

УДК 625.711:539.37

О. И. ЦЫГАНOK, И. Е. КРАКОВА, А. О. ШИМАНОВСКИЙ

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

ДЕФОРМИРОВАНИЕ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ ПРИ РАЗНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ ЕЕ ПОВЕРХНОСТИ

Исследуется напряженно-деформированное состояние слоев дорожного покрытия под действием нагрузки от проезжающих автомобилей с учетом изменения температуры по высоте. Решение получено путем конечноэлементного моделирования в среде программного комплекса ANSYS с использованием элемента, реализующего расчет механики связанных полей. Показано, что значительное изменение температуры поверхности дорожной одежды в течение короткого промежутка времени может стать причиной образования повреждений в ее слоях.

Ключевые слова: дорожное покрытие, асфальтобетон, конечно-элементное моделирование, напряженно-деформированное состояние.

Большие потоки автотранспорта различной тоннажности приводят к накоплению остаточных деформаций в различных слоях дорожной одежды, которые впоследствии становятся причиной ее повреждения. Кроме циклических нагрузок значительное влияние на прочность автодорог оказывают также климатические условия. Сезонные и кратковременные изменения температуры воздуха ведут к появлению градиента температур в слоях дорожного покрытия, что является причиной изменения его напряженно-деформированного состояния [1, 2]. В связи с этим существует необходимость учета распределения температуры по высоте при анализе напряжений и деформаций в слоях дорожной одежды.

В настоящее время выполнено значительное количество экспериментальных исследований, связанных с анализом распределения температур по высоте дорожного покрытия. Результаты измерения температуры и влажности верхнего слоя дорожного покрытия на острове Бали (Индонезия) представлены в работе [3]. Эксперименты по определению влажности, температуры, а также напряжений и деформаций для экспериментального участка дороги в Литве описаны в статье [4]. В публикации [5] представлен анализ влияния температуры окружающей среды в летний период на двухслойное асфальтобетонное дорожное покрытие с учетом транспортной нагрузки.

В статье [6] содержится обзор исследований по определению температур в дорожном покрытии, проанализированы различные эмпирические модели и аналитические зависимости, позволяющие устанавливать картину распределения температур при разных физико-механических и геометрических параметрах дорог и условиях окружающей среды.

Упрощенная модель для описания термовязкоупругого деформирования дорожного покрытия при действии на него подвижной нагрузки со стороны шин предложена в работе [7]. Закономерности распределения температуры, напряжений и деформаций в земляном полотне и слоях дорожной одежды автодороги, расположенной в северной части Казахстана, в течение разных периодов года рассмотрены в статье [8]. При расчетах использована математическая модель упругого многослойного полупространства. В работе [9] авторами разработаны математические модели, описывающие распределение температур и фильтрации жидкости в грунте, что позволило проанализировать влияние температуры и влажности грунта и дорожного покрытия на процесс его промерзания.

На данный момент существует значительное число работ, выполненных учеными разных стран, в которых изучается напряженно-деформируемое состояние покрытия дорог и образование дефектов в дорожном покрытии, однако принимается, что температура во всех его слоях одинакова [10, 11].

В работах [12–14] представлены результаты вычислений допустимых градиентов температур, при которых не образуются микротрещины на поверхности цементобетонного дорожного покрытия. В разработанных математических моделях использован критерий прочности, который характеризует процесс образования и развития микротрещин в бетоне. Однако здесь не учитывалось действие нагрузок от проезжающего автомобиля.

Целью данной работы является установление влияния распределения температур в дорожном покрытии на напряженно-деформированное состояние дорог с интенсивностью движения от 2 000 до 5 000 автомобилей в сутки.

Рассматривается участок дороги, схема которой представлена на рисунке 1. Предполагается, что дорожная одежда включает четыре слоя, которые сформированы из разных материалов. Их физико-механические и геометрические

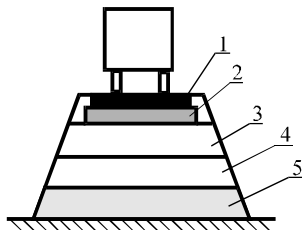


Рисунок 1 – Расчетная модель дорожного покрытия:

- 1 – плотный асфальтобетон;
- 2 – пористый асфальтобетон;
- 3 – высокопористый асфальтобетон;
- 4 – гравийная смесь; 5 – супесь пылеватая

характеристики, соответствующие рекомендациям [15], приведены в таблице 1. Как показали исследования, для получения требуемой точности результатов толщина основания (слой 5) в рассматриваемом случае должна быть не менее 70 см.

При расчетах дорожных покрытий, как правило, предполагается, что давление от шины на участок дороги равномерно распределяется по круговой площадке. При движении автомобиля на дорогу одновременно оказывают воздействие несколько шин. Наиболее неблагоприятным является случай, при котором рядом двигаются два

автомобиля, что соответствует периодичности приложения нагрузок по длине и ширине дорожного полотна [16]. Поэтому в качестве расчетной области выделен структурный элемент, содержащий участок, который включает $\frac{1}{4}$ области приложения нагрузки. Он представляет собой параллелепипед, включающий несколько слоев дорожного покрытия с различными физико-механическими характеристиками (рисунок 2).

Таблица 1 – Характеристики слоев дорожной одежды

Но- мер слоя	Толщина слоя, см	Физико-механические характеристики					
		Плотность, кг/м ³	Модуль упругости, МПа	Кэффи- циент Пуассона	Кэффициент температурного расширения, 1/°С	Удельная теплоемкость, кДж/кг·К	Тепло- проводность, Вт/м·К
1	4	2300	3200	0,3	10^{-5}	1,65	1,4
2	4	2300	2000	0,25	10^{-5}	1,65	1,25
3	14	2000	2000	0,25	10^{-5}	1,65	1
4	48	1700	205	0,15	10^{-5}	1,00	0,64
5	–	1600	46	0,35	$1,18 \cdot 10^{-5}$	1,10	0,62

Конечноэлементная модель выделенного структурного элемента дорожного полотна создавалась в программном комплексе ANSYS. Для проведения связанного статического и температурного анализа слой дорожной одежды моделировался 20-узловым Brick-элементом SOLID226, который позволяет учесть особенности мультифизического анализа. Конечноэлементная сетка создавалась в полуавтоматическом режиме, при этом число конечных элементов модели составило около 7000.

В качестве нагрузки к четверти круга на поверхности модели, радиус которого принимался равным 17 см, прикладывалось равномерно распределенное давление 600 кПа, соответствующее действию шины. В качестве граничных условий применены наложение

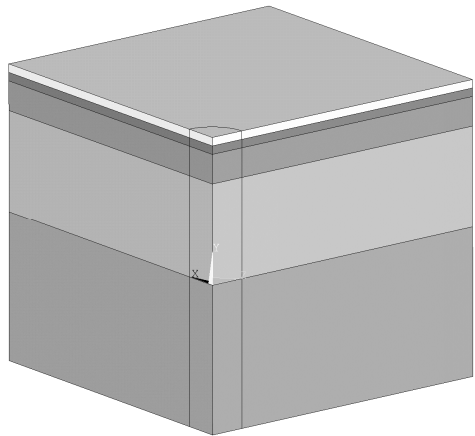


Рисунок 2 – Структурный элемент дорожного покрытия

условий симметрии на все боковые поверхности параллелепипеда и запрет перемещений по вертикали для нижней поверхности нижнего слоя. Также для поверхности слоя 1 задавались различные значения относительных температур $T_{\text{н}}$ из диапазона от -20 до $+50$ °С по отношению к неизменяемой температуре нижней поверхности слоя 5, которая принималась равной 0 °С.

В ходе выполнения расчетов получены значения температур, напряжений и деформаций в слоях дорожного покрытия.

На рисунке 3 представлены графики, демонстрирующие изменение температур по высоте дороги при разных температурах ее поверхности. Их сравнение с экспериментальными зависимостями, представленными в работе [8], показывает достаточно хорошее соответствие. Из приведенных графиков видно, что наибольший градиент температуры по высоте дорожной одежды имеет место в верхних наиболее плотных и жестких ее слоях.

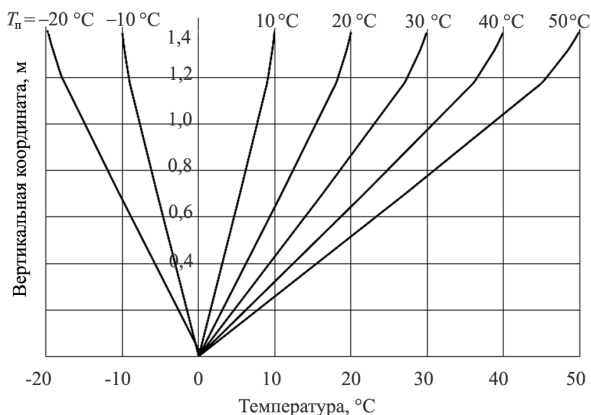


Рисунок 3 – Изменение температур по высоте дорожного покрытия при разных температурах T_n поверхности

На рисунке 4 представлены схемы распределения деформаций по поперечному сечению дороги вблизи места приложения нагрузки. При одинаковой температуре под действием силы давления шины все точки дорожного покрытия смещаются вниз, как это показано на рисунке 4, *а*. При больших значениях отрицательных температур поверхности материалы слоев сжимаются, а в области контакта наблюдаются максимальные смещения (рисунок 4, *б*). В случае нагрева дорожного покрытия вследствие температурного расширения его толщина увеличивается (рисунок 4, *в*). Приложение нагрузки от веса шины ведет к уменьшению деформаций, вызванных нагревом, причем полное перемещение четырех верхних слоев дороги остается положительным, т. е. они не возвращаются в исходное положение.

Отметим, что разница между наибольшими и наименьшими смещениями точек модели в случае охлаждения увеличивается по сравнению со случаем без нагрева и при $T_n = -20$ °C отношение составляет 1,7 раза, при нагреве ($T_n = 50$ °C) – 1,4 раза. Полученные результаты косвенно свидетельствуют об увеличении неравномерности распределения напряжений по объему.

Сравнение схем распределения эквивалентных по Мизесу напряжений (рисунок 5) подтверждает вывод, представленный ранее при анализе деформаций. При одинаковой температуре слоев дороги напряжения в трех верхних слоях распределяются достаточно равномерно, то есть можно считать, что эти слои работают как трехслойная пластина на упругом основании (рисунок 5, а). При отрицательном значении температуры поверхности наибольшие напряжения концентрируются на границах первого и второго слоев, а также третьего и четвертого (рисунок 5, б), достигая значений порядка 1,1 МПа. По сравнению со случаем без нагрева значения напряжений увеличиваются в 2 раза. Значительные температурные напряжения ведут к появлению трещин.

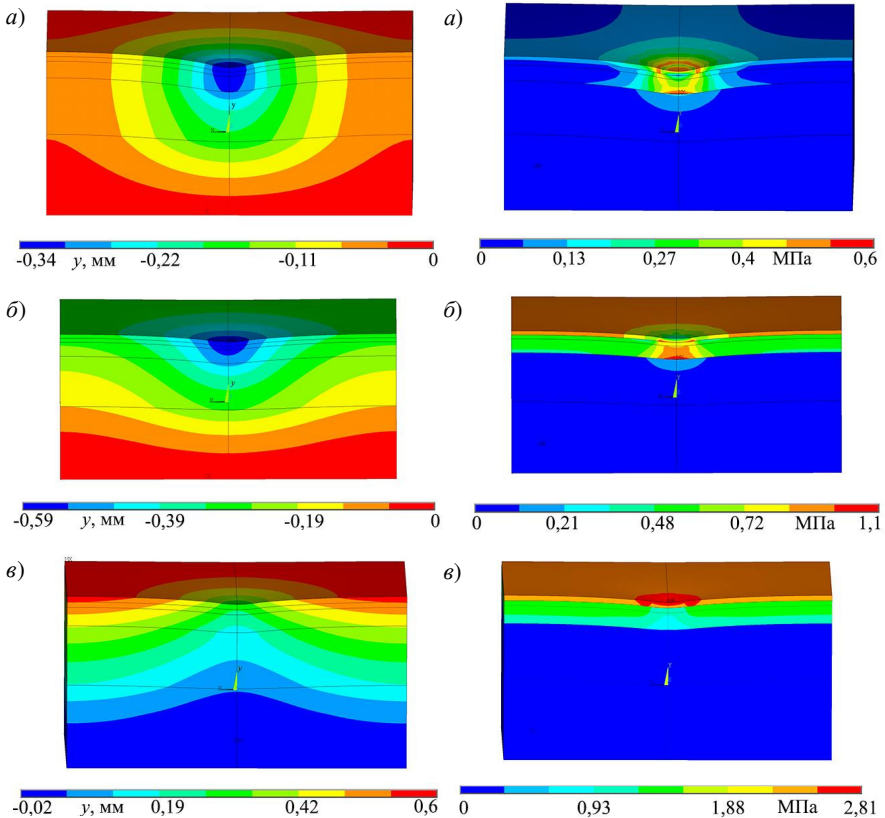


Рисунок 4 – Вертикальные перемещения точек дорожного покрытия:
 а – $T_n = 0^\circ\text{C}$; б – $T_n = -20^\circ\text{C}$; в – $T_n = +50^\circ\text{C}$

Рисунок 5 – Эквивалентные по Мизесу напряжения при температурах:
 а – $T_n = 0^\circ\text{C}$; б – $T_n = -20^\circ\text{C}$; в – $T_n = +50^\circ\text{C}$

В случае нагрева верхнего слоя дороги наибольшие напряжения концентрируются в верхнем слое дороги (рисунок 5, в). Максимальные значения напряжений увеличиваются в 4,7 раза по сравнению со случаем без нагрева (до 2,81 МПа). Это становится причиной образования колеи в местах проследования шин. Заметим, что в представленном расчете не учитывалось снижение жесткости асфальтобетона при увеличении температуры, которое наблюдается на практике. Следовательно, колея появляется на дороге не только вследствие изменения механических характеристик верхнего слоя дорожного покрытия, но и из-за перераспределения напряжений вследствие температурных деформаций.

На рисунках 6 и 7 показано, как изменяются перемещения и напряжения в слоях дорожного покрытия при изменении температуры нагрева его поверхности и учете силы давления шины автомобиля.

Представленные графики (см. рисунок 6) показывают, что наибольшие деформации наблюдаются в слоях 1 и 2 при температуре около 30 °С. В то же время при температурах, больших 20 °С, основание практически не деформируется. Однако наибольшие по модулю значения деформаций наблюдаются при снижении температуры воздуха.

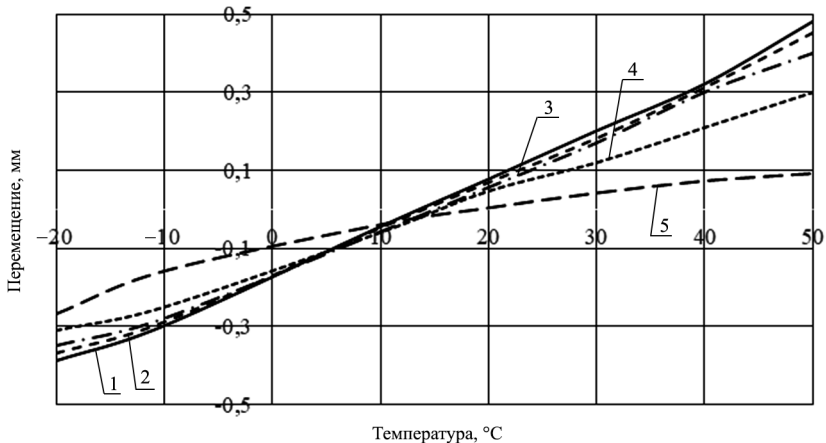


Рисунок 6 – Изменение максимальных перемещений точек слоев дороги под центром области контакта колеса с дорожным покрытием в зависимости от температуры поверхности дороги; цифра у линии соответствует номеру слоя

Графики изменения эквивалентных по Мизесу напряжений демонстрируют значительное увеличение их значений в материале слоя 1 как при повышении, так и при снижении температуры. В первом случае это может приводить к образованию колеи, а во втором – к растрескиванию дорожного покрытия.

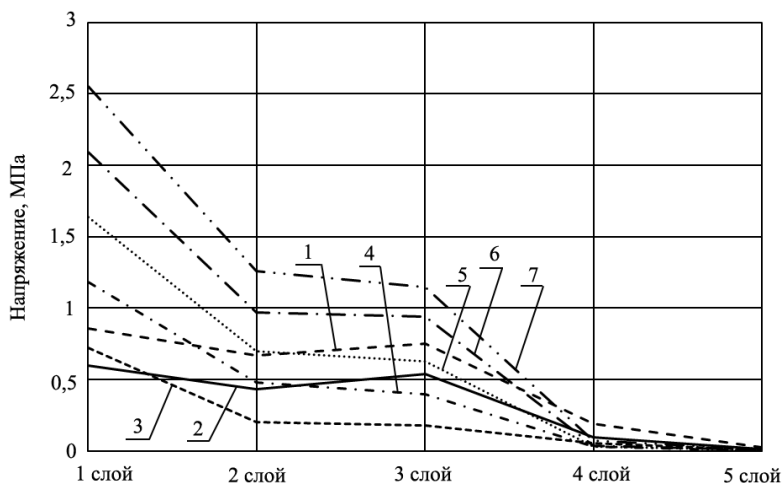


Рисунок 7 – Максимальные эквивалентные по Мизесу напряжения в слоях дорожной одежды при относительных температурах T_n поверхности ее верхнего слоя: 1 – $T_n = -20^\circ\text{C}$; 2 – $T_n = -10^\circ\text{C}$; 3 – $T_n = 10^\circ\text{C}$; 4 – $T_n = 20^\circ\text{C}$; 5 – $T_n = 30^\circ\text{C}$; 6 – $T_n = 40^\circ\text{C}$; 7 – $T_n = 50^\circ\text{C}$

Заключение. В работе рассмотрена методика конечноэлементного моделирования термоупругого деформирования дорожного покрытия с использованием элемента, в котором реализована возможность анализа связанных полей. Учет реального распределения температур в дорожном полотне позволил установить, что наличие градиента температуры ведет к существенному увеличению напряжений в верхнем слое асфальтобетонного покрытия. Данный факт является одной из причин образования колеи на дороге при высоких температурах воздуха и растрескиванию дорожного полотна при низких.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Бочкарев, Д. И. Оценка влияния эксплуатационных характеристик асфальтобетонного покрытия на безопасность дорожного движения / Д. И. Бочкарев, В. В. Петрусевич // Чрезвычайные ситуации: образование и наука. – 2015. – № 10 (1) – С. 40–44.
- 2 Ефремов, С. В. Влияние температуры на долговечность в агрессивных средах асфальтобетона с гранитным и известняковым щебнем / С. В. Ефремов // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2017. – Вып. 79. – С. 123–127.
- 3 Ariawan, I. M. A. Development of asphalt pavement temperature model for tropical climate conditions in West Bali region / I. M. A. Ariawan, B. S. Subagio, B. H. Setiadji // Procedia Engineering, 2015. – Vol. 125. – P. 474–480.
- 4 Monitoring the mechanical and structural behavior of the pavement structure using electronic sensors / D. Ćygas [et al.] // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. – 2015. – Vol. 30, is. 4. – P. 317–328.
- 5 Li, Y Temperature predictions for asphalt pavement with thick asphalt layer / Y. Li, L. Liu, L. Sun // Construction and Building Materials. – 2018. – Vol. 160. – P. 802–809.

6 Asphalt pavement temperature prediction models: A review / I. Adwan [et al.] // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11, is. 9. – Article 3794. – 19 p.

7 Effect of temperature on asphalt pavement strain responses: APT data and thermo-viscoelastic pavement modelling / F. Homsî [et al.] // Proceedings of 17th AAPA International Flexible Pavements Conference. – Melbourne, 2017. – 12 p.

8 **Teltayev, B. B.** Distribution of temperature, moisture, stress and strain in the highway // B. B. Teltayev, J. Liu, E. A. Suppes // Magazine of Civil Engineering. – 2018. – Vol. 83, is. 7. – P. 102–113.

9 **Апталаев, М. Н.** Влияние водно-теплого режима основания автомобильной дороги на состояние дорожной одежды / М. Н. Апталаев, М. Е. Жалко // Транспортные сооружения. – 2016. – Т. 3, № 4. – 12 с.

10 **Афиногенов, А. О.** Анализ напряженно-деформированного состояния массива грунта земляного полотна автомобильных дорог / А. О. Афиногенов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2008. – № 3. – С. 109–111.

11 **Yastremskiy, D. A.** Numerical simulation of stress-strain state of road covering of the SMA with the use of stabilizing additives «Armide» / D. A. Yastremskiy, P. V. Chepur, T. N. Abaydullina // Fundamental Research. – 2016. – Vol. 7, is. 2. – P. 277–281.

12 **Пшембаев, М. К.** Анализ напряженного состояния поверхностного слоя дорожных бетонных покрытий при температурном воздействии / М. К. Пшембаев, Я. Н. Ковалев, Л. И. Шевчук // Наука и техника. – 2017. – Т. 16, № 4. – С. 282–288.

13 **Teltayev, B.** Modeling of temperature field in flexible pavement / B. Teltayev, K. Aitbayev // Indian Geotechnical Journal. – 2015. – Vol. 45, is. 4. – P. 371–377.

14 **Веренько, В. А.** Влияние параметров транспортной нагрузки на развитие деформаций дорожных покрытий / В. А. Веренько, В. В. Занкович, А. А. Макаревич // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2006. – Вып. 34–35. – С. 102–110.

15 Теплопроводность строительных материалов, их плотность и теплоемкость [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/strojmateriialy/teploprovodnost-stroitelnyh-materialov-ih-plotnost-i-teploemkost>. – Дата доступа : 10.08.2022.

16 Компьютерное моделирование деформирования слоистых конструкций с учетом изменения температур граничных поверхностей / А. О. Шимановский [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения. – 2022. – Вып. 11. – С. 204–207.

V. I. TSYHANOK, I. E. KRAKAVA, A. O. SHIMANOVSKY
Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus

PAVEMENT DEFORMATION AT DIFFERENT TEMPERATURES OF ITS SURFACE

The stress-strain state of the pavement layers under the passing cars load action is investigated, taking into account the change in temperature along the height. The solution is obtained by the finite element modeling in the ANSYS software package environment using an element that implements the coupled fields mechanics calculation. It is shown that a significant change in the pavement surface temperature over a short time period can cause damages in its layers.

Keywords: pavement surface, asphalt concrete, finite element modeling, stress-strain state.

Получено 30.10.2022