

Носов С. В., канд. техн. наук, доц.
Липецкий государственный технический университет

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТА ПНЕВМОКОЛОСОМ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ

nosovsergej@mail.ru

Разработана математическая модель процесса уплотнения грунта пневматическим колесом и алгоритм расчета деформаций грунта и его плотности на основе нового реологического подхода к оценке деформационных характеристик уплотняемых материалов.

Ключевые слова: уплотнение грунта, относительные деформации слоя грунта.

Для наиболее общего случая, когда при взаимодействии пневматического колеса с уплотняемым слоем, материал которого работает в условиях сложного напряженного состояния, компоненты девиатора тензора деформаций определяются каждая в отдельности в соответствии с особенностями развития деформаций в каждом направлении. При этом должны учитываться и закономерности изменения соответствующей составляющей нагрузки со стороны колесных уплотнителей.

Составим математическую модель взаимодействия уплотняемого слоя грунта с пневмоколом дорожно-строительной машины.

Если в качестве основного критерия при разработке математической модели выбрать приращение плотности грунта после однократного прохода пневмоколеса, то можно записать

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 - e}, \quad (1)$$

где ρ – плотность грунта после прохода пневмоколеса, г/см³; ρ_0 – начальная плотность грунта, г/см³; e – относительное изменение объема.

При разработке математической модели взаимодействия уплотняемого слоя с пневмоко-

лом приняты следующие допущения: грунт представляет собой изотропную среду с упруго-вязко-пластичными свойствами; в процессе деформации разрушения грунта не происходит, т.е. грунт рассматривается как сплошная среда; зависимость сдвига грунта, как функции от глубины, носит линейный характер; каток на пневматических шинах движется по горизонтальной поверхности прямолинейно и равномерно; пятно контакта колеса с грунтом имеет форму эллипса; инерционными свойствами грунта можно пренебречь; влияние динамических колебаний в трансмиссии катка не оказывают влияния на процесс развития деформации и изменения плотности грунта.

Относительное изменение объема определяется главными деформациями среды, которые могут быть определены из известного кубического уравнения [1]

$$\varepsilon^3 - J_1 \varepsilon^2 + J_2 \varepsilon - J_3 = 0, \quad (2)$$

коэффициентами которого являются инварианты тензора деформаций

$$J_1 = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \varepsilon_\sigma - 2\mu(t)\varepsilon_\sigma, \quad (3)$$

$$J_2 = \varepsilon_x \varepsilon_y + \varepsilon_y \varepsilon_z + \varepsilon_x \varepsilon_z - \frac{1}{4} \gamma_{xy}^2 - \frac{1}{4} \gamma_{yz}^2 - \frac{1}{4} \gamma_{zx}^2 = -2\mu(t)\varepsilon_\sigma^2 - \frac{1}{4} \gamma_{zx}^2, \quad (4)$$

Угловая деформация в плоскости качения пневмоколеса определяется зависимостью:

$$\gamma_{zx} = \frac{\lambda_2}{H_{cl}}. \quad (7)$$

Остальные относительные деформации приравниваются нулю.

Согласно проведенным исследованиям [2] получена зависимость изменения коэффициента поперечной деформации слоя грунта от времени действия уплотняющей нагрузки

$$\begin{cases} \mu(t) = 0,5t + 0,01 & \text{если } \mu(t) \leq 0,3; \\ \mu(t) = 0,3 & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (8)$$

$$J_3 = \begin{vmatrix} \varepsilon_x & \frac{1}{2} \gamma_{yx} & \frac{1}{2} \gamma_{zx} \\ \frac{1}{2} \gamma_{xy} & \varepsilon_y & \frac{1}{2} \gamma_{zy} \\ \frac{1}{2} \gamma_{xz} & \frac{1}{2} \gamma_{yz} & \varepsilon_z \end{vmatrix} = \varepsilon_\sigma \mu(t) \{ \varepsilon_\sigma^2 \mu(t) + 0,25 \gamma_{zx}^2 \} \quad (5)$$

где $|\varepsilon_y| = |\varepsilon_x| = |\mu(t)\varepsilon_z|$, $\mu(t)$ – коэффициент поперечной деформации грунта.

Здесь переменными ε_x , ε_y , ε_z обозначены относительные деформации в направлении соответствующих осей, а переменными γ_{xy} , γ_{yz} , γ_{zx} – угловые деформации в соответствующих плоскостях (рис. 1). При этом

$$\varepsilon_z = \varepsilon_\sigma = \frac{\lambda_\sigma}{H_{cl}}; \quad \varepsilon_y = \frac{\lambda_\sigma}{H_{cl}} \mu(t); \quad \varepsilon_x = \frac{\lambda_\sigma}{H_{cl}} \mu(t) \quad (6)$$

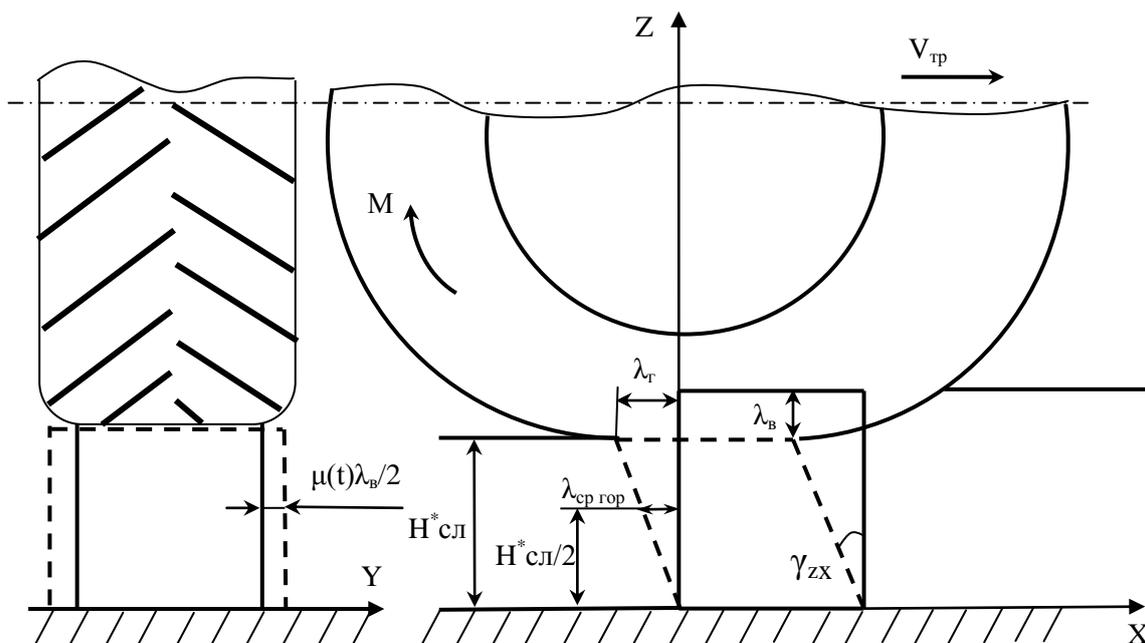


Рис. 1. Ориентирование элементарного объема слоя грунта в осях системы координат

На рис. 2 представлены три основных режима качения пневмоколеса в процессе уплотнения грунта. В пятне контакта пневмоколеса с уплотняемым слоем грунта развиваются нор-

мальные и тангенциальные напряжения. Для определения значений и закономерностей их распределения по опорной поверхности принят графический метод сходящихся сил [3].

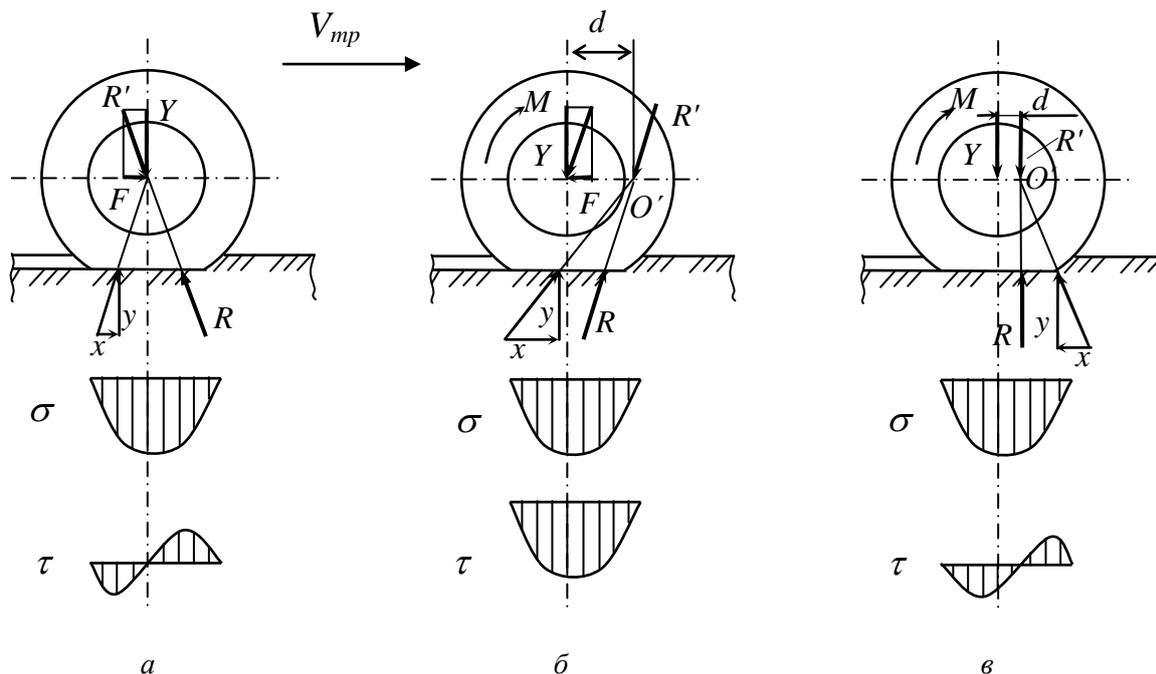


Рис. 2. Реакции грунта, действующие в контактах колес:

а - ведомого; б - ведущего; в - свободного; σ – нормальное напряжение; τ – тангенциальное напряжение

Развитие относительных вертикальной $\varepsilon_z(t)$ и горизонтальной $\varepsilon_x(t)$ деформаций слоя грунта под колесом описывается выражениями

$$\varepsilon_z(t) = \frac{1}{E} \left[\sigma(\tau') + \int_0^t K(t - \tau') \sigma(\tau') d\tau' \right],$$

$$\varepsilon_x(t) = \frac{1}{G} \left[\tau(\tau') + \int_0^t R(t - \tau') \tau(\tau') d\tau' \right], \quad (9)$$

где $\sigma(\tau')$ и $\tau(\tau')$ – нормальные и касательные напряжения в грунте под колесом в момент времени τ' действия нагрузки, кПа; t – время в мо-

мент определения деформаций; τ' – время, в момент возникновения напряжений σ и τ ; $K(t-\tau')$ и $R(t-\tau')$ – функции скоростей линейной и сдвиговой ползучести, представленные в виде экспоненциально-степенных выражений [4]; E и G – мгновенные модули деформации и сдвига грунта, кПа:

$$E = \frac{1 + \int_0^t K(t-\tau') d\tau'}{\chi_\kappa[\bar{x}] \cdot \varepsilon'_e(t) / \sigma}, \quad G = \frac{1 + \int_0^t R(t-\tau') d\tau'}{\chi_\kappa[\bar{x}] \cdot \varepsilon'_s(t) / \tau}, \quad (10)$$

$$\chi_\kappa[\bar{x}] = \frac{\varepsilon[t; \bar{x}]}{\varepsilon[t; \bar{x}_0]} = \frac{\lambda[t; W; \rho] \cdot \lambda[t; \alpha_r; t_r; h_r] \cdot \lambda[t; \sigma; \tau]}{\lambda[t; W_0; \rho_0; \alpha_{r0}; t_{r0}; h_{r0}; \sigma_0; \tau_0]} = \chi_1 \cdot \chi_2 \cdot \chi_3, \quad (11)$$

где $\chi_1 = f(W, \rho)$ – функция подобия от влажности и плотности слоя грунта; $\chi_2 = f(\alpha_r, t_r, h_r)$ – функция подобия от угла установки грунтозацепов к плоскости качения колеса, шага и высоты грунтозацепов; $\chi_3 = f(\sigma, \tau)$ – функция подобия от нормальных и тангенциальных напряжений в пятне контакта пневмоколеса с уплотняемым грунтом.

Уравнения регрессии для функций подобия можно получить экспериментальным путем при проведении штамповых испытаний.

Время взаимодействия пневмоколеса с уплотняемым слоем грунта:

$$t = \frac{2a}{V_{mp}}, \quad (12)$$

где V_{mp} – поступательная скорость трактора с прицепным катком или другой транспортно-технологической машины на колесном ходу, м/с; $2a$ – длина продольной диагонали пятна контакта колеса с деформируемым грунтом

$$2a = 0,7 \cdot 2 \sqrt{(D_k / 2)^2 - r_k^2} + \delta(2a), \quad (13)$$

где D_k – свободный диаметр колеса, м; r_k – статический радиус колеса, м; $\delta(2a)$ – приращение величины продольной диагонали пятна контакта колеса с грунтом в зависимости от его реологических свойств.

Таким образом, получена математическая модель взаимодействия уплотняемого слоя грунта с пневмоколесом уплотняющей машины, которая позволяет определить значения вертикальной, горизонтальной и объемной деформаций грунта и его плотность после прохода колеса.

Вычисления проводятся в следующем порядке:

1. Зная основные параметры колесной транспортно-технологической машины, вычисляют нормальную нагрузку на колеса;

2. Через диаметр колеса и его статический радиус определяют значение длины пятна контакта;

где σ и τ – нормальное и тангенциальное напряжения в слое при ступенчатом законе нагружения (законе Хевисайда), кПа; $\varepsilon'_e(t)$ и $\varepsilon'_s(t)$ – относительные вертикальная и горизонтальная деформации слоя при его нагружении по закону Хевисайда в момент времени t .

Коэффициент подобия между базовой и любой другой из кривых ползучести определяется выражением

3. Вычисляют площадь пятна контакта, среднее значение нормального напряжения в пятне контакта и максимальное значение нормальных напряжений;

4. Через длину пятна контакта и скорость движения уплотняющей машины определяют время взаимодействия колеса с грунтом;

5. Зная величину ведущего момента на пневмоколесе, графическим методом получают эпюры напряжений, действующие в контакте колеса с уплотняемым слоем (рис. 2), параллельно вычисляя значения вертикальной и горизонтальной деформаций грунта по выражениям (9);

6. Вычисляют значения относительных линейных и угловых деформаций согласно выражений (6), (7) и с помощью выражений (3) - (5) вычисляют корни кубического уравнения (2);

7. Определяют относительное изменение объема, через величину которого находят значение плотности после прохода пневмоколеса по слою грунта согласно (1).

Выводы по данному исследованию:

1. Проведено теоретическое исследование взаимодействия уплотняемого слоя с пневмоколесом транспортно-технологической машины (скрепера, автогрейдера, пневмокотка и др.) в рамках четырехмерного подхода к оценке деформационных характеристик уплотняемого материала на основе разработанной математической модели. В качестве основного критерия эффективности взаимодействия уплотняемого материала с пневмоколесом принято приращение плотности дорожного материала после однократного прохода пневмоколеса, определяемое через относительное изменение объема.

2. Каждая компонента относительных деформаций, входящая в инварианты кубического уравнения, определяется как независимая величина в соответствии с принятыми соотношениями нелинейной теории наследственной ползучести упруго-вязко-пластических тел с учетом времени и характера действия соответствующего

ющей нагрузки в пятне контакта пневмоколеса с уплотняемым слоем, а также функций подобия, определяющих соотношения параметров состояния уплотняемого слоя, параметров грунтозацепов и величин действующих нормальных и касательных напряжений в пятне контакта пневмоколеса с уплотняемым слоем грунта.

3. Установлено, что коэффициент бокового расширения уплотняемого дорожно-строительного материала является величиной непостоянной и зависит от времени действия приложенных нагрузок. Для грунта получена зависимость изменения коэффициента бокового расширения от времени, согласно которой в интервале 0...0,5 с наблюдается рост его значений, а в последствии, при больших значениях времени нагружения (порядка нескольких секунд и более) коэффициент принимает постоянное значение, характерное для данного типа грунта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов - М.: Высшая школа, 1978.-447 с.
2. Носов С.В., Бондаренко П.А. К вопросу оценки коэффициента Пуассона опорного основания МЭС с ярко выраженными реологическими свойствами // Прогресс транспортных средств и систем - 2002: материалы международной научно-практической конференции (8-11 октября 2002 г.). Часть 1.- Волгоград, 2002. С. 311-313.
3. Водяник И.И. Воздействие ходовых систем на почву (научные основы.- М.: Агропромиздат, 1990.- 172 с.
4. Носов, С.В. Выбор функции влияния при исследовании реологических свойств опорного основания // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2006. № 10. С. 19-21.