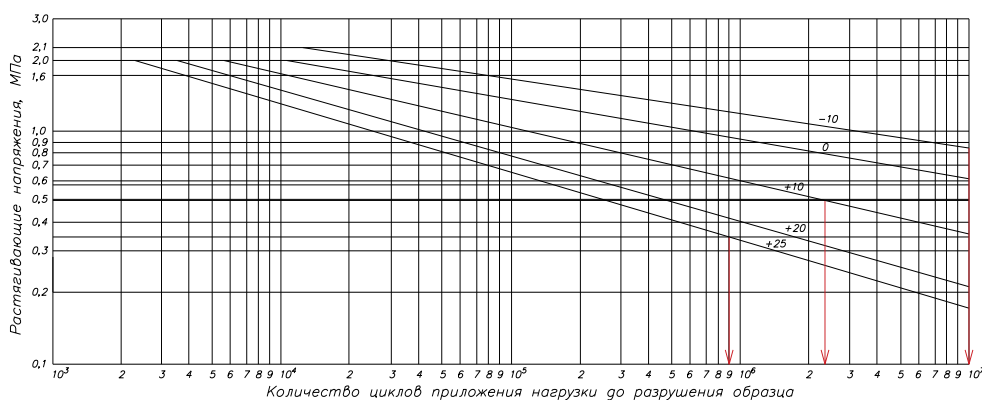


Рис. 2. Выносливость асфальтобетона на рассматриваемом сооружении с увеличенной толщиной одежды ездового полотна [17]

Более чем двукратное увеличение толщины одежды ездового полотна по сравнению с исходной величиной приведет к существенному увеличению постоянной нагрузки на сооружение и поэтому не может рассматриваться как действенный и эффективный метод снижения напряжений. Поэтому в качестве второго способа принято местное увеличение жесткости ортотропной плиты в соответствии с рекомендациями [1]. Измененные геометрические характеристики элементов проезжей части, при которых покрытие способно воспринять необходимое количество циклов воздействия нагрузки, изображены на рис. 3. Отметим, что толщина центральных коробчатых ребер увеличена до 10 мм с целью снижения продольных растягивающих напряжений в асфальтобетоне над стенками поперечных балок. С учетом этого поврежденность материала за весь планируемый срок службы составила

$$d = \frac{375000}{6600000} + \frac{375000}{1900000} + 2 \frac{375000}{1000000} = 1,0 = 1.$$

Снижение шага расположения поперечных балок с 3 до 2 м только для уменьшения напряжений в асфальтобетоне не выглядит оправданным, т. к. поперечные балки устанавливаются с целью распределения нагрузки между главными несущими элементами, а не обеспечения достаточной жесткости проезжей части. Поэтому в качестве третьего способа рассмотрено иное инженерное решение, не связанное с изменением размеров элементов, но увеличивающее местную жесткость ортотропной плиты у стенок главных балок путем постановки дополнительных полудиафрагм (рис. 4) [27]. Отметим, что с целью снижения продольных растягивающих напряжений в асфальтобетоне над стенками поперечных балок толщина коробчатых стрингеров увеличена до 12 мм.

В этом случае поврежденность покрытия за планируемый срок службы составит

$$d = \frac{375000}{3000000} + \frac{375000}{2300000} + 2 \frac{375000}{1000000} = 0,99 < 1.$$

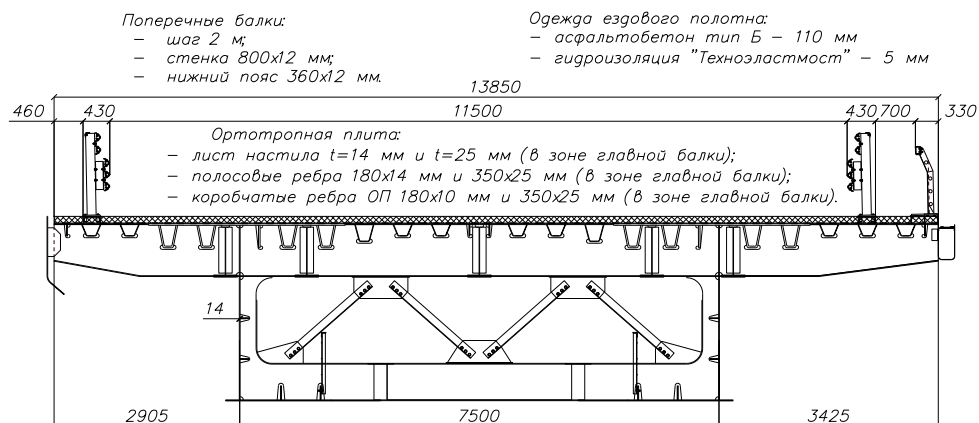


Рис. 3. Измененная конструкция ортотропной плиты

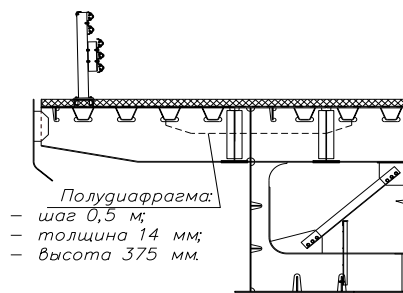


Рис. 4. Схема местного усиления ортотропной плиты полудиафрагмами

Эффективность каждого из рассмотренных способов можно оценить по требуемым затратам на погонный метр пролетного строения. Согласно [1], стоимость укладки 1 м^2 слоя одежды ездового полотна толщиной 40 мм из плотного асфальтобетона типа Б составляет 2327 р., средняя стоимость 1 т металла 15ХСНД с изготовлением и монтажом равна 205377 р. Результаты сведены в таблицу. Наиболее эффективным оказался вариант с постановкой дополнительных полудиафрагм. Кроме того, минимально и увеличение постоянной нагрузки на главные несущие элементы.

Эффективность рассмотренных способов снижения напряжений

Варианты	Вариант № 1	Вариант № 2	Вариант № 3
Объем/пог. м	2,15 м ³	1,91 т	0,553 т
Цена, за ед., руб.	58 175	205 377	205 377
Затраты, руб./м	125 076	393 237	113 573

Заключение

По результатам проведенной работы можно сделать следующие выводы:

– в ходе проведенных расчетов НДС одежды ездового полотна металлического моста было установлено, что рассмотренная типичная конструкция проезжей части не в состоянии обеспечить восприятие покрытием требуемого числа воздействий подвижной нагрузки, т. е. неизбежно возникновение усталостных трещин. Об этом же свидетельствуют дефекты, возникающие в асфальтобетоне на подобных сооружениях уже через несколько лет эксплуатации;

– недостаточная жесткость конструкции ездового полотна приводит к быстрому накоплению повреждений и усталостному разрушению, что подтверждается и расчетами покрытия на выносливость;

– предложенный способ увеличения местной жесткости ортотропной плиты путем постановки дополнительных полудиафрагм приводит к снижению растягивающих напряжений в асфальтобетоне с наибольшей эффективностью. Остальные проанализированные способы чрезмерно материалоемки и приводят к значительному увеличению постоянной нагрузки на главные несущие элементы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Телегин М.А.* Особенности расчета цельнометаллических пролетных строений автодорожных мостов с учетом совместной работы ортотропной плиты с главными балками и одеждой ездового полотна : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.23.11 / Телегин Максим Александрович. Омск, 2016. 213 с.
2. *Яшинов А.Н.* Проблемы назначения и эксплуатации покрытий на ортотропной плите пролетных строений металлических мостов // Материалы XLI Международной научно-практической конференции. Алматы : Казахская академия транспорта и коммуникаций (КазАТК), 2017. С. 354–358.
3. *Design Manual for Orthotropic Steel Plate Deck Bridges.* American Institute of Steel Construction. 1963. 237 с. URL: <https://www.aisc.org/globalassets/aisc/publications/out-of-print/design-manual-for-orthotropic-steel-plate-deck-bridges.pdf> (дата обращения: 21.02.2019).
4. *Беляев Н.Н.* Опыт численного моделирования работы асфальтобетонных покрытий на ортотропной плите // Труды первого всеросс. дорожн. конгр. Москва, 2009. С. 60–70.
5. *Яшинов А.Н., Поляков С.Ю.* Об одном способе назначения конструкции одежды ездового полотна на ортотропной плите металлических мостов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2018. № 4 (47). С. 58–65.
6. *Xianhua Chen, Xueyan Liu, Zhendong Qian, Zhang Lei.* State-of-art of Asphalt surfacings on long-spanned orthotropic steel deck in China. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/2053/7a40b17c3e787cdbc5d5003a38ff9ef00b.pdf> (дата обращения: 21.02.2019).
7. *Sang Luo, Qing Lu.* Condition survey and analysis of first epoxy asphalt concrete pavement on orthotropic bridges in China. A ten-year review. URL: http://qlu.myweb.usf.edu/epoxy_asphalt_manuscript_10.30.pdf (дата обращения: 21.02.19).
8. *Овчинников И.Г. и др.* Проблемы ремонта дорожной одежды на железобетонном мосту через Волгу Саратов – Энгельс // Наукосведение : интернет-журнал. 2014. № 5 (24). URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/01KO514.pdf> (дата обращения: 21.02.19).
9. *Овчинников И.Г. и др.* Семнадцать лет эксплуатации мостового перехода через Волгу у села Пристанное Саратовской области // Транспортные сооружения : интернет-журнал. 2017. Т. 4. № 1. URL: <http://t-s.today/issues/vol4-no1.html> (дата обращения: 21.02.19).
10. *Щербаков А.Г. и др.* Прикладная механика дорожных одежд на мостовых сооружениях ; Волгогр. гос. архит.-строит. ун-т. Волгоград : ВолГАСУ, 2006. 220 с.
11. *Каюмов Р.А., Гришин И.В., Иванов Г.П.* К расчету покрытий металлических мостов с ортотропной плитой на температурные воздействия // Известия КГАСУ. 2011. №3 (17). С. 171–178.

12. Mbaraga A.N., K.J. Jenkins, J Van den Heever. Laboratory evaluation of fatigue and flexural stiffness of warm mix asphalt Flexural Stiffness of Warm Mix Asphalt // 3rd conference on Four-point Bending Beam held in the University of California, Davis, CA, USA, 2012.
13. Бахрах Г.С. Эволюция методов оценки выносливости асфальтобетона // Дороги и мосты. 2016. № 2 (36). С. 288–300.
14. Кирюхин Г.Н. Термофлуктуационная и фрактальная модель долговечности асфальтобетона // Дороги и мосты. 2014. № 1 (31). С. 247–268.
15. Телтаев Б.Б. Усталостная деструкция асфальтобетонного покрытия. Самоорганизация и механическое толкование // Известия Национальной академии наук Республики Казахстан, 2017. № 3. С. 256–275.
16. Yazhen Sun, Chenze Fang, Jinchang Wang, Zuoxin Ma, Yolin Ye. Energy-Based Approach to Predict Fatigue Life of Asphalt Mixture Using Three-Point Bending Fatigue Test. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/11/9/1696/pdf> (дата обращения: 21.02.2019).
17. Дровалева О.В. Усталостная долговечность асфальтобетона при воздействии интенсивных транспортных нагрузок : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.23.05 / Дровалева Ольга Валериевна. Ростов-на-Дону, 2009. 201 с.
18. Радовский Б.С., Супрун А.С., Козаков И.И. Проектирование дорожных одежд для движения большегрузных автомобилей. Киев : Будивэльник, 1989. 168 с.
19. Углова Е.В., Шило О.А. Анализ критериев расчета нежестких дорожных одежд в условиях воздействия интенсивного транспортного потока // Транспортные сооружения : интернет-журнал. 2018. № 3. URL: <https://t-s.today/PDF/14SAT318.pdf> (дата обращения: 21.02.2019).
20. Поляков С.Ю. Проверка выносливости асфальтобетонного покрытия на ортотропной плите с учетом температурного фактора // Транспортные сооружения : интернет-журнал. 2019. № 3. DOI: 10.15862/09SAT319 (дата обращения: 29.09.2019).
21. Радовский Б.С., Телтаев Б.Б. Вязкоупругие характеристики битума и их оценка по стандартным показателям. Алматы : «Білім» баспасы, 2013. 152 с.
22. Teltayev B.B., Radovskiy B.S. Predicting thermal cracking of asphalt pavements from bitumen and mix properties // Road Materials and Pavement Design. 2017. URL: https://www.researchgate.net/publication/318430967_Predicting_thermal_cracking_of_asphalt_pavements_from_bitumen_and_mix_properties (дата обращения: 21.02.2019).
23. Кирюхин Г.Н. Обратимое деформирование асфальтобетона в зависимости от условий нагружения // Дороги и мосты. 2016. № 1 (35). С. 1–26.
24. Иванов Н.Н. и др. Конструирование и расчет нежестких дорожных одежд / под редакцией Н.Н. Иванова. Москва : Транспорт, 1973. 317 с.
25. Завьялов М.А., Кириллов А.М. Моделирование изменения модуля упругости асфальтобетона при нагружении // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 2. С. 70–76.
26. Яшинов А.Н., Поляков С.Ю. Экспериментальное определение напряженно-деформированного состояния асфальтобетонного покрытия на металлических мостах // Научный журнал строительства и архитектуры. 2018. № 2 (50). С. 82–93.
27. Пат. 173855, Российская Федерация. Пролетное строение моста / Л.Ю. Соловьев, Н.Е. Борисовская. Опубл. 14.09.2017.

REFERENCES

1. Telegin M.A. Osobennosti rascheta tsel'nometallicheskih proletrykh stroenii avtodorozhnykh mostov s uchetom sovmestnoi raboty ortotropnoi plity s glavnyimi balkami i odezhdoi ezdovogo polotna. Diss. kand. tekhn. nauk. [Structural analysis of metal bridge span structures based on joint work of orthotropic steel deck with main beams and pavement. PhD Thesis]. Omsk, 2016. 213 p. (rus)
2. Yashnov A.N. Problemy naznacheniya i ekspluatatsii pokrytii na ortotropnoi plite proletrykh stroenii metallicheskih mostov [Problems of application and operation of coatings on orthotropic plate of metal bridge span structures]. In: Materialy XLI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Proc. 41st Int. Sci. Conf.). Almaty : KazATK, 2017. Pp. 354–358. (rus)
3. Design Manual for Orthotropic Steel Plate Deck Bridges. American Institute of Steel Construction. 1963, 237 p. Available: www.aisc.org/globalassets/aisc/publications/out-of-print/design-manual-for-orthotropic-steel-plate-deck-bridges.pdf (accessed February 21, 2019)

4. Belyaev N.N. Opyt chislennogo modelirovaniya raboty asfal'tobetonnykh pokrytii na ortotropnoi plite [Numerical simulation of asphalt concrete pavement on orthotropic plate]. In: Trudy pervogo vseross. dorozhn. kongressa (*Proc. 1st All-Russ. Road Congress*). Moscow, 2009. Pp. 60–70. (rus)
5. Yashnov A.N., Polyakov S.Yu. Ob odnom sposobe naznacheniya konstruktssii odezhdy ezdovogo polotna na ortotropnoi plite metallicheskih mostov [Design method of deck pavement of metal bridges]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya*. 2018. No. 4 (47). Pp. 58–65. (rus)
6. Xianhua Chen, Xueyan Liu, Zhendong Qian, Zhang Lei. State-of-art of asphalt surfacing on long-spanned orthotropic steel deck in China. Available: <https://pdfs.semanticscholar.org/2053/7a40b17c3e787c9bfec5d5003a38ff9ef00b.pdf> (accessed February 21, 2019)
7. Sang Luo, Qing Lu. Condition survey and analysis of first epoxy asphalt concrete pavement on orthotropic bridges in China. A ten-year review. Available: http://qiu.myweb.usf.edu/epoxy_asphalt_manuscript_10.30.pdf (accessed February 21, 2019)
8. Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I., Il'chenko E.D., Pokrovskiy A.V., Morozov V.N., Derevyakin O.A. Problemy remonta dorozhnoi odezhdy na zhelezobetonnom mostu cherez Volgu [Problems of pavement repair of reinforced concrete bridge across the Volga Saratov – Engels]. *Naukovedenie*. 2014. No. 5 (24). Available: <http://naukovedenie.ru/PDF/01KO514.pdf> (accessed February 21, 2019)
9. Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I., Rasporov O.N., Rasporov K.O. Semnadsat' let ekspluatatsii mostovogo perekhoda cherez Volgu u sela Pristannoe Saratovskoi oblasti [Seventeen years of operation and maintenance of the Volga river bridge crossing near the Pristannoye village, Saratov region]. *Transportnye sooruzheniya*. 2017. V. 4. No. 1. Available: <http://t-s.today/issues/vol4-no1.html> (accessed February 21, 2019)
10. Shcherbakov A.G. e. a. Prikladnaya mekhanika dorozhnykh odezhd na mostovykh sooruzheniyakh [Applied mechanics of road pavement on bridge structures]. Volgograd: VolGASU, 2006. 220 p. (rus)
11. Kayumov R.A., Grishin I.V., Ivanov G.P. K raschetu pokrytii metallicheskih mostov s ortotropnoi plitoy na temperaturnye vozdeistviya [Stress-strain state of steel bridge pavement on orthotropic slab]. *Izvestiya KGASU*. 2011. No. 3 (17). Pp. 171–178. (rus)
12. Mbaraga A.N., Jenkins K.J., J Van den Heever. Laboratory evaluation of fatigue and flexural stiffness of warm mix asphalt. *Proc. 3rd Conf. 'Four-Point Bending Beam'*. University of California, Davis, CA, USA, 2012.
13. Bakhrakh G.S. Evolyutsiya metodov otsenki vynoslivosti asfal'tobetona [Development of methods for evaluating asphalt concrete endurance]. *Dorogi i mosty*. 2016. No. 2 (36). Pp. 288–300. (rus)
14. Kiryukhin G.N. Termofluktatsionnaya i fraktal'naya model' dolgovechnosti asfal'tobetona [Thermal fluctuation and fractal model of asphalt concrete durability]. *Dorogi i mosty*. 2014. No. 1 (31). Pp. 247–268. (rus)
15. Teltaev B.B. Ustalostnaya destrukttsiya asfal'tobetonnoy pokrytiya. Samoorganizatsiya i mekhanicheskoe tolkovanie [Fatigue failure of asphalt concrete pavement. 1. Self-organization and mechanical interpretation]. *Izvestiya Natsional'noi akademii nauk Respubliki Kazakhstan*. 2017. No. 3. Pp. 256–275. (rus)
16. Yazhen Sun, Chenze Fang, Jinchang Wang, Zuoxin Ma, Yolin Ye. Energy-based approach to predict fatigue life of asphalt mixture using three-point bending fatigue test. Available: www.mdpi.com/1996-1944/11/9/1696/pdf (accessed February 21, 2019)
17. Drovaleva O.V. Ustalostnaya dolgovechnost' asfal'tobetona pri vozdeistvii intensivnykh transportnykh nagruzok. Diss. kand. tekhn. nauk. [Fatigue life of asphalt concrete under intensive transport loads. PhD Thesis]. Rostov-on-Don, 2009. 201 p. (rus)
18. Radovskii B.S., Suprun A.S., Kozakov I.I. Proektirovanie dorozhnykh odezhd dlya dvizheniya bol'shegruznykh avtomobilei [Pavement design for heavy vehicles]. Kiev: Budivel'nik, 1989. 168 p. (rus)
19. Uglova E.V., Shilo O.A. Analiz kriteriev rascheta nezhestkikh dorozhnykh odezhd v usloviyakh vozdeistviya intensivnogo transportnogo potoka [Analysis of criteria for calculating non-rigid pavements in intense traffic flow]. *Transportnye sooruzheniya*. 2018. No. 3. Available: <https://t-s.today/PDF/14SATS318.pdf> (accessed February 21, 2019)

20. Polyakov S.Yu. Proverka vynoslivosti asfal'tobetonnoy pokrytiya na ortotropnoi plite s uchetom temperaturnogo faktora [Endurance of asphalt concrete surface on an orthotropic slab under temperature factor]. *Transportnye sooruzheniya*. 2019. No. 3. DOI: 10.15862/09SATS319 (accessed September 29, 2019).
21. Radovskii B.S., Teltaev B.B. Vyazkoprugie kharakteristiki bituma i ikh otsenka po standartnym pokazatelyam [Viscoelastic bitumen properties and their evaluation by standard parameters]. Almaty: Bilim baspasy, 2013. 152 p. (rus)
22. Teltayev B.B., Radovskiy B.S. Predicting thermal cracking of asphalt pavements from bitumen and mix properties. *Road Materials and Pavement Design*, 2017. Available: www.researchgate.net/publication/318430967_Predicting_thermal_cracking_of_asphalt_pavements_from_bitumen_and_mix_properties (accessed February 21, 2019)
23. Kiryukhin G.N. Obratimoe deformirovaniye asfal'tobetona v zavisimosti ot uslovii nagru-zheniya [Reversible deformation of asphalt concrete under loading conditions]. *Dorogi i mosty*. 2017. No. 35. Pp. 233–256. (rus)
24. Ivanov N.N. *e. a.* Konstruirovaniye i raschet nezhestkikh dorozhnykh odezhd [Design and calculation of nonrigid pavement]. Moscow: Transport, 1973. 317 p. (rus)
25. Zav'yalov M.A., Kirillov A.M. Modelirovaniye izmeneniya modulya uprugosti asfal'tobetona pri nagruzhenii [Modeling of change in asphalt concrete dynamic modulus]. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*. 2015. No. 2. Pp. 70–76. (rus)
26. Yashnov A.N., Polyakov S.Yu. Eksperimental'noe opredeleniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya asfal'tobetonnoy pokrytiya na metallicheskiykh mostakh [Experimental determination of the stress-strain state of asphalt concrete surface on metal bridges]. *Nauchnyi zhurnal stroitel'stva i arkhitektury*. 2018. No. 2 (50). Pp. 82–93. (rus)
27. Solov'ev L.Yu., Borisovskaya N.E. Proletnoye stroeniye mosta [Bridge superstructure]. Patent Russ. Fed. N 173855. 2017. 4 p. (rus)

Сведения об авторе

Поляков Сергей Юрьевич, инженер, Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, sergey19920@mail.ru

Author Details

Sergei Yu. Polyakov, Engineer, Siberian State Transport University, 191, Koval'chuk Str., 630049, Novosibirsk, Russia, sergey19920@mail.ru