

УДК 624.138.2.678.063

Напряженно-деформированное состояние грунта под следом колеса транспортного средства

М.Я. Довжик – к.т.н., доцент; Б.Я. Татьянченко – к.т.н., доцент;
А.А. Соларёв – аспирант

Сумский национальный аграрный университет

Одной из современных проблем сельскохозяйственного производства является защита почвы от переуплотнения колёсами работающих на полях машин. Давление колес и гусениц уменьшает пористость земли, приводит к неравномерному распределению влаги, изменяет теплопроводность и в результате ухудшает ее плодородие. Поэтому изучение механических явлений в грунте, протекающих под тяжестью технических средств обработки, имеет большое практическое значение.

В данной работе сделана попытка решить задачу о распределении напряжений и изменении плотности грунта под колесами или гусеницами машин при допущении линейной зависимости между усилиями и деформациями.

Под действием давления, распределенного по некоторой площади контакта, грунт находится в сложном напряженном состоянии. В нем возникают как нормальные напряжения σ , так и касательные – τ . Как известно, при расчётах фундаментов приходится иметь дело со значительными удельными нагрузками, вызывающими большую осадку грунта, переход его в пластическое состояние, оседание и выпячивание в стороны и вверх. Эти процессы недопустимы под колесами и рабочими органами машин, работающих на полях, поэтому в данном случае можно применить теорию линейно деформированной среды.

В месте контакта колеса с землей на грунт передается давление интенсивности q , которое по ширине площадки можно считать постоянным (рис.1), а закономерность его изменения вдоль линии движения не имеет значения, так как максимум давления будет испытывать каждая точка образовавшегося следа.

Таким образом, имеем полосу бесконечной длины и шириной $2a$, деформированную равномерно распределенной нагрузкой.

Напряженное состояние в произвольной точке массива описывается девятью компонентами напряжений. Их нахождение можно упростить, ограничившись плоским решением, если принять во внимание, что в направлении оси Oz грунт не имеет возможности деформироваться.

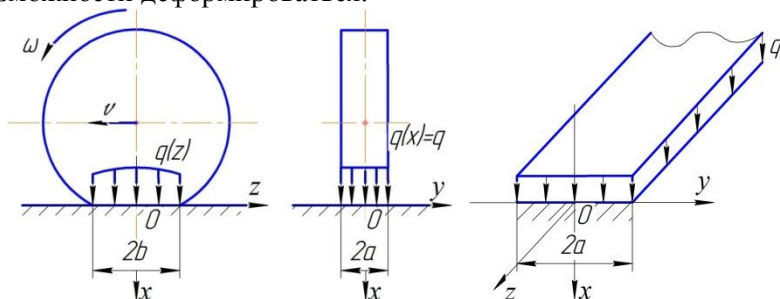


Рис. 1. Нагрузка на грунт от колеса и расчётная схема.

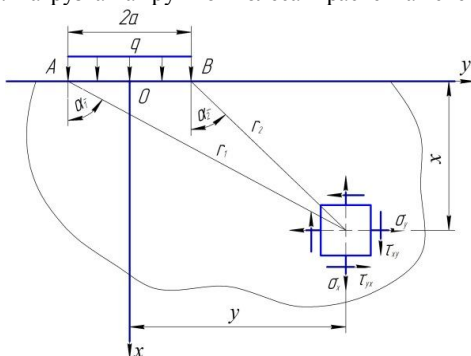


Рис. 2. Напряженное состояние в плоскости xOy .

Рассматривая полоску единичной ширины, вырезанную двумя параллельными между собой и перпендикулярными оси Oz сечениями (рис. 2), как полубесконечную плоскость, воспользуемся известным решением в полярных координатах [3, с.102] и запишем уравнения для напряжений в декартовой системе координат:

$$\sigma_x = \frac{q}{\pi} \left[\arcsin \frac{y-a}{\sqrt{x^2 + (x-a)^2}} - \arcsin \frac{y+a}{\sqrt{x^2 + (x+a)^2}} + \frac{x(x-a)}{x^2 + (y-a)^2} - \frac{x(x+a)}{x^2 + (y+a)^2} \right];$$

$$\sigma_y = \frac{q}{\pi} \left[\arcsin \frac{y-a}{\sqrt{x^2 + (x-a)^2}} - \arcsin \frac{y+a}{\sqrt{x^2 + (x+a)^2}} - \right. \\ \left. - \frac{x(x-a)}{x^2 + (y-a)^2} + \frac{x(x+a)}{x^2 + (y+a)^2} \right];$$

$$\tau_{xy} = \frac{q}{\pi} \left[\frac{(y-a)^2}{x^2 + (y-a)^2} - \frac{(y+a)^2}{x^2 + (y+a)^2} \right].$$

Из условия $\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] = 0$ находим:

$$\sigma_z = \mu(\sigma_x + \sigma_y) = \frac{2\mu q}{\pi} \left[\arcsin \frac{y-a}{\sqrt{x^2 + (x-a)^2}} - \arcsin \frac{y+a}{\sqrt{x^2 + (x+a)^2}} \right],$$

где μ – коэффициент поперечной деформации для грунта;

E – модуль продольной упругости.

Нормальное напряжение σ_z является одним из трех главных напряжений, так как в плоскостях, перпендикулярных оси Oz , отсутствуют сдвигающие усилия и $\tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$. В силу закона парности касательных напряжений $\tau_{zx} = \tau_{xz} = 0$; $\tau_{zy} = \tau_{yz} = 0$. Таким образом, все компоненты напряженного состояния определены.

Очевидно, что максимально нагруженной будет вертикаль под центром распределённой нагрузки. Здесь площадки, параллельные и перпендикулярные плоскости xOz , являются главными, следовательно, напряжения σ_x , σ_y и σ_z на них будут главными:

$$\sigma_x = \frac{q}{2\pi} \left(\arcsin \frac{a}{\sqrt{x^2 - a^2}} + \frac{ax}{x^2 + a^2} \right);$$

$$\sigma_y = \frac{q}{2\pi} \left(\arcsin \frac{a}{\sqrt{x^2 - a^2}} - \frac{ax}{x^2 + a^2} \right);$$

$$\sigma_z = -\frac{2\mu q}{\pi} \arcsin \frac{a}{\sqrt{x^2 + a^2}}.$$

На рис.3 приведены эпюры изменения этих напряжений, уменьшенные в q раз; после умножения их на q они принимают истинные значения. Это позволяет вычислять напряжения при любых нагрузках q и независимо от ширины колеса $2a$.

Расчёты показали, что наибольшее по модулю напряжение σ_x распространяется на значительную глубину и при $x=3a$ все еще составляет около 40% от своего максимального значения. Максимальное сжатие грунта имеет место в центре распределенной нагрузки (точка О). Здесь вертикальное по оси Ох и горизонтальное по оси Оу напряжение под колесом равно удельному давлению q .

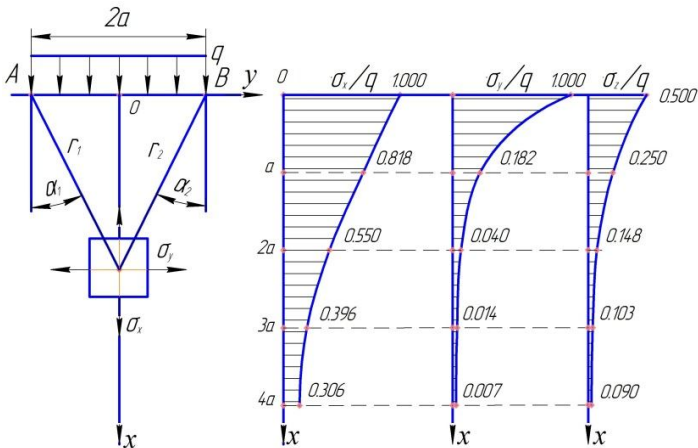


Рис.3. Эпюры главных напряжений в точках на оси Ох.

На свободной поверхности грунта при $y > |a|$ все составляющие напряжения равны нулю. В особых условиях находятся точки А и В. Здесь, вследствие резкого обрыва давления, имеет место сдвиг грунта, находящегося под колесом, относительно остальной его массы. В результате среза именно в этих точках зарождаются пластические деформации и грунт переходит в состояние текучести, которое затем распространяется вглубь массива. Относительное изменение объёма в произвольной точке массива:

$$\theta = (1 - 2\mu)(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) / E.$$

Теперь можно определить относительное изменение плотности грунта, вызванное изменениями его объёма: $p / p_0 = 1 / (1 - \theta)$.

Здесь p_0 - плотность грунта в ненапряженном состоянии.

Используя имеющиеся в литературе сведения об удельном давлении на грунт колёс наиболее часто используемых тракторов, автомобилей и комбайнов [2, с.54...57], можно определить изменение плотности грунта в любой точке и выбор машины, обеспечивающей уплотнение в пределах нормы, допустимых для данного вида культуры и почвы.

Результаты расчётов для принятых значений упругих констант грунта не расходятся с имеющимися в литературе аналогичными данными. Так, увеличение плотности под колесом технического средства средней мощности составляет около 2,5...3,0%, что совпадает с результатами известных исследований [2, с.8...14]. Степень соответствия результатов расчёта действительному положению в большой мере зависит от точности принимаемых упругих констант. Если для песчаных и глинистых грунтов, на которые чаще всего опираются фундаменты, они известны, то для поверхностного слоя гумуса, этих характеристик нет. Причина очень проста: эта среда слишком неоднородна по своей структуре. В данном случае принято $\mu = 0.25$; $E=10\text{МПа}$. Как известно, комфортность условий для культурных растений определяется пористостью грунта. Пористость, например, среднесуглинистых и глинистых светлых чернозёмов находится в диапазоне 40...55% [2, с.8...14]. Следовательно, увеличение плотности этих грунтов на 2...3% повлечёт снижение их пористости на 4...6%. Это может оказать неблагоприятное влияние на рост и урожайность многих культур.

Литература:

1. Інженерна геологія. Механіка ґрунтів, основи та фундаменти : підручник / [Зоценко М.Л., Коваленко В.І. та ін.]; за ред. М.Л. Зоценко. – Полтава: ПНТУ, 2003. – 554 с.
2. Кравченко В.И. Уплотнение почв машинами / В.И. Кравченко. – Алма-Ата: «Наука», 1986. – 96 с.
3. Самусь В.И. Основы теории упругости и пластичности / В.И. Самусь. – М.: «Высшая школа», 1982. – 264 с.