

МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЧВОГРУНТОВ ПРИ ОБЪЕМНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Докт. техн. наук, проф. ГОРИН Г. С.

Белорусский национальный технический университет

Во всем мире, начиная с середины прошлого века, средняя мощность вновь созданных тракторов ежегодно росла на 2–4 л. с. в год. Пропорционально мощности увеличилась масса тракторов, прицепов и технологических комплексов. При этом нормальные нагрузки на их колеса стали часто превышать аналогичные нагрузки на колеса дорожных автомобилей и прицепов. В результате многократных проходов сельскохозяйственной техники поверхностные слои почвы переуплотняются, что приводит к снижению урожайности по следу колес (10 % – для зерновых; 20 % – для корнеклубнеплодов). С годами переуплотнение подпахотных слоев почвы накапливается. Эксперты предлагают следующие методы снижения уплотнения почвы;

- уменьшение давления в контактах движителей с почвой примерно до 0,1 МПа (ГОСТ 26955–86) путем сдваивания или даже страивания колес;
- переход на многоосные ходовые системы. Например, на выставке Agritechnica компания Fendt продемонстрировала в 2007 г. трехосный трактор, в 2011 г. – четырехосный;
- глубокое чизелевание подпахотных слоев почвы (раз в два года);
- ежегодное движение по одной технологической колее, ориентируясь по спутниковой навигации; достигнута точность нахождения названной колее 2 см.

Реализация перечисленных мероприятий потребует дополнительных затрат в сельскохозяйственном производстве, а при их выборе – и дополнительных технико-экономических обоснований. Применяемые методы оценки переуплотнения почвы (в основном эмпирические) несут статистическую погрешность. Для расчетов уплотнения почвы и решения других при-

кладных задач (расчета глубины колеи и тягово-энергетических показателей колес) в сельхозмеханике обычно применяют зависимости напряжений от соответствующих деформаций, в частности полученные в результате испытаний – пенетрационных (нормальных к опорной поверхности) либо сдвиговых для условий одноосного деформирования [1–3]. В механике грунтов для расчета фундаментов зданий используют характеристики, полученные в условиях трехосного сжатия [4–6]. Поэтому в работе [7] оценки воздействия ходовых систем на почву и их тягово-энергетических показателей произведены на основе аналитических исследований, основанных на применении известного метода конечных элементов (МКЭ) и пространственной механической характеристики почвогрунта [8]. Вместе с тем для решения перечисленных прикладных задач требуются данные о реальных характеристиках почв. Для достижения приемлемой точности расчетов решалась пространственная контактная задача с использованием математического аппарата механики сплошной среды (МСС). Аналогичные исследования проводят за рубежом [9].

Положения МСС. Приложенные нормальные напряжения вызывают относительные удлинения (укорочения) граней Σ_x , Σ_y , Σ_z и относительное изменение объема параллелепипеда

$$\Sigma_V = \frac{\Delta V}{V} = \Sigma_x + \Sigma_y + \Sigma_z, \text{ но не изменяя его}$$

формы (рис. 1а). При приложении к параллельным граням параллелепипеда двух равных касательных напряжений τ_{xz} и τ_{zx} ребра его не получают удлинений и его деформация заключается только в скашивании и повороте на угол γ_{yx} двух параллельных граней (рис. 1б). Такую деформацию называют чистым сдвигом. Одновременно со скашиванием параллелепипед получает вращение на угол γ_{zx} . Аналогичная уг-

ловая деформация происходит под воздействием напряжения τ_{yx} . Если наложить два простых

сдвига с одинаковыми углами поворота $\gamma_{xz} = \gamma_{zx}$ смежных ребер, то произойдет чистый сдвиг без изменения объема и без поворота вокруг осей (рис. 1г). Чистый сдвиг можно получить также при приложении двух равных, но противоположных по знаку напряжений.

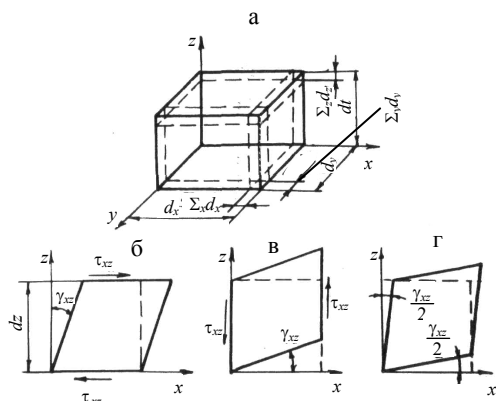


Рис. 1. Компоненты деформаций

Известны зависимости, с помощью которых напряжения могут быть выражены через деформации:

$$\sigma_x = 2G\Sigma_x + 3\lambda\Sigma_m;$$

$$\sigma_y = 2G\Sigma_y + 3\lambda\Sigma_m;$$

$$\sigma_z = 2G\Sigma_z + 3\lambda\Sigma_m;$$

$$\tau_{xy} = G\gamma_{xy};$$

$$\tau_{yz} = G\gamma_{yz};$$

$$\tau_{zx} = G\gamma_{zx},$$

где $\lambda = \frac{2\mu G}{1-2\mu}$ – постоянная Ляме, кН/см².

В МСС принимают, что средние нормальные напряжения σ_m могут быть выражены через средние деформации Σ_m :

$$\Sigma_m = \frac{\Sigma_x + \Sigma_y + \Sigma_z}{3}.$$

Реологическое уравнение состояния идеального упруго-линейно-деформируемого тела (тела Гука) имеет вид

$$\sigma_m = K\Sigma_m, \quad (1)$$

где K – модуль объемной деформации, кН/см².

Коэффициент поперечной деформации μ (коэффициент Пуассона) можно выразить через константы:

$$\mu = \frac{\Sigma_y}{\Sigma_x} = \frac{K-2G}{2(G+K)}; \quad (2)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}; \quad (3)$$

$$K = \frac{E}{1-2\mu}.$$

В теории малых упругопластических деформаций А. А. Ильющина принимают $\tau_i = G\gamma_i$, где

$$\tau_i = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}; \quad (4)$$

$$\gamma_i = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\Sigma_x - \Sigma_y)^2 + (\Sigma_y - \Sigma_z)^2 + (\Sigma_z - \Sigma_x)^2 + \frac{3}{2}(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2)}; \quad (5)$$

где τ_i, γ_i – интенсивность соответственно касательных напряжений и деформаций сдвига.

Этот закон справедлив при значениях среднего напряжения, намного превышающих обычный предел упругости материала.

Перепишем физические уравнения теории упругости в виде следующих уравнений:

$$\sigma_x = (2G + \lambda)\Sigma_x + \lambda(\Sigma_y + \Sigma_z);$$

$$\sigma_y = (2G + \lambda)\Sigma_y + \lambda(\Sigma_x + \Sigma_z);$$

$$\sigma_z = (2G + \lambda)\Sigma_z + \lambda(\Sigma_x + \Sigma_y);$$

$$\tau_{xy} = G\gamma_{xy};$$

$$\tau_{yz} = G\gamma_{yz};$$

$$\tau_{zx} = G\gamma_{zx}.$$

Приведенные зависимости показывают, что интенсивность деформаций сдвига есть функция только интенсивности касательных напряжений, а объемная деформация Σ_v есть функция среднего нормального напряжения σ_m .

Механические свойства почвогрунтов.

В механике грунтов рассматриваются три основных закона деформирования:

- закон ламинарной фильтрации;
- закон уплотнения (компрессионная зависимость);
- закон трения (зависимость между сопротивлением грунтов сдвигу и деформацией при различных нормальных давлениях) – в этой статье не анализируется.

Закон ламинарной фильтрации. Поровое пространство между частицами и сами частицы почвогрунтов насыщены водой. Если отфильтровывание воды из почвогрунта при деформировании происходит с большой скоростью, то его механические характеристики определяются в основном свойствами грунтового скелета. Такого рода консолидация почвогрунта называется компрессионной. Если отфильтрованные воды из почвогрунта задерживают деформирование скелета, то такое деформирование называется фильтрационной консолидацией.

В данной статье не рассматривались временные эффекты, связанные с фильтрацией воды из грунтового скелета, а решались статические задачи. Построение динамических моделей возможно при большей изученности реологических свойств почвогрунтов.

Закон уплотнения. Почвогрунты наиболее чувствительны к уплотнению сразу после увлажнения. Через несколько дней коллоиды почвы впитывают воду и набухают, в результате чего повышается прочность скелета. Компрессионные испытания показали, что процесс уплотнения может быть подразделен на три фазы:

- в первой фазе увеличение нагрузки не вызывает уплотнения почвы до тех пор, пока не превышены внутренние структурные напряжения;
- во второй фазе – быстрого уплотнения – объемный вес почвы и пористость изменяются пропорционально логарифму давления p :

$$\gamma = K_{об} \log p + \gamma_{об},$$

где $\gamma_{об}$ – первоначальный объемный вес;

- в третьей фазе – затвердевания – дальнейшее уплотнение завершается при выжимании воды из пористой системы. Это довольно мед-

ленный процесс, он не представляет интереса для исследования взаимодействия колеса с почвой.

Для компрессионных трехосных испытаний почвогрунтов в лабораторных условиях применяют приборы, в отечественной литературе получившие название стабилометров. Цилиндрический образец почвогрунта помещают в резиновую оболочку стабилометра и подвергают всестороннему гидростатическому обжатию давлением σ_m . Кроме того, к торцам образца прикладывается возрастающее давление σ_i . Сжатие грунта сопровождается развитием осевых и поперечных деформаций, которые фиксируют в процессе испытаний. Основным итогом испытаний является зависимость между девиатором напряжений $\sigma_i - \sigma_m$ (дополнительные, сверх всестороннего давления на образец) и осевой деформацией.

Реальные почвогрунты сопротивляются сжатию и растяжению по-разному. Поэтому объемные деформации развиваются под действием не только среднего нормального напряжения, но и в результате сдвига (явление дилатансии), а сдвиговые деформации зависят как от интенсивности касательных напряжений (4), так и среднего нормального напряжения (1). В отличие от металлов зависимость $\tau_i \sim \gamma_i$ реальных почвогрунтов не инвариантна. Она изменяется с изменением среднего нормального напряжения σ_m . Влияние σ_m объясняется наличием внутреннего трения при сдвиге почвенного образца. В результате трехосных испытаний с фиксированными значениями σ_m на плоскости может быть построено семейство кривых (рис. 2).

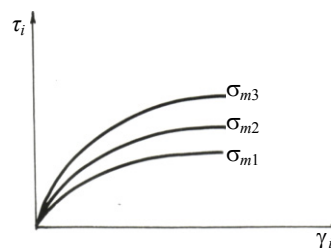


Рис. 2. Неинвариантные зависимости интенсивности касательных напряжений от интенсивности деформаций почвогрунтов

Инвариантная форма записи закона деформирования не может быть применена для сыпучих грунтов, обладающих большим внут-

ренным трением. Учитывая, что нормальные давления в почве под контактом колеса изменяются в небольших пределах (от 0 до 0,2 МПа), а угол внутреннего трения в связных грунтах мал, инвариантная форма записи справедлива для суглинков и торфяников с погрешностью до 20 %.

Результаты исследований, выполненных на песчаных образцах, показали, что линейное соотношение между объемной деформацией и главными нормальными напряжениями сохраняется, если $\sigma_m > 0,38\tau_{\max}$ (τ_{\max} – максимальное напряжение сдвига). При дальнейшем увеличении касательных напряжений зависимость $\tau_i = \varphi(\gamma_i)$ существенно отличается от линейной. Анализ показывает, что соотношение средних нормальных напряжений и максимальных касательных $\sigma_m < 0,38\tau_{\max}$ не всегда выдерживается в слоях почвы под колесами тракторов [10].

Почвогрунты обладают упругопластическими свойствами. Упругостью называют способность почвогрунтов восстанавливать свои форму и объем после прекращения действия внешних сил. Пластичностью называют свойство почвогрунта изменять, не разрушаясь, свою форму под действием внешних сил. При разгрузке пластические деформации не восстанавливаются. Упругие деформации могут быть как линейными, т. е. прямо пропорциональными приложенному напряжению, так и нелинейными.

Коэффициент поперечного расширения почвогрунта – величина переменная. Постоянство его возможно, если соотношение между модулем деформации $K(\Sigma_m)$ и $\tau_i(\gamma_i)$ сохраняется во всем диапазоне нагружения. В реальных почвогрунтах это условие невыполнимо.

Коэффициент μ почвогрунта может изменяться от 0 до 0,5. Из формулы (2) следует, что при $\mu = 0$ деформация происходит только по оси образца ($\Sigma_V = 0$ и $K = E = 2G$). При $\mu = 0,5$ изменяется форма образца без изменения объема (материал несжимаем). В этом случае $K \rightarrow \infty$, $E = 3G$.

Грунты с жестким скелетом – крупнопесчаные и гравелистые – обладают, как правило, малой сжимаемостью. Содержание влаги не влияет на характер их компрессионной кривой. Грунты с упругим скелетом (глины, суглинки)

имеют малый модуль деформации. Сжимаемость таких грунтов существенно зависит от состава и влажности. Соотношение между упругой и пластической составляющими деформации может быть установлено из зависимостей для сопротивления почв сжатию от деформации.

Часто для описания нелинейного деформирования применяют степенную зависимость, которая для одноосных испытаний имеет вид:

$$\tau = A\gamma^m;$$

$$\sigma_z = A_m \Sigma_z^m,$$

где A и A_m – модуль деформации соответственно при чистом сдвиге и одноосном сжатии.

Степенная зависимость обладает рядом недостатков: во-первых, безразмерный показатель степени m не имеет физического смысла; во-вторых, предполагается, что развитие деформаций почвы приводит к ее неограниченному упрочнению.

Более реальные результаты дает зависимость В. В. Кацыгина для сопротивления почв сжатию

$$\sigma = p_0 \operatorname{th} \frac{K_{об}}{p_0} h, \quad (6)$$

где p_0 – предел несущей способности, кН/см²; $K_{об}$ – коэффициент объемного сжатия почвы, кН/см³.

Константы p_0 и K имеют реальный физический смысл. Их значения приведены в ряде работ. Чтобы перейти от перемещений почвы h к деформациям, примем, что деформируется слой почвы высотой l

$$h = \Sigma_z l.$$

Обозначим также $Kl = E_0$, где E_0 – модуль упругости почвы при перемещениях $h = 0$. После подстановки выражений для h и l в формулу (6) получим выражение для механической характеристики почвогрунта при объемном деформировании

$$\sigma = p_0 \operatorname{th} \frac{E_0}{p_0} \Sigma. \quad (7)$$

Формула передает общий вид механической характеристики $\sigma_i \sim \Sigma_i$. В действительности на ее протекание большое влияние оказывает история предыдущего нагружения. У кривой $\sigma \sim \Sigma$ две горизонтальные асимптоты: верхняя – предел несущей способности почвы p_0 и нижняя – напряжения, характеризующие предыдущее уплотнение σ_c .

К сожалению, сведения о механических характеристиках почвогрунтов, полученных в результате трехосных испытаний, ограниченные. Поэтому для расчета принята инвариантная форма записи закона деформирования (4) и (5). Возможна также вторая форма записи этого закона

$$\sigma_i = E\Sigma_i,$$

где σ_i и Σ_i – интенсивность соответственно нормальных напряжений и нормальных деформаций; E – переменный (текущий) модуль деформации:

$$\sigma_i = \frac{3}{2}\sqrt{2}\tau_i;$$

$$\Sigma_i = \frac{\sqrt{2}}{2}\gamma_i.$$

Текущий модуль деформации определим из закона деформирования (7)

$$E = E_0 \text{th} \Sigma_i. \quad (8)$$

Различают модули деформации:

- касательный в любой точке $E_{\text{кас}} = \Delta\sigma/\Delta\Sigma$;
- секущий $E = \sigma/\Sigma$.

Эксперименты показывают, что при деформировании почвенного образца касательный модуль деформации вначале растет до некоторого предела, который зависит от свойства почвы. При дальнейшем деформировании почвенный образец разрушается и модуль его уменьшается. В литературе обычно приводятся данные о модулях деформации E_0 в точке $\Sigma = 0$.

Методика расчета. Выделены четыре частные задачи, возникающие при рассмотрении взаимодействия колеса с почвой, которые заключаются в расчете:

- деформированного состояния и нагрузочной характеристики шины;
- условий на контакте;

- объемного напряженно-деформированного состояния почвы в зоне контакта;
- тягово-энергетических показаний колес.

Колесо моделировали гибким штампом эллиптической формы в плане, находящимся под действием тангенциальной P_K и нормальной N_K нагрузок. Большая и малая оси эллипса обозначены соответственно через a и b . Максимальные нормальные давления, действующие в средней части контакта, обозначены $q_{\text{max}n}$, а действующие у плечевых зон: $q_{\text{max}n+1}$. Для анализа контактный отпечаток шины разделен на площадки: пять площадок в середине колеса и по три – у плечевых зон (рис. 3). В силу симметрии действующих сил рассмотрена половина контактного отпечатка. Определены нормальные силы, действующие в центре каждой площадки (в соответствии с цифровыми индексами на рис. 3):

$$Z_1 = Z_8 = q_1 F_1 = 0,4q_1 ab,$$

где

$$F_1 = 2 \cdot 0,40a \cdot 0,5b;$$

$$Z_2 = Z_7 = q_2 F_2 = 0,4q_2 ab,$$

где

$$F_2 = 2 \cdot 0,40a \cdot 0,5b;$$

$$Z_3 = Z_7 = q_3 F_3 = 0,20q_{\text{max}3} ab,$$

где

$$F_3 = 0,40a \cdot 0,5b;$$

$$Z_4 = q_4 F_4 = 0,40q_{\text{max}4} ab,$$

где

$$F_4 = 2 \cdot 0,40a \cdot 0,5b;$$

$$Z_5 = q_5 F_5 = 0,20q_{\text{max}5} ab,$$

где

$$F_5 = 0,40a \cdot 0,5b.$$

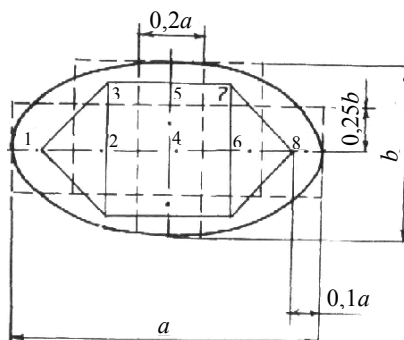


Рис. 3. Деление контактного отпечатка для определения узловых сил

Давления $q_{\max 5}$ и $q_{\max 4}$ приняты из экспериментально определенной эпюры.

Буксование колеса при коэффициентах использования сцепного веса $\varphi < (0,4-0,5)$ проявляется в результате упругого деформирования шины и почвы, а при $\varphi > (0,4-0,5)$ – еще и за счет проскальзывания контактного отпечатка. Чтобы избежать больших погрешностей, обусловленных последним, ограничились рассмотрением объемно-напряженного состояния почвы при коэффициентах сцепления, не превышающих $\varphi = 0,55$.

При выборе параметров пятна контакта прогнозируемых тракторов мощностью 600, 800, 1000 л. с. рассчитывали:

- массу трактора m_t с равными колесами и нормальные нагрузки на одно переднее колесо ($0,3m_t$), исходя из задаваемой мощности и достигнутой энергонасыщенности тракторов;
- площадь контакта (исходя из достигнутых среднего и максимального давлений в контакте, а также соотношений a/b).

Остальные тягово-энергетические показатели колеса (сопротивление качению, буксование и КПД) рассчитывали по методикам, подобным на общепринятые.

В результате численного решения конечной элементной модели определяли дискретные значения σ_z , W_z и U_x в различных участках по длине контакта колеса с почвой. Схема перемещений расчетной решетки под колесом трактора К-701 при $\varphi = 0,55$ показана на рис. 4.

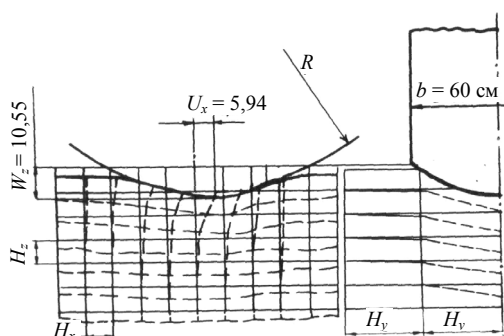


Рис. 4. Перемещение решетки, см, в почве под колесом трактора К-701 при $\varphi = 0,55$

Колесо деформирует почву на глубину W_z в вертикальном направлении и на величину U_x – в тангенциальном. Кинематические потери пу-

ти, связанные с тангенциальной деформацией почвы, характеризует составляющая коэффициента буксования

$$\delta_n = \frac{U_x}{2a},$$

где $2a$ – длина контактного отпечатка шины.

Кинематические потери, связанные с деформацией шины δ , выразим через коэффициент ее тангенциальной эластичности согласно ГОСТ 17697–72 «Автомобили. Качение колеса. Термины и определения»

$$\lambda = \frac{r_k^0 - r_k}{M_k} = \frac{\Delta r_k}{M_k}.$$

Составляющая силы сопротивления качению колеса, учитывающая деформации почвы в поперечном направлении, не превысит 5 % от P_{f1} . С приемлемой для прикладных расчетов точностью составляющую силы сопротивления качению $P_{fн}$ определим путем суммирования составляющих, учитывающих деформации почвы в вертикальном P_{f1} и тангенциальном P_{f2} направлениях $P_{fн} = P_{f1} + P_{f2}$.

Результаты расчетов. В результате решения МКЭ контактной задачи с использованием полученной механической характеристики почвогрунта при объемном деформировании установлено, что увеличение ширины пятна контакта путем сдваивания колес позволяет существенно снизить глубину следа и уплотнение поверхностных слоев почвы. При этом, однако, растет уплотнение подпахотных слоев почвы.

Увеличение по мере роста тягового класса тракторов нормальных нагрузок на колеса с 22,8 (Т-150К) до 54,0 кН (К-710) и максимальных вертикальных давлений q_{\max} с 0,2 до 0,3 МПа приводит к росту коэффициента буксования δ_n с 0,11 до 0,16 (табл. 1) и глубины колеи с 6,8 до 12,1 см (табл. 2).

Таблица 1

Тягово-энергетические показатели колес тракторов высокой и особо высокой мощности при $\varphi = 0,55$

Показатель	Т-150К	К-701	К-710	К-710, сдвоенные колеса	Прогноз для тракторов с мощностью N_e , л. с.		
					600	800	1000
δ_n	0,11	0,13	0,16	0,11	0,17	0,17	0,17
P_k , кН	12,50	20,35	29,70	29,70	39,65	52,85	65,60
P_{f2} , кН	3,68	7,51	12,80	9,24	18,50	25,50	32,34
f_1	0,07	0,07	0,10	0,08	0,11	0,11	0,11

f_2	0,09	0,10	0,14	0,09	0,14	0,15	0,15
f_n	0,16	0,17	0,24	0,17	0,26	0,27	0,27
$\Theta_1, \text{кН} \cdot \text{м}$	–	7,54	12,90	9,27	22,93	39,77	59,76
$P_{кр}, \text{кН}$	8,82	15,92	16,90	20,46	21,13	27,35	33,33
η_n	0,62	0,59	0,48	0,61	0,44	0,42	0,42
η (при $\eta_{ш} = 0,95$)	0,59	0,56	0,46	0,58	0,42	0,40	0,40

Коэффициент сопротивления качению f_1 , учитывающий потери на вертикальную деформацию почвы, растет с 0,07 до 0,10, а учитывающий потери на тангенциальную деформацию f_2 – с 0,09 до 0,14 (табл. 1). Результирующий КПД η_n , учитывающий потери на деформацию почвы и буксование, уменьшается с 0,62 до 0,42. При КПД шины $\eta_{ш} = 0,95$ названный КПД η уменьшается с 0,59 до 0,40. Кинематические и силовые потери ходовых систем тракторов на влажных почвах можно уменьшить путем сдвигания колес. Коэффициент буксования и сопротивления качению колес δ_n , учитывающий потери на деформацию почвы, уменьшается при этом до 0,11 при $f_1 = 0,07$ и $f_2 = 0,09$ (табл. 1). Наиболее существенно уменьшаются потери, связанные с тангенциальной деформацией почвы. При сдвигании колес у трактора К-710 может быть достигнут такой же КПД, как и у трактора Т-150К.

У трактора К-710 со сдвоенными колесами глубина колеи гораздо меньше ($W_z = 8,26$ см), чем с одинарными ($W_z = 12,13$ см) (табл. 2). Уровень уплотняющего воздействия на почву некоторых машин для внесения удобрений уже в настоящее время выше, чем у прогнозируемого трактора 4×4 мощностью 1000 л. с. Так, под колесом 1500×600-635 машины для внесения удобрений РУМ-16 при нагрузке на колесо 5,5 т вертикальные напряжения в поверхностном слое глубиной 0–8 см равны 0,423 МПа, а коэффициент объемной деформации $\Sigma_V = 1,64$, при глубине следа по колее $W_z = 14,14$ см. Снизить колеобразование и уплотняющее воздействие ходовой системы на почву можно за счет существенного увеличения площади ходового аппарата и уменьшения давлений в контакте колеса с почвой. Так, при общей нор-

мальной нагрузке 6,3 т на колесо 1140–700 самоходной машины для внесения удобрений МВУ максимальное его давление – 0,16 МПа, а среднее – 0,12 МПа. Поэтому уплотнение поверхностного слоя под такими колесами небольшое ($\Sigma_V = 1,17$), а глубина следа колеи $W_z = 7,8$ см. Однако при увеличении площади контакта колеса почти не снижается уплотнение глубинных слоев почвы, которые не подвергаются последующей почвообработке. Коэффициенты объемной деформации почвы $\Sigma_V = 1,07$ на глубине 25–40 см под колесами машин для внесения удобрений МВУ и РУМ-16 почти не отличаются.

Таблица 2

Показатели взаимодействия с почвой ведущих колес тракторов высокой и особо высокой мощности при $\phi = 0,55$

Показатель	Т-150К	К-701	К-710	К-710, шины сдвоенные	Прогноз для тракторов с мощностью N_e , л. с.		
					600	800	1000
U_{max}^l , см	4,56	5,92	8,66	5,09	10,23	11,72	12,80
U_{zmax}^l , см	6,82	8,92	12,13	8,26	14,15	15,57	16,70
σ_{zmax} , МПа, на глубине, см:	0–8	0,27	0,28	0,36	0,20	0,37	0,36
	0–16	0,16	0,18	0,24	0,14	0,26	0,27
	16–24	0,10	0,11	0,16	0,10	0,18	0,19
	24–32	0,05	0,07	0,10	0,08	0,12	0,14
σ_{xmax} , МПа, на глубине, см:	0–8	0,14	0,16	0,20	0,12	0,21	0,22
	8–16	0,06	0,07	0,09	0,06	0,11	0,12
	16–24	0,03	0,04	0,05	0,03	0,06	0,07
	24–32	0,01	0,02	0,03	0,02	0,03	0,04

ВЫВОДЫ

1. Для решения прикладных задач сельхозмеханики, а именно выбора допустимых нормальных нагрузок на колесо с учетом формы эпюры давления требуются знания механических характеристик почвогрунтов при объемном деформировании.
2. Предложено выражение (8) для инвариантной механической характеристики почвогрунта.
3. Рассчитаны показатели взаимодействия с почвой колес тракторов высокой и особо высокой мощности. На их основе получены оценки

уплотнения почвы и тягово-энергетических показателей упомянутых тракторов.

4. У реальных почвогрунтов объемные деформации развиваются не только под действием средних нормальных напряжений, но и в результате сдвига (явление дилатансии), а сдвиговые деформации зависят как от интенсивности касательных напряжений (4), так и среднего нормального напряжения (1).

Инвариантная форма записи закона деформирования не может быть применена для сыпучих грунтов, обладающих большим внутренним трением. В условиях эксплуатации распространены разнообразные почвогрунты, механические характеристики которых при объемном деформировании подлежат изучению.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кацыгин, В. В.** Основы теории выбора оптимальных параметров мобильных сельскохозяйственных машин и орудий / В. В. Кацыгин // Вопросы сельскохозяйственной механики. – Минск, 1964. – Т. XVIII. – С. 5–147.
2. **Орда, А. Н.** Уплотнение почвы под воздействием ходовых систем / А. Н. Орда, А. Б. Селеш // Агропанорама. – 2007. – № 1. – С. 13–16.
3. **Золотаревская, Д. И.** Зависимость между сжимающими напряжениями и осадкой почвы / Д. И. Золотаревская // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1980. – № 2. – С. 33–35.
4. **Вялов, С. С.** Реологические основы механики грунтов / С. С. Вялов. – М.: Высш. шк., 1978. – 447 с.
5. **Зурнаджи, В. А.** Механика грунтов, основания и фундаменты / В. А. Зурнаджи, В. В. Николаев. – М.: Высш. шк., 1967. – 415 с.
6. **Безухов, Н. И.** Приложения методов теории упругости и пластичности к решению инженерных задач / Н. И. Безухов, О. В. Лужин. – М.: Высш. шк., 1979. – 200 с.
7. **Горин, Г. С.** Тягово-энергетические параметры агрегатов для выполнения промышленных технологий в растениеводстве: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / Г. С. Горин. – Минск, 1986. – 473 с.
8. **Анусин, Б. З.** Метод конечных элементов при решении задач горной геомеханики / Б. З. Анусин, А. Б. Фадеев. – М.: Недра, 1975. – 142 с.
9. **Coleman, G. E.** The finit element analsis of soil compaction / G. E. Coleman, I. V. Perumpral // Transaction of the ASAE. – 1974. – P. 656–666.
10. **Bertilssen, Gele.** Reaction to mechanical pressure / Gele Bertilssen // Svedish journal of agricultural research. – 1971. – Vol. 1, No. 3. – P. 179–185.

Поступила 15.03.2011