

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СЛОИСТОГО ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

А.О. Шимановский, Д.А. Купреева

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель

MODELING OF THE LAYERED PAVEMENT DEFORMATION CONSIDERING THE TEMPERATURE CHANGE

A.O. Shimanovsky, D.A. Kupreyeva

Belarusian State University of Transport, Gomel

Аннотация. Выполнен анализ напряжений и деформаций в асфальтобетонном покрытии, возникающих под действием давления колес проезжающих автомобилей. Учитывается изменение модулей упругости материалов верхних слоев, обусловленное изменением температуры по высоте. На основе решения задачи термоупругости в среде программного комплекса конечноэлементного моделирования ANSYS установлено распределение температур, напряжений и деформаций в слоях дорожного покрытия. Продемонстрировано, что снижение жесткости материалов верхних слоев при нагреве поверхности дороги ведет к существенному изменению картины распределения напряжений и деформаций.

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

Для цитирования: Шимановский, А.О. Моделирование деформирования слоистого дорожного покрытия с учетом изменения температуры / А.О. Шимановский, Д.А. Купреева // Проблемы физики, математики и техники. – 2023. – № 4 (57). – С. 81–86. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2023_4_57_81. – EDN: SIRIJL

Abstract. The analysis of stresses and deformations in the asphalt concrete pavement, arising under the action of the pressure of the wheels of passing cars, is carried out. There is taken into account the change in the elastic moduli of the upper layers materials, due to the change in temperature along the height. Based on the solution of the thermoelasticity problem in the ANSYS finite element modeling software package, the distribution of temperatures, stresses and strains in the pavement layers is obtained. It is shown that the decrease in the stiffness of the upper layers materials leads to a significant change in the pattern of stress and strain distribution when the road surface is heated.

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

For citation: Shimanovsky, A.O. Modeling of the layered pavement deformation considering the temperature change / A.O. Shimanovsky, D.A. Kupreyeva // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2023. – № 4 (57). – P. 81–86. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2023_4_57_81 (in Russian). – EDN: SIRIJL

Введение

Дорожная одежда должна сохранять свою прочность под действием нагрузок от проезжающих автомобилей, а ее поверхность не должна пластически деформироваться в течение расчетного срока службы. Помимо давления от транспортных средств, автомобильные дороги подвергаются воздействию многочисленных факторов окружающей среды (увлажнение выпадающими осадками, промерзание и оттаивание и др.).

На формирование условий работы дорожных одежд большое влияние оказывает изменение температуры воздуха в месте расположения автодороги. Анализ, проведенный в [1] для условий Эстонии, показал, что температуры дорожного покрытия за последние 30 лет менялись в диапазоне от -34 до $+58$ °С. В работе [2] показано, что температура на территории Китая выросла за последние десятилетия на 2–4 градуса, а температура поверхности дороги в некоторых

случаях оказывается на 50° большей температуры основания. Также в ней рассмотрено влияние температуры на модуль упругости асфальтобетона и его коэффициент Пуассона. Увеличение температуры поверхности дороги приводит к существенному снижению модуля упругости асфальтобетона, что ведет к перераспределению напряжений в дорожном покрытии и может стать причиной его преждевременного выхода из строя.

В работе [3] анализируется диапазон изменения модулей упругости мелкозернистых и крупнозернистых асфальтобетонов при разных температурах и длительностях нагружения. Отмечается, что для анализа прочности дорожных покрытий важно иметь близкие к точным значения параметров жесткости слоев. Обоснование значений модулей упругости асфальтобетонов для расчёта дорожной одежды по критерию растяжения при изгибе под кратковременными нагрузками представлено в статье [4].

В статье [5] предлагается методика, позволяющая учесть влияние различных параметров асфальтобетона на его динамический модуль упругости. На основании экспериментальных данных в [6] подобраны различные сигмоидальные функции, характеризующие зависимость динамического модуля упругости асфальтобетона от температуры и частоты нагружения.

В ходе испытаний, описанных в работе [7], установлено, что существующие эмпирические формулы дают значительную погрешность определения модуля упругости после 500 с нагружения при температуре -10°C . Статистический анализ полученных в исследовании [8] данных показал, что после нескольких тысяч циклов нагружения модуль упругости материала снижается на 30% и более, причем на сопротивление термической усталости существенное влияние оказывают состав асфальтобетона и размер фракции его составляющих. На основе анализа механических характеристик асфальтобетона в условиях Румынии в [9] установлено, что повышение температуры воздуха с 11 до 30°C ведет к увеличению числа усталостных повреждений в 15 раз.

В статье [10] выполнен экспериментальный анализ влияния соотношения битума и цемента на модуль упругости и предел прочности цементобетона с дисперсным битумом при разных температурах. Методика прогнозирования механических характеристик такого цементобетона в зависимости от содержания его составных элементов предложена в работе [11].

Точность результатов определения температуры асфальтобетонных покрытий по эмпирически полученным выражениям анализируется в статье [12]. Приведены рекомендации по рациональному использованию рассматриваемых формул.

Имеется ряд публикаций, посвященных расчетам напряжений в дорожных покрытиях, связанных с наличием тепловых явлений. В работе [13] для определения деформаций дорожной одежды предложен подход, позволяющий на первом этапе определить распределение температур по высоте поперечного сечения, а на втором найти эквивалентные модули упругости, соответствующие данному распределению температур. Данный подход использован также в статье [14]. Сравнение температурных деформаций, вычисленных на основе различных эмпирических зависимостей для модулей упругости, с результатами экспериментов выполнено в работе [15]. Экспериментально найденные значения оказались несколько большими, чем определенные расчетом.

Экспериментально-теоретический анализ распределения температур и напряжений в трех типах дорожных покрытий при проезде автомобиля проведен в работе [16]. Установлено, что на

напряжения и деформации в слоях дорожного покрытия существенно влияют как нелинейно изменяющийся градиент температуры, так и условия взаимодействия колес с дорогой, а наилучшие условия имеют место при движении тяжелых автомобилей с малой скоростью.

В работе [17] проанализированы деформации асфальтового покрытия при суточных перепадах температур. Принималось, что температура на поверхности покрытия изменяется от $+25^{\circ}\text{C}$ до $+60^{\circ}\text{C}$. Выполнено сравнение экспериментальных данных с результатами расчета по модели, учитывающей связь изменения температуры и вязкоупругих деформаций в материале покрытия. В статье [18] выполнено сравнение моделей упругого и вязкоупругого деформирования дорожного покрытия под действием проезжающих автомобилей при температурах до 50°C . Отмечается, что при температурах, превышающих 30°C , разница между результатами вычислений оказывается значительной и может существенно влиять на расчетное значение долговечности. Проведенный в работе [19] экспериментальный анализ причин образования колеиности при высоких температурах показал, что значительную роль здесь играют механические характеристики второго и третьего слоев дорожного покрытия.

Экспериментально анализируется деформирование образца при понижении температуры в работе [20]. Показано, что существующие теоретические модели недостаточно точно отражают изменение температурных напряжений в материале при отрицательных температурах.

В статье [21] проведена серия расчетов, связанных с моделированием методом конечных элементов распространения трещины в дорожном покрытии. Показана высокая вероятность образования микротрещин на границах слоев дорожного покрытия. В работе [22] выполнено конечноэлементное моделирование с целью анализа влияния суточного изменения температуры поверхности дороги на распространение трещин в ней.

Таким образом, существует необходимость в уточненном определении напряжений и деформаций в дорожной одежде, связанных с изменением температуры окружающей среды. Целью представленной работы является установление влияния зависимости модуля упругости верхних слоев дорожного покрытия от температуры на напряженно-деформированное состояние дорог \square категории, интенсивность движения по которым составляет от 2 000 до 5 000 автомобилей в сутки.

1 Методика численного моделирования

Рассматривается участок дороги, поперечное сечение которой представлено на рисунке 1.1. Предполагается, что дорожная одежда включает

Таблица 1.1 – Физико-механические характеристики слоев дорожной одежды (при 20° С)

| Номер слоя | Толщина, см | Плотность, кг/м ³ | Модуль упругости, МПа | Коэффициент Пуассона | Коэффициент температурного расширения, 1/°С | Удельная теплоемкость, кДж/кг·К | Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К |
|------------|-------------|------------------------------|-----------------------|----------------------|---|---------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 4 | 2300 | 3336 | 0,3 | 10 ⁻⁵ | 1,65 | 1,4 |
| 2 | 4 | 2300 | 2944 | 0,25 | 10 ⁻⁵ | 1,65 | 1,25 |
| 3 | 14 | 2000 | 330 | 0,25 | 10 ⁻⁵ | 1,65 | 1 |
| 4 | 48 | 1700 | 205 | 0,15 | 10 ⁻⁵ | 1,00 | 0,64 |

четыре слоя, которые сформированы из разных материалов. Их физико-механические характеристики аналогичны использованным в [23] (таблица 1.1). Зависимости модулей упругости асфальтобетонных слоев от температуры приняты в соответствии с [13] и приведены на рисунке 1.2. Изменение механических характеристик слоев 3 и 4 при их нагреве незначительно, и им можно пренебречь.

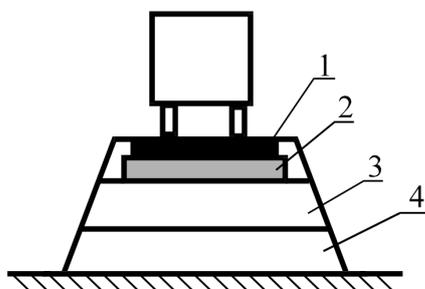


Рисунок 1.1 – Расчетная модель дорожной одежды:

- 1 – плотный асфальтобетон;
- 2 – пористый асфальтобетон;
- 3 – фракционированный щебень;
- 4 – гравийная смесь

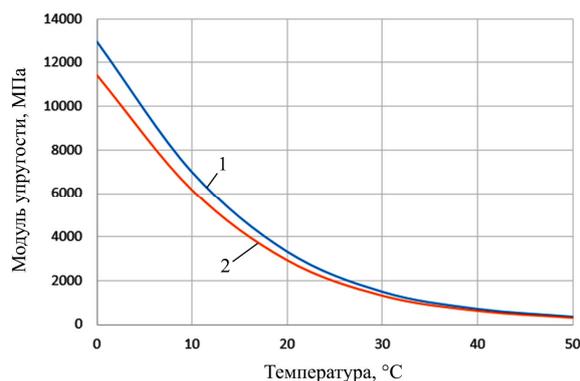


Рисунок 1.2 – Зависимости модулей упругости материалов от температуры, цифра у линии соответствует номеру слоя

При расчетах дорожных покрытий используется допущение, 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 в одном направлении движутся два автомобиля. В этом случае можно считать, что нагрузки по длине и ширине дорожного полотна приложены периодически [23], [24]. Поэтому в качестве расчетной области рассматривается структурный элемент, содержащий участок, который включает одну четвертую области приложения нагрузки. Он имеет вид параллелепипеда, который включает несколько слоев дорожного покрытия с различными физико-механическими характеристиками (рисунок 1.3).

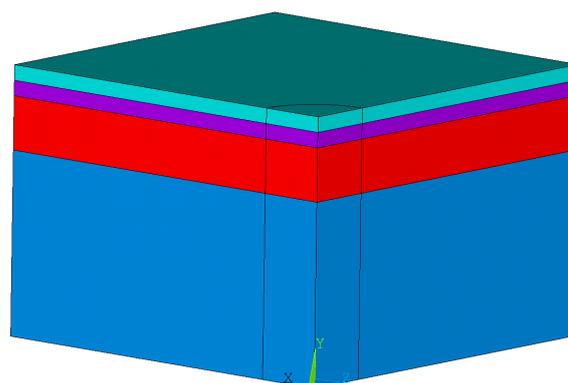


Рисунок 1.3 – Структурный элемент дорожного покрытия

Конечно-элементная модель выделенного структурного элемента дорожного полотна была создана в программном комплексе ANSYS. Учитывая необходимость проведения связанного статического и температурного анализа, использован 20-узловой шестигранный элемент SOLID226, который дает возможность учета особенностей мультифизического анализа. Конечно-элементная 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: запрет перемещений по вертикали для нижней поверхности нижнего слоя и

симметрия для всех боковых поверхностей параллелепипеда. Также для поверхности слоя 1 задавались различные значения относительных температур T_n из диапазона от 0 до $+50^\circ\text{C}$.

В ходе расчета осуществлялось решение связанных уравнений термоупругого деформирования [25]:

$$\{\varepsilon\} = [D]^{-1} \{\sigma\} + \{\alpha\} \Delta T;$$

$$S = [\alpha]^t \{\sigma\} + \frac{\rho C_p}{T_0} \Delta T,$$

где $\{\varepsilon\}$ – вектор полной деформации; $[D]$ – матрица жесткости; $\{\sigma\}$ – вектор напряжения; $\{\alpha\}$ – вектор коэффициентов теплового расширения (верхний индекс t использован для обозначения соответствующей транспонированной матрицы); ΔT – изменение температуры относительно эталонной температуры (она предполагается равной 0°C), К; S – плотность энтропии; ρ – плотность материала; C_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении; T_0 – абсолютная эталонная температура, К.

2 Анализ результатов расчетов

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

На рисунке 2.1 представлены графики, демонстрирующие изменение температур по высоте дороги при разных температурах ее поверхности. Они показывают, что наибольший градиент температуры по высоте дорожной одежды имеет место в верхних наиболее плотных и жестких ее слоях.

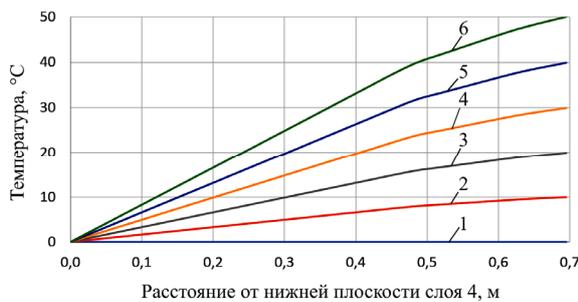


Рисунок 2.1 – Изменение температур по высоте дорожного покрытия при разных температурах T_n поверхности

Схемы распределения напряжений, представленные на рисунке 2.2, показывают, что при одинаковой температуре во всех слоях дороги верхние два слоя асфальтобетона работают как балка на упругом основании, воспринимая нагрузку от движущегося автомобиля. Учитывая достаточно высокий модуль упругости асфальтобетона, в этом случае имеем максимальное напряжение в нем, которое составляет 2730 кПа. Увеличение температуры поверхности дороги,

которое сопровождается снижением модулей упругости верхних двух слоев, приводит к существенному изменению картины распределения напряжений. Теперь максимальные их значения наблюдаются как под центром площадки приложения нагрузки, так и на краях этой области. Снижение уровня максимальных напряжений слоев асфальтобетона при увеличении температуры связано с существенным уменьшением их модулей упругости.

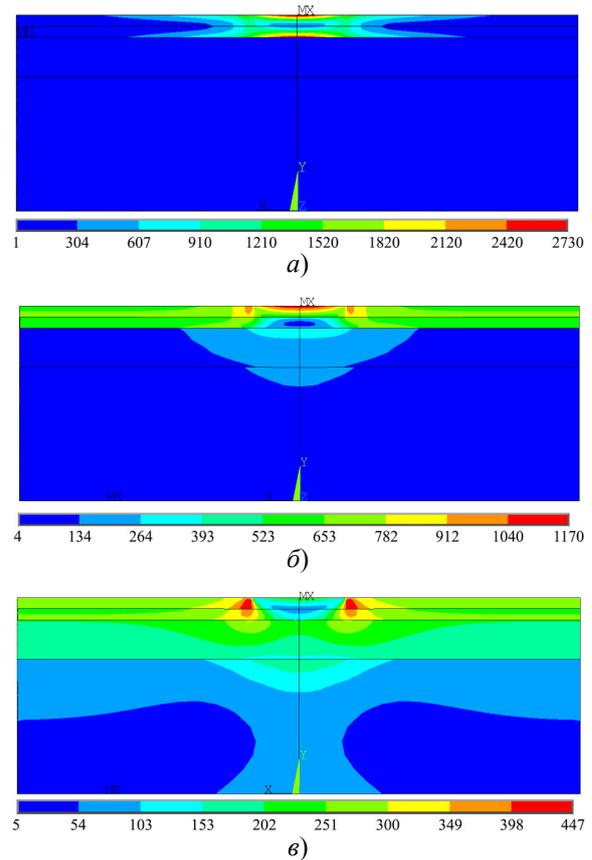


Рисунок 2.2 – Эквивалентные по Мизесу напряжения, кПа, при температурах: а) $T_n = 0^\circ\text{C}$; б) $T_n = +30^\circ\text{C}$; в) $T_n = +50^\circ\text{C}$

Анализ схем распределения деформаций (рисунок 2.3) показывает, что при нулевой температуре поверхности все точки дорожного покрытия смещаются вниз, а наибольшие смещения наблюдаются, главным образом, в асфальтобетонных слоях под местом приложения нагрузки. Увеличение температуры поверхности, а вместе с ней и температур всех слоев, приводит к увеличению толщины дорожного покрытия вследствие температурного расширения. По этой причине максимальные положительные деформации наблюдаются в верхних угловых точках данной модели. В то же время область с минимальными значениями перемещений, которая соответствует наибольшим деформациям, под действием приложенной нагрузки распространяется не только на асфальтобетонное покрытие,

но и на третий слой фракционированного щебня. Такой результат согласуется с данными, приведенными в работе [19].

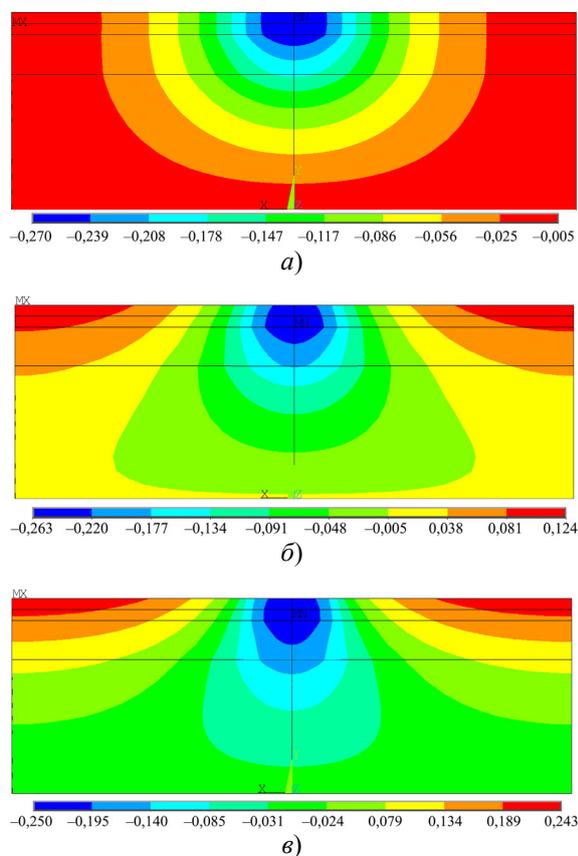


Рисунок 2.3 – Вертикальные перемещения точек дорожного покрытия, мм, при температурах: а) $T_n = 0^\circ \text{C}$; б) $T_n = +30^\circ \text{C}$; в) $T_n = +50^\circ \text{C}$

Заключение

В работе представлены результаты конечно-элементного моделирования термоупругого деформирования дороги \square категории под действием нагрузки от движущихся автомобилей. Показано, что при низких температурах асфальтобетонное покрытие работает как балка на упругом основании. Связанное с увеличением температуры поверхности дороги уменьшение модуля упругости асфальтобетона приводит к перераспределению напряжений и значительному увеличению деформаций под местом приложения нагрузки. Такой результат может свидетельствовать о формировании колеи на дорожном покрытии. Полученные результаты могут быть использованы при совершенствовании конструкций автомобильных дорог.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Kontson, K.* Superpave Pavement Design Temperatures in Estonia / K. Kontson, K. Lill, A. Aavik // *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. – 2023. – Vol. 18, № 2. – P. 190–204.

2. *Influence of regional climate change on summer temperature effect of asphalt pavement* / J. Fu [et al.] // *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*. – 2020. – Vol. 39, № 2. – P. 87–94.

3. *Телтаев, Б.Б.* Анализ расчетных значений модуля упругости асфальтобетонов / Б.Б. Телтаев // *Дорожная техника 2010*. – СПб.: Славутич, 2010. – С. 130–137.

4. *Обоснование расчётных характеристик асфальтобетонов по ГОСТ Р 58406.2-2020 при проектировании дорожных одежд на растяжение при изгибе* / Н.В. Косенко [и др.] // *Автомобиль. Дорога. Инфраструктура*. – 2022. – № 2 (32). – 15 с.

5. *Кириллов, А.М.* Моделирование изменения модуля упругости асфальтобетона при нагружении / А.М. Кириллов, М.А. Завьялов // *Инженерно-строительный журнал*. – 2015. – № 2. – С. 70–76.

6. *Кирюхин, Г.Н.* Эффективная модель модуля упругости асфальтобетона / Г.Н. Кирюхин // *Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова*. – 2016. – № 1. – С. 78–84.

7. *Jaczeowski, M.* Asphalt concrete subjected to long-time loading at low temperatures – Deviations from the time-temperature superposition principle / M. Jaczeowski, J. Judycki, P. Jaskula // *Construction and Building Materials*. – 2019. – Vol. 202. – P. 426–439.

8. *Arabzadeh, A.* Thermal fatigue behavior of asphalt concrete: A laboratory-based investigation approach / A. Arabzadeh, M. Guler // *International Journal of Fatigue*. – 2019. – Vol. 121. – P. 229–236.

9. *Răcănel, C.* Considerations regarding the influence of climatic conditions on pavement with asphalt layers / C. Răcănel, A. Burlacu // *Recent Advances in Civil and Mining Engineering: Proceedings of the 4th European Conference of Civil Engineering (ECCIE'13)*. – Antalya, 2013. – P. 141–147.

10. *Influences of temperature on mechanical properties of cement asphalt mortars* / X. Kong [et al.] // *Materials and Structures*. – 2014. – Vol. 47. – С. 285–292.

11. *Ouyang, J.* Modeling Mechanical Properties of Cement Asphalt Emulsion Mortar with Different Asphalt to Cement Ratios and Temperatures / J. Ouyang, J. Zhao, Y. Tan // *Journal of Materials in Civil Engineering*. – 2018. – Vol. 30, iss. 10. – Article 04018263. – 10 p.

12. *Тешаев, Э.А.* Исследование влияния годовых колебаний температуры на деформационные характеристики асфальтобетонных покрытий / Э.А. Тешаев, М.М. Жалалдинов, Г.Б. Эргешова // *Наука. Образование. Техника*. – 2015. – № 1. – С. 44–51.

13. *Wolfe, R.K.* Standardized Elastic Moduli of Pavement Layers for Overlay Design / R.K. Wolfe, B.W. Randolph, D.C. Colony // *Journal of*

Transportation Engineering. – 1995. – Vol. 121, № 2. – P. 221–232.

14. *Vassoler, G.* Comportamento mecânico de pavimentos flexíveis submetidos a gradientes térmicos / G. Vassoler, W. Chong, L.P. Specht // *Acta Scientiarum. Technology.* – 2011. – Vol. 33, № 3. – P. 265–271.

15. *Ramos García, J.A.* Analysis of the temperature influence on flexible pavement deflection / J.A. Ramos García, M. Castro // *Construction and Building Materials.* – 2011. – Vol. 25, iss 8. – P. 3530–3539.

16. *Numerical investigation of the mechanical response of semi-rigid base asphalt pavement under traffic load and nonlinear temperature gradient effect* / O.C. Assogba [et al.] // *Construction and Building Materials.* – 2020. – Vol. 235. – Article 117406. – 25 p.

17. *Dynamic behavior of asphalt pavement structure under temperature-stress coupled loading* / Q. Xue [et al.] // *Applied thermal engineering.* – 2013. – Vol. 53, № 1. – P. 1–7.

18. *Mejzun, Ł.* Comparison of elastic and viscoelastic analysis of asphalt pavement at high temperature / Ł. Mejzun, J. Judycki, B. Dołżycki // *Procedia Engineering.* – 2017. – Vol. 172. – C. 746–753.

19. *Research on the high temperature performance of asphalt pavement based on field cores with different rutting development levels* / N. Li [et al.] // *Materials and Structures.* – 2021. – Vol. 54. – C. 1–12.

20. *Gajewski, M.A.* Prediction of asphalt concrete low-temperature cracking resistance on the

basis of different constitutive models / M.A. Gajewski, P. Langlois // *Procedia Engineering.* – 2014. – Vol. 91. – P. 81–86.

21. *Dave, E.V.* Thermal reflective cracking of asphalt concrete overlays / E.V. Dave, W.G. Buttlar // *International Journal of Pavement Engineering.* – 2010. – Vol. 11, № 6. – P. 477–488.

22. *Thermal fatigue and cracking behaviors of asphalt mixtures under different temperature variations* / Y. Luo [et al.] // *Construction and Building Materials.* – 2023. – Vol. 369. – Article 130623. – 16 p.

23. *FEM Modelling of the Temperature Influence on the Stress-Strain State of the Pavement* / A. Shimanovsky [et al.] // *Komunikacie.* – 2023. – Vol. 25, № 1. – P. D1–D9.

24. *Цыганок, О.И.* Деформирование дорожной одежды при разных температурах ее поверхности / О.И. Цыганок, И.Е. Кракова, А.О. Шимановский // *Механика. Исследования и инновации.* – 2022. – Вып. 15. – С. 227–234.

25. *Nye, J.F.* Physical Properties of Crystals: Their Representation by Tensors and Matrices / J.F. Nye. – Oxford: Clarendon Press, 1957. – 322 p.

Поступила в редакцию 04.08.2023.

Информация об авторах

Шимановский Александр Олегович – д.т.н., профессор
Курцева Дарья Андреевна – студентка