



УДК 624.041

Гришин Илья Валерьевич

ассистент

E-mail: il6357grishin@yandex.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

Пискунов Александр Алексеевич

доктор технических наук, профессор

E-mail: a.piskunov52@mail.ru

Институт пути, строительства и сооружений РУТ (МИИТ)

Адрес организации: 127055, Россия, г. Москва, Минаевский пер., д. 2

Моделирование процесса деформирования асфальтобетонных покрытий мостов при температурном воздействии

Аннотация

Постановка задачи. Цель исследования – моделирование процесса деформирования асфальтобетонных покрытий мостов при температурном воздействии. Разработка модели была вызвана необходимостью оценки влияния температурных напряжений на напряженно-деформированное состояние асфальтобетонных покрытий мостов при наиболее простых расчетных схемах. Выбор осуществлялся по критерию соответствия результатам численного моделирования.

Результаты. В результате сравнения аналитических решений, полученных с помощью предложенных моделей, с результатами численного моделирования, были сделаны выводы:

- растягивающие напряжения достигают своего максимума в верхней фибре слоя асфальтобетона;
- температурные напряжения возрастают от края к центру плиты;
- увеличение напряжений, вызванное неравномерным распределением температуры по толщине асфальтобетона, не превышает 7 % в упругой постановке и с учетом релаксации напряжений может не браться в расчет;
- увеличение жесткости основания слоя асфальтобетона в 1000 раз приводит к увеличению максимальных напряжений не более чем на 10 % в упругой постановке, что, с учетом релаксации напряжений, дает основание использовать выбранную модель, как для металлических, так и для железобетонных мостов.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в возможности более полного понимания причин разрушения асфальтобетонных покрытий мостов и, соответственно, возможности учета этих факторов при назначении толщины и физико-механических параметров покрытий.

Ключевые слова: термонапряженное состояние многослойных плит, гипотеза равномерных деформаций, гипотеза наклонной, гипотеза ломаной, численное моделирование термонапряженного состояния.

Введение

Рядом авторов отмечается важность анализа состояния мостового полотна и причин дефектов, возникающих в них [1, 2]. Одной из причин является разница между коэффициентами температурного расширения-сжатия асфальтобетона и жесткого основания, представленного металлической плитой проезжей части или железобетонной плитой, в зависимости от материала пролетного строения. Учитывая длительность и периодический характер действия нагрузки в такой конструкции, являющейся многослойной плитой, в асфальтобетоне будут происходить процессы релаксации напряжений, вызванные ползучестью, и может происходить накапливание повреждений, как показано в [3-6] и в работах авторов.

Одной из задач для оценки влияния температурных напряжений является разработка расчетной модели термонапряженной многослойной плиты. Существуют

различные подходы, к решению данной задачи [7-10]. Ранее авторами были подробно описаны уравнения и способ их использования, позволяющие это сделать. Уравнения имеют следующий вид, и каждое предполагает использование определенной гипотезы, более подробно описанной в прошлых работах.

Модель с использованием гипотезы равномерных по высоте полных деформаций, с напряжениями, определяемыми по следующему уравнению (гипотеза равномерных деформаций):

$$\sigma_i(y) = E_i \cdot \varepsilon - E_i \cdot \alpha_i \cdot \Delta T_i(y). \quad (1)$$

Модель с использованием гипотезы линейно изменяющихся по высоте всей многослойной плиты деформаций, с напряжениями, определяемыми по следующему уравнению (гипотеза наклонной):

$$\sigma_i(y) = E_i \cdot (a \cdot x + b) - E_i \cdot \alpha_i \cdot \Delta T_i(y). \quad (2)$$

Модель с использованием гипотезы линейно изменяющихся различных для каждого слоя деформаций (гипотеза ломаной):

$$\sigma_{zz}^{(i)}(z, y) = E_i \cdot \varepsilon_{zz}^{(i)}(z, y) - E_i \cdot \alpha_i \cdot \Delta T_i(y), \quad (3)$$

$$\varepsilon_{zz}^{(i)}(z, y) = \frac{\partial u^{(i)}(y, z)}{\partial z} = U_i(z) \cdot \frac{-y + y_{i+1}}{h_i} + U_{i+1}(z) \cdot \frac{y - y_i}{h_i}. \quad (4)$$

Для определения влияния температурного фактора с помощью уравнений (1)-(4) и моделирования в ANSYS, рассматривался участок ортотропной плиты, с защитно-сцепляющим слоем и слоем асфальтобетона, уложенными на него (рис. 1).

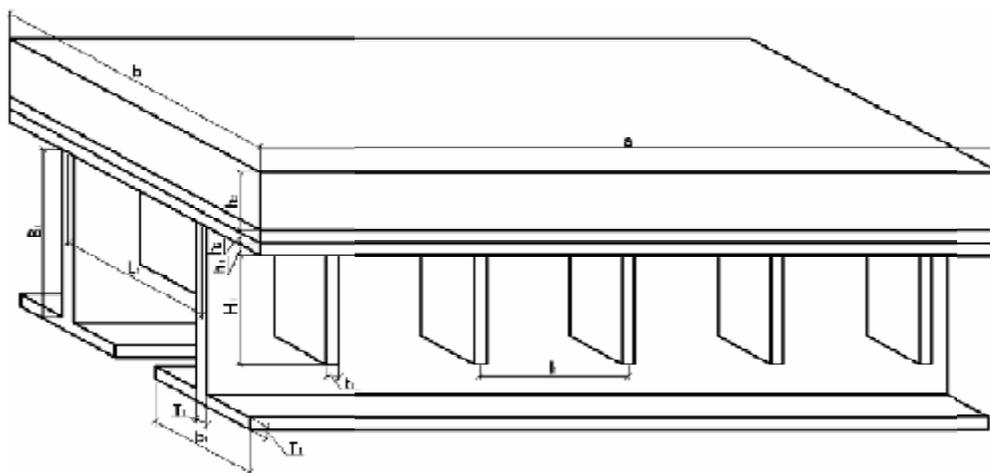


Рис. 1. Геометрические параметры участка ортотропной плиты (иллюстрация авторов)

При этом принимались следующие физико-механические параметры материалов:

- Асфальтобетон.

Модуль упругости: $E_{аб} = 14,5 \cdot 10^2$ МПа. Коэффициент Пуассона: $\mu_{аб} = 0,07$.

Коэффициент температурного расширения-сжатия: $\alpha_{аб} = 3,5 \cdot 10^{-5} \frac{1}{^\circ\text{C}}$.

- Защитно-сцепляющий слой (приняты характеристики битума, как одного из основных компонентов рулонного материала).

Модуль упругости: $E_{зс} = 50,1$ МПа. Коэффициент Пуассона: $\mu_{зс} = 0,07$. Коэффициент температурного расширения-сжатия: $\alpha_{зс} = 2 \cdot 10^{-4} \frac{1}{^\circ\text{C}}$.

- Металл ортотропной плиты.

Модуль упругости: $E_{ме} = 2,06 \cdot 10^5$ МПа. Коэффициент Пуассона: $\mu_{ме} = 0,3$.

Коэффициент температурного расширения-сжатия: $\alpha_{ме} = 1 \cdot 10^{-5} \frac{1}{^\circ\text{C}}$.

Влияние жесткости основания и неравномерного распределения температуры по толщине асфальтобетона на его термонапряженное состояние

Для определения влияния данных параметров осуществлялось моделирование в программном комплексе ANSYS с использованием 8 узлового элемента QUAD 8 NODE.

Средний размер стороны элемента был равен 0,01 м. При этом рассматривалось 3 случая нагружения:

1. При равномерном перепаде температуры во всех узлах равном -60 °С.

2. Температурный перепад узлов ортотропной плиты и защитно-сцепляющего слоя равен -60 °С, а перепад по толщине асфальтобетона задан по закону параболы в соответствии со схемой на рис. 2.

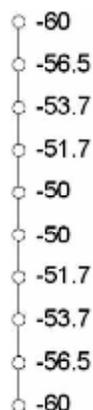


Рис. 2. Схема перепада температур по толщине асфальтобетона (иллюстрация авторов)

3. При равномерном перепаде температуры во всех узлах равном -60 °С, но модуль упругости материала ортотропной плиты увеличен в 1000 раз.

Кроме того варьировались геометрические параметры ортотропной плиты:

А. Набор параметров: $a=1,8$ м; $b=12$ м; $l_1=0,3$ м; $t_1=0,3$ м; $H_1=0,13$ м.

В. Набор параметров: $a=5$ м; $b=11$ м; $l_1=0,4$ м; $t_1=0,012$ м; $H_1=0,15$ м.

С. Набор параметров: $a=5$ м; $b=20$ м; $l_1=0,4$ м; $t_1=0,012$ м; $H_1=0,15$ м.

Ниже в табл. 1-3 представлены результаты расчета в ANSYS при геометрических параметрах А, В, С, соответственно, для середины ортотропной плиты. При этом без скобок – для случая загрузки 1, в фигурных скобках – для случая загрузки 2, в круглых скобках – для случая загрузки 3.

Таблица 1

№ точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Нормальные напряжения, МПа	2,1 (2,32) {2,15}	2,1 (2,29) {2,15}	2,1 (2,17) {2,15}	2,13 (2,32) {1,62}	2,13 (2,29) {1,62}	2,1 (2,19) {1,59}	1,39 (1,46) {1,41}	1,39 (1,45) {1,41}	1,39 (1,48) {1,41}

Таблица 2

№ точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Нормальные напряжения, МПа	2,24 (2,32) {2,34}	2,24 (2,29) {2,34}	2,14 (2,17) {2,20}	2,25 (2,32) {1,81}	2,25 (2,29) {1,81}	2,13 (2,19) {1,71}	1,44 (1,46) {1,32}	1,43 (1,45) {1,32}	1,44 (1,48) {1,33}

Таблица 3

№ точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Нормальные напряжения, МПа	2,27 (2,42) {2,37}	2,26 (-) {2,36}	2,14 (2,32) {2,26}	2,26 (2,32) {-}	2,26 (-) {1,82}	2,14 (1,77) {1,72}	1,44 (1,47) {1,32}	1,44 (-) {-}	1,44 (1,47) {1,34}

Цифры, нумерующие столбцы таблиц, соответствуют точкам, в которых определялись напряжения (рис. 3).

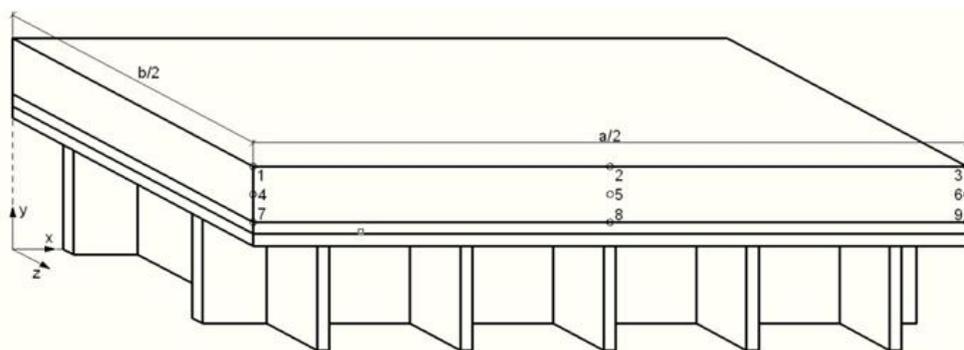


Рис. 3. Нумерация узлов для определения напряжений (иллюстрация авторов)

По результатам численного расчета методом конечных элементов (МКЭ) можно сделать следующие выводы:

1) Поскольку нас интересуют максимальные напряжения, для сравнения расчетных моделей с результатами расчета МКЭ будем рассматривать только максимальные предсказываемые напряжения. При этом предполагается, что максимальные напряжения по длине плиты возникают в её центре.

2) Можно видеть, что растягивающие напряжения при случае загрузки 1, достигают максимума в верхней половине слоя асфальтобетона. При увеличении жесткости основания напряжения в верхней фибре постепенно начинают превышать напряжения в центре слоя. Поэтому предлагается, ради возможности применения полученных результатов для более широкого класса конструкций с различными жесткостями оснований, считать, что напряжения в общем случае достигают своего максимума в верхней фибре асфальтобетона.

3) Напряжения возрастают от края к центру плиты, как показано на рис. 4.

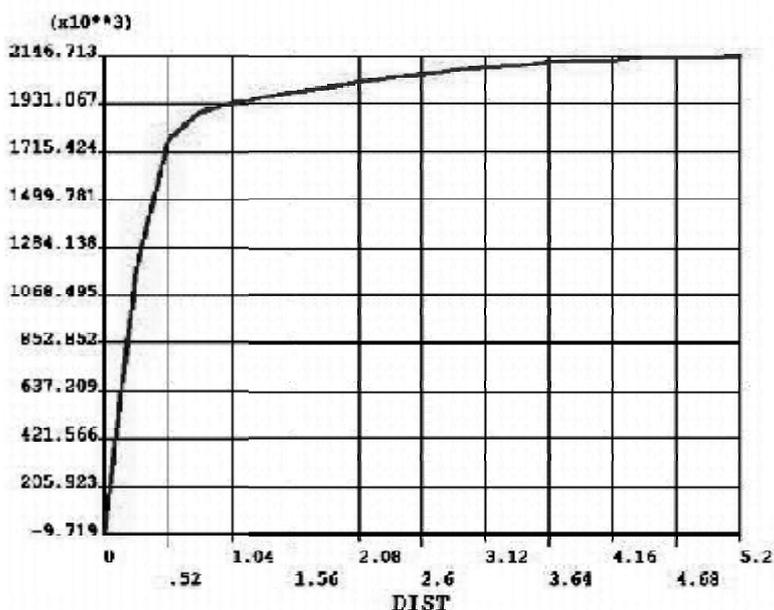


Рис. 4. Изменение напряжений по длине ортотропной плиты (иллюстрация авторов)

4) Напряжения в верхней фибре, возникающие от неравномерности распределения температуры по высоте слоя асфальтобетона, отличаются от нижележащих слоев не более чем на 7 %. С учетом релаксации напряжений этот процент сильно уменьшится. По этой причине данный фактор можно в дальнейшем не учитывать.

5) Увеличение жесткости основания в 1000 раз приводит к увеличению напряжений в верхней фибре асфальтобетона не более чем на 10 %.

Обоснование расчетной модели термонапряженного состояния асфальтобетона

На основе вышеприведенного анализа будем выбирать расчетную модель на основе сравнения напряжений, возникающих в верхней фибре асфальтобетона, т.е. максимальных напряжений. Объясняется это тем, что дальнейшей нашей целью будет попытка спрогнозировать начало процесса разрушения, который возникает именно в месте появления максимальных напряжений.

Ниже в табл. 4 приведены отличия результатов, полученных с помощью гипотезы ломаной и гипотезы наклонной от результатов, полученных с помощью МКЭ. Можно видеть, что гипотеза ломаной лучше описывает термонапряженное состояние в упругой постановке, но не более чем на 4 % при описанных параметрах.

Таблица 4

	Отличие гипотезы ломаной от МКЭ	Отличие гипотезы наклонной от МКЭ
Отличие максимальных напряжений при различных геометрических параметрах ортотропной плиты	8,4 %	12 %
Отличие максимальных напряжений при увеличении модуля упругости металла ортотропной плиты в 1000 раз	10 %	10 %
Отличие максимальных напряжений при увеличении модуля упругости асфальтобетона в 10 раз	1,5 %	2,5 %
Отличие максимальных напряжений при уменьшении модуля упругости асфальтобетона в 10 раз	4 %	4 %
Отличие максимальных напряжений при увеличении толщины асфальтобетона на 0,05 м	2 %	7 %
Отличие максимальных напряжений при уменьшении толщины асфальтобетона на 0,03 м	6 %	6 %

В табл. 5 представлено аналогичное сравнение гипотезы наклонной с гипотезой равномерных деформаций. Можно видеть, что гипотеза равномерных деформаций лучше описывает термонапряженное состояние асфальтобетона при этом являясь намного более простой для реализации. Поэтому в дальнейшем предлагается в качестве основной расчетной модели использовать именно ее.

Таблица 5

	Отличие гипотезы равномерных деформаций от МКЭ	Отличие гипотезы наклонной от МКЭ
Отличие максимальных напряжений при различных геометрических параметрах ортотропной плиты	8,4 %	12 %
Отличие максимальных напряжений при увеличении модуля упругости металла ортотропной плиты в 1000 раз	10 %	10 %
Отличие максимальных напряжений при увеличении модуля упругости асфальтобетона в 10 раз	1,5 %	2,5 %
Отличие максимальных напряжений при уменьшении модуля упругости асфальтобетона в 10 раз	4 %	4 %
Отличие максимальных напряжений при увеличении толщины асфальтобетона на 0,05 м	2 %	7 %
Отличие максимальных напряжений при уменьшении толщины асфальтобетона на 0,03 м	6 %	6 %

Заключение

Таким образом, можно сделать вывод, что максимальные температурные напряжения в асфальтобетоне возникают на уровне центра пролетного строения и в

верхней фибре слоя асфальтобетона. Для оценки начала процесса разрушения была выбрана расчетная модель, использующая гипотезу равномерных деформаций, выбранная по критерию сравнения максимальных напряжений, получаемых с помощью данной гипотезы и с помощью МКЭ. Данная модель дает возможность принимать различные жесткости плиты пролетного строения и предполагает возможность изменения количества слоев и их жестких характеристик. Следует отметить, что это справедливо только для температурных напряжений, поскольку, при появлении изгибных деформаций, картина полностью поменяется, поэтому для таких случаев необходимо разрабатывать отдельную модель. В дальнейшем к данной расчетной модели можно применить, разработанную нами, модель ползучести асфальтобетона и спрогнозировать величину, появляющихся в нем, температурных напряжений. Применяя к этим напряжениям теорию накопления повреждений, являющуюся, правда, недоработанной для асфальтобетона, можно спрогнозировать появление первых трещин вызванных именно температурным фактором. Однако на эти результаты будет накладываться динамическое влияние колеса, поэтому разрабатываемая модель не применима отдельно от моделей, учитывающих эти динамические воздействия и, вероятно, воздействия старения асфальтобетона.

Список библиографических ссылок

1. Сравнительный анализ применяемых конструкций дорожной одежды мостовых сооружений обхода г. Сочи, сданных в эксплуатацию до начала строительства Олимпийских объектов. Часть 2. Основные повреждения дорожной одежды мостового полотна // naukovedenie.ru : интернет-журнал. 2014. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/39KO514.pdf> (дата обращения: 20.09.2019).
2. Иванов Г.П., Еремеев А.В. Напряженно-деформированное состояние асфальтобетонных покрытий на мостовых сооружениях при сжатии от температурных деформаций : сб. ст. международной научно-практической конференции 15-16 января 2016 года г. Санкт-Петербург, СПб, 2016. С. 173–175.
3. Assessment of Thermal Stresses in Asphalt Mixtures at Low Temperatures Using the Tensile Creep Test and the Bending Beam Creep Test // mdpi.com/journal/applsci : интернет-журнал. 2019. URL: https://www.researchgate.net/publication/331374349_Assessment_of_Thermal_Stresses_in_Ashphalt_Mixtures_at_Low_Temperatures_Using_the_Tensile_Creep_Test_and_the_Bending_Beam_Creep_Test (дата обращения: 20.09.2019).
4. Linking asphalt binder fatigue to asphalt mixture fatigue performance using viscoelastic continuum damage modeling // link.springer.com/journal/11043 : интернет-журнал. 2016. URL: https://www.researchgate.net/publication/300374818_Linking_asphalt_binder_fatigue_to_asphalt_mixture_fatigue_performance_using_viscoelastic_continuum_damage_modeling (дата обращения: 20.09.2019).
5. Unified Construction of Dynamic Rheological Master Curve of Asphalts and Asphalt Mixtures // researchgate.net : интернет-журнал. 2017. URL: https://www.researchgate.net/publication/319956810_Unified_Construction_of_Dynamic_Rheological_Master_Curve_of_Ashpalts_and_Ashphalt_Mixtures.
6. Use of Viscoelastic Continuum Damage Theory to Correlate Fatigue Resistance of Asphalt Binders and Mixtures // researchgate.net : интернет-журнал. 2018. URL: https://www.researchgate.net/publication/327767356_Use_of_Viscoelastic_Continuum_Damage_Theory_to_Correlate_Fatigue_Resistance_of_Ashphalt_Binders_and_Mixtures
7. Иванов Г. П., Мухаметханов Р. И. Оценка трещиностойкости асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог : сб. ст. второго всероссийского дорожного конгресса, Москва, 2010. С. 212–215.
8. Щербаков А. Г. О расчетной оценке напряженно-деформированного состояния покрытий на мостовых сооружениях : сб. ст. международной научно-технической конференции «Эффективные строительные конструкции: теория и практика», Пенза, 2002. С. 457–462.

9. Litao G., Xiaoying W., Qian X. Thermal stress of asphalt pavement based on dynamic characteristics of asphalt mixtures // International Journal of Pavement Research and Technology. 2016. Vol.9. Issue 5. P. 263–367.
10. Xue Q., Liu L., Zhao Y., Chen Y., Li J. Dynamic behavior of asphalt pavement structure under temperature-stress coupled loading // Applied Thermal Engineering. 2013. Vol. 53. Issue 1. P. 1–7.

Grishin Ilya Valerievych

assistant

E-mail: il6357grishin@yandex.ru**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Piskunov Aleksandr Alekseevich

doctor of technical sciences, professor

E-mail: a.piskunov52@mail.ru**Institute of roads, buildings and structures of Russian institute of transport**

The organization address: 127055, Russia, Moscow, Minaevsky per., 2

Modeling the process of deformation of asphalt concrete pavement of bridges under temperature exposure**Abstract**

Problem statement. The purpose of the study is to simulate the process of deformation of asphalt concrete pavements of bridges under temperature exposure. The development of the model was caused by the need to assess the effect of temperature stresses on the stress-strain state of asphalt concrete pavement of bridges with the simplest design schemes. The selection was made according to the criterion of compliance with the results of numerical modeling.

Results. As a result of comparing the analytical solutions obtained using the proposed models with the results of numerical modeling, the following conclusions were made:

- tensile stresses reach their maximum in the upper fiber of the asphalt concrete layer;
- thermal stresses increase from the edge to the center of the plate;
- an increase in stresses caused by an uneven temperature distribution over the thickness of asphalt concrete does not exceed 7 % in the elastic setting and, taking into account stress relaxation, may not be taken into account;
- an increase in the rigidity of the base of the asphalt concrete layer by a factor of 1000 leads to an increase in maximum stresses of no more than 10 % in the elastic setting, which, taking into account the relaxation of stresses, gives reason to use the selected model for both metal and reinforced concrete bridges.

Conclusions. The significance of the results for the construction industry lies in the possibility of a more complete understanding of the causes of the destruction of asphalt pavement of bridges and, accordingly, the possibility of taking these factors into account when assigning the thickness and physico-mechanical parameters of asphalt pavements.

Keywords: thermally stressed state of multilayer plates, uniform deformation hypothesis, inclined hypothesis, broken line hypothesis, numerical simulation of thermally stressed state.

References

1. Comparative analysis of applied pavement constructions of bridge structures bypassing the city of Sochi, put into operation before the start of construction of Olympic facilities. Part 2. The main damage to the pavement of the bridge // *naukovedenie.ru* : internet-journal. 2014. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/39KO514.pdf> (reference date: 20.09.2019).
2. Ivanov G. P., Ereemeev A. V. The stress-strain state of asphalt concrete pavements on bridge structures under compression from temperature deformations : dig. of art. of

- international scientific-practical conference on January 15-16 of 2016 in St. Petersburg, SPb, 2016. P. 173–175.
3. Assessment of Thermal Stresses in Asphalt Mixtures at Low Temperatures Using the Tensile Creep Test and the Bending Beam Creep Test // *mdpi.com/journal/applsci* : internet-journal. 2019. URL: https://www.researchgate.net/publication/331374349_Assessment_of_Thermal_Stresses_in_Asphalt_Mixtures_at_Low_Temperatures_Using_the_Tensile_Creep_Test_and_the_Bending_Beam_Creep_Test (reference date: 20.09.2019).
 4. Linking asphalt binder fatigue to asphalt mixture fatigue performance using viscoelastic continuum damage modeling // *link.springer.com/journal/11043* : internet-journal. 2016. URL: https://www.researchgate.net/publication/300374818_Linking_asphalt_binder_fatigue_to_asphalt_mixture_fatigue_performance_using_viscoelastic_continuum_damage_modeling (reference date: 20.09.2019).
 5. Unified Construction of Dynamic Rheological Master Curve of Asphalts and Asphalt Mixtures // *researchgate.net* : internet-journal. 2017. URL: https://www.researchgate.net/publication/319956810_Unified_Construction_of_Dynamic_Rheological_Master_Curve_of_Asphalts_and_Asphalt_Mixtures (reference date: 20.09.2019).
 6. Use of Viscoelastic Continuum Damage Theory to Correlate Fatigue Resistance of Asphalt Binders and Mixtures // *researchgate.net* : internet-journal. 2018. URL: https://www.researchgate.net/publication/327767356_Use_of_Viscoelastic_Continuum_Damage_Theory_to_Correlate_Fatigue_Resistance_of_Asphalt_Binders_and_Mixtures (reference date: 20.09.2019).
 7. Ivanov G. P., Mukhametkhanov R. I. Assessment of crack resistance of asphalt concrete pavements of automobile roads : dig. of art. of the Second all-Russian road congress, Moscow, 2010. P. 212–215.
 8. Shcherbakov A.G. About the estimated assessment of the stress-strain state of coatings on bridge structures : dig. of art. of International scientific technical conference «Effective building constructions: theory and practice», Penza, 2002. P. 457–462.
 9. Litao G., Xiaoying W., Qian X. Thermal stress of asphalt pavement based on dynamic characteristics of asphalt mixtures // *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2016. Vol. 9. Iss. 5. P. 263–367.
 10. Xue Q., Liu L., Zhao Y., Chen Y., Li J. Dynamic behavior of asphalt pavement structure under temperature-stress coupled loading // *Applied Thermal Engineering*. 2013. Vol. 53. Iss. 1. P. 1–7.