

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2023, Том 10, № 4 / 2023, Vol. 10, Iss. 4 <https://t-s.today/issue-4-2023.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/08SATS423.pdf>

DOI: 10.15862/08SATS423 (<https://doi.org/10.15862/08SATS423>)

2.1.5. Строительные материалы и изделия (технические науки)

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки)

Анализ свойств геосинтетических материалов, пригодных для борьбы с отраженными трещинами в асфальтобетонных покрытиях

¹Медведев Д.В., ¹Симчук Е.Н., ²Бочкарев А.В.

¹АНО «Научно-исследовательский институт
транспортно-строительного комплекса», Москва, Россия

²ФГБОУ ВО «Саратовский государственный
технический университет имени Гагарина Ю.А.», Саратов, Россия

Автор, ответственный за переписку: Медведев Дмитрий Викторович, e-mail: medvedev@niitsk.ru

Аннотация. Появление отраженных трещин на новом асфальтобетонном слое, уложенном в ходе реконструкции поверх существующего бетонного или асфальтобетонного покрытия, является основной причиной преждевременного выхода из строя автомобильных дорог. Трещины такого типа зарождаются над дефектами старого покрытия и прорастают через новый слой под воздействием нагрузок от транспортных средств и колебаний температурного поля. Одним из распространенных способов борьбы с отраженными трещинами является использование промежуточного армирующего слоя из специального геосинтетического материала, перераспределяющего на себя часть нагрузок. В работе предлагается структурная модель многослойной дорожной одежды и модель изменения температурного поля, построенные на основе проектной документации автомобильной дороги М-11 «Нева» и данных со станции температурного мониторинга. Расчет температурных напряжений, возникающих в армированных асфальтобетонных слоях в окрестности существующей трещины старого покрытия, производится

методом конечных элементов с использованием приближенного метода Хиллса и Брайена, сводящего расчет к последовательности решения задач линейной теории упругости. Зависимости модуля жесткости асфальтобетона от температуры и времени действия нагрузки вычисляются на основе индекса пенетрации и температуры размягчения вяжущего с учетом неизбежного старения последнего в процессе укладки и эксплуатации покрытия. Показано, что существенное снижение опасных растягивающих напряжений в асфальтобетоне возможно при армировании георешетками с максимальной прочностью на растяжение не ниже 100 кН/м, изготовленными на основе высокомодульных стеклянных или углеродных волокон, при условии совместной работы асфальтобетонных и армирующих слоев в отсутствие взаимного проскальзывания.

Ключевые слова: отраженные трещины; асфальтобетон; геосинтетический материал; температурные напряжения; метод конечных элементов; колебания температуры; вязкоупругие материалы

Geosynthetic materials properties analysis suitable for controlling reflective cracks in asphalt concrete

¹Dmitriy V. Medvedev, ¹Evgeniy N. Simchuk, ²Andrey V. Bochkarev

¹ANO «Research Institute of Transport and Construction Complex», Moscow, Russia

²Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia

Corresponding author: Dmitriy V. Medvedev, e-mail: medvedev@niitsk.ru

Abstract. Reflective cracks appearing in the new asphalt concrete layer laid during reconstruction over the existing concrete or asphalt concrete pavement is the main cause of premature highways failure. Cracks of this type appear over defects in the old pavement and grow through the new pavement under the influence of vehicle loads and fluctuations in the temperature field. One of the common ways to combat reflective cracks is the use of an intermediate reinforcing layer made of special geosynthetic material, redistributing part of the loads. The paper proposes a multilayer pavement structural model and a temperature field change model based on the design documentation of the M-11 «Neva» highway and data from the temperature monitoring station. Temperature stresses calculation arising in reinforced asphalt concrete layers in the existing crack vicinity of the old pavement is performed by the finite element method using the approximate method of Hills and Brien, reducing the

calculation to the sequence of solving problems of linear elasticity theory. The dependencies of asphalt concrete rigidity modulus on temperature and time of load action are calculated on the basis of penetrative index and the binder softening temperature, taking into account the inevitable aging of the binder during paving and pavement operation. It is shown that significant reduction of dangerous tensile stresses in asphalt concrete is possible at reinforcement with geogrids with maximum tensile strength not lower than 100 kN/m, made on the basis of high-modulus glass or carbon fibers, under condition of joint work of asphalt concrete and reinforcing layers in the absence of mutual slippage.

Keywords: reflective cracks; asphalt concrete; geosynthetic material; thermal stresses; finite element method; temperature fluctuations; viscoelastic materials

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



Введение

Introduction

Одной из основных причин преждевременного выхода из строя автомобильных дорог является растрескивание асфальтобетонного покрытия. Помимо снижения комфорта движения для водителей и пассажиров транспортных средств, наличие сквозных трещин покрытия приводит к прониканию воды и антиобледенительных реагентов в слои основания дорожной одежды и вызывает многократное ускорение их деградации. Несвоевременное восстановление сплошности асфальтобетонного покрытия ведет в конечном итоге к необходимости дорогостоящего капитального ремонта или даже к полной разборке существующей конструкции с последующим сооружением новой. Наиболее распространенным способом восстановления сплошности является укладка нового асфальтобетонного покрытия поверх старого, покрытого трещинами. Основная проблема такой технологии реконструкции связана с отраженными трещинами, прорастающими из старого покрытия в новое в течение уже первых лет эксплуатации нового покрытия. Многими исследователями отмечается, что, несмотря на все усилия, пока не удалось выработать недорогого и эффективного способа полной ликвидации проблемы отраженных трещин в новом покрытии [1; 7]. Фрезерование старого покрытия с заделкой существующих трещин пластичными материалами, увеличение толщины нового покрытия и уменьшение вязкости его связующего, применение промежуточных слоев усиления из высокомодульных волокон, установка разделяющих слоев из синтетических материалов с высокой деформативностью в большинстве случаев приводят только к отсрочке появления трещин на новом покрытии, а не полному их исчезновению. Одним из перспективных путей решения обозначенной проблемы видится проведение широкомасштабных полевых и лабораторных испытаний современных геосинтетических трещинопрерывающих материалов, сопровождаемых выполнением полноценного математического моделирования процессов деформирования и развития трещин в слоях дорожной одежды, принимающего во внимание как вязкоупругую природу асфальтобетона, так и совокупное воздействие нагрузок от транспортных средств и изменения температуры.

Исследованию процессов трещинообразования асфальтобетонных покрытий и способов борьбы с ними посвящено немало работ. В исследовании [2] приводятся результаты испытания на усталостное разрушение модельной конструкции, состоящей из слоя асфальтобетона, уложенного через промежуточный слой геосинтетического материала на резиновое основание с заранее сформированной трещиной. Результаты исследования показывают, что многократное увеличение долговечности в

сравнении с неармированной конструкцией достигается только при достаточной адгезии армирующего слоя к асфальтобетону — простое приклеивание геосинтетического материала к нижнему слою асфальтобетона, вместо заделки в его толщу, приводит к быстрому отслаиванию и потере армирующих свойств. С этими выводами согласны авторы [3], проводившие в соответствии с протоколом Texas Overlay Test испытания на усталостную долговечность кернов, извлеченных из армированных асфальтобетонных покрытий восстановленных дорожных одежд. В процессе испытаний наблюдалось отслаивание армирующего материала от слоя старого асфальтобетона. В работе [4], в сравнении с [2], использовалась более близкая к реальности конструкция с дополнительным слоем, моделирующим старое асфальтобетонное покрытие. Выяснилось, что наибольший прирост усталостной долговечности и сопротивления к колееобразованию наблюдается, если геосинтетический материал устанавливать на расстоянии в треть толщины от нижней поверхности асфальтобетона. В исследовании [5] реализован иной подход к оценке стойкости к трещинообразованию — вместо циклического нагружения образцов балочного типа, как в работах [2–4], проводилось раскалывание на гладком металлическом клине призматических образцов, состоящих из двух слоев асфальтобетона с промежуточным слоем геосинтетики. Критерием стойкости выступала механическая работа установки, требующаяся для раскалывания образца на две половинки, которое трактовалось как сквозное прорастание трещины. Для армирования использовались георешетки из высокомодульных углеродных и стеклянных волокон с прочностью на растяжение от 120 кН/м до 200 кН/м при максимальной деформации от 1,5 % до 3 %, а также иглопробивной нетканый полимерный материал, выдерживающий деформацию до 100 %. Наибольшая работа установки потребовалась для образцов, усиленных нетканым материалом; однако наибольшее увеличение начального усилия (до 62 %), необходимого для инициации роста трещины, наблюдалось при использовании георешетки из углеродных волокон с прочностью 200 кН/м. Авторы [6] сообщают об уменьшении на 65 % средних пиковых деформаций при армировании асфальтобетонного слоя действующей дорожной одежды комбинированной углеродно-стеклянной георешеткой с максимальной прочностью 250 кН/м; при этом использование полимерной георешетки сравнимой прочности, но на порядок меньшей жесткости, не повлияло на поле деформаций. Интересная обзорная работа [7] посвящена сравнению эффективности более 10 различных способов восстановления растрескавшегося асфальтобетонного покрытия, применяемых в США и Канаде. Отмечается, что использование геотекстиля, георешеток и стальных решеток менее эффективно в борьбе с отраженными трещинами, чем, например, технологии холодного ресайклинга (cold-in place recycling)

или установки чередующихся тонких слоев асфальтобетона и мелкого щебня (chip seal interlayer); в то же время, никакие способы не помогают отсрочить более чем на 3 года момент появления отраженных трещин на восстановленных покрытиях в северных штатах, где значительная часть года наблюдается отрицательная температура воздуха. В работе [8] установлено удовлетворительное согласие между результатами лабораторных измерений вертикальных напряжений и горизонтальных деформаций в крупномасштабной модели дорожной одежды размером 1,8 м×1,6 м×1,8 м, и результатами линейного расчета по методу конечных элементов. Наконец, упомянем работу [9], в которой было проведено масштабное конечно-элементное моделирование процесса накопления микрповреждений в окрестности трещины старого асфальтобетонного основания, покрытого слоем нового асфальта. Материалы покрытия рассматривались как линейно-упругие при действии транспортной нагрузки, и как вязкоупругие при действии температурных нагрузок. Для моделирования распределения температур по толщине слоев использовались данные измерений со станции мониторинга, расположенной в одном из северных районов Португалии, передаваемые станцией ежечасно в течение года. Моделирование показало, что наибольшая скорость накопления повреждений определяется именно температурными нагрузками и наблюдается в период с февраля по апрель.

Принимая во внимание результаты исследований [1–9], была поставлена следующая задача: при помощи конечно-элементного моделирования многослойной дорожной одежды, прошедшей реконструкцию при помощи укладки нового асфальтобетонного слоя через промежуточный слой геосинтетического материала, уточнить параметры геосинтетического материала, требуемые для существенного уменьшения температурных напряжений в окрестности трещины старого асфальтобетонного покрытия. Расчет на температурные нагрузки проводился в линейной постановке; структура дорожной одежды и модель распределения температур соответствуют 1-й очереди строительства автодороги М-11 «Нева» (Московская область); в качестве армирующего материала выбиралась георешетка на основе высокомодульного стекловолокна прочностью на растяжение 120 кН/м, имеющаяся в ассортименте продукции отечественных производителей.

Статья имеет следующую структуру. В первом разделе предлагается математическая модель распределения температуры по слоям дорожной одежды. Второй раздел посвящен постановке задачи определения напряженно-деформированного состояния в окрестности трещины. В 3-м разделе приводятся основные результаты вычислений, после чего следует их обсуждение.

1. Моделирование распределения температур по слоям дорожной одежды

1. Modeling of temperature distribution over pavement layers

Современный асфальтобетон является композитным материалом, состоящим из минерального высокопрочного наполнителя и органического вяжущего (битума). Нормативные требования к битумам, которые могут быть использованы для приготовления покрытий современных автомобильных дорог, предъявляются достаточно жесткие требования. В частности, для минимизации колееобразования под воздействием нагрузки от транспортных средств, битум должен иметь достаточно высокую вязкость в самое жаркое время года. Напротив, в холодное время года вязкость битума должна достаточно мала, чтобы обеспечивать релаксацию напряжений для предотвращения образования трещин. Падение характеристик битума при его технологическом старении, происходящем при укладке асфальтобетона, и при последующем эксплуатационном старении должно быть настолько замедленным, чтобы обеспечить показатели стойкости к колееобразованию и растрескиванию на весь планируемый срок службы автомобильной дороги.

Битум относится к вязкоупругим материалам, свойства которого сильно зависят от температуры и времени приложения нагрузки. В окрестности температуры стеклования и ниже битум ведет себя как хрупкий упругий материал с низким уровнем необратимых деформаций; при температурах, близких к температуре размягчения битум проявляет выраженные вязкостные свойства: в эксперименте при постоянном одноосном нагружении, деформации образца неограниченно возрастают со временем вплоть до разрушения. Следовательно, необходимым этапом моделирования напряженно-деформированного состояния многослойной дорожной одежды, включающей слои из асфальтобетона, является построение температурной модели, предсказывающей сезонные и суточные колебания температуры по всем слоям конструкции.

В качестве объекта моделирования была выбрана скоростная автомобильная дорога М-11 «Нева», как сравнительно свежая конструкция, спроектированная и построенная «с нуля» в соответствии с современными нормами (табл. 1). Начиная с 2018 года, на этой дороге государственной компанией «Автодор» были введены в эксплуатацию автоматические станции удаленного мониторинга, передающие каждые полчаса информацию о перемещениях, температурах и влажности дорожной одежды по всей ее глубине.

Таблица 1 / Table 1

Конструкция дорожной одежды 1 этапа строительства М-11 «Нева»

Pavement design of M-11 «Neva» construction stage 1

	Слой <i>Layer</i>	Толщина <i>H, мм</i> <i>Thickness H, mm</i>	Плотность ρ , кг/м ³ <i>Density ρ, kg/m³</i>	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К) <i>Heat conductivity coefficient λ, W/(m·K)</i>	Теплоемкость <i>c</i> , Дж/(кг·К) <i>Heat storage capacity <i>c</i>, J/(kg·K)</i>
1	Щебеночно-мастичный асфальтобетон ЦМА-20 <i>Stone mastic asphalt concrete SMA-20</i>	60	2 500 (2 500)	1,4 (1,4)	1 000–1 500 (1 000)
2	Горячий плотный асфальтобетон типа Б на битуме БНД 60/90 <i>Hot dense-graded asphalt concrete type B on bitumen CB (construction bitumen) 60/90</i>	80	2 400 (2 400)	1,4 (1,4)	900–1 500 (1 500)
3	Горячий пористый асфальтобетон на битуме БНД 60/90 <i>Hot open-graded asphalt concrete on bitumen CB (construction bitumen) 60/90</i>	150	2 300 (2 300)	1,25 (1,25)	900–1 500 (1 500)
4	Щебеночно-песчаная смесь С4 <i>Stone sand mixture C4</i>	480	2 000 (2 000)	2,0–2,1 (2,0)	800–900 (800)
5	Песок мелкий <i>Fine sand</i>	600	1 800–1 900 (1 900)	1,91–2,32 (2,12)	800 (800)
6	Грунт земляного полотна — песок <i>Roadbed soil — sand</i>	—	1 750–2 000 (1 900)	1,80–2,44 (2,12)	800 (800)

Источник / Source¹

Диапазоны возможных изменений плотности, теплопроводности и теплоемкости материалов в слоях, представленных в таблице 1, устанавливались в соответствии со справочниками² и ОДМ 218.2.061-2015 «Рекомендации по определению теплофизических свойств дорожно-строительных материалов и грунтов».

Согласно исследованию [10], удельная теплоемкость асфальтобетона в первые 2–3 года эксплуатации минимальна и равна примерно 900–1 000 Дж/(кг·К); в дальнейшем изменение микроструктуры асфальтобетона в процессе его старения приводит к увеличению теплоемкости более чем в 1,5 раза.

Эти экспериментальные результаты были учтены при выборе границ изменения теплоемкости асфальтобетонов в таблице 1.

¹ Строительство, содержание, ремонт, капитальный ремонт и эксплуатация на платной основе скоростной автомобильной дороги М-11 «Москва — Санкт-Петербург» на участке км 58 — км 149 (1 и 2 этап). Информационный меморандум. М.: ГК «Автотор», 2014. http://m11-section1-2.avtodor-invest.com/files2/Information_memorandum.pdf

² Бабичев, А.П. Физические величины: Справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 1232 с.

Справочная энциклопедия дорожника. Том 5. Проектирование автомобильных дорог. / Под ред. Г.А. Федотова, П.И. Поспелова. — М.: Информавтотор, 2007. — 1 466 с.

Изменчивость коэффициента теплопроводности песка в той же таблице связана с зависимостью от влажности. В круглых скобках в таблице 1 указаны значения величин, принятые для дальнейших расчетов.

В предлагаемой температурной модели дорожная одежда представляется слоистым полупространством, состоящим из однородных слоев постоянной толщины, покоящихся на неограниченном по глубине грунтовом основании, с однородным полем температуры на внешней границе.

Для упрощения расчетов тепловые характеристики материала каждого слоя считаются постоянными, не зависящими от времени и температуры; фазовыми переходами и прочими структурными перестройками вещества, возможными при изменении температуры, пренебрегаем.

В таких условиях для моделирования процесса распространения тепла можно использовать систему одномерных однородных уравнений теплопроводности:

$$\frac{\partial u_k}{\partial t} = \frac{\lambda_k}{c_k \rho_k} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x^2}, \quad k = 1..N, \quad (1)$$

вместе с условиями непрерывности теплового потока на межслойных границах:

$$(\lambda_k u_k - \lambda_{k+1} u_{k+1})|_{x=X_k} = 0, \quad k = 1..N-1, \quad (2)$$

где N — количество слоев; $u_k = u_k(t, x)$ — температура в пределах k -го слоя в точке с координатой x в момент времени t ; λ_k, c_k, ρ_k — коэффициент теплопроводности, удельные теплоемкость и плотность материала k -го слоя, соответственно; $X_k = \sum_{i=1}^k H_i$ — координата границы между k -м и $k+1$ -м слоями. Ось координат x начинается на внешней границе (верхней поверхности первого слоя) и направлена вглубь полупространства по нормали к поверхности.

Для задания начальных и граничных условий использовалась информация, полученная в период с 14 января 2019 года по 16 августа 2021 года с устройства мониторинга № 118 «Автодор», установленного на трассе М-11 (км 60 + 450).

К сожалению, устройство не измеряет температуру поверхности дорожной одежды, поэтому в качестве граничного условия задавалась зависимость температуры от времени, измеренная на границе между слоями ЩМА-20 и плотного асфальтобетона (рис. 1).

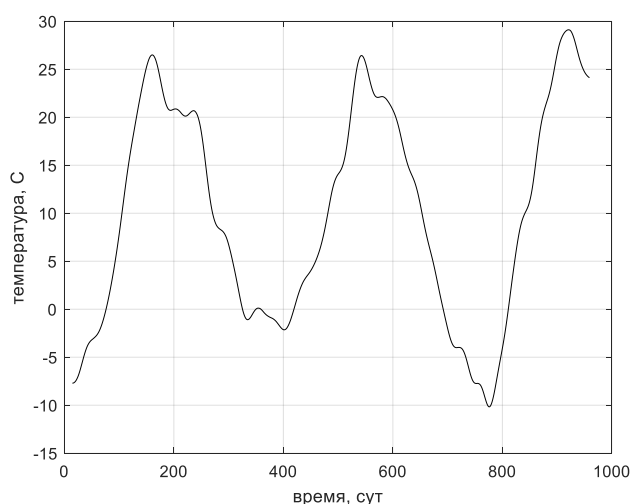


Рисунок 1. Изменение температуры на верхней поверхности слоя плотного асфальтобетона (начало отсчета по оси времени — суткам 00:00-23:59 01.01.2019 соответствует номер 1) (разработано авторами)

Figure 1. Temperature change on the dense asphalt concrete upper surface layer (the start point along the time axis — day 00:00-23:59 01.01.2019 corresponds to number 1) (developed by the authors)

Соответственно, после вынужденного исключения слоя ЩМА-20, температурная модель включала 5 последовательных слоев, сверху вниз: плотный асфальтобетон, пористый асфальтобетон, щебеночно-песчаная смесь, песок мелкий и грунтовое основание. Неограниченное по глубине грунтовое основание моделировалось слоем толщиной 10 м; на нижней границе этого слоя температура может задаваться постоянной и равной средней наблюдаемой температуре на соответствующей глубине для открытого грунта на широте Московской области по данным метеорологических наблюдений. Для задания начальных условий проводилась кусочно-линейная интерполяция по измеренным температурам на межслойных границах по состоянию на 00:00 14 января 2019 года.

Численное решение задачи (1)–(2) методом сеток было получено при помощи программного модуля, написанного на языке системы инженерных расчетов Matlab. Для верификации программного модуля было проведено сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными, полученными за расчетный период с 14 января 2019 года по 16 августа 2021 года с устройства мониторинга № 118 (рис. 2).

Как видно из рисунка 2, экспериментальные и расчетные данные находятся в хорошем согласии — максимальное расхождение температур не превосходит 2°C. Данный уровень погрешности можно считать приемлемым для использования программного модуля на втором этапе расчетов при оценке температурных напряжений, возникающих в слоях дорожной одежды.

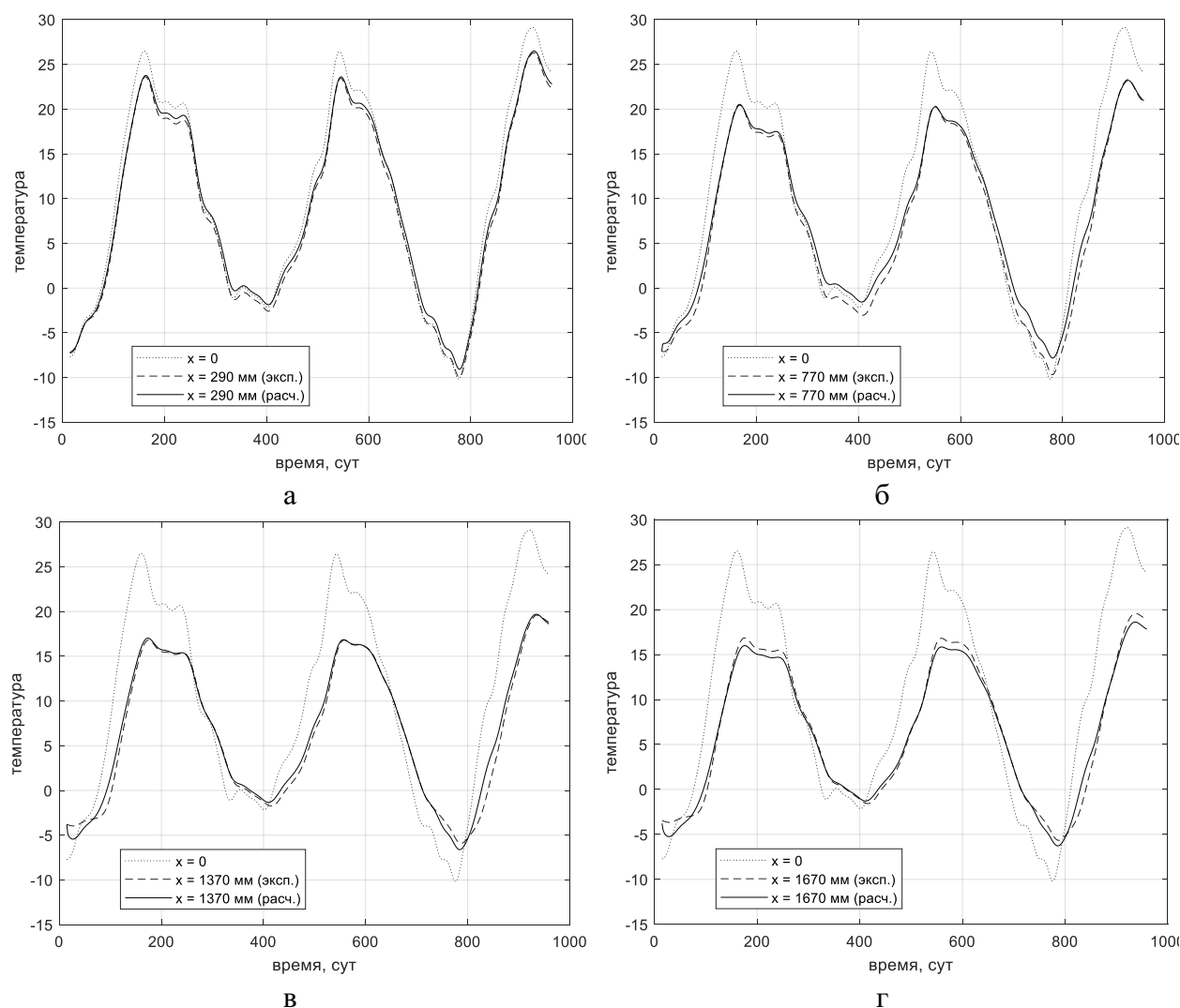


Рисунок 2. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных по температурам на разных глубинах (разработано авторами)

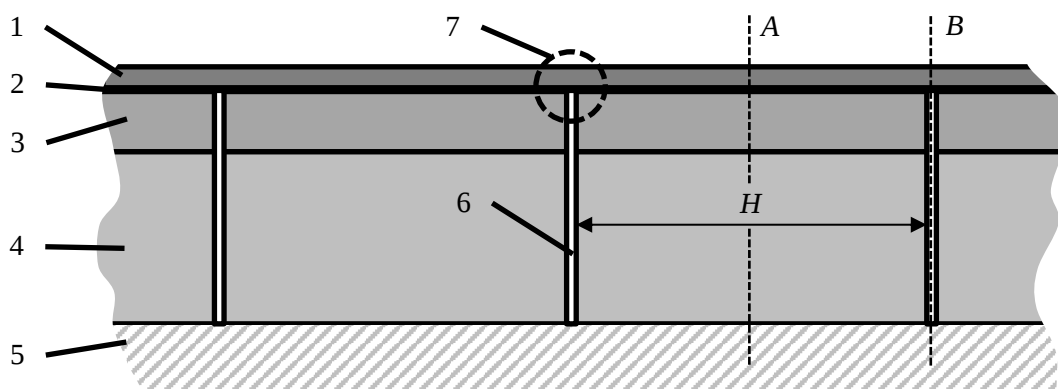
Figure 2. Comparison of experimental and calculated data on temperatures at different depths (developed by the authors)

2. Постановка задачи определения напряженного состояния в окрестности трещины

2. Research objective for determining the stress state in the vicinity of the crack

Структурная модель дорожной одежды. Предположим, что существующая дорожная одежда в ходе многолетней эксплуатации подверглась поперечному растрескиванию, при котором прямолинейные вертикальные трещины, перпендикулярные оси дороги, возникли на расстоянии H друг от друга (рис. 3). Если считать, что трещины проросли через всю толщину асфальтобетонных слоев 3 и несвязные слои основания 4 не сопротивляются растягивающим нагрузкам, то вся дорожная одежда оказывается разделенной на серию малосвязанных сегментов. Пусть в

процессе ремонтно-восстановительных работ к верхней поверхности старого покрытия 3, после его выравнивания, прикреплен слой геосинтетического материала 2 на основе стекловолокна, поверх которого создано новое асфальтобетонное покрытие 1. Тогда при понижении температуры к обычным температурным напряжениям растяжения в новом покрытии добавляются напряжения в окрестности вершины трещины (зона 7), появляющиеся в результате стремления трещины к расширению из-за температурного сжатия сегментов старой дорожной одежды.



1 — новое асфальтобетонное покрытие; 2 — слой армирования; 3 — старое асфальтобетонное покрытие; 4 — основание; 5 — грунтовое полотно; 6 — трещина; 7 — зона добавочных температурных напряжений

1 — new asphalt concrete pavement; 2 — reinforcement layer; 3 — old asphalt concrete pavement; 4 — roadbed; 5 — ground bed; 6 — crack; 7 — added temperature stresses area

Рисунок 3. Структура дорожной одежды (разработано авторами)

Figure 3. Pavement structure (developed by the authors)

Предполагается, что применение армирующего геосинтетического материала позволит существенно снизить уровень добавочных температурных напряжений в новом покрытии и уменьшить вероятность его растрескивания.

Модель изменения температуры. Для расчета максимального уровня добавочных напряжений необходимо из всевозможных распределений температур по глубине дорожной одежды, возникающих в процессе эксплуатации, выбрать самые неблагоприятные распределения. Как отмечалось во многих источниках, температурное растрескивание асфальтобетона наблюдается при резких понижениях температуры в холодное время года, когда скорость релаксации напряжений слишком мала, чтобы справиться со стремительно нарастающими температурными напряжениями и последние могут превысить прочность материала на растяжение. Полноценный расчет напряженно-деформированного состояния вязкоупругого материала в двух- или трехмерной постановке в

неоднородном нестационарном поле температур является сложной задачей и для ее упрощения мы воспользуемся приближенным методом Хиллса и Брайена, сводящим данную задачу к последовательности упругих задач [11]. В соответствии с методом, весь промежуток времени $t \in [0, \tau]$, на котором вычисляются температурные напряжения, разбивается последовательностью точек $0 = t_1, t_2, \dots, t_N = \tau$ на малые равные промежутки длительностью Δt и напряжение в момент времени t_{k+1} определяют суммированием:

$$\sigma(t_{k+1}) = \alpha \sum_{p=1}^k S(\Delta t, T_p)(T_{p+1} - T_p), \quad (3)$$

где α — коэффициент температурного расширения асфальтобетона, $T_p = T(t_p)$ — температура в момент времени t_p и $S(\Delta t, T)$ — модуль жесткости асфальтобетона при длительности нагружения Δt и температуре T . В начале расчета температурные напряжения полагают нулевыми: $\sigma(t_1) = 0$. Основным недостатком метода Хиллса и Брайена называют отсутствие учета эффекта релаксации напряжений при длительных воздействиях нагрузок [12]. Однако в том же исследовании [12] приводится сравнение температурных напряжений, вычисленных по данному методу, с экспериментальными напряжениями, измеренными при понижении температуры образца с 6°C до -20°C со скоростью $10^\circ\text{C}/\text{час}$. Испытанию подвергались образцы на нескольких видах битума и в результате выявлено удовлетворительное согласие теории с экспериментом, причем для некоторых образцов теория давала завышенные напряжения, а для других — заниженные. Предположим, что при низких температурах релаксацией напряжений в асфальтобетоне в течение суток действительно можно пренебречь. Опираясь на эту гипотезу, представим эпюру температуры по глубине дорожной одежды как суперпозицию медленно меняющейся сезонной температуры $T_{\text{сез}}(t)$ и быстро меняющейся суточной $T_{\text{сут}}(t)$. После анализа экспериментальных данных с зонда № 118 на трассе М-11, учитывая, что верхний датчик температуры находится не на поверхности, а на глубине 6 см, для сезонной температуры на поверхности дорожной одежды примем:

$$T_{\text{сез}}(t)|_{x=0} = 10 - 18 \cos\left(\frac{2\pi}{365}(t-15)\right), \quad (4)$$

где t измеряется в сутках, начиная с 1 января 2019 г. (рис. 4).

Примеры сезонных профилей температур в слоях асфальтобетона общей толщиной 29 см, возникающих при использовании (4), показаны на рисунке 5.

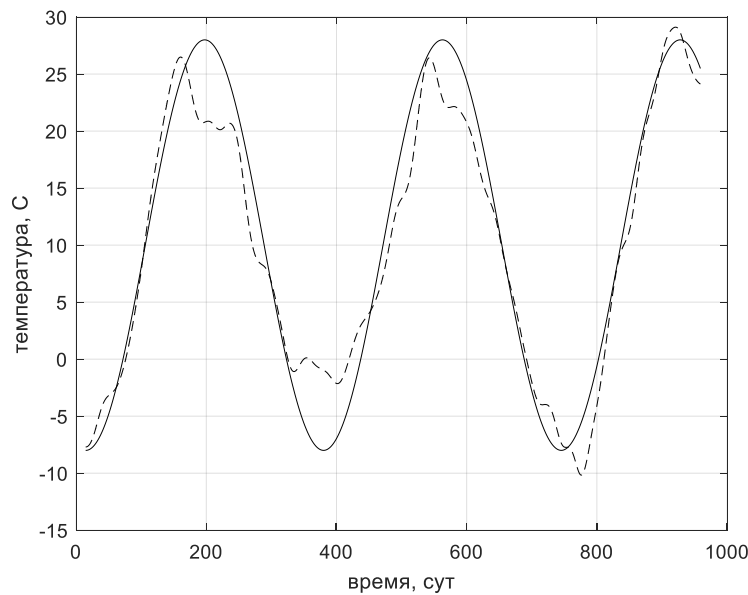
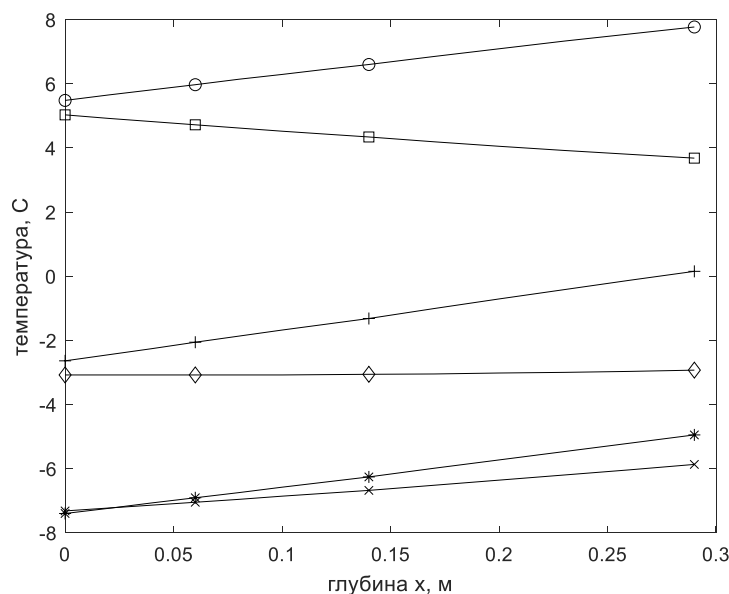


Рисунок 4. Наблюдаемые (пунктирная линия) и принятые в расчет (сплошная линия) сезонные колебания температуры на поверхности асфальта (разработано авторами)

Figure 4. Observed (dashed line) and calculated (continuous line) seasonal temperature fluctuations on the asphalt surface (developed by the authors)



(o) — 1 ноября; (+) — 1 декабря; (*) — 1 января; (x) — 1 февраля; (◇) — 1 марта; (□) — 1 апреля
(o) — November 1; (+) — December 1; (*) — January 1; (x) — February 1; (◇) — March 1; (□) — April 1

Рисунок 5. Моделирование распределения температур по слоям асфальтобетона (разработано авторами)

Figure 5. Temperature distribution simulation over asphalt concrete layers (developed by the authors)

Будем считать, что сезонные изменения температуры $T_{сез}(t, x)$ настолько медленные, что не приводят к появлению температурных напряжений. На фоне сезонного профиля возможны быстрые суточные

изменения температуры, вызывающие температурные напряжения. Анализ показаний верхнего датчика температуры за период с 14.01.2019 по 16.08.2021 выявил следующие экстремальные участки зависимостей температуры от времени:

Таблица 2 / Table 2

Экстремальные участки температурных зависимостей

Extreme areas of temperature dependencies

Максимальное понижение температуры в течение суток в холодное время года <i>Maximum temperature decrease during a day in cold season</i>	10–11 марта за 14 часов температура уменьшилась с -6°C до -18°C <i>On March 10–11, the temperature decreased from -6°C to -18°C in 14 hours</i>
Максимальное понижение температуры в течение суток за все время наблюдения <i>Maximum temperature decrease during the day for the whole observation period</i>	22–23 июня за 14 часов температура уменьшилась с 40°C до 19°C <i>On June 22–23, the temperature decreased from 40°C to 19°C in 14 hours</i>
Максимальное повышение температуры в течение суток в холодное время года <i>Maximum temperature rise during a day in cold season</i>	25 марта за 8 часов температура увеличилась с -7°C до 8°C <i>On March 25, the temperature increased from -7°C to 8°C in 8 hours</i>
Максимальное понижение температуры за 1 час в холодное время года <i>Maximum temperature decrease in 1 hour during cold season</i>	16 марта температура с 15 до 16 часов понизилась на 1,6°C <i>On March 16, the temperature decreased by 1,6°C from 15 to 16 hours</i>
Максимальное повышение температуры за 1 час в холодное время года <i>Maximum temperature increase in 1 hour during cold season</i>	25 марта температура с 09 до 10 часов повысилась на 2,6°C <i>On March 25, the temperature from 09 to 10 hours increased by 2,6°C</i>
Максимальное понижение температуры за 1 час за все время наблюдения <i>Maximum temperature decrease in 1 hour over the entire observation period</i>	9 июля температура с 16 до 17 часов понизилась на 4,4°C <i>On July 9, the temperature from 4 to 5 p.m. decreased by 4,4°C</i>
Максимальное повышение температуры за 1 час за все время наблюдения <i>Maximum temperature rise in 1 hour during the entire observation period</i>	8 июня температура с 09 до 10 часов повысилась на 3,5°C <i>On June 8, the temperature increased by 3,5°C from 09 to 10 hrs.</i>
Минимальная средняя температура по всем асфальтобетонным слоям в течение суток <i>Minimum average temperature over all asphalt pavements during the day</i>	18–19 января средняя температура равнялась -19°C <i>On January 18–19 the average temperature was -19°C</i>

Разработано авторами / Developed by the authors

Объединяя максимальное наблюдаемое суточное понижение температуры в холодное время года ($\Delta T = 12$ град) с максимальной наблюдаемой скоростью ее изменения ($\Delta T / \Delta t = 4$ град/час), примем следующую модельную функцию суточного изменения температуры:

$$T_{\text{сут}} = \pm \begin{cases} 4t, & t \in [0, 3); \\ 12, & t \in [3, 12); \\ 4(15 - t), & t \in [12, 15); \\ 0, & t \in [15, 24). \end{cases} \quad (5)$$

При выборе в (5) знака «+», суточная температура линейно возрастает в течение 3 часов со скоростью 4°C/час и фиксируется в течение 9 часов на отметке +12°C к сезонной температуре, а затем за 3 часа

$$\beta = \frac{0.1794}{1 + 0.2084PI - 0.00524PI^2}, \quad (7)$$

и η — сдвиговая ньютоновская вязкость, $[\eta] = \text{МПа} \cdot \text{с}$,

$$\eta = a_{Ahr} (T) \eta (PI), \quad (8)$$

являющаяся произведением функции температурно-временного смещения Аррениуса:

$$a_{Ahr} (T) = \exp \left[11720 \frac{3(30 + PI)}{5(10 + PI)} \left(\frac{1}{T + 273} - \frac{1}{T_{rb} + 263} \right) \right] \quad (9)$$

и приведенной вязкости, подобранной в соответствии с данными Ван дер Поля [13; 14]:

$$\eta (PI) = 0.00124 \left[1 + 71 \exp \left(- \frac{12(20 - PI)}{5(10 + PI)} \right) \right] \exp \left(\frac{0.2011}{0.11 + 0.0077PI} \right). \quad (10)$$

Таким образом модуль жесткости битума $S_b(t, T)$ в данной модели можно вычислить, задав только два параметра битума — его индекс пенетрации PI и температуру размягчения T_{rb} .

Модуль жесткости асфальтобетонного композита, согласно [13], определяется так:

$$S_{mix} = P_c \left[E_{agg} \cdot (1 - VMA) + S_b \cdot VMA \cdot VFA \right] + \\ + (1 - P_c) \left[\frac{1 - VMA}{E_{agg}} + \frac{VMA}{S_b \cdot VFA} \right]^{-1}, \quad (11)$$

где E_{agg} и VMA — модуль упругости и пористость минерального наполнителя; VFA — доля межзерновых пор, заполненных битумом и P_c — контактный множитель, задающий баланс между последовательными и параллельными соединениями элементов асфальтобетонного композита:

$$P_c = \frac{\left(0.138 + S_b \frac{VFA}{VMA} \right)^{0.58}}{36.3 + \left(S_b \frac{VFA}{VMA} \right)^{0.58}}. \quad (12)$$

Для вычисления S_{mix} требуется найти S_b по формуле (6) и задать 3 параметра E_{agg} , VMA и VFA .

Выбирая за основу конструкцию дорожной одежды М-11 (табл. 1), слои которой имеют в составе битум БНД 60/90, примем следующие параметры:

Таблица 3 / Table 3

Параметры асфальтобетонных слоев, принятые для расчета

Asphalt concrete layers parameters adopted for calculation

Материал Material	Индекс пенетрации PI Penetration index PI	Температура размягчения T_{rb} , °C Softening point T_{rb} , °C	Модуль упругости минерального наполнителя E_{agg} , МПа Elasticity modulus of of mineral filler E_{agg} , MPa	Пористость минерального наполнителя VMA Porosity of mineral filler VMA	Доля межзерновых пор, заполненных битумом VFA Share of pinhole rating filled with bitumen VFA
Новый плотный а/б (слой 1) New dense asphalt concrete (layer 1)	-0,5	47	$30 \cdot 10^3$	0,14	0,75
Старый плотный а/б (слой 2) Old dense asphalt concrete (layer 2)	-0,73	56		0,14	0,75
Старый пористый а/б (слой 3) Old porous asphalt concrete (layer 3)	-0,73	56		0,18	0,6

Разработано авторами / Developed by the authors

При выборе параметров PI и T_{rb} для старого асфальтобетона было учтено, что за 5–7 лет эксплуатации пенетрация битума (выраженная в мм погружения иглы) достигает 0,3–0,4 от первоначального значения, а температура размягчения повышается примерно в 1,2 раза [14].

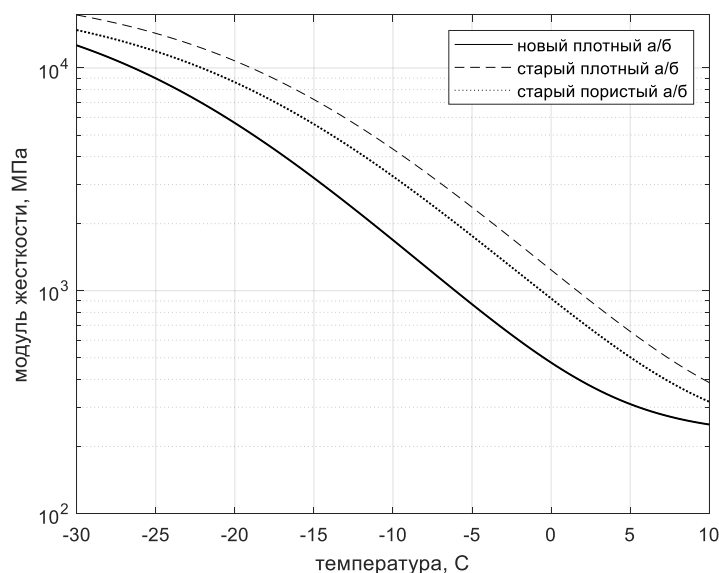


Рисунок 7. Зависимости модуля жесткости асфальтобетона от температуры при длительности нагружения $t = 1\,800$ с (разработано авторами)

Figure 7. Dependences of asphalt concrete rigidity modulus on temperature at loading duration $t = 1\,800$ s. (developed by the authors)

Структурные параметры VMA и VFA соответствуют усредненным показателям дорожных асфальтобетонных смесей и обеспечивают объемное содержание воздушных пор 3,5 % для плотного асфальтобетона и 7,2 % для пористого, что соответствует условиям п. 6.2.3 ОДМ 218.3.096-2017 «Методические рекомендации по объемному проектированию асфальтобетонных смесей по методологии Маршалла». Зависимости модуля жесткости S_{mix} от температуры при длительности нагружения 1 800 с., вычисленные в соответствии с параметрами в таблице 3, показаны на рисунке 7. Интересно отметить, что в процессе эксплуатационного старения модуль жесткости плотного асфальтобетона при умеренных отрицательных температурах (от -15°C до 0°C) возрастает более чем в 2,5 раза.

Основная расчетная модель. Для вычисления температурных напряжений, возникающих в рассматриваемой модели дорожной одежды, использовался метод конечных элементов в 2D постановке. В силу симметричности, для разбиения треугольной сеткой выбиралась правая половина одного сегмента (между вертикальными пунктирами А и В на рисунке 3). Влиянием температурных расширений/сжатий щебеночно-песчаной смеси, песка и грунтового основания, имеющими много меньшие жесткостные параметры в сравнении с асфальтобетоном, было решено пренебречь. Таким образом, непосредственно моделировались напряжения в «пироге», состоящем из нового асфальтобетона, слоя армирования и двух слоев старого асфальтобетона (рис. 8).

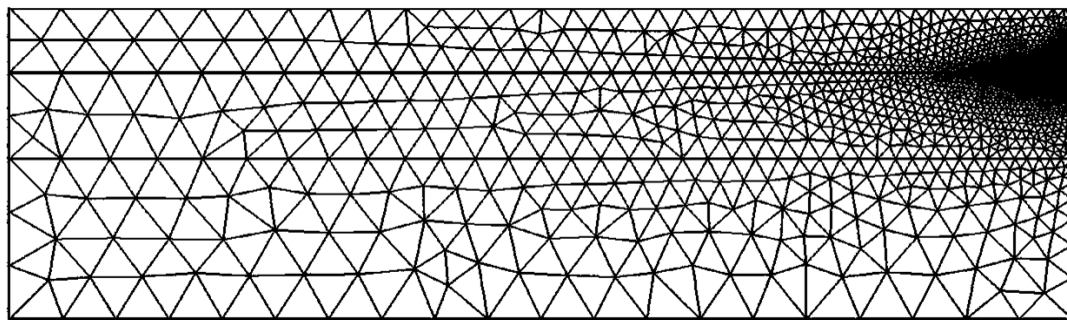


Рисунок 8. Треугольная расчетная сетка
метода конечных элементов (разработано авторами)

Figure 8. Finite element method triangular computational grid (developed by the authors)

Армирование геосинтетическим материалом на основе стекловолокна прочностью на растяжение 120 кН/м представляется тонким однородным слоем толщиной 1 мм с приведенным модулем упругости слоя $8 \cdot 10^3$ МПа. Оси координат имеют стандартные направления: Ох горизонтально вправо, Оу вертикально вверх, с началом в левом верхнем углу рассматриваемой половины сегмента длиной 1 м и высотой 0,291 м; на левой границе всех слоев ($x = 0$, $-0.291 \leq y \leq 0$) и правой границе двух верхних слоев ($x = 1$, $-0.061 \leq y \leq 0$) задаются нулевые

горизонтальные перемещения $u_x = 0$, на нижней границе ($0 \leq x \leq 1$, $y = -0.291$) — нулевые вертикальные перемещения $u_y = 0$, остальные границы остаются свободными. Распределение по высоте сечения температур $T(t, y)$, которое задает распределение модулей жесткости $S(t, y)$, определяется из решения уравнения теплопроводности (1) для заданной суперпозиции сезонной и суточной температур на верхней поверхности сегмента $y = 0$; боковые поверхности сегмента считаются теплоизолированными. Для нивелирования концентрации напряжений в окрестности вершины основной вертикальной трещины ($x = 1$, $y = -0.061$) введена область треугольной формы, имитирующая горизонтальную трещину на границе между слоем армирования и слоем старого асфальтобетона — модуль жесткости материала, заполняющего эту дополнительную трещину, линейно уменьшается до нуля при перемещении от вершины трещины к ее устью (рис. 9). Допущение о существовании дополнительной трещины соответствует экспериментальным данным [2; 3].

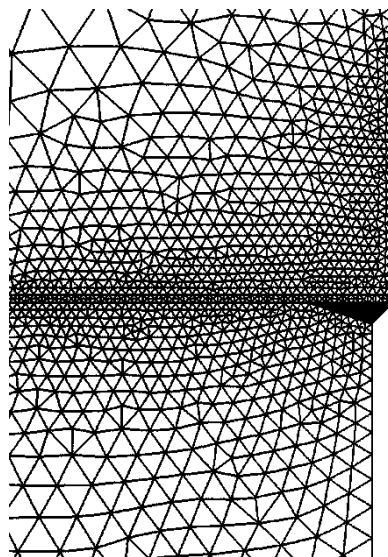


Рисунок 9. Сгущение треугольной сетки в окрестности вершины вертикальной трещины. Темным цветом выделен треугольник дополнительной трещины (разработано авторами)

Figure 9. Triangular grid condensation in the vicinity of the vertical crack apex. The triangle of the additional crack is highlighted in dark color (developed by the authors)

Для оценки влияния армирования на напряженное состояние конструкции, в слое нового асфальта вблизи вершины основной трещины выделялся горизонтальный отрезок $0.95 \leq x \leq 1$ (расчетный отрезок), расположенный на расстоянии 2,5 мм от нижней границы этого слоя. В точках расчетного отрезка вычислялось напряжение σ_x , ответственное за возникновение поперечных трещин в асфальтобетоне, для двух случаев — наличия и отсутствия слоя армирования.

3. Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния

3. Stress-strain state modeling results

На рисунке 10 показаны суточные изменения $\max \sigma_x$ на расчетном отрезке для декабря — марта, при выборе «-» в формуле (5).

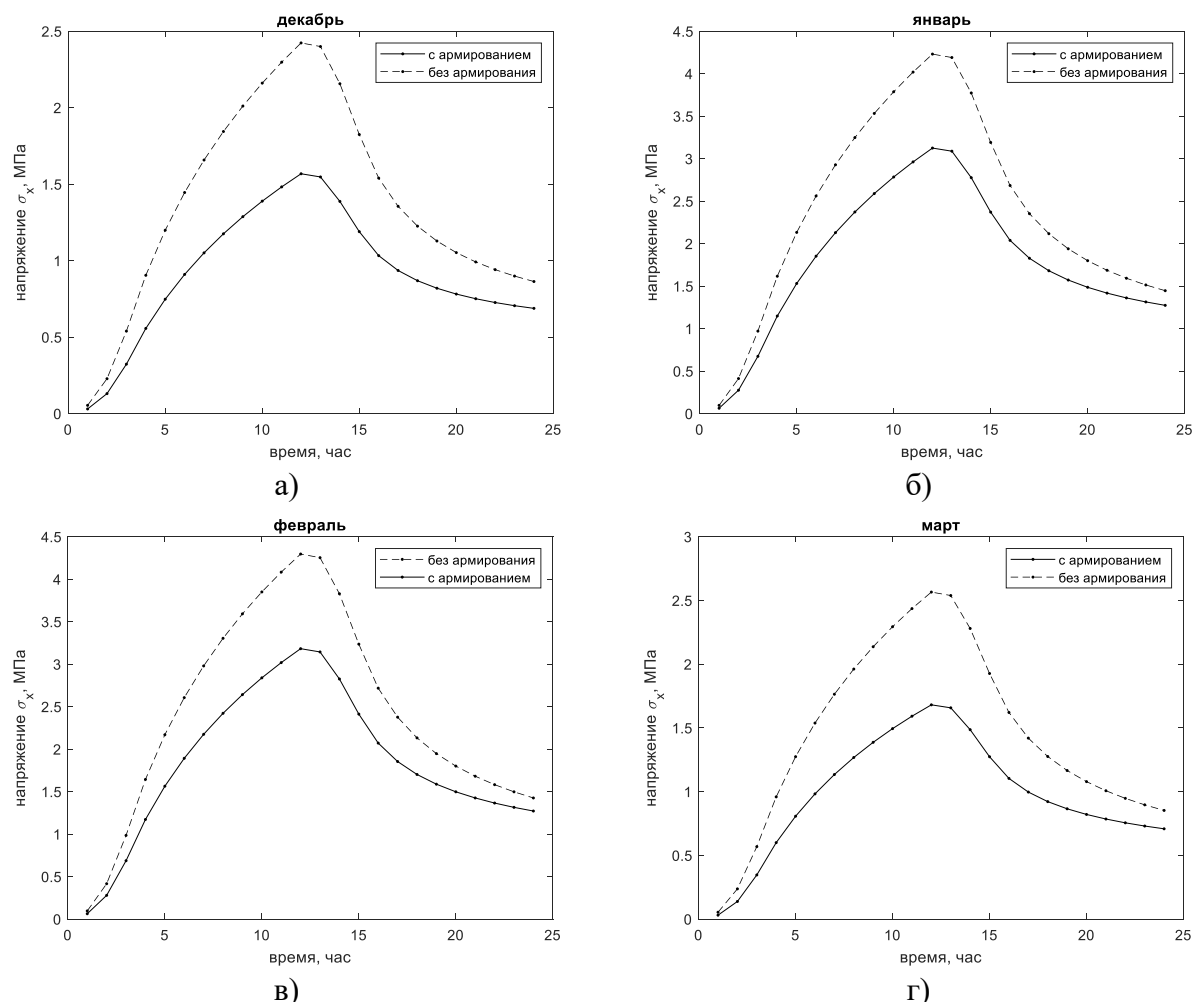


Рисунок 10. Суточные изменения $\max \sigma_x$ (разработано авторами)

Figure 10. Diurnal variations $\max \sigma_x$ (developed by the authors)

Характер кривых схож и показывает, что максимальное напряжение достигается в конце фазы постоянного отрицательного приращения температуры, перед началом возвращения температуры к среднесезонным значениям. Применение армирования позволяет существенно снизить растягивающие напряжения в новом слое асфальтобетона — от 25 % до 35 %. В январе-феврале максимум напряжений достигает 4,3 МПа, что приближается к средней прочности асфальтобетона при $T < -10^\circ\text{C}$, равной 5 МПа [13].

Локальные вариации прочности вместе с воздействием дополнительной нагрузки от транспортных средств могут привести к прорастанию трещины старого асфальтобетонного слоя в новый слой. В армированном слое максимум напряжений существенно ниже и вероятность продолжения роста трещины снижается. Напряжения в стекловолокне при этом не превосходят 130 МПа и остаются много меньшими предельной прочности на разрыв (около 900 МПа). Таким образом, малая деформативная способность асфальтобетона при низкой температуре не позволяет в полной мере использовать высокие прочностные качества армирующего материала.

На рисунке 11 показано распределение напряжения σ_x по расчетному отрезку (горизонтальная координата — смещение влево от вершины трещины). Армирование геосинтетическим материалом значительно уменьшает уровень напряжений в окрестности ± 1 см от вершины трещины.

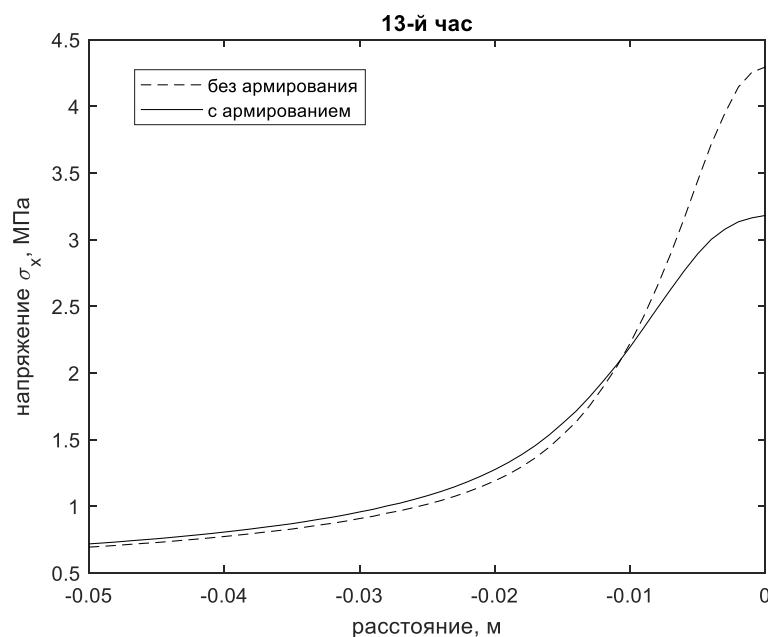


Рисунок 11. Распределение растягивающих напряжений в окрестности вершины трещины к началу 13-го часа изменения суточной температуры в феврале (разработано авторами)

Figure 11. Tensile stresses distribution in the vicinity of the crack tip by the beginning of the 13th hour of daily temperature change in February (developed by the authors)

На рисунке 12 для того же 13-го часа показано распределение температуры и модуля жесткости по толщине дорожной одежды. Как указывалось выше, старение битума в составе асфальтобетона приводит к росту модуля жесткости последнего, что учитывается при моделировании (рис. 12 б).

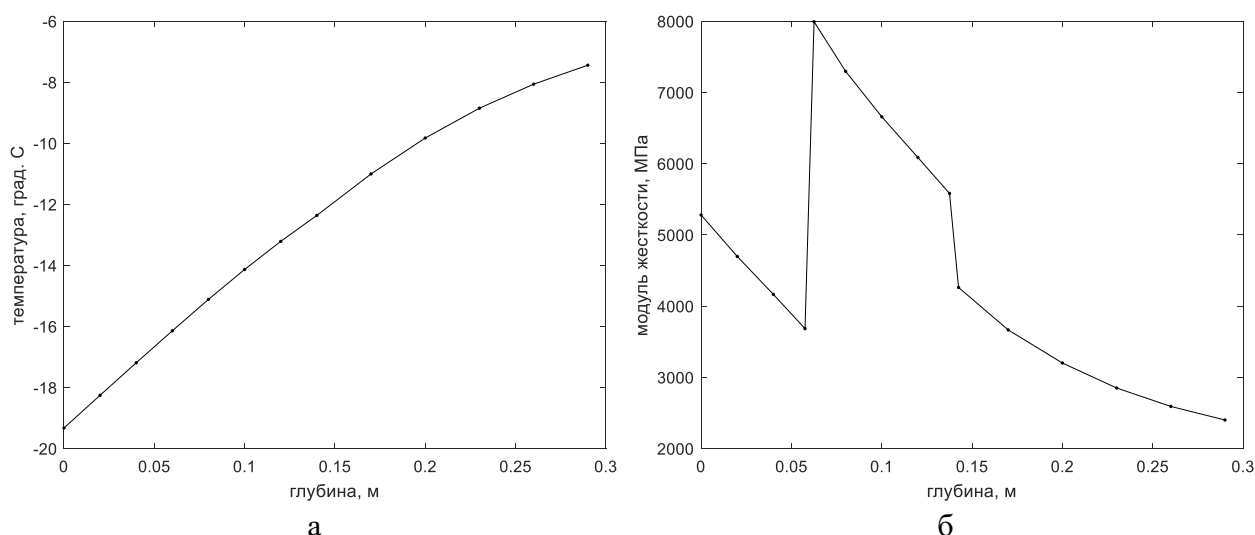


Рисунок 12. Распределение (а) температуры и (б) модуля жесткости по толщине дорожной одежды (разработано авторами)

Figure 12. Distribution of (a) temperature and (b) rigidity modulus over the pavement thickness. (developed by the authors)

Обсуждение

Discussion

В соответствии с результатами расчета, наибольшие растягивающие температурные напряжения в новом слое асфальтобетона возникают в январе-феврале, что согласуется с выводами в работе [9]. Геосинтетический материал на основе стекловолокна прочностью 120 кН/м позволяет снизить опасные растягивающие напряжения в период с декабря по март на 25–35 %. Этот вывод вполне соотносится с результатами, приведенными в работе [6], когда применение углеродно-стеклянной георешетки с вдвое большей прочностью (250 кН/м) привело к снижению максимальных деформаций на 65 %. Таким образом, в первом приближении можно считать, что степень снижения максимальных растягивающих напряжений в окрестности трещины пропорциональна прочности используемого высокомодульного геосинтетического материала. Предложенный в работе подход к оценке уровня этих напряжений не противоречит известным результатам и может быть использован при анализе состояния дорожных одежд тех регионов нашей страны, в которых уровень отрицательных зимних температур и максимальных скоростей их изменения не отличается кардинально от Московского региона.

Асфальтобетон — сложный композитный материал, пространственное распределение механических свойств которого далеко от однородного. С учетом вариабельности его свойств, технология, нацеленная на

уменьшение опасных напряжений в асфальтобетоне, должна снижать эти напряжения **существенно**. Если в качестве условного порога существенного снижения принять 20 %, то можно сделать следующий вывод: армирование специальными геосинтетическими материалами перед укладкой нового асфальтобетонного покрытия является эффективным при борьбе с прорастанием трещин со стороны старого асфальтобетонного покрытия при условии использования материалов на основе высокомодульных, например, стеклянных или углеродных волокон, с прочностью на растяжение не ниже примерно 100 кН/м.

Следует учесть, что при проведении моделирования пренебрегалось технологическими повреждениями, которые могут возникнуть при укладке геосинтетического материала, а также отслаиванием материала от поверхностей асфальтобетона в процессе эксплуатации. В работе [15] приводятся фотографии образцов георешеток на основе полиэстера и стекловолокна, извлеченных из-под нового асфальтобетонного слоя сразу после монтажа. Решетка из полиэстера, способная к большим деформациям, в результате воздействия тяжелой колесной техники и асфальтовых катков потеряла только 30 % первоначальной прочности, в то время как решетка на основе малодеформируемого стекловолокна оказалась почти полностью разрушенной — потери прочности достигали 90 %. Оценка влияния свойств геосинтетического материала, таких как модуль упругости, предельная деформация и прочность на растяжение, на уровень его повреждаемости в процессе монтажа, является отдельной задачей, не входящей в рамки данного исследования. Поэтому указанная выше оценка прочности 100 кН/м должна рассматриваться как среднее остаточное значение после завершения работ по монтажу асфальтобетонного покрытия.

Для надежной оценки напряженно-деформированного состояния слоев дорожной одежды требуется построение адекватной температурной модели, принимающей во внимание сезонные и суточные изменения температуры для той местности, в которой находится автомобильная дорога.

Предложенный расчетный алгоритм учитывает в первом приближении вязкоупругие свойства асфальтобетона, а именно, зависимость его модуля жесткости от температуры и времени приложения нагрузки. Вычисление напряжений по упрощенному методу Хиллса и Брайена не позволяет учесть эффект релаксации напряжений, однако, влиянием этого эффекта можно пренебречь при низкой температуре при условии ограничения расчетного времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Леонович, И.И.** Вестник Белорусского национального технического университета / И.И. Леонович, И.С. Мельникова // Вестник Белорусского национального технического университета. — 2011. — № 6. — С. 49–53. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25964697>. — EDN VWEVDX. (дата обращения: 03.12.2023).
2. **Sobhan, K.** Effects of geosynthetic reinforcement on the propagation of reflection cracking and accumulation of permanent deformation in asphalt overlays / K. Sobhan, M. Genduso, V. Tandon // Third LACCEI International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI 2005), Advances in Engineering and Technology / Картахена: LACCEI, 2005. — URL: https://www.laccei.org/LACCEI2005-Cartagena/Papers/EM045_Sobhan.pdf. (дата обращения: 25.11.2023).
3. **Leiva-Padilla, P.** Reflective Cracking in Asphalt Overlays Reinforced with Geotextiles / P. Leiva-Padilla, L. Loria-Salazar, J. Aguiar-Moya, F. Leiva-Villacorta. — DOI https://doi.org/10.1007/978-94-024-0867-6_31 // 8th RILEM International Conference on Mechanisms of Cracking and Debonding in Pavements. RILEM Bookseries, vol 13 / Под ред.: A. Chabot, W. Buttlar, E. Dave, C. Petit, G. Tebaldi Дордрехт: Springer, 2016. — С. 219–226. — URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-024-0867-6_31. (дата обращения: 25.11.2023).
4. **Khodaii, A.** The effects of geogrid on reduction of reflection cracking in asphalt overlay / A. Khodaii, S. Fallah, F. Moghadas Nejad. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2008.05.007> // Geotextiles and Geomembranes. — 2009. — Т 27. — № 1. — С. 1–8. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266114408000381>. (дата обращения: 25.11.2023).
5. **Solatiyan, E.** Evaluation of Crack Development Through a Bituminous Interface Reinforced With Geosynthetic Materials by Using a Novel Approach / E. Solatiyan, V. T. Ho, N. Bueche, M. Vaillancourt, A. Carter. — DOI <https://doi.org/10.1177/03611981231166002> // Transportation Research Record. — 2023. — Т 2677. — № 11. — С. 446–457. — URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/03611981231166002>. (дата обращения: 25.11.2023).
6. **Graziani, A.** Structural response of grid-reinforced bituminous pavements / A. Graziani, E. Pasquini, G. Ferrotti, A. Virgili, F. Canestrari. — DOI <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0255-1> // Materials and Structures. — 2014. — Т 47. — С. 1391–1408. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-014-0255-1>. (дата обращения: 25.11.2023).
7. **Dhakar, N.** Mitigation strategies for reflection cracking in rehabilitated pavements — A synthesis / N. Dhakar, M.A. Elseifi, Z. Zhang. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.05.001> // International Journal of Pavement Research and Technology. — 2016. — Т 9. — № 3. — С. 228–239. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1996681416300153>. (дата обращения: 25.11.2023).
8. **Correia, N. S.** Finite-Element Evaluations of Geogrid-Reinforced Asphalt Overlays over Flexible Pavements / N.S. Correia, E.R. Esquivel, J.G. Zornberg. — DOI <https://doi.org/10.1061/JPEODX.0000043> // Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements. — 2018. — Т 144. — № 2. — С. 4018020. — URL: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/JPEODX.0000043>. (дата обращения: 25.11.2023).
9. **Minhoto, M.J.C.** The Temperature Effect on the Reflective Cracking of Asphalt Overlays / M.J.C. Minhoto, J.C. Pais, P.A.A. Pereira. — DOI <https://doi.org/10.1080/14680629.2008.9690141> // Road Materials and Pavement Design. — 2008. — Т 9. — № 4. — С. 615–632. — URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14680629.2008.9690141>. (дата обращения: 25.11.2023).
10. **Завьялов, М.А.** Теплостойкость асфальтобетона / М.А. Завьялов, А.М. Завьялов // Строительные материалы. — 2009. — № 7. — С. 6–9. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12830630>. — EDN KUUCFR. (дата обращения: 25.11.2023).
11. **Hills, J.F.** The fracture of bitumens and asphalt mixes by temperature induced stresses / J.F. Hills, D. Brien // Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists. — 1966. — Т 35. — С. 292–309.
12. **Pszczola, M.** Evaluation of Thermal Stresses in Asphalt Layers Incomparison with TSRST Test Results / M. Pszczola, J. Judycki. — DOI https://doi.org/10.1007/978-94-007-4566-7_5 // 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements. RILEM Bookseries, vol 4 / Под ред.: Scarpas A., Kringos N., Al-Qadi I. Дордрехт: Springer, 2012. — С. 41–49. — URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-4566-7_5. (дата обращения: 25.11.2023).

13. **Teltayev, B.** Predicting thermal cracking of asphalt pavements from bitumen and mix properties / B. Teltayev, B. Radovskiy. — DOI <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1350598> // Road Materials and Pavement Design. — 2018. — Т 19. — № 8. — С. 1832–1847. — URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14680629.2017.1350598>. (дата обращения: 25.11.2023).
14. **Радовский, Б.С.** Вязкоупругие характеристики битума и их оценка по стандартным показателям / Б.С. Радовский, Б.Б. Телтаев. — Алматы: «Білім» баспасы, 2013. — 152 с.
15. **Leite-Gembus, F.** Theory and practical experiences in pavement rehabilitation using asphalt reinforcement grids / F. Leite-Gembus, D. Hilpert, M. Bakrac // Theory and Practical Experiences in Pavement Rehabilitation Using Asphalt Reinforcement Grids. — 2016. — URL: https://www.huesker.fr/fileadmin/media/Scientific_Revised_Paper/P778_Theory_and_practical_experiences_in_pavement_rehabilitation_using_Ashphalt_Reinforcement_Grids.pdf. (дата обращения: 25.11.2023).

Сведения об авторах:

Медведев Дмитрий Викторович — первый заместитель генерального директора, АНО «Научно-исследовательский институт транспортно-строительного комплекса», Москва, Россия, e-mail: medvedev@niitsk.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1208829

Симчук Евгений Николаевич — кандидат экономических наук, генеральный директор, АНО «Научно-исследовательский институт транспортно-строительного комплекса», Москва, Россия, e-mail: simchuk@niitsk.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1206910

Бочкарев Андрей Владимирович — доктор физико-математических наук, доцент, профессор, ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», Саратов, Россия, e-mail: ab2009sar@list.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=10662
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57192391330>

Статья получена: 03.12.2023. Принята к публикации: 27.02.2024. Опубликовано онлайн: 12.03.2024.

REFERENCES

1. Leonovich I.I., Melnikova I.S. Cracks in Roadway Covering: Methods for Improvemenmt of Crack Resistance. *Vestnik BNTU*. 2011; (6): 49–53. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25964697> (accessed 03rd December 2023). (In Russ.).
2. Sobhan K., Genduso M., Tandon V. Effects of geosynthetic reinforcement on the propagation of reflection cracking and accumulation of permanent deformation in asphalt overlays. In: *Third LACCEI International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI 2005), Advances in Engineering and Technology*. Cartagena, Columbia: LACCEI; 2005. Available at: https://www.laccei.org/LACCEI2005-Cartagena/Papers/EM045_Sobhan.pdf (accessed 25th November 2023). (In Eng.).
3. Leiva-Padilla P., Loria-Salazar L., Aguiar-Moya J., Leiva-Villacorta F. Reflective Cracking in Asphalt Overlays Reinforced with Geotextiles. In: Chabot, A., Buttlar, W., Dave, E., Petit, C., Tebaldi, G. (eds). *8th RILEM International Conference on Mechanisms of Cracking and Debonding in Pavements. RILEM Bookseries, vol 13*. Dordrecht: Springer; 2016. p. 219–226. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-024-0867-6_31 (accessed 25th November 2023). (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-024-0867-6_31.
4. Khodaii A., Fallah S., Moghadas Nejad F. The effects of geogrid on reduction of reflection cracking in asphalt overlay. *Geotextiles and Geomembranes*. 2009; 27(1): 1–8. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2008.05.007>.
5. Solatiyan E., Ho V.T., Bueche N., Vaillancourt M., Carter A. Evaluation of Crack Development Through a Bituminous Interface Reinforced with Geosynthetic Materials by Using a Novel Approach. *Transportation Research Record*. 2023; 2677(11): 446–457. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1177/03611981231166002>.

6. Graziani A., Pasquini E., Ferrotti G., Virgili A., Canestrari F. Structural response of grid-reinforced bituminous pavements. *Materials and Structures*. 2014; 47: 1391–1408. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0255-1>.
7. Dhakal N., Elseifi M.A., Zhang Z. Mitigation strategies for reflection cracking in rehabilitated pavements — A synthesis. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2016; 9(3): 228–239. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.05.001>.
8. Correia N.S., Esquivel E.R., Zornberg J.G. Finite-Element Evaluations of Geogrid-Reinforced Asphalt Overlays over Flexible Pavements. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*. 2018; 144(2): 4018020. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1061/JPEODX.0000043>.
9. Minhoto M.J.C., Pais J.C., Pereira P.A.A. The Temperature Effect on the Reflective Cracking of Asphalt Overlays. *Road Materials and Pavement Design*. 2008; 9(4): 615–632. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2008.9690141>.
10. Zav'yalov M.A., Zav'yalov A.M. [Heat capacity of asphalt concrete]. *Construction Materials*. 2009; (7): 6–9. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12830630> (accessed 25th November 2023). (In Russ., abstract in Eng.).
11. Hills J.F., Brien D. The fracture of bitumens and asphalt mixes by temperature induced stresses. *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*. 1966; 35: 292–309. (In Eng.).
12. Pszczoła M., Judycki J. Evaluation of Thermal Stresses in Asphalt Layers Incomparision with TSRST Test Results. In: Scarpas, A., Kringos, N., Al-Qadi, I. (eds). *7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements*. RILEM Bookseries, vol 4. Dordrecht: Springer; 2012. p. 41–49. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-4566-7_5 (accessed 25th November 2023). (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-4566-7_5.
13. Teltayev B., Radovskiy B. Predicting thermal cracking of asphalt pavements from bitumen and mix properties. *Road Materials and Pavement Design*. 2018; 19(8): 1832–1847. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1350598>.
14. Radovskiy B.S., Teltayev B.B. Vyazkouprugiye kharakteristiki bituma i ikh otsenka po standartnym pokazatelyam [Viscoelastic characteristics of bitumen and their assessment using standard indicators]. Almaty: «Bilim» baspasy; 2013. (In Russ.).
15. Leite-Gembus F., Hilpert D., Bakrac M. Theory and practical experiences in pavement rehabilitation using asphalt reinforcement grids. *Theory and Practical Experiences in Pavement Rehabilitation Using Asphalt Reinforcement Grids*. 2016. Available at: https://www.huesker.fr/fileadmin/media/Scientific_Revised_Paper/P778_Theory_and_practical_experiences_in_pavement_rehabilitation_using_Asphalt_Reinforcement_Grids.pdf (accessed 25th November 2023). (In Eng.).

Information about the authors:

Dmitriy V. Medvedev — ANO «Research Institute of Transport and Construction Complex», Moscow, Russia, e-mail: medvedev@niitsk.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1208829

Evgeniy N. Simchuk — ANO «Research Institute of Transport and Construction Complex», Moscow, Russia, e-mail: simchuk@niitsk.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1206910

Andrey V. Bochkarev — Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia, e-mail: ab2009sar@list.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=10662
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57192391330>

Submitted: 3rd December 2023. Revised: 27th February 2024. Published online: 12th March 2024.