

А.С. Миляев

С.-Петербургская государственная лесотехническая академия

Миляев Александр Сергеевич родился в 1936 г., окончил в 1959 г. Ленинградское высшее военное инженерно-техническое училище ВМФ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и строительной механики С.-Петербургской государственной лесотехнической академии, заслуженный работник высшей школы РФ. Имеет более 150 научных работ в области механики деформируемого твердого тела, в том числе по механике силового взаимодействия конструкций и сооружений с грунтом при статических и динамических нагрузках.
E-mail: icffi@home.ru.



ПРОЧНОСТНЫЕ РАСЧЕТЫ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕСОВОЗНЫХ ДОРОГ С НЕЖЕСТКИМИ ПОКРЫТИЯМИ ПРИ ДВИЖЕНИИ ГУСЕНИЧНЫХ МАШИН

Представлена методика прочностных расчетов конструкций лесовозных дорог с нежесткими покрытиями, по которым могут передвигаться тяжелые гусеничные машины. Она соответствует методологии, принятой в строительных нормах и правилах, и ориентирована на применение численного метода конечных элементов. Дан пример назначения минимальных размеров расчетной области для прямолинейных участков дорог.

Ключевые слова: лесовозные дороги, тяжелые гусеничные машины, прочностные расчеты, метод конечных элементов.

В настоящее время лесовозные дороги с нежесткими покрытиями проектируют по нормам [1, 2, 4, 5], в которых конструкцию дороги подбирают по приведенному модулю деформации с помощью номограмм в зависимости от параметра h/D , где h – толщина покрытия, D – диаметр круга, площадь которого равна площади овального отпечатка одного колеса автомобиля. Номограммы составлены на основе аналитического решения осесимметричной задачи о напряженно-деформированном состоянии (НДС) невесомого упругого слоистого полупространства при действии статической поверхностной нагрузки (модифицированная задача Буссинеска). Эта расчетная схема не соответствует трехмерному НДС конструкции дороги, возникающему при движении гусеничных машин. Используемая методика не позволяет подобрать конструкцию дороги, не может быть определен параметр h/D , поскольку отпечаток гусеницы имеет форму длинного узкого прямоугольника.

Целью нашей статьи является разработка методики прочностных расчетов конструкций лесовозных дорог с нежесткими покрытиями, по которым могут передвигаться тяжелые гусеничные машины. Она соответствует методологии, принятой в строительных нормах и правилах, и ориентирована на применение численного метода конечных элементов.

Постановка задачи. На слоистом грунтовом массиве располагается дорожное полотно лесовозной дороги, по которой должны передвигаться тяжелые гусеничные машины. Требуется определить НДС конструк-

ции дороги при движении по ней машины НГ-60, пренебрегая динамичностью воздействия на покрытие.

На рис.1 представлены поперечный и продольный разрезы расчетной области, включающей серповидное гравийно-песчаное покрытие средней толщиной $h_{rc} = 0,25$ м, песчаную насыпь толщиной $h_{bnk} = 0,5$ м, три верхних слоя грунтового массива толщиной h_1, h_2, h_3 (см. таблицу), а также эквивалентный слой грунта толщиной h_{eqv} , моделирующий влияние нижних слоев грунтового массива до глубины активной толщи $H_a = 11$ м.

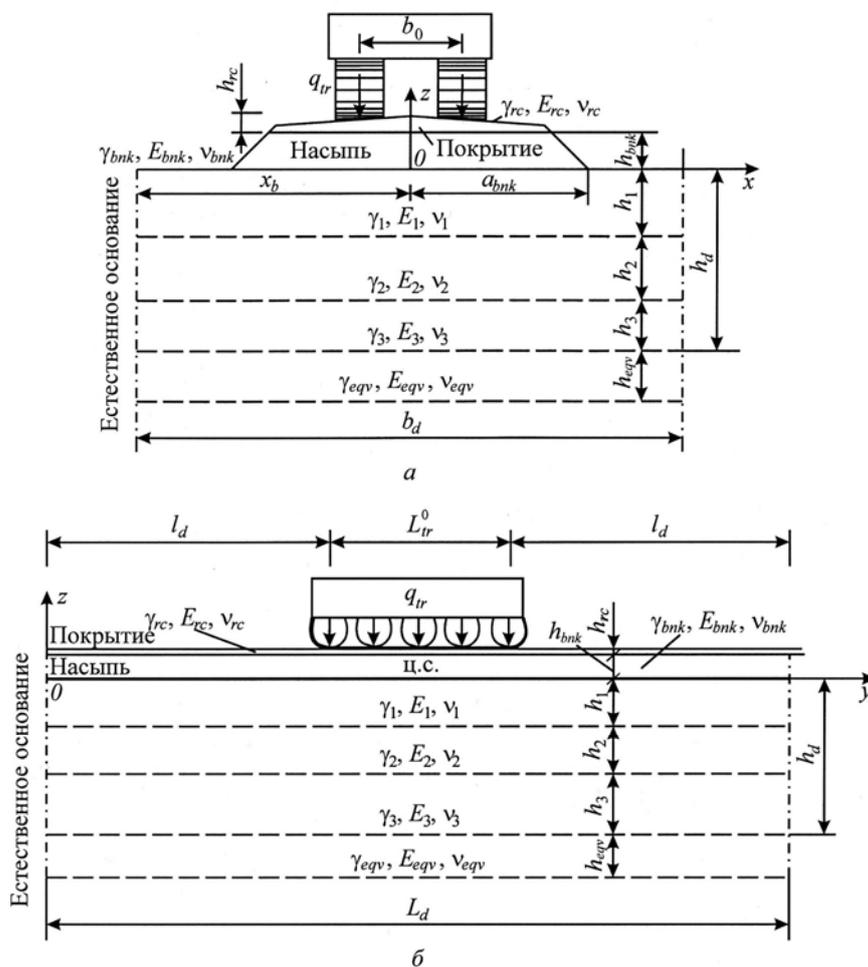


Рис. 1. Разрезы расчетной области: *а* – поперечный, *б* – продольный; a_{bnk} – полуширина основания насыпи, $a_{bnk} = 3$ м; x_b – расстояние по оси Ox от точки O до границы расчетной области, $x_b = 9$ м; b_d, h_d, L_d – ширина, глубина и длина расчетной области, $b_d = 18$ м, $h_d = 3,5$ м, $L_d = 30$ м; γ_k, E_k, ν_k – удельный вес, модуль деформации и коэффициент Пуассона грунта слоев (см. таблицу); b_0 – расстояние между гусеницами НГ-60, $b_0 = 2,6$ м; L_{tr}^0 – длина следа гусеницы в продольном направлении, $L_{tr}^0 = 5$ м; q_{tr} – нагрузка на гусеницы, $q_{tr} = 59$ кН/м; l_d – расстояние от следов гусениц в продольном направлении до границы расчетной области, $l_d = 12,5$ м; ц.с. – центр сил тяжести НГ-60

Естественное основание сложено горизонтальными слоями грунта, параметры которых представлены в таблице.

В целях сокращения числа конечных элементов в расчетной модели часть грунтового массива в пределах активной толщи (4–9-й слои) заменена

Параметры грунтового массива

№ слоя	h_k , м	γ_k , кН/м ³	E_k , МПа	ν_k	№ слоя	h_k , м	γ_k , кН/м ³	E_k , МПа	ν_k
1	0,9	18,1	30	0,30	6	1,0	19,3	14	0,39
2	1,2	20,0	26	0,33	7	1,1	22,2	33	0,32
3	1,4	20,9	14	0,35	8	0,8	19,3	20	0,30
4	1,1	18,5	8	0,40	9	1,7	19,2	18	0,30
5	1,9	21,3	20	0,35					

эквивалентным слоем h_{eqv} , моделирующим реакцию этих слоев. Учтено, что в обычных условиях инженерно-геологических изысканий по трассе дороги глубина шурфов и скважин не превышает 3...5 м, следовательно, наиболее точные сведения о физико-механических свойствах естественного основания относятся к верхним слоям.

Параметры эквивалентного слоя грунта определяем следующим образом. По методике СНиП [6] вычисляем значение активной толщи основания $H_a = \min z$, при которой $\sigma_{z,tr}(z) / \sigma_{z,g}(z) \leq \delta_n$, где $\sigma_{z,g}$, $\sigma_{z,tr}$ – вертикальные напряжения от собственного веса грунта и транспорта на глубине z ; $\delta_n = 0,2$ для грунтов с параметрами, указанными в таблице. В результате расчетов и сравнения вертикальных напряжений $\sigma_{z,g}$, $\sigma_{z,tr}$ находим $H_a = 11$ м.

Приведенные значения удельного веса γ_{red} , модуля деформации E_{red} и коэффициента Пуассона ν_{red} 4–9-го слоев грунтового массива (см. таблицу) вычисляем как средневзвешенные по формулам ($H_0 = \sum_{k=4}^9 h_k = 7,5$ м):

$$\begin{aligned} \gamma_{red} &= \sum \gamma_k h_k / H_0 = 20,35 \text{ кН/м}^3; \\ E_{red} &= \sum E_k h_k / H_0 = 15,66 \text{ МПа}; \\ \nu_{red} &= \sum \nu_k h_k / H_0 = 0,34. \end{aligned}$$

Эквивалентный модуль деформации E_{eqv} эквивалентного слоя естественного основания определяем из условия, чтобы осадка 4–9-го слоев грунтового массива Δ_{red} под действием единичной силы равнялась осадке Δ_{eqv} эквивалентного слоя:

$$\Delta_{red} = H_0 / (E_{red} A_{fe}); \Delta_{eqv} = h_{eqv} / (E_{eqv} A_{fe}), \quad (1)$$

где A_{fe} – площадь основания КЭ, используемого для моделирования эквивалентного слоя.

Приравняв Δ_{red} и Δ_{eqv} , находим: $E_{eqv} = E_{red} / 6 = 2,61$ МПа. Значения γ_{eqv} и ν_{eqv} принимаем равными γ_{red} и ν_{red} .

Считаем глубину расчетной области h_d равной сумме толщин трех верхних слоев грунта естественного основания, $h_d = 3,5$ м. Назначаем толщину эквивалентного слоя грунта h_{eqv} равной половине высоты объемного КЭ, используемого в расчете: $h_{eqv} = 0,5$ м.

Физико-механические характеристики песчаной насыпи и покрытия принимаем следующими: $\gamma_{bnk} = 17 \text{ кН/м}^3$, $E_{bnk} = 20 \text{ МПа}$, $\nu_{bnk} = 0,35$; $\gamma_{rc} = 19 \text{ кН/м}^3$, $E_{rc} = 65 \text{ МПа}$, $\nu_{rc} = 0,3$.

Метод исследования. Задачу решаем численно – методом конечных элементов в перемещениях. Строим геометрическую конечно-элементную модель (твердотельную КЭ-модель) конструкции дороги, задаем физико-механические свойства конечных элементов (КЭ), начальные и граничные условия, внешние силы, действующие на КЭ, формируем разрешающую систему уравнений поставленной задачи, строим ее решение в узлах КЭ-модели, вычисляем все величины, характеризующие НДС модели, результаты расчетов формируем и выводим на бумажные и электронные носители информации.

Начало глобальной прямоугольной системы координат $Oxuz$ помещаем на левой границе расчетной области в ее плоскости симметрии, ось Ox направляем поперек дороги, Oy – вдоль оси дороги, Oz – вверх (см. рис. 1).

Сетку узлов КЭ на поверхности покрытия в направлении оси Ox принимаем с шагами 1,35; 0,70; 0,95; 0,95; 0,70; 1,35 м, что позволяет разместить гусеничные колеи машины НГ-60 симметрично относительно продольной оси дороги; шаг вдоль оси Oy – 1 м, вдоль оси Oz – 0,5 м. В остальной части расчетной области шаг сетки узлов вдоль осей Ox , Oy , Oz считаем равным 1 м. Общее число узлов – 3162.

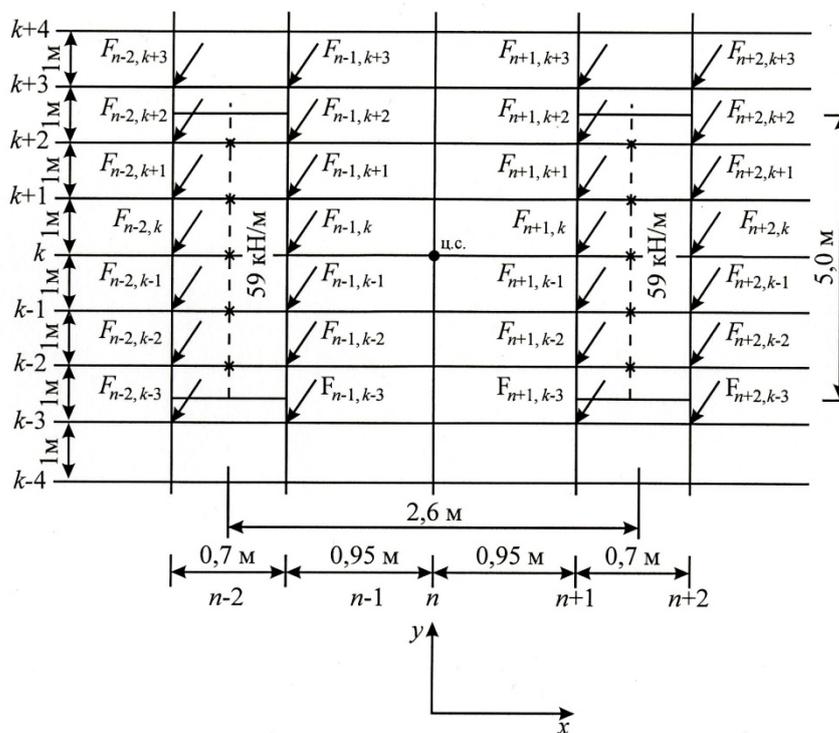


Рис. 2. Расчетная нагрузка на покрытие

На поверхности покрытия размещаем пластинчатые КЭ с четырьмя узлами, каждый из которых обладает двумя степенями свободы – перемещениями в направлении осей Ox , Oy . В остальной части расчетной области размещаем объемные КЭ с восьмью узлами, каждый из них обладает тремя степенями свободы – перемещениями в направлении осей Ox , Oy , Oz . Общее число КЭ равно 2520.

Физико-механические свойства в каждой отдельной части расчетной области (покрытие, насыпь, естественное основание) принимаем изотропными линейно-упругими, в соответствии с приведенными числовыми значениями удельных весов, модулей деформации и коэффициентов Пуассона.

Узлы закрепляем от перемещений: на плоскостях $x = -x_b$ и $x = x_b$ – вдоль оси Ox , на плоскостях $y = 0$ и $y = L_d$ – вдоль оси Oy , на плоскости $z = 4$ м – вдоль оси Oz .

Распределение внешних сил, действующих на узлы КЭ при размещении на покрытии машины НГ-60, представлено на рис. 2, где обозначено: $k - 4, k - 3, \dots, k + 4$ – номера узловых линий вдоль оси Ox ; $n - 2, n - 1, \dots, n + 2$ – то же вдоль оси Oy ; $F_{n,k}$ – сосредоточенные в узлах силы, направленные вдоль оси Oz . Двум большим прямоугольникам соответствуют отпечатки следов гусениц. Числовые значения сил $F_{n,k}$ (кН) следующие:

$$\begin{aligned} F_{n-2, k-3} = 3,69; F_{n-2, k-2} = 25,8; F_{n-2, k-1} = 29,5; F_{n-2, k} = 29,5; F_{n-2, k+1} = 29,5; F_{n-2, k+2} = \\ = 25,8; F_{n-2, k+3} = 3,69; F_{n-1, k-3} = 3,69; F_{n-1, k-2} = 25,8; F_{n-1, k-1} = 29,5; F_{n-1, k} = 29,5; \\ F_{n-1, k+1} = 29,5; F_{n-1, k+2} = 25,8; F_{n-1, k+3} = 3,69; F_{n+1, k-3} = 3,69; F_{n+1, k-2} = 25,8; \\ F_{n+1, k-1} = 29,5; F_{n+1, k} = 29,5; F_{n+1, k+1} = 29,5; F_{n+1, k+2} = 25,8; F_{n+1, k+3} = 3,69; \\ F_{n+2, k-3} = 3,69; F_{n+2, k-2} = 25,8; F_{n+2, k-1} = 29,5; F_{n+2, k} = 29,5; F_{n+2, k+1} = 29,5; \\ F_{n+2, k+2} = 25,8; F_{n+2, k+3} = 3,69. \end{aligned}$$

После ввода всех исходных данных в программу расчет одного варианта задачи на персональном компьютере класса Pentium-III занимает около 3 мин машинного времени.

Результаты расчета вертикальных перемещений u_z в плоскости симметрии $x = 0$ представлены на рис. 3. Как видим, вертикальные перемещения u_z быстро затухают и на расстоянии $l_d = 2,5 L_{lr}^0$ практически равны нулю. Наибольшая осадка дорожного покрытия на оси дороги составляет 2,82 мм; наибольшее выпучивание дорожного покрытия $2,8 \cdot 10^{-2}$ мм.

Рис. 3. Вертикальные перемещения u_z в плоскости симметрии $x = 0$: 1 – на поверхности покрытия ($z = 0,5$ м); 2 – на кровле эквивалентного слоя ($z = -3,5$ м); 3 – на кровле 3-го слоя ($z = -2,1$ м); 4 – на кровле 1-го слоя ($z = 0$ м); 5 – на кровле 2-го слоя ($z = -0,9$ м). Вдоль оси абсцисс отложены расстояния по оси дороги

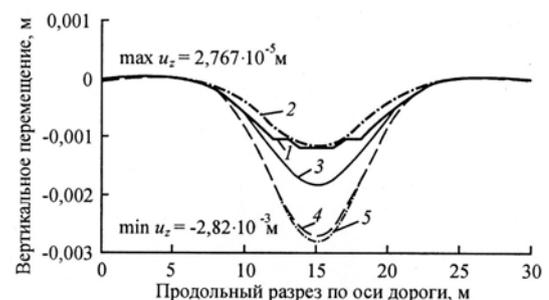
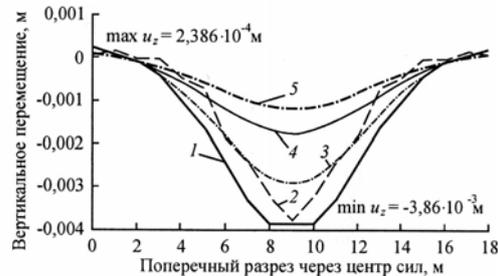


Рис. 4. Вертикальные перемещения u_z в плоскости $y = L_d/2$: 1 – на поверхности покрытия ($z = 0,5$ м) и на поверхности естественного основания ($z = 0$ м); 2 – на поверхности естественного основания ($z = 0$ м); 3 – на кровле 2-го слоя ($z = -0,9$ м); 4 – на кровле 3-го слоя ($z = -2,1$ м); 5 – на кровле эквивалентного слоя ($z = -3,5$ м). Вдоль оси абсцисс отложены расстояния по поперечному разрезу расчетной области дороги, проведенному через центр действующих сил



Результаты расчета вертикальных перемещений u_z в плоскости $y = L_d/2$, проходящей через центр действующих на покрытие сил, представлены на рис. 4.

Максимальные главные растягивающие напряжения ($\max \sigma_1$), действующие в покрытии, равны 5580 Па, в насыпи 10 200 Па; максимальные по абсолютной величине главные сжимающие напряжения ($\max |\sigma_3|$) соответственно 22 580 и 65 540 Па; максимальные касательные напряжения (τ_{\max}) 11 490 и 22 790 Па, в первом слое земляного полотна $\tau_{\max} = 13 820$ Па.

Из рассмотрения рис. 4 следует, что вертикальные перемещения u_z быстро затухают и на расстоянии $x_b = 3a_{bnk}$ практически равны нулю. Наибольшая осадка дорожного покрытия на дне гусеничной колеи машины НГ-60 составляет 3,86 мм; наибольшее выпучивание дорожного покрытия – 0,24 мм.

Для оценки жесткости дорожной конструкции можно воспользоваться величиной допустимого упругого прогиба Δ_{adm} поверхности покрытия при прохождении автотранспорта, который вычисляют следующим образом [3]. Основное аналитическое выражение, на базе которого построены нормы [2, 3, 6], связывает максимальный упругий прогиб Δ_{\max} поверхности упругого полупространства с давлением p по площади круга диаметром D и может быть представлено в виде

$$\Delta_{\max} = pD(1 - \nu^2)/E, \quad (2)$$

где E , ν – приведенные модуль упругости и коэффициент Пуассона полупространства.

При этом неявно предполагается, что максимальный упругий прогиб Δ_{\max} заведомо меньше предельного значения для выбранного материала покрытия.

Так как согласно нормам [1, 2, 4, 5] давление p в шинах автотранспорта не может превышать 0,6 МПа, а диаметр эквивалентного круга отпечатка колеса D обычно не более 0,4 м, максимальное значение произведения pD равно 0,24 МН/м. Тогда из формулы для Δ_{\max} вытекает однозначная связь между максимальным упругим прогибом и модулем упругости E .

Подставляя в формулу (2) $E_{rc} = 65$ МПа, $\nu_{rc} = 0,3$, получаем значение допустимого упругого прогиба $\Delta_{adm} = 0,24 \cdot 10^6 \cdot 0,91 / 65 \cdot 10^6 = 3,36$ мм. Его можно принять в качестве критерия жесткости дорожной конструкции. Поскольку осадка покрытия на дне гусеничной колеи машины НГ-60 составляет 3,86 мм, то следует увеличить жесткость дорожной конструкции.

Выводы

Предложенная методика позволяет выполнять проектировочные расчеты конструкций лесовозных дорог с нежесткими покрытиями. Для прямолинейных участков дорог минимальные размеры расчетной области могут быть определены следующим образом. Ширину поперечного сечения расчетной области b_d принимают равной трем-четырем размерам ширины основания насыпи; длину L_d – пяти-шести длинам отпечатка следа гусеницы L_w^0 ; глубину h_d определяют по величине активной толщи грунтового массива H_a .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ВСН 46-83. Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа [Текст]. – М.: Транспорт, 1985. – 157 с.
2. ВСН 01-85. Инструкция по проектированию лесозаготовительных предприятий [Текст]. – М.: Минлесбумпром СССР, 1986. – 135 с.
3. Милыев, А.С. Автоматизированный расчет конструкций зимних лесовозных дорог [Текст]: учеб. пособие / А.С. Милыев. – СПб.: ЛТА, 2006. – 303 с.
4. МОДН2-2001. Межгосударственные отраслевые дорожные нормы. Проектирование нежестких дорожных одежд [Текст]. – М.: Межправит. совет дорожников, 2002. – 92 с.
5. ОДН 218.046-01. Отраслевые дорожные нормы. Проектирование нежестких дорожных одежд [Текст]. – М.: Гос. служба дорожного хоз-ва Мин-ва транспорта РФ, 2001. – 98 с.
6. СНиП 2.02.01-83*. Основания зданий и сооружений [Текст] / Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 1986. – 50 с.

Поступила 04.06.07

A.S. Milyaev
Saint-Petersburg State Forest-Technical Academy

Strength Calculations for Wood Tracks Design with Loose Surfaces for Track-type Machines Motion

The technique of strength calculations is provided for wood tracks designs with loose surfaces for heavy track-type machines. The technique corresponds to methodology accepted in Construction Norms and Rules and is oriented to application of numerical finite element method. The example is provided for assigning minimal dimensions of rated operating conditions for straight road portions.

Keywords: wood tracks, heavy track-type machines, strength calculations, finite element method.