

УДК 625.072:531.8

*Е. В. Вайнштейн, В. М. Вайнштейн, П. А. Нехорошков*

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ ЛЕСОВОЗНОЙ АВТОДОРОГИ ПО КАСАТЕЛЬНЫМ НАПРЯЖЕНИЯМ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

*Приведены результаты исследований напряженно-деформированного состояния конструкции дорожной одежды лесовозной автомобильной дороги по касательным напряжениям методом конечных элементов с использованием компьютерного моделирования по программному комплексу «PLAXIS». Параметры напряженно-деформированного состояния конструкции дорожной одежды лесовозной автомобильной дороги определены при размещении двух лесовозных автопоездов по полосам движения. Данные расчетов позволяют сравнить их с данными, полученными по отраслевым нормам дорожного хозяйства расчета нежестких дорожных одежд.*

**Ключевые слова:** *щебеночно-мастичный асфальтобетон, лесовозный автопоезд, конструкция дорожной одежды.*

**Введение.** Для автомобильного лесотранспорта, как и для всего лесопромышленного комплекса в целом, основной задачей развития является дальнейшее повышение эффективности производства. Дорожные условия оказывают значительное влияние на технико-эксплуатационные показатели работы автомобильного лесотранспорта. Дорожная одежда лесовозной автомобильной дороги является сложной многослойной инженерной конструкцией, на которую воздействуют нагрузки от лесовозных автопоездов и других транспортных средств [1].

**Целью** работы является определение параметров напряженно-деформированного состояния конструкции дорожной одежды лесовозной автомобильной дороги при размещении двух лесовозных автопоездов по полосам движения при компьютерном моделировании методом конечных элементов по программному комплексу «PLAXIS», а также установление коэффициента прочности на сдвиг в слоях земляного полотна и сравнение его с расчетным по отраслевым дорожным нормам (ОДН 218.046 – 2001) [2].

**Решаемые задачи**, направленные на достижение цели, заключаются в определении коэффициента прочности на сдвиг, в слоях земляного полотна путем моделирования и определения параметров напряженно-деформированного состояния дорожной одежды по касательному напряжению.

Основные уравнения имеют следующий вид.

Рассмотрим силу  $F$  (рис.1.), действующую на упругое полупространство, которое имеет модуль упругости  $E$  и коэффициент Пуассона  $\mu$ . Выберем произвольную систему координат, в которой ось  $Z$  направлена вниз по направлению действия силы, а две другие оси расположены в плоскости действия силы. Координаты точки приложения силы обозначим  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , причём  $z = 0$ .

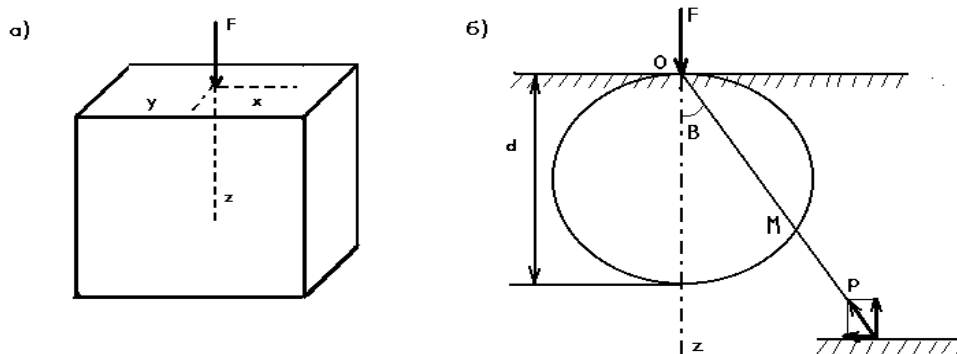


Рис.1. Расчетная схема действия сосредоточенной силы на полупространство и напряжения в точке М

Пусть имеется некоторая точка М с координатами  $x_m, y_m, z_m$ . Расстояние от точки М до точки приложения силы обозначим R и найдём по формуле

$$R = \sqrt{(x_m - x)^2 + (y_m - y)^2 + z_m^2}. \tag{1}$$

Напряжения в точке М вычисляются по формулам Буссинеска:

$$\begin{aligned} \sigma_z &= -\frac{3F}{2\pi} \frac{z_m^3}{R^5}; \\ \sigma_x &= -\frac{3F}{2\pi} \left\{ \frac{(x_m - x)^2 z_m}{R^5} + \frac{1 - 2\mu}{3} \left[ \frac{1}{R(R + z_m)} - \frac{(2R + z_m)(x_m - x)^2}{(R + z_m)^2 R^3} + \frac{z_m}{R^3} \right] \right\}; \\ \sigma_y &= -\frac{3F}{2\pi} \left\{ \frac{(y_m - y)^2 z_m}{R^5} + \frac{1 - 2\mu}{3} \left[ \frac{1}{R(R + z_m)} - \frac{(2R + z_m)(y_m - y)^2}{(R + z_m)^2 R^3} + \frac{z_m}{R^3} \right] \right\}; \\ \tau_{zx} &= -\frac{3F}{2\pi} \frac{(x_m - x) z_m^2}{R^5}; \\ \tau_{zy} &= -\frac{3F}{2\pi} \frac{(y_m - y) z_m^2}{R^5}; \\ \tau_{xy} &= -\frac{3F}{2\pi} \left[ \frac{(x_m - x)(y_m - y) z_m}{R^5} - \frac{1 - 2\mu}{3} \frac{(2R + z_m)(x_m - x)(y_m - y)}{(R + z_m)^2 R^3} \right]. \end{aligned} \tag{2}$$

От колеса лесовозного автомобиля на полупространство действует распределённая по некоторой области  $\omega$  нагрузка с интенсивностью  $q(x,y)$  (рис.2). Выделим в этой области элементарную площадку  $d\omega = dx dy$ .

Действующая на неё сила будет равна

$$dF = q \cdot d\omega = q \cdot dx dy. \tag{3}$$

Одновременно с напряжением от колес лесовозного автомобиля на грунт земляного полотна действует распределенная нагрузка от веса дорожной одежды. На выделенную элементарную площадку  $d\omega = dx dy$  действует сила

$$dP = \sum_1^n \gamma_i \cdot z_i \cdot d\omega = \sum_1^n \gamma_i z_i \cdot dx dy, \tag{4}$$

где  $\gamma_i$  – плотность (i) слоя дорожной одежды, кг/м<sup>3</sup>;  $z_i$  – толщина слоя, м.

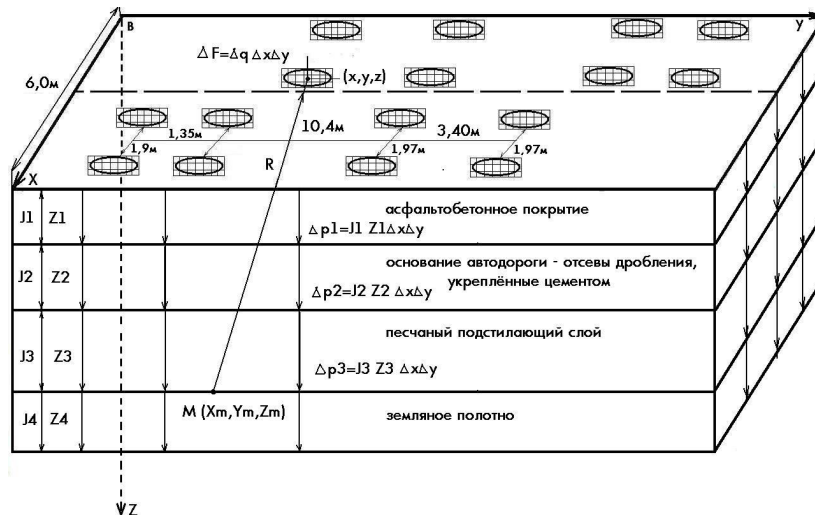


Рис. 2. Расчетная схема действия распределенной нагрузки от подвижного состава и веса дорожной одежды на полупространство (B)

Интенсивность нагрузки от дорожной одежды определяется от каждого слоя в зависимости от плотности его материала и толщины. На поверхности грунта земляного полотна она равна

$$S = \gamma_1 \cdot z_1 + \gamma_2 \cdot z_2 + \gamma_3 \cdot z_3, \tag{5}$$

где  $\gamma_1$  – плотность асфальтобетона, кг/м<sup>3</sup>;  $z_1$  – толщина слоя асфальтобетона, м;  $\gamma_2$  – плотность укрепленных цементом отсеков дробления известняков, кг/м<sup>3</sup>;  $z_2$  – толщина слоя укрепленных цементом отсеков дробления известняков, м;  $\gamma_3$  – плотность песка, кг/м<sup>3</sup>;  $z_3$  – толщина песчаного слоя, м.

Используя принцип суперпозиции сил и интегрируя по области  $\omega$ , найдём полные значения напряжений [3].

$$\begin{aligned} \sigma_z &= -\frac{3z_m^3}{2\pi} \iint_{\omega} \frac{q dx dy}{R^5}; \\ \sigma_x &= -\frac{3}{2\pi} \iint_{\omega} q \left\{ \frac{(x_m - x)^2 z_m}{R^5} + \frac{1 - 2\mu}{3} \left[ \frac{1}{R(R + z_m)} - \frac{(2R + z_m)(x_m - x)^2}{(R + z_m)^2 R^3} + \frac{z_m}{R^3} \right] \right\} dx dy \\ \sigma_y &= -\frac{3}{2\pi} \iint_{\omega} q \left\{ \frac{(y_m - y)^2 z_m}{R^5} + \frac{1 - 2\mu}{3} \left[ \frac{1}{R(R + z_m)} - \frac{(2R + z_m)(y_m - y)^2}{(R + z_m)^2 R^3} + \frac{z_m}{R^3} \right] \right\} dx dy \\ \tau_{zx} &= -\frac{3z_m^2}{2\pi} \iint_{\omega} q \frac{(x_m - x)}{R^5} dx dy; \\ \tau_{zy} &= -\frac{3z_m^2}{2\pi} \iint_{\omega} q \frac{(y_m - y)}{R^5} dx dy; \\ \tau_{xy} &= -\frac{3}{2\pi} \iint_{\omega} q \left[ \frac{(x_m - x)(y_m - y)z_m}{R^5} - \frac{1 - 2\mu}{3} \frac{(2R + z_m)(x_m - x)(y_m - y)}{(R + z_m)^2 R^3} \right] dx dy. \end{aligned} \tag{6}$$

Аналогично определяем полные значения напряжений от веса дорожной одежды

$$\begin{aligned} \sigma_z &= -\frac{3z_m^3}{2\pi} \sum_{i=1}^n \iint_{\omega} \frac{\gamma_i z_i dx dy}{R^5}; \\ \sigma_x &= -\frac{3}{2\pi} \sum_{i=1}^n \iint_{\omega} \gamma_i z_i \left\{ \frac{(x_m - x)^2 z_m}{R^5} + \frac{1 - 2\mu}{3} \left[ \frac{1}{R(R + z_m)} - \frac{(2R + z_m)(x_m - x)^2}{(R + z_m)^2 R^3} + \frac{z_m}{R^3} \right] \right\} dx dy; \\ \tau_{zx} &= -\frac{3z_m^2}{2\pi} \sum_{i=1}^n \iint_{\omega} \gamma_i z_i \frac{(x_m - x)}{R^5} dx dy; \\ \tau_{zy} &= -\frac{3z_m^2}{2\pi} \sum_{i=1}^n \iint_{\omega} \gamma_i z_i \frac{(y_m - y)}{R^5} dx dy; \\ \tau_{xy} &= -\frac{3}{2\pi} \sum_{i=1}^n \iint_{\omega} \gamma_i z_i \left[ \frac{(x_m - x)(y_m - y)z_m}{R^5} - \frac{1 - 2\mu}{3} \frac{(2R + z_m)(x_m - x)(y_m - y)}{(R + z_m)^2 R^3} \right] dx dy. \end{aligned} \tag{7}$$

Под действием заданных нагрузок в теле появляются напряжения. При анализе напряжений в окрестности рассматриваемой точки М (рис.3) выделим бесконечно малый элемент в форме параллелепипеда, ребра которого параллельны координатным осям, а их длина равна dx, dy, dz.

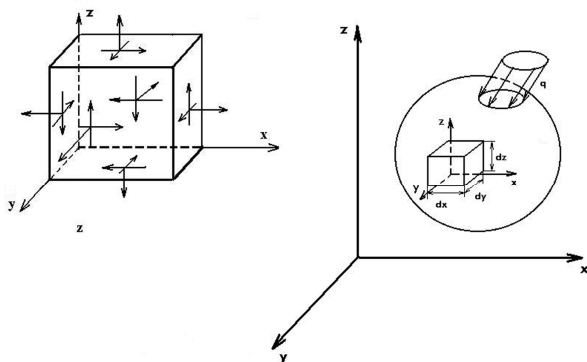


Рис. 3. Схема действия напряжений на гранях параллелепипеда в исследуемой точке элемента

На гранях этого параллелепипеда действуют три нормальных и шесть касательных напряжений, совокупность которых образует тензор напряжений. Одноименные и параллельные напряжения, действующие на параллельных гранях бесконечно малого параллелепипеда, отличаются на бесконечно малую величину и потому их можно считать одинаковыми. Полученные зависимости позволяют найти наибольшие нормальные и касательные напряжения для рассматриваемой точки.

Среди бесчисленного множества площадок, которые можно провести через исследуемую точку, имеются три взаимно перпендикулярные площадки, касательные напряжения на которых отсутствуют. Эти площадки и действующие по ним нормальные напряжения будут главными [4]. В общем случае пространственного напряженного состояния связь между главными напряжениями и напряжениями по любой наклонной площадке, проходящей через данную точку, описывается кубическим уравнением [5]

$$\sigma^3 - I_1 \sigma^2 + I_2 \sigma - I_3 = 0, \tag{8}$$

где  $I_1, I_2, I_3$  – соответственно первый, второй, третий инварианты тензора напряжений.

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z; \tag{9}$$

$$I_2 = \sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{zx}^2; \tag{10}$$

$$I_3 = \sigma_x \sigma_y \sigma_z + 2\tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx} - \sigma_x \tau_{yz}^2 - \sigma_y \tau_{zx}^2 - \sigma_z \tau_{xy}^2. \tag{11}$$

Решив это уравнение, найдем главные напряжения  $\sigma_1; \sigma_2; \sigma_3$ . Кубическое уравнение решаем методом половинного деления.

Все напряжения отличны от нуля, и напряженное состояние является объемным, трехосным.

По площадкам, наклоненным под углом  $45^\circ$  к главным, возникают наибольшие касательные напряжения. Значения этих напряжений определяются по формуле

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} . \quad (12)$$

При  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$   $\tau_{max}$  является максимальным касательным напряжением для данной точки тела, где площадка параллельна  $\sigma_2$ .

Используя условия третьей теории прочности, найдены максимальные касательные напряжения. Условие прочности будет иметь вид

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} < [\tau_{np}], \quad (13)$$

где  $[\tau_{np}]$  – предельная величина активного напряжения сдвига (в той же точке), превышение которой вызывает нарушение прочности на сдвиг.

Предельную величину активного напряжения сдвига в грунте земляного полотна определяется по теории прочности Мора-Кулона.

$$\tau_{max} < [\tau_{np}], \text{ или } \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} < C + G_m \cdot \operatorname{tg} \phi . \quad (14)$$

В случае напряженно-деформированного состояния оценка прочности в данной точке конструкции производится путем непосредственного сопоставления возникающего в ней рабочего напряжения с предельным. Коэффициент запаса прочности равен отношению предельного напряжения к максимальному:

$$K_{np} = \frac{[\tau_{np}]}{\tau_{max}} . \quad (15)$$

Рассмотрим влияние параметров лесовозных автопоездов и их расстановку на автодороге при определении максимальных касательных напряжений в покрытии, основании автодороги, рабочем слое земляного полотна и в теле насыпи на глубине 84–200 см от поверхности покрытия. Расстановку лесовозных автопоездов в сечении автомобильной дороги произведем таким образом, когда две самые нагруженные вторые оси тягача будут находиться в одном сечении по оси  $Z$ . Схема расстановки двух лесовозных автопоездов приведена на рис.4. Нагрузка на вторую ось принята с коэффициентом перегруза, равным  $K_{п} = 1,4$ .

Вариант расстановки двух лесовозных автопоездов следующий: правая сторона проезжей части автодороги – лесовозный автопоезд МАЗ 509А+ГКБ-9383-011, груженный с нагрузкой на вторую ось 178 кН [2]. Левая сторона проезжей части автодороги – лесовозный автопоезд МАЗ 509А+ГКБ-9383-011, груженный с нагрузкой на вторую ось 178 кН.

Выберем произвольную систему координат, у которой ось  $Z$  направлена вдоль трассы по ходу движения по правой полосе, ось  $X$  перпендикулярно ей, ось  $Y$  вниз, плоскость  $XOZ$  на поверхности покрытия.

Автомобили двигаются по правой и левой полосам. Введём местную систему координат относительно автомобиля. На рис. 4 показана схема определения координат расстановки лесовозов. Параметры и координаты отпечатков колес лесовозных автопоездов по вариантам их расстановки приведены в таблице.



4 слой – песчаный слой толщиной 0,34 м. Модуль упругости равен  $E_{\text{упр}} = 100$  МПа; коэффициент Пуассона  $\mu=0,25$ ; плотность  $\rho = 16,5$  кН/м<sup>3</sup>, сцепление  $C = 5$  кПа (5 кН/м<sup>2</sup>), угол внутреннего трения  $\varphi = 42^{\circ}$  [2];

5 слой – грунт суглинок легкий. Модуль упругости равен  $E_{\text{упр}} = 43$  МПа; коэффициент Пуассона  $\mu=0,35$ ; плотность  $\rho = 18,0$  кН/м<sup>3</sup>, сцепление  $C = 4,7$  кПа (4,7 кН/м<sup>2</sup>), угол внутреннего трения  $\varphi = 26^{\circ}$ .

На основании проведенных расчетов при расстановке лесовозов получены следующие данные по определению максимальных касательных напряжений.

На рис.5. показана схема расстановки двух лесовозов и нагрузки, действующей от колес на покрытие.

Схема деформирования дорожной одежды приведена на рис. 6.

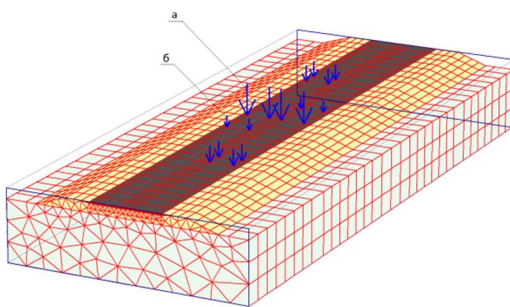


Рис. 5. Расчетная схема метода конечных элементов: а – большими стрелками показано положение наиболее нагруженной задней оси лесовоза; б – маленькими стрелками показано положение всех остальных, менее нагруженных осей

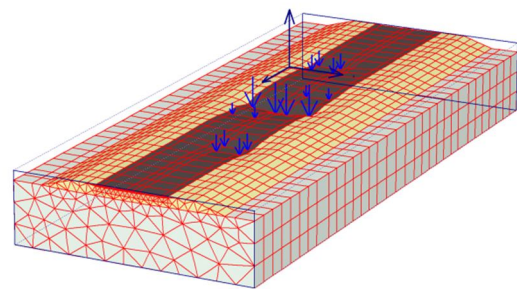


Рис. 6. Схема деформирования конструкции дорожной одежды

Схема деформирования дорожной одежды в опасном сечении приведена на рис. 7. Изолинии касательных напряжений в конструкции представлены на рис.8.

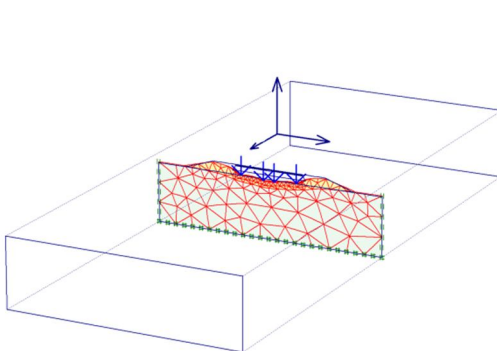


Рис. 7. Схема деформирования дорожной одежды в опасном сечении

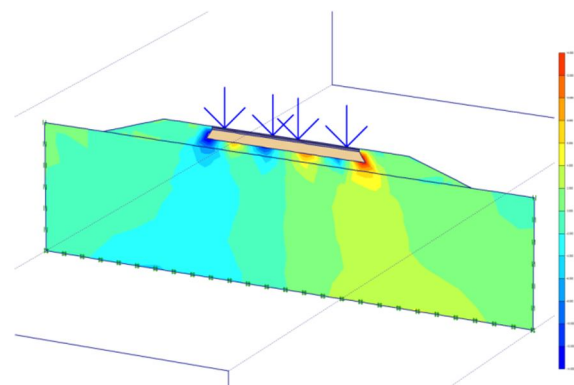


Рис. 8. Изолинии касательных напряжений в конструкции

На основании построенных изолиний касательные напряжения точек полупространства от нагрузки двух лесовозных автопоездов приведены на рис. 9.

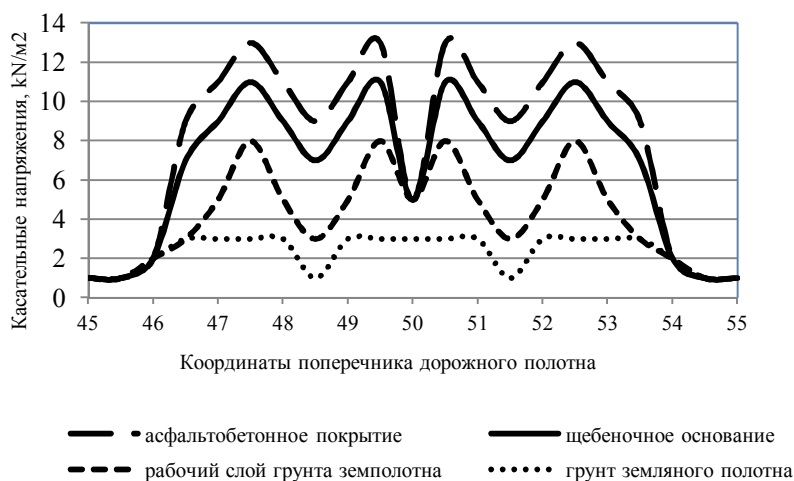


Рис. 9. График максимальных касательных напряжений от нагрузки на вторую ось лесовозных автопоездов

Анализ рис. 9. показывает, что наибольшие касательные напряжения имеют место под колесами второй оси лесовозного автопоезда. Касательные напряжения от действия нагрузки под колесами второй оси тягача на левой и правой полосе движения в асфальтобетонном покрытии составляют  $\tau_{\phi 1} = 0,013$  МПа, на краях покрытия и между колесами –  $\tau_{\phi 1} = 0,009$  МПа. Соответственно касательные напряжения на кромке покрытия в 1,4 раза меньше, чем под колесами перегруженного тягача. По глубине конструкции дорожной одежды касательные напряжения уменьшаются. Так, в щебеночном основании на глубине 0,12 м от поверхности покрытия касательные напряжения составляют  $\tau_{\phi 2} = 0,011$  МПа под колесами второй оси лесовозного автопоезда. На уровне рабочего слоя грунта земляного полотна на глубине 0,84 м от поверхности покрытия касательные напряжения активного напряжения сдвига составляют  $\tau_{\phi 3} = 0,008$  МПа.

По толщине конструкции дорожной одежды с увеличением глубины от поверхности покрытия касательные напряжения уменьшаются. Касательные напряжения на уровне щебеночного основания уменьшаются в 1,2 раза, на уровне верха рабочего слоя земляного полотна – в 1,6 раза, в подошве земляного полотна – в 4,3 раза.

По данным расчета конструкции дорожной одежды по сдвигу в грунте земляного полотна по [2], расчетное активное напряжение сдвига равно  $\tau_{\phi, \text{расч}} = 0,0123$  МПа, а предельная величина активного напряжения сдвига  $\tau_{\text{пр, расч}} = 0,0148$  МПа.

Коэффициент прочности по сдвигу в грунте земляного полотна расчетным методом

составляет: 
$$K_{\text{пр}} = \frac{\tau_{\text{пред}}}{\tau_{\phi, \text{расч}}} = \frac{0,0148}{0,0123} = 1,20.$$

Фактические значения касательных напряжений на уровне рабочего слоя грунта земляного полотна, рассчитанные по расчетному комплексу «PLAXIS», составляют  $\tau_{\phi, \text{эксп}} = 0,008$  МПа, что меньше, чем расчетные по [2]  $\tau_{\phi, \text{расч}} = 0,0123$  МПа. Коэффициент прочности по сдвигу в грунте земляного полотна, полученный в сравнении по расчетному комплексу «PLAXIS» и отраслевым нормам, составляет:

$$K_{\text{пр}} = \frac{\tau_{\phi, \text{расч}}}{\tau_{\phi, \text{эксп}}} = \frac{0,0123}{0,008} = 1,53.$$



Относительно предельного состояния сдвига коэффициент прочности составляет  $K_{пр} = 1,85$ , что показывает большой запас прочности по сдвигу в грунте земляного полотна в сравнении с касательными напряжениями, возникающими от построенной модели, и расчетами по отраслевым нормам [2].

### Выводы

1. Анализ расчета касательных напряжений по расчетному комплексу «PLAXIS» показал: а) максимальные касательные напряжения возникают под колесами второй оси автопоезда; б) влияние соседних колес автопоездов, расположенных на разных полосах движения, не выявлено; в) по толщине конструкции дорожной одежды с увеличением глубины от поверхности покрытия касательные напряжения уменьшаются. На уровне щебеночного основания, глубиной 12 см от покрытия – в 1,2 раза, в рабочем слое земляного полотна, на глубине 84 см от покрытия – в 1,6 раза, в подошве земляного полотна на глубине 144 см – в 4,3 раза.

2. Касательные напряжения, полученные по расчетному комплексу «PLAXIS», для неблагоприятной расстановки лесовозных автопоездов оказались в 1,53 раза меньше, чем рассчитанные по отраслевым нормам [2].

3. Касательные напряжения, полученные по расчетному комплексу «PLAXIS», в сравнении с предельным значением активного напряжения сдвига, оказались в 1,85 раза меньше, что показывает большой запас прочности по сдвигу в грунте земляного полотна.

### Список литературы

1. Радовский, Б. С. Проектирование дорожных одежд для движения большегрузных автомобилей / Б. С. Радовский, А. С. Супрун, И. И. Козаков. – Киев: Будивэльник, 1989. – 168 с.
2. Инструкция по проектированию нежестких дорожных одежд ОДН 218.046-01. – М.: Гос. служба дор. хоз-ва м-ва транспорта РФ, 2001. – 145 с.
3. Вайнштейн, В.М. Разработка конструкции и технологии строительства лесовозных дорог с использованием отсевов дробления известняков (для условий РМЭ): автореф. дисс. ... канд. техн. наук / В. М. Вайнштейн. – Йошкар-Ола, 2002.–22 с.
4. Ицкович, Г.М. Сопротивление материалов / Г.М.Ицкович. – М.: Высш. шк., 1960. – 530 с.
5. Александров, А.В. Основы теории упругости и пластичности: Учебник для строит. спец. вузов / А.В.Александров, В.Д.Потапов. – М.: Высш.шк., 1990. – 400 с.: ил.
6. Вайнштейн, Е. В. Технология строительства лесовозных дорог из щебеночно-мастичных асфальтобетонов с отсевами дробления известняков: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / Е. В. Вайнштейн. – Йошкар-Ола, 2010.–16 с.

Статья поступила в редакцию 04.06.12.

Работы выполнены в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ ФГБОУ ВПО «Марийский государственный технический университет» на 2012 год (шифр проекта 5.3516.2011, № 26).

*E. V. Vainshtein, V. M. Vainshtein, P. A. Nekhoroshkov*

### RESEARCH OF STRAIN-STRESS STATE OF ROAD STRUCTURE OF FOREST MOTOR ROAD BY TANGENTIAL STRESS WITH THE USE OF FINITE-ELEMENT METHOD

*Research results of strain-stress state of road structure of forest motor road by tangential stress are presented. A finite-element method with the use of computer simulation in software solution «PLAXIS» was used in the course of research. Characteristics of strain-stress state of road structure of forest motor road are determined with the help of two timber trucks placed at the traffic lanes. Analytical data make it possible to compare the results with the road facilities trade standards data of flexible pavement calculation.*

**Key words:** rubble and mastic asphalt concrete, timber truck, road structure.

*ВАЙНШТЕЙН Виктор Мейлехович* – кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных дорог Поволжского государственного технологического университета (Россия, Йошкар-Ола). Область научных интересов – рациональное лесопользование, дорожно-строительные материалы и технологии. Автор 36 публикаций.

E-mail: VajnshtejnVM@volgatech.net

*НЕХОРОШКОВ Петр Аркадьевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных дорог Поволжского государственного технологического университета (Россия, Йошкар-Ола). Область научных интересов – рациональное лесопользование, транспорт леса, оптимизация и моделирование транспорта леса, геоинформационные и логистические системы. Автор 38 публикаций.

E-mail: NehoroshkovPA@volgatech.net

*ВАЙНШТЕЙН Евгений Викторович* – кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных дорог Поволжского государственного технологического университета (Россия, Йошкар-Ола). Область научных интересов – рациональное лесопользование, дорожно-строительные материалы и технологии. Автор 16 публикаций.

E-mail: VajnshtejnEV@volgatech.net