

УДК 539.3

DOI 10.17223/19988621/69/12

Д.В. Янов, С.А. Зелепугин

## ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ НЕЖЕСТКОЙ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ НА ПРОЧНОСТЬ И СДВИГОУСТОЙЧИВОСТЬ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Представлены результаты численного расчета покрытия и основания четырехслойной дорожной одежды нежесткого типа с помощью метода конечных элементов. Задача решалась в статической плоско-деформационной постановке. Определен максимальный вертикальный прогиб и коэффициент запаса прочности для покрытия дорожной одежды, проведен анализ сдвигоустойчивости основания по критерию прочности Друкера – Прагера.

**Ключевые слова:** *дорожная одежда, напряженно-деформированное состояние, коэффициент запаса прочности, критерий Друкера – Прагера, метод конечных элементов.*

Развитие транспортной системы неразрывно связано со строительством и модернизацией автодорог, при этом большая часть затрат уходит на строительство дорожной одежды (ДО). Конструкция ДО имеет два основных слоя: покрытие и основание. При этом каждый слой может разделяться еще на несколько промежуточных слоев, каждый из которых выполняет определенную роль при действующих нагрузках автотранспорта [1]. Покрытие автодороги непосредственно контактирует с автотранспортом и воспринимает основную нагрузку, распределяя ее на нижние слои ДО. Как правило, к покрытию предъявляют следующие требования: прочность при сжатии и растяжении, влагостойкость, морозостойкость. Ниже идет основание, задача которого принять и максимально равномерно распределить нагрузку на местный грунт. Чаще всего основание выполнено из щебеночных, песчаных, гравийных смесей. Данные смеси могут быть как слабосвязанные, так и укрепленные специальными веществами, что в значительной мере влияет на несущую способность автодороги.

В современной научной литературе выделяются два основных направления в области проектирования и конструирования автомобильной ДО. Первое направление связано с теоретической и экспериментальной оценкой прочности и совершенствованием методов расчета ДО [2–7]. Достаточно большое количество работ в этой области посвящено расчету покрытия и основания ДО на сдвигоустойчивость [2]. В первую очередь сдвиговым деформациям подвержено покрытие ДО [2], особенно в летний период, когда прочностные показатели асфальтобетона снижаются в полтора-два раза из-за повышенных температур. Снижение сопротивления сдвиговым деформациям приводит к образованию колеи и локальных просадок на покрытии ДО. Дефекты такого рода значительно ухудшают качество автодороги и являются серьезной опасностью для всех участников дорожного движения. После расчета покрытия на сдвигоустойчивость необходимо проводить такие же расчеты для основания ДО. Как правило, основание выполнено из сыпучих, слабосвязанных материалов, поэтому возникает большая вероятность просадки основания под нагрузкой тяжелого автотранспорта [2]. Необратимые де-

формации в грунтах напрямую связаны с касательными напряжениями, и если рассмотреть процесс деформации грунтов более подробно, то можно заметить, что при критических касательных напряжениях, превышающих силы сопротивления и сцепления среды, происходит смещение грунтового массива вдоль одной или нескольких поверхностей скольжения. Вследствие таких скольжений, в одних местах грунт может просаживаться, а в других местах выпучиваться, что приводит к недопустимому деформированию покрытия. Проведение расчетов на прочность и сдвигустойчивость для грунтов (бетонов, асфальтобетонов, сыпучих сред) достаточно трудоемкая задача, так как нужна адекватная модель разрушения. Чаще всего в расчетах используют критерии прочности Мора – Кулона и Друкера – Прагера, а также модели Cam-Clay, Menetrey – William.

Второе направление связано со способами укрепления покрытия и основания ДО. Работы в этой области посвящены как теоретическим, так и практическим исследованиям укрепления автодороги [8–11]. С развитием геосинтетических материалов появилась возможность армирования верхних слоев ДО, укрепления откосов и основания. При этом основная сложность проектирования таких конструкций заключается в оценке их прочности. Модификация аналитических методов расчета армированного покрытия не дает достаточно точных результатов при сравнении с экспериментальными данными, тем не менее специалисты в этой области продолжают улучшать методики расчета [8]. Укрепление с помощью армирования также применяется и в основании, такой подход увеличивает сопротивление упругому прогибу и в полной мере обеспечивает перераспределение напряжений по всему основанию ДО. Но наиболее эффективным способом укрепления основания ДО является применение связующих материалов, таких как: шлаки, цемент, битум, синтетические смолы, известь, силикат натрия, органические и полимерные вяжущие добавки [9]. Укрепленное основание эффективно сопротивляется сдвиговым деформациям и имеет высокие прочностные показатели, однако возникает проблема подбора связующего вещества для того или иного типа автодороги. Различные связующие вещества по-разному влияют на физико-механические свойства грунтов, поэтому необходимо более точное прогнозирование поведения укрепленного основания при заданных нагрузках на стадии проектирования.

Проектирование ДО представляет собой трудоемкую задачу, так как необходим оптимальный подбор слоев (толщина, тип материала) с экономической точки зрения и с целью достижения требуемой прочности для обеспечения надежности ДО. Процесс подбора может происходить итерационно и занимать много времени, поэтому более перспективным направлением является численное моделирование на основе подходов механики деформируемого твердого тела, механики разрушения, механики грунтов. Анализ современных методов численного моделирования в области строительной механики, и, в частности, дорожного строительства, показывает, что подавляющее большинство исследователей использует метод конечных элементов (МКЭ), поэтому этот метод был применен и в данной работе.

Основная идея метода заключается в дискретизации расчетной области на конечные элементы, соединенные в узлах, перемещения внутри элементов определяются через узловые перемещения с помощью функций формы [12]. В данной работе выбраны треугольные конечные элементы и линейные полиномы в качестве функций формы. После расчета узловых перемещений в данной задаче можно определить напряженно-деформированное состояние (НДС) всей конструкции.

Применение МКЭ при проектировании ДО дает широкие возможности для анализа НДС покрытия и основания, а также определения их несущей способности [13 – 16]. Расчет ДО с помощью МКЭ не ограничивается количеством слоев, их расположением и типом материалов. При этом возможно решить сразу несколько проблем: оценить прочность армированного покрытия и основания, оценить сдвигустойчивость укрепленного и неукрепленного основания ДО и многие другие проблемы.

Целью данной работы является оценка напряженно-деформированного состояния слоев ДО при помощи метода конечных элементов в статической, упругой, плоско-деформационной постановке, оценка прочности покрытия при упругом прогибе, локализация участков необратимой деформации в основании ДО по критерию Друкера – Прагера [17, 18].

### Постановка задачи

В качестве конструкции ДО используется типовой пример из отраслевых дорожных норм «ОДН 218.046-01 Проектирование нежестких дорожных одежд (Россия)» [19]:

- 1) дорога располагается во II дорожно-климатической зоне;
- 2) категория автомобильной дороги – III;
- 3) заданный срок службы ДО –  $T_{\text{work}} = 15$  лет;
- 4) суммарное число приложений нагрузки  $\Sigma N_p \approx 1.2 \cdot 10^6$  авт.;
- 5) грунт рабочего слоя земляного полотна – супесь пылеватая с расчетной влажностью 0.7  $W_t$ , которая относится к сильнопучинистым грунтам;
- 6) материал для основания – гравийная смесь;
- 7) высота насыпи составляет 1.4 м;
- 8) схема увлажнения рабочего слоя земляного полотна – III;
- 9) глубина залегания грунтовых вод – 0.6 м.

Поверхность ДО состоит из двух слоев высотой по 5 см, далее идет основание общей высотой 1.3 м, состоящее из гравийной смеси и супеси пылеватой. На рис. 1 изображено расположение слоев, их размеры по высоте и ширине. Рабочее покрытие автодороги третьей категории, согласно [19], имеет ширину 7 м, обочина – 1 м. Высота ДО 1.4 м, угол наклона откосов составляет 45°. В таблице представлены основные характеристики слоев ДО. Постановка задачи дана на рис. 2.



Рис. 1. Схема дорожной одежды, размеры даны в мм

Fig. 1. Road pavement layout; sizes in mm

## Физико-механические параметры слоев дорожной одежды

№	1	2	3	4
Материал слоя	Асфальтобетон плотный на БНД марки 60/90	Асфальтобетон пористый на БНД марки 60/90	Гравийная смесь	Супесь пылеватая
Толщина слоя $h$ , см	5	5	50	80
Модуль Юнга $E$ , МПа	3200	2800	240	46
Коэффициент Пуассона $\mu$	0.1	0.1	0.17	0.3
Угол внутреннего трения $\varphi$ , град	-	-	42	31
Коэффициент сцепления $C$ , МПа	-	-	0.0025	0.006
Предел прочности на сжатие $\sigma_s$ , МПа при 20 °С	2.2	2	-	-

В качестве статической нагрузки, действующей на поверхность автодороги, рассматривается нагрузка от танка Т-90 со специальными накладками на гусеницы. Нагрузка задается в виде равномерно распределенных сил (давления) от гусениц, что упрощает постановку задачи.

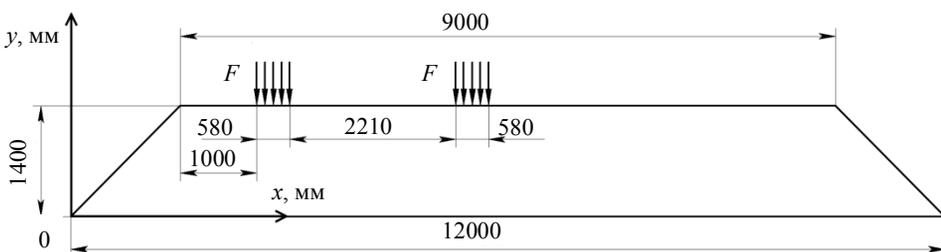


Рис. 2. Постановка задачи  
Fig. 2. Formulation of the problem

Приведенная нагрузка (нагрузка на единицу длины гусеницы в продольном направлении) рассчитывается по формуле

$$Q = \frac{Mg}{2L} \quad (1)$$

где  $M$  – масса танка, кг;  $g$  – ускорение свободного падения,  $m/c^2$ ,  $L$  – длина гусеницы, м. Полная масса танка задана равной 45500 кг, длина гусеницы выбрана 4.27 м, следовательно,  $Q = 54450$  Н/м.

Расчет узловых сил  $F$  осуществляется следующим образом. Так как задача решается в двумерной плоско-деформационной постановке, то в продольном направлении берется условная единичная длина  $l$ , равная 1 м для всех расчетных элементов. Тогда сила  $F$ , действующая на каждый расчетный узел, при условии равенства узловых масс, рассчитывается по формуле

$$F = \frac{Ql}{n}, \quad (2)$$

где  $l$  – выбранная длина расчетных элементов;  $n$  – число узлов, на которые действует приведенная нагрузка  $Q$ .

Граничные условия задачи следующие: узлы расчетной сетки, расположенные вдоль оси  $x$  при  $y = 0$ , имеют жесткое закрепление на вертикальное перемещение  $\delta_y = 0$  (рис. 2). Для остальных граничных узлов заданы условия, соответствующие свободной поверхности. Расчеты проводились с помощью специально разработанной авторами вычислительной программы, написанной на алгоритмическом языке программирования C++.

### Результаты расчетов и обсуждение

На рис. 3 представлены поля перемещений узлов  $\delta_y$ . Максимальные перемещения соответствуют области контакта гусениц, однако следует отметить различие полей перемещений от левой и правой гусениц. Это связано с тем, что левая на рисунке гусеница танка находится практически у обочины автодороги, то есть там, где контактирует плотное асфальтобетонное покрытие и гравийно-песчаная смесь. Резкое уменьшение модуля упругости с 3200 до 240 МПа и приводит к таким эффектам, в отличие от правой части, где обочина расположена на расстоянии более 3 м от правой гусеницы.

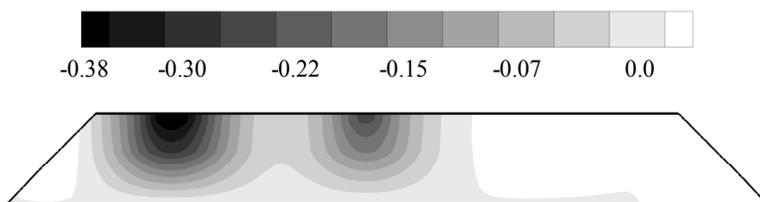
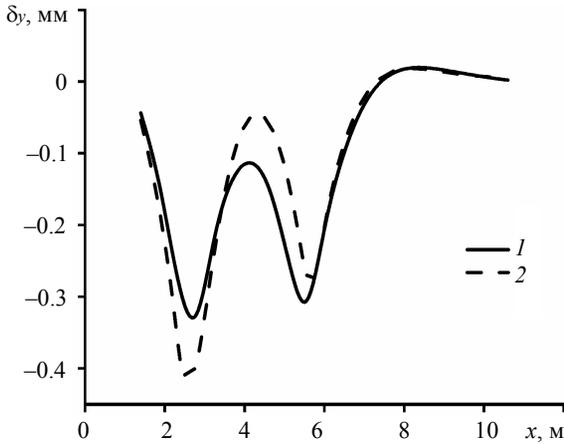


Рис. 3. Поля перемещений  $\delta_y$  (мм)

Fig. 3. Displacement fields  $\delta_y$  (mm)

На рис. 4 приведена зависимость перемещений  $\delta_y(x)$  при  $y = 1.4$  м, что соответствует верхней границе дорожного покрытия. Из данного рисунка видно, как деформируется поверхность дорожного покрытия при несимметричной нагрузке относительно центра автодороги. В правой части автодороги наблюдается выгибание поверхности в положительном направлении. При продавливании и неупругом деформировании автодороги в области действия нагрузки и выгибании в периферийной части возможно образование колеи.

Полученные результаты были сопоставлены с результатами решения данной задачи в ANSYS Mechanical для одинаковых конечно-элементных сеток. В строительной механике утвердился ряд верифицированных/сертифицированных программных комплексов: ANSYS, MIDAS Civil, Robot Structural, SCAD, Лири. Любые альтернативные результаты расчетов требуется сопоставить (верифицировать) с решением по одному из этих программных комплексов. ANSYS является основным из них, поэтому решение, полученное с помощью разработанного программного комплекса, сравнивалось с решением, полученным в ANSYS Mechanical. Анализ графиков показывает качественное и количественное соответствие результатов. Например, величина вертикального перемещения крайней левой точки покрытия в обоих случаях составляет 0.05 мм, а в правой части, при  $x$  больше 7 м, наблюдается выгибание покрытия. Максимальный прогиб на рис. 4, кривая 1, составляет 0.35 мм, для полученного нами решения эта величина составляет 0.425 мм.



**Рис. 4.** Перемещения  $\delta_y(x)$  при  $y = 1.4$  м. 1 – решение, полученное в ANSYS Mechanical, 2 – решение, полученное в вычислительной программе авторов

**Fig. 4.** Displacements  $\delta_y(x)$  at  $y = 1.4$  m. The solution is obtained using (1) ANSYS Mechanical and (2) authors' numerical code

Кроме вертикальных перемещений, ДО подвергается и горизонтальным перемещениям. На рис. 5 представлены поля перемещений  $\delta_x$ , при этом следует отметить, что значение максимальных положительных (0.13 мм) и отрицательных (–0.18 мм) перемещений  $\delta_x$  отличается по модулю на 40 %, так как нагрузка расположена несимметрично относительно центра автодороги.



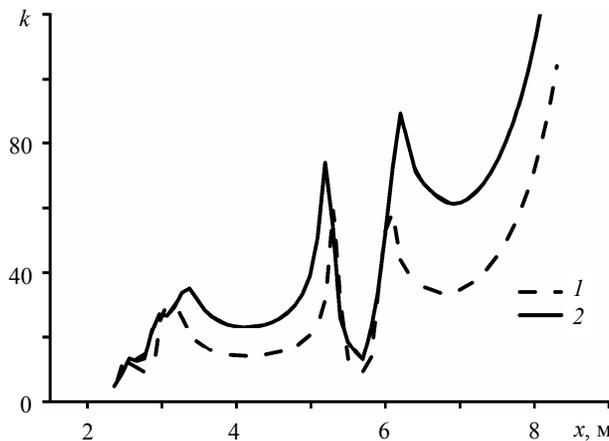
**Рис. 5.** Поля перемещений  $\delta_x$  (мм)

**Fig. 5.** Displacement fields  $\delta_x$  (mm)

Для анализа несущей способности покрытия и основания ДО используется коэффициент запаса прочности (КЗП)  $k = \sigma_s / \sigma$ , где  $\sigma_s$  – предельно допустимое значение рассматриваемой величины,  $\sigma$  – напряжения, вычисляемые по выбранному критерию. При оценке прочности покрытия автодороги необходимо учитывать, что материал подвергается сжимающим напряжениям, поэтому  $\sigma_s$  – критическое напряжение при сжатии. В качестве  $\sigma$  рассматривается интенсивность напряжений по Мизесу (3):

$$I = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}, \quad (3)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные напряжения. На рис. 6 представлены графики изменения коэффициента запаса прочности  $k(x)$  для двух слоев покрытия ДО (верхний ряд конечных элементов для каждого слоя). В области контакта гусениц танка  $k$  составляет 3–12.



**Рис. 6.** Коэффициент запаса прочности покрытия дорожной одежды  $k(x)$ . 1 – асфальтобетон пористый, 2 – асфальтобетон плотный

**Fig. 6.** Load factor for pavement,  $k(x)$ . (1) open-graded asphalt concrete and (2) dense-graded asphalt concrete

При  $x = 4$  м, то есть между гусеницами танка, коэффициент запаса прочности в среднем возрастает до 15. В правой части автодороги КЗП покрытия возрастает до 120 и выше вследствие несимметричности нагрузки.

Определение сдвигоустойчивости основания также является важной частью прочностных расчетов для ДО нежесткого типа. Для этого в расчетах применяется критерий Друкера – Прагера (4) [17]

$$\sqrt{\frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} = \frac{6C \cos \alpha}{\sqrt{3}(3 + \sin \alpha)} + \frac{2 \sin \alpha}{\sqrt{3}(3 + \sin \alpha)}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3), \quad (4)$$

где  $C$  – коэффициент сцепления,  $\alpha$  – угол внутреннего трения. Данный критерий достаточно корректно описывает поведение сыпучих материалов, грунтов, щебеночных и глинистых оснований.

В данной работе КЗП для основания рассчитывался следующим образом. После расчета НДС, для каждого элемента конструкции определяется предельное значение с помощью критерия Друкера – Прагера, при котором материал переходит в неупругую стадию деформирования, причем в формулу для расчета КЗП вводится поправочный коэффициент  $K_{\text{корр}}$  равный 1.22, обусловленный тем, что в основание добавляются связующие компоненты, повышающие прочность материала. Тогда коэффициент запаса прочности для основания выглядит таким образом:

$$k_b = K_{\text{корр}} \frac{\frac{6C \cos \alpha}{\sqrt{3}(3 + \sin \alpha)} + \frac{2 \sin \alpha}{\sqrt{3}(3 + \sin \alpha)} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{\sqrt{\frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}}. \quad (5)$$

На рис. 7 представлены поля КЗП для гравийного основания и супеси пылеватой.

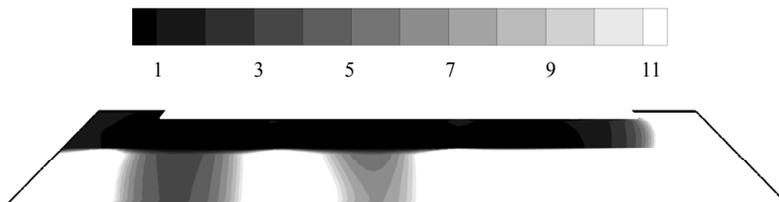


Рис. 7. Коэффициент запаса прочности для основания дорожной одежды  
Fig. 7. Load factor for roadbed

Анализ результатов расчетов показывает, что наблюдается обширная зона необратимых деформаций в области гравийного основания ДО. Основной причиной может быть слабосвязанность данного материала и большой угол внутреннего трения. Крайняя правая часть верхнего основания практически не подвергается касательным деформациям и выполняет свою несущую роль, так как основную нагрузку воспринимает левая часть ДО. Для супеси пылеватой  $k_b$  находится в пределах 3–10, то есть в данной зоне не наблюдаются необратимые деформации.

### Заключение

Разработана альтернативная вычислительная программа для проектирования дорожной одежды нежесткого типа с помощью метода конечных элементов. Рассчитано напряженно-деформированное состояние и коэффициент запаса прочности для покрытия и основания при заданной статической нагрузке, а также определены вертикальные перемещения поверхности покрытия. При данной нагрузке покрытие автодороги способно сопротивляться сжимающим напряжениям и имеет минимальный коэффициент запаса прочности равный 3.

Представлен подход для вычисления коэффициент запаса прочности для основания дорожной одежды при помощи критерия Друкера – Прагера. На основе такого подхода выявлена низкая несущая способность гравийно-песчаного основания практически по всей ширине дорожной одежды, кроме свободной боковой части, где касательные напряжения минимальны. Нижнее основание (супесь пылеватая) дорожной одежды имеет коэффициент запаса прочности в пределах 3–10, что свидетельствует о достаточном сопротивлении сдвиговым деформациям в этой области.

Полученное решение сравнивалось с решением в ANSYS Mechanical. Основным параметром при сравнении была выбрана вертикальная компонента перемещения. Получено качественное и количественное соответствие результатов.

Авторы выражают благодарность Пашкову С.В. за инициирование данной работы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Бабков В.Ф., Андреев О.В.* Проектирование автомобильных дорог. Ч. 2. М.: Транспорт, 1987. 415 с.
2. *Александров А.С., Долгих Г.В., Калинин А.Л.* Совершенствование расчета дорожных конструкций по сопротивлению сдвигу. Часть 2. Модифицированные модели расчета главных и касательных напряжений // Инженерно-строительный журнал. 2016. № 2(62). С. 51–68. DOI: 10.5862/МСЕ.62.6.
3. *Aman, Awaluddin A., Ahmad A., Olivia M.* Parametric study on the compressive strength geopolymer paving block // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. V. 345. 012018. DOI: 10.1088/1757-899X/345/1/012018.
4. *Колесников Г.Н., Гаврилов Т.А.* Моделирование условий появления низкотемпературных трещин в асфальтобетонном слое автомобильной дороги // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2018. № 56. С. 57–66. DOI: 10.17223/19988621/56/5.
5. *Сиротюк В.В., Лунёв А.А.* Прочностные и деформационные характеристики золошлаковой смеси // Инженерно-строительный журнал. 2017. № 6(74). С. 3–16. DOI: 10.18720/МСЕ.74.1.
6. *Judycki J.* A new viscoelastic method of calculation of low-temperature thermal stresses in asphalt layers of pavements // Int. J. Pavement Engineering. 2018. V. 19. Iss. 1. P. 24–36. DOI: 10.1080/10298436.2016.1199883.
7. *Телтаев Б.Б., Луу Дж., Суннес Е.А.* Распределение температуры, влажности, напряжений и деформаций в автомобильной дороге // Инженерно-строительный журнал. 2018. № 7(83). С. 102–113. DOI: 10.18720/МСЕ.83.10.
8. *Матвеев С.А., Мартынов Е.А., Литвинов Н.Н.* Расчет армированной конструкции дорожной одежды как многослойной плиты на упругом основании // Вестник СибАДИ. 2015. № 5(45). С. 72–76.
9. *Al-Jumaili M.A., Issmael O.D.* Cold asphalt mixtures with high reclaimed pavement material percentages response to local traffic loading and environmental conditions // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. V. 433. 012013. DOI: 10.1088/1757-899X/433/1/012013.
10. *Vyrozhemskiy V., Krayushkina K., Bidnenko N.* Durable high strength cement concrete topping for asphalt roads // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2017. V. 236. 012031. DOI: 10.1088/1757-899X/236/1/012031.
11. *Михайлин П.Г.* Экспериментальные исследования по снижению слоев конструкции основания дорожной одежды автомобильной дороги «Амур» (Чита – Хабаровск) км 1927 – км 1942 с использованием георешетки // Современные наукоемкие технологии. 2017. № 1. С. 51–55.
12. *Зенкевич О.С.* Метод конечных элементов в технике / под ред. Б.Е. Победря. М.: Мир, 1975. 543 с.
13. *Calvarano L.S., Palamara R., Leonardi G., Moraci N.* 3D-FEM Analysis on geogrid reinforced flexible pavement roads // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2017. V. 95. 022024. DOI: 10.1088/1755-1315/95/2/022024.
14. *Li S., Hu C.* Finite element analysis of GFRP reinforced concrete pavement under static load // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018. V. 113. 012188. DOI: 10.1088/1755-1315/113/1/012188.
15. *Малик А.В., Лавит И.М.* Метод расчета коэффициента интенсивности напряжений для неподвижной трещины нормального разрыва при динамическом нагружении // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2018. № 54. С. 88–102. DOI: 10.17223/19988621/54/8.
16. *Leonardi G.* Finite element analysis for airfield asphalt pavements rutting prediction // Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences. 2015. V. 63. Iss. 2. P. 397–403. DOI: 10.1515/bpasts-2015-0045.
17. *Drucker D.C., Prager W.* Soil mechanics and plastic analysis or limit design // Quarterly of Applied Mathematics. 1952. V. 10(2). P. 157–165.

18. Микушина В.А., Смолин И.Ю. Численное моделирование деформирования и разрушения пористой алюмооксидной керамики на мезоуровне // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2019. № 58. С. 99–108. DOI: 10.17223/19988621/58/8.
19. *Отраслевые дорожные нормы*: ОДН 218.046-01. Проектирование нежестких дорожных одежд. М.: Информавтодор, 2001. 146 с.

Статья поступила: 21.08.2019

Yanov D.V., Zelepugin S.A. (2021) NUMERICAL CALCULATION OF STRENGTH AND SHEAR RESISTANCE OF NON-RIGID ROAD PAVEMENT BY THE FINITE ELEMENT METHOD. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika* [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics]. pp. 155–165

DOI 10.17223/19988621/69/12

Keywords: road pavement, stress-strain state, factor of safety, Drucker–Prager criterion, finite element method.

The paper presents 2D mathematical simulation results for a T–90 tank interacting with the III-type road in a plane-strain formulation. The purpose of the work is to determine the vertical deflection of an asphalt-concrete road, as well as the load factor of the two-layer road pavement (dense-graded asphalt concrete, open-graded asphalt concrete) and two-layer roadbed (gravel roadbed, ground roadbed – silt sandy loam). To calculate the load factor of the road pavement, the ratio of the von Mises stress to the ultimate compression stress is used. To analyze the shear resistance of the roadbed, the modified Drucker-Prager strength criterion is utilized. The computed results reveal the maximum vertical deflection in the contact area of the tracks. In the same area, the load factor of the road pavement is 3–12, which indicates the high bearing capacity of the dense-graded asphalt concrete. Analysis of the shear resistance of the roadbed shows that irreversible deformations occur in the gravel base in the contact area of the tracks, which can lead to the subsidence of the coating, while the load factor for sandy loam is 3–10.

*Dmitriy V. YANOV* (Tomsk State University, Tomsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation). E-mail: dima.yanov97@mail.ru

*Sergey A. ZELEPUGIN* (Doctor of Physics and Mathematics, Tomsk State University, Tomsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation). E-mail: szel@yandex.ru

#### REFERENCES

1. Babkov V.F., Andreev O.V. (1987) *Proektirovanie avtomobil'nykh dorog. Chast' 2* [Road design. Part 2]. Moscow: Transport.
2. Aleksandrov A.S., Dolgikh G.V., Kalinin A.L. (2016) Sovershenstvovanie rascheta dorozhnykh konstruksiy po soprotivleniyu sdvigu. Chast' 2. Modifitsirovannyye modeli rascheta glavnykh i kasatel'nykh napryazheniy [Improvement of shear strength design of a road structure. Part 2. Modified models to calculate the principal and shear stresses]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal – Magazine of Civil Engineering*. 62(2). pp. 51–68. DOI: 10.5862/MCE.62.6.
3. Aman, Awaluddin A., Ahmad A., Olivia M. (2018) Parametric study on the compressive strength geopolymer paving block. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 345(012018). DOI: 10.1088/1757-899X/345/1/012018.
4. Kolesnikov G.N., Gavrilov T.A. (2018) Modelirovanie usloviy poyavleniya nizkotemperaturnykh treshchin v asfal'tobetonnom sloe avtomobil'noy dorogi [Simulation of the conditions for a low-temperature crack appearance in the asphalt concrete layer of a road]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 56. pp. 57–66. DOI: 10.17223/19988621/56/5.

5. Sirotiyuk V.V., Lunev A.A. (2017) Prochnostnye i deformatsionnye kharakteristiki zoloshlakovoy smesi [Strength and deformation characteristics of ash and slag mixture]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal – Magazine of Civil Engineering*. 6(74). pp. 3–16. DOI: 10.18720/MCE.74.1.
6. Judycki J. (2018) A new viscoelastic method of calculation of low-temperature thermal stresses in asphalt layers of pavements. *International Journal of Pavement Engineering*. 19(1). pp. 24–36. DOI: 10.1080/10298436.2016.1199883.
7. Teltayev B.B., Liu J., Suppes E.A. (2018) Raspreделение температуры, vlazhnosti, napryazheniy i deformatsiy v avtomobil'noy doroge [Distribution of temperature, moisture, stress and strain in the highway]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal – Magazine of Civil Engineering*. 83(7). pp. 102–113. DOI: 10.18720/MCE.83.10.
8. Matveev S.A., Martynov E.A., Litvinov N.N. (2015) Raschet armirovannoy konstruksii dorozhnoy odezhdyy kak mnogoslonoynoy plity na uprugom osnovanii [Calculation of the reinforced design of road clothes as multilayered plate on the elastic basis]. *Vestnik SibADI – The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 5(45). pp. 72–76. DOI: 10.26518/2071-7296-2015-5(45)-72-76.
9. Al-Jumaili M.A., Issmael O.D. (2018) Cold asphalt mixtures with high reclaimed pavement material percentages response to local traffic loading and environmental conditions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 433(012013). DOI: 10.1088/1757-899X/433/1/012013.
10. Vyrozhemskiy V., Krayushkina K., Bidnenko N. (2017) Durable high strength cement concrete topping for asphalt roads. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 236(012031). DOI: 10.1088/1757-899X/236/1/012031.
11. Mikhaylin R.G. (2017) Eksperimental'nye issledovaniya po snizheniyu sloev konstruksii osnovaniya dorozhnoy odezhdyy avtomobil'noy dorogi «Amur» (Chita – Khabarovsk) km 1927 – km 1942 s ispol'zovaniem georeshetki [Numerical modelling technique of the highways road clothes bases geogrid reinforcements]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii – Modern High Technologies*. 1. pp. 51–55.
12. Zienkiewicz O.C. (1971) *The Finite Element Method in Engineering Science*. London: McGraw-Hill.
13. Calvarano L.S., Palamara R., Leonardi G., Moraci N. (2017) 3D-FEM Analysis on geogrid reinforced flexible pavement roads. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 95(022024). DOI: 10.1088/1755-1315/95/2/022024.
14. Li S., Hu C. (2018) Finite element analysis of GFRP reinforced concrete pavement under static load. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 113(012188). DOI: 10.1088/1755-1315/113/1/012188.
15. Malik A.V., Lavit I.M. (2018) Metod rascheta koeffitsienta intensivnosti napryazheniy dlya nepodvizhnoy treshchiny normal'nogo razryva pri dinamicheskom nagruzhenii [On the computational method for the stress intensity factor of a stationary crack in mode I under dynamic loading]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 54. pp. 88–102. DOI: 10.17223/19988621/54/8.
16. Leonardi G. (2015) Finite element analysis for airfield asphalt pavements rutting prediction. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*. 63(2). pp. 397–403. DOI: 10.1515/bpasts-2015-0045.
17. Drucker D.C., Prager W. (1952) Soil mechanics and plastic analysis or limit design. *Quarterly of Applied Mathematics*. 10(2). pp. 157–165.
18. Mikushina V.A., Smolin I.Yu. (2019) Chislennoe modelirovanie deformirovaniya i razrusheniya poristoy alyumooksidnoy keramiki na mezourovne [Numerical modeling of the deformation and fracture of a porous alumina ceramics at mesoscale]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 58. pp. 99–108. DOI: 10.17223/19988621/58/8.
19. Otrasleyve dorozhnye normy: ODN 218.046-01 (2001) *Proektirovanie nezhestkikh dorozhnykh odezhd* [Design of non-rigid road clothes]. Moscow: Informavtodor.