

С. В. Красковский, мл. науч. сотрудник; П. А. Лыщик, канд. техн. наук, доцент;
С. С. Макаревич, канд. техн. наук, доцент

РАСЧЕТ И ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕСНЫХ ДОРОГ, АРМИРОВАННЫХ ОБЪЕМНЫМИ ГЕОРЕШЕТКАМИ

Theoretical preconditions of reinforcing by solid geolattices of timber roads constructions are considered. The method of calculation and optimization of the reinforced road construction is developed. The method allows to establish optimum parameters of a solid geolattice and its most expedient arrangement on depth of a construction. At such arrangement the greatest equivalent pressure for concrete type of a soil in view of its settlement humidity and total number of appendices of settlement loading are localized. It is shown that at identical height the best characteristics the solid geolattice with the least size of cells possesses.

Введение. Общая протяженность дорог, используемых на вывозке леса, составляет 116,1 тыс. км, из них дорог круглогодичного действия – около 14,9 тыс. км. В пределах границ предприятий лесного комплекса 90,6% занимают грунтовые дороги, в том числе 9,5% – дороги общего пользования.

Под воздействием высоких нагрузок от лесовозного транспорта конструкции лесных дорог имеют свойство преждевременно разрушаться, на их поверхности образуются волны, колеи, выбоины. Скорости движения уменьшаются, возрастают сопротивление движению и расход ГСМ, в результате снижается производительность труда на вывозке леса. Для обеспечения требуемой надежности дорожной конструкции, придания ее эксплуатационным показателям требуемых значений необходимо принятие специальных технических решений, в частности применение объемных георешеток (далее – георешеток).

Сдвиговая прочность грунта под воздействием лесовозного транспорта. Проведенные под руководством проф. Казарновского В. Д. исследования показали, что в грунтовых дорожных конструкциях критерий сдвигоустойчивости является основным критерием прочности. Это обусловлено тем, что разрушение таких дорожных конструкций связано с накоплением остаточных деформаций сдвига. Рассмотрим теоретическую сторону сдвиговых процессов в грунте.

Для оценки прочности грунтовых дорожных конструкций воспользуемся теорией Мора – Кулона, которая описывает предельное состояние грунта при сдвиге. В соответствии с данной теорией предельное состояние в конкретной точке наступит при равенстве эквивалентного $\sigma_{\text{эkv}}$ и предельного $\sigma_{\text{пр}}$ напряжений, т. е. при

$$\sigma_{\text{эkv}} = \sigma_{\text{пр}}. \quad (1)$$

С учетом зависимости, приведенной в работе [1], выражение (1) можно записать так:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = (\sigma_1 + \sigma_3 + 2H) \sin \varphi_w, \quad (2)$$

где σ_1 , σ_3 – соответственно наибольшие и наименьшие нормальные напряжения в рас-

сматриваемой точке, МПа; $H = c_w / \text{tg} \varphi_w$ – давление связности, МПа; c_w , φ_w – соответственно сцепление (МПа) и угол внутреннего трения грунта, зависящие от его плотности и влажности W .

Разделив $\sigma_{\text{эkv}}$ и $\sigma_{\text{пр}}$, т. е. левую и правую части выражения (2), на нагрузку q , получим

$$S_{\text{эkv}} = S_{\text{пр}}. \quad (3)$$

Применив к грунтам теорию предельного равновесия при сдвиге, мы получили следующие результаты [1]. Под воздействием автомобильной нагрузки с параметрами $q = 0,6$ МПа и $R = 0,185$ м, соответствующей расчетному автомобилю группы А, в дорожной конструкции на определенной глубине z наступает предельное состояние. Например, в дорожной конструкции из супеси легкой с расчетной влажностью $W_p = 0,6$ при суммарном числе приложений расчетной нагрузки $\sum N = 10^3$ предельное состояние наступает в точке η_1 (рис. 1), соответствующей глубине $z_{\text{пр1}} = 0,067$ м, и прекращается в точке η_2 ($z_{\text{пр2}} = 0,952$ м).

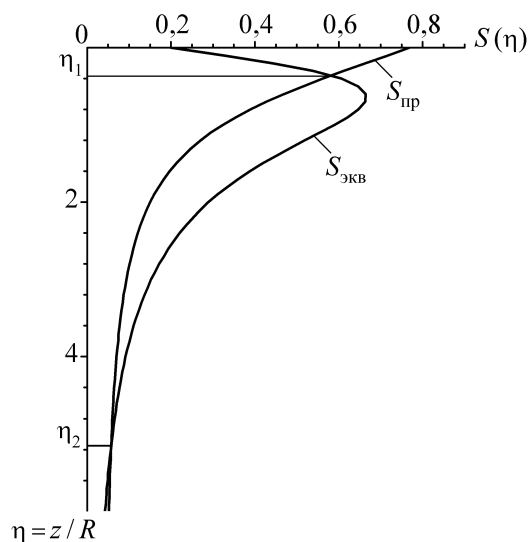


Рис. 1. Предельное состояние грунта при сдвиге

Характерно, что области, в которых грунт находится в предельном состоянии при сдвиге, наблюдаются у всех типов грунтов (табл. 1). При

этом $z_{пр1} \rightarrow 0$ с увеличением $\sum N$ и W_p .

Таблица 1

Глубина наступления предельного состояния для различных грунтов $z_{пр1}$, см

Песок	Супесь	Суглинок и глина	Гравийный материал
5,8–10,0	0,8–11,0	0–8,4	10,1–18,7

Предельное состояние грунта приводит к накоплению остаточных деформаций в дорожной конструкции и способствует образованию колеи.

Напряженное состояние конструкции лесной дороги, армированной объемной георешеткой. Предотвратить или снизить интенсивность накопления остаточных деформаций в грунтовой дорожной конструкции рекомендуется за счет применения георешетки. Георешетку необходимо закладывать на глубине, соответствующей предельным сдвигающим напряжениям, перекрывая при этом область наиболее опасных напряжений сдвига. Расчетная схема дорожной конструкции с георешеткой показана на рис. 2.

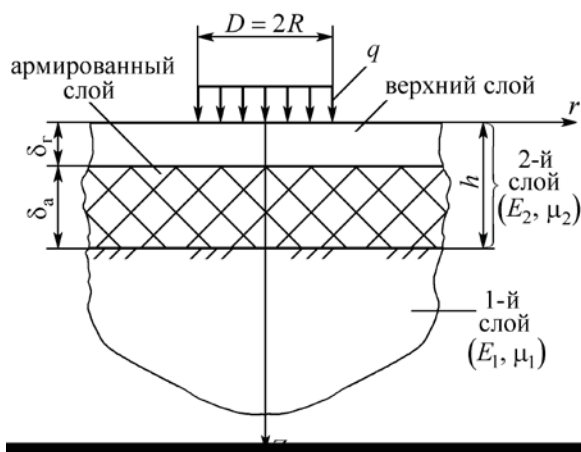


Рис. 2. Расчетная схема армированной конструкции

Для определения напряжений и перемещений приведем эту конструкцию к двухслойной. Нижним (первым) слоем будем считать подстилающий грунт, а вторым слоем толщиной h – слой, состоящий из армированного слоя грунта толщиной δ_a и верхнего слоя грунта толщиной δ_r . Средневзвешенные модуль упругости и коэффициент Пуассона второго слоя определим по формулам

$$E_2 = \frac{E_a \delta_a + E_r \delta_r}{\delta_a + \delta_r}; \quad (4)$$

$$\mu_2 = \frac{\mu_a \delta_a + \mu_r \delta_r}{\delta_a + \delta_r}, \quad (5)$$

где E_a , E_r – модули упругости соответственно армированного и верхнего слоев грунта, МПа; μ_a , μ_r – коэффициенты Пуассона соответственно армированного и верхнего слоев грунта.

Отметим, что даже значительные отклоне-

ния в величине μ сравнительно мало сказываются на результатах расчета [2]. Поэтому можно принять $\mu_1 = \mu_2$ и равными коэффициенту Пуассона подстилающего грунта.

Напряжения и перемещения в такой двухслойной системе наиболее просто определяются с использованием функции напряжений Эри $\varphi = \varphi(r, z)$ [3]. Примем функцию φ , предложенную в работе [4], тогда для первого слоя

$$\varphi_1 = \int_0^{\infty} (A + B(\alpha(\eta - 1) + 2\mu_1)) \times e^{-\alpha\eta} J_0(\rho\alpha) d\alpha, \quad (6)$$

для второго слоя

$$\varphi_2 = \int_0^{\infty} (A + B(\alpha(\eta - 1) + 2\mu_2)) \times e^{-\alpha\eta} J_0(\rho\alpha) d\alpha + \int_0^{\infty} (C_2((1 - 2\mu_2)(1 - e^{-2\lambda}) + \int_0^{\infty} + \lambda(1 + e^{-2\lambda})) + D_2(2\mu_2(1 + e^{-2\lambda}) - \lambda(1 - e^{-2\lambda}))) e^{-\alpha\eta} J_0(\rho\alpha) d\alpha, \quad (7)$$

где A , B , C_2 , D_2 – функции, зависящие от параметра интегрирования α ; $\eta = z/h$, $\rho = r/h$, $\lambda = \alpha(1 - \eta)$; μ_1 , μ_2 – коэффициенты Пуассона соответственно первого и второго слоев; $J_0(\rho\alpha)$ – функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

По известным зависимостям через функцию Эри [3] можно записать напряжения и перемещения для первого и второго слоев [4].

В выражения для определения напряжений и перемещений входят функции A , B , C_2 , D_2 , которые определяются из граничных условий:

на поверхности при $z = 0$

$$\sigma_{z(2)} = \begin{cases} -q & \text{при } r < R, \\ 0 & \text{при } r > R \end{cases}, \quad \tau_{rz(2)} = 0;$$

на границе слоев при $z = h$

$$w_1 = w_2; \quad u_1 = u_2,$$

где w_1 , w_2 – вертикальные перемещения соответственно первого и второго слоев; u_1 , u_2 – горизонтальные перемещения соответственно первого и второго слоев.

При этом равномерно распределенную по площади круга нагрузку от колеса удобно представить в виде интеграла от функции Бесселя:

$$q(r) = q\beta \int_0^{\infty} J_1(\beta\alpha) J_0(\rho\alpha) d\alpha,$$

где $\beta = R/h$; $J_1(\beta\alpha)$ – функция Бесселя первого рода первого порядка.

Наибольшие нормальные напряжения σ_z ,

σ_r и σ_θ будут возникать в точках, лежащих на оси Z , т. е. при $\rho = r/h = 0$. При этом ввиду осевой симметрии $\sigma_r = \sigma_\theta$.

Переходя к пределу при $\rho \rightarrow 0$, получим зависимости для определения напряжений в слоях конструкции в точках, лежащих на оси Z .

Для первого слоя

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{z(1)} &= -q\beta \int_0^\infty \frac{k_4 + k_3(1 - \alpha(1 - \eta))}{k_1 k_4 + k_2 k_3} \times \\ &\times e^{-\alpha\eta} J_1(\beta\alpha) d\alpha, \\ \sigma_{r(1)} &= \frac{q\beta}{2} \int_0^\infty \frac{k_4 - k_3(1 + 2\mu_1 + \alpha(1 - \eta))}{k_1 k_4 + k_2 k_3} \times \\ &\times e^{-\alpha\eta} J_1(\beta\alpha) d\alpha; \end{aligned} \right\} (8)$$

для второго слоя

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{z(2)} &= -q\beta \int_0^\infty \frac{s_1 k_4 + s_2 k_3}{k_1 k_4 + k_2 k_3} e^{-\alpha\eta} J_1(\beta\alpha) d\alpha, \\ \sigma_{r(2)} &= -\frac{q\beta}{2} \int_0^\infty \frac{s_4 k_3 - s_3 k_4}{k_1 k_4 + k_2 k_3} e^{-\alpha\eta} J_1(\beta\alpha) d\alpha, \end{aligned} \right\} (9)$$

где k_i, s_i – функции параметра интегрирования α .

Касательные напряжения $\tau_{rz(1)}, \tau_{rz(2)}$ в точках, лежащих на оси Z , равны нулю. Следовательно, нормальные напряжения в этих точках будут главными напряжениями.

Будем считать главные нормальные сжимающие напряжения положительными, как это принято в работе [2]. Тогда для первого слоя получим, $\sigma_{1(1)} = -\sigma_{z(1)}$, $\sigma_{3(1)} = -\sigma_{r(1)}$, для второго слоя $\sigma_{1(2)} = -\sigma_{z(2)}$, $\sigma_{3(2)} = -\sigma_{r(2)}$. Затем, рассчитав по формулам (8) и (9) главные напряжения, можно определить эквивалентные и предельные напряжения по формуле (2) и проанализировать напряженное состояние грунтовой дорожной конструкции при заданных ее основных параметрах и характеристиках слоев.

Расчет и оптимизация армированных конструкций лесных дорог. Расчет и оптимизацию проведем на примере грунтовой дороги из супеси легкой с учетом следующих данных. На дорожную конструкцию действует нагрузка с параметрами $q = 0,6$ МПа и $R = 0,185$ м, при этом $W_p = 0,6$. Характеристики супеси легкой в зависимости от различного значения $\sum N$ взяты из работы [5] и приведены в табл. 2.

Толщина верхнего слоя грунта δ_r , или глубина закладки георешетки, практически соответствует глубине наступления предельного состояния. Ниже следует слой грунта, армированный георешеткой «Белгеосот» с толщиной стенок 1,5 мм и модулем упругости материала георешетки $E_p = 1193$ МПа. Размер ячеек принимался равным $\times 10, 20 \times 20, 30 \times 30, 40 \times 40$ см. Высота георешетки принималась

равной 10, 15 и 20 см.

При этом сцепление в армированном слое грунта характеризуется параметром c_0 , а угол внутреннего трения грунта – параметром ϕ_0 . По формулам, приведенным в работах [6, 7], получены характеристики армированного слоя грунта (табл. 2).

Таблица 2

Характеристики слоев дорожной конструкции

Характеристика	$\sum N$				
	1	10^3	10^4	10^5	10^6
<i>Неармированные верхний и нижний слой грунта</i>					
E_r , МПа	56				
c_w , МПа	0,014	0,012	0,008	0,006	0,005
ϕ_w	36	24	18	14	12
<i>Армированный слой грунта (размер ячейки 10×10 см)</i>					
E_a , МПа	90,1				
c_0 , МПа	0,482	0,480	0,476	0,474	0,473
ϕ_0	35,2	23,4	17,5	13,6	11,6
<i>Армированный слой грунта (размер ячейки 20×20 см)</i>					
E_a , МПа	73,1				
c_0 , МПа	0,248	0,246	0,242	0,240	0,239
ϕ_0	35,6	23,7	17,7	13,8	11,8
<i>Армированный слой грунта (размер ячейки 30×30 см)</i>					
E_a , МПа	67,4				
c_0 , МПа	0,170	0,168	0,164	0,162	0,161
ϕ_0	35,7	23,8	17,8	13,9	11,9
<i>Армированный слой грунта (размер ячейки 40×40 см)</i>					
E_a , МПа	64,5				
c_0 , МПа	0,131	0,129	0,125	0,123	0,122
ϕ_0	35,8	23,8	17,9	13,9	11,9

Запишем эквивалентные $\sigma_{\text{экв}}$ и предельные $\sigma_{\text{пр}}$ напряжения в каждом слое, отнесенные к нагрузке q :

эквивалентные напряжения для i -го слоя

$$S_{y\delta(a)} = q^{-1}(\sigma_{1(i)} - \sigma_{3(i)}), \quad (10)$$

где $i = 1, 2$;

предельные напряжения для верхнего и нижнего слоев грунта

$$S_{\text{пр}(i)} = q^{-1}(\sigma_{1(i)} + \sigma_{3(i)} + 2H) \sin \phi_w; \quad (11)$$

для армированного слоя грунта

$$S_{\text{r}\delta(a)} = q^{-1}(\sigma_{1(2)} + \sigma_{3(2)} + 2H_0) \sin \phi_0. \quad (12)$$

В качестве примера на рис. 3, а для георешетки с размером ячеек 20×20 см и высотой 10 см построены графики изменения $S_{\text{экв}}$ и $S_{\text{пр}}$.

Учитывая, что с увеличением глубины напряжения быстро уменьшаются и при $z_0 = 2$ м

не превышают 1,5% от величины q , упругая зона в подстилающем грунте ограничена глубиной 2 м (на рис. 3 показана не полностью).

Анализ графиков показывает, что на глубине от z_a до z_B часть нижнего слоя грунта находится в предельном состоянии, и в ней будут возникать пластические деформации.

Однако достижение предельного состояния в нижнем слое грунта не является предельным в целом для всей дорожной конструкции. Появление пластических деформаций компенсируется увеличением напряжений в слоях, работающих в упругой стадии. Так, напряжения $S_{э\kappa\text{в}}$ в пластической зоне AA_1B (рис. 3, а) должны компенсироваться увеличением напряжений $S_{э\kappa\text{в}}$ в верхнем, армированном и нижнем (на глубине от z_B до z_0) слоях грунта. Сумма напряжений $S_{э\kappa\text{в}}$ в зоне AA_1B будет характеризоваться площадью этой области ω_n . Соответственно, сумма напряжений $S_{э\kappa\text{в}}$ в слоях, где возникают только упругие деформации, будет характеризоваться площадями эпюр этих напряжений: в верхнем слое грунта – ω_r , в армированном слое грунта – ω_a , в нижнем слое грунта – ω_1 . В результате компенсации напряжений значения напряжений $S_{э\kappa\text{в}}$ в этих областях увеличатся. Причем, как и в любой статически неопределимой конструкции, элементы с большей жесткостью берут на себя большую нагрузку, а элементы с меньшей жесткостью – меньшую нагрузку. При компенсации напряжений слой грунта, находящийся в упругой зоне, берет на себя дополнительные напряжения пропорционально их модулям упругости, т. е. если ω_r и ω_1 увеличатся в n раз, то ω_a увеличится в nE_a/E_r раз.

Из условия равенства компенсирующих напряжений и напряжений, попавших в пластиче-

скую область, можно определить коэффициент компенсации n :

$$n = \frac{\omega_n + \omega_r + \omega_a + \omega_1}{\omega_r + \omega_a (E_a / E_r) + \omega_1}. \quad (13)$$

С достаточной точностью площади ω_n , ω_r , ω_a и ω_1 можно вычислить с помощью формулы прямоугольников или трапеций. Для нашего случая n составляет 1,34.

В нижнем слое грунта на глубине от z_a до z_B напряжения $S_{э\kappa\text{в}}$ при достижении значений, ограниченных кривой AB , дальше увеличиваться не могут, поэтому будут увеличиваться напряжения в упругих зонах нижнего, верхнего и армированного слоев с учетом n , т. е.

$$S_{\text{y}\acute{\epsilon}\text{a}(i)}^* = nS_{\text{y}\acute{\epsilon}\text{a}(i)}; \quad S_{\text{y}\acute{\epsilon}\text{a}(a)}^* = n(A_a / A_a)S_{\text{y}\acute{\epsilon}\text{a}(a)}. \quad (14)$$

Учитывая, что в вышеуказанных слоях возрастут напряжения σ_1 и σ_3 , в этих слоях изменятся и значения напряжений $S_{\text{пр}}$. Для верхнего и нижнего слоев грунта получим

$$S_{\text{i}\delta(i)}^* = q^{-1}((\sigma_{1(i)} + \sigma_{3(i)})n + 2H) \sin \varphi_w, \quad (15)$$

в армированном слое грунта

$$S_{\text{i}\delta(a)}^* = q^{-1}((\sigma_{1(2)} + \sigma_{3(2)})n \frac{A_a}{A_a} + 2H_0) \sin \varphi_0. \quad (16)$$

На рис. 3, б построены графики кривых $S_{\text{y}\acute{\epsilon}\text{a}}^*$ и $S_{\text{i}\delta}^*$. Как видим, $S_{\text{y}\acute{\epsilon}\text{a}}^*$ в верхнем и армированном слоях грунта по величине не превышают $S_{\text{i}\delta}^*$ в этих слоях (рис. 3, б). Это означает, что дорожная конструкция будет работать удовлетворительно.

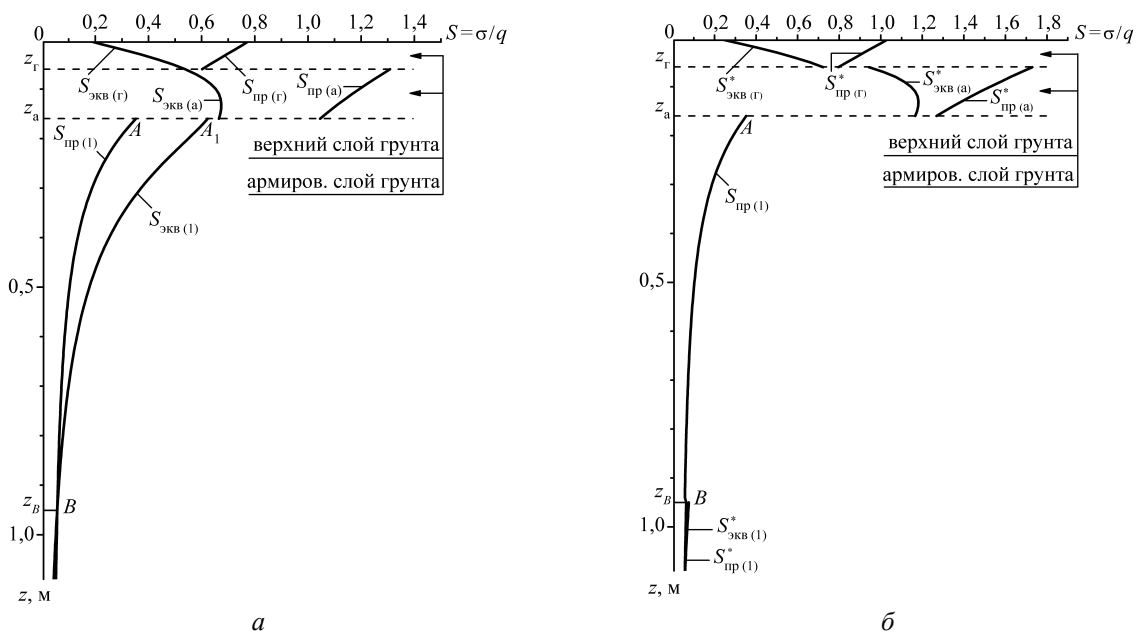


Рис. 3. Графики изменения $S_{э\kappa\text{в}}$ и $S_{\text{пр}}$ в дорожной конструкции, армированной георешеткой «Белгеосот» с размером ячеек 20×20 см и высотой 10 см: а – в предположении, что все слои работают в упругой стадии; б – с учетом того,

что часть нижнего слоя грунта на участке от z_a до z_B находится в предельном состоянии