

Орда А.Н., доктор технических наук, профессор;

Шкляревич В.А., старший преподаватель

*Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный
технический университет», г. Минск, Республика Беларусь*

ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ НОРМАЛЬНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ И ОСАДКОЙ ПОЧВЫ

Аннотация. Получены аналитические зависимости между нормальным напряжением и осадкой почвы.

Abstract. Analytical relationships between normal tension and soil sediment were obtained.

Ключевые слова. Напряжение в почве, осадка почвы, деформация, колесо.

Keywords. Soil tension, soil sediment, deformation, wheel.

В земледельческой механике наибольшее распространение находят следующие зависимости между напряжением сжатия и осадкой штампа [1–3]:

$$\sigma = k h, \quad (1)$$

$$\sigma = p \frac{P}{F} h, \quad (2)$$

$$\sigma = c h^{\mu}, \quad (3)$$

$$\sigma = c_0 \varepsilon^{\mu}, \quad (4)$$

$$\sigma = p_0 \left(1 - e^{-h/k_0}\right), \quad (5)$$

$$\sigma = p_0 \left(1 - e^{-L'\varepsilon}\right), \quad (6)$$

$$\sigma = p_0 th \left(\frac{k}{p_0} h \right), \quad (7)$$

$$\sigma = \frac{p_0}{1 + C e^{-c_1 p_0 h}}, \quad (8)$$

где k – коэффициент объемного смятия почвы, Н/м³; $\bar{p}$ – среднее удельное давление, Па; P – периметр опорной площади, м; F – опорная площадь, м²; c – константа; μ – показатель степени деформируемости почвы; c_0 – константа деформируемости с постоянной размерностью, Па; $\varepsilon = h / D$ – относительная деформация; D – диаметр штампа, м; p_0 – предел несущей способности почвы, Па; k_0 – константа деформируемости, м; L' – безразмерный коэффициент относительной жесткости; ε_m – относительная деформация почвы в точке перегиба кривой деформирования.

Проанализируем возможность применения закономерностей деформирования почвы штампом (1)–(8) к процессу передвижения колес.

Для того чтобы можно было применить закономерности деформирования почвы штампом применительно к качению колеса, применяются следующие допущения [4].

1. Сила реакции почвы на элементе поверхности колеса проходит через его ось и равна напряжению σ , умноженному на площадь элемента dA (рисунок 1, а).

2. Напряжение σ под колесом равно напряжению под штампом, вдавленным в почву на глубину, на которой находится рассматриваемый элемент поверхности колеса.

При выполнении данных допущений можно применять зависимость между напряжением σ и осадкой штампа h (рисунок 1, б) для определения напряжений в размеченных точках контакта колеса с почвой.

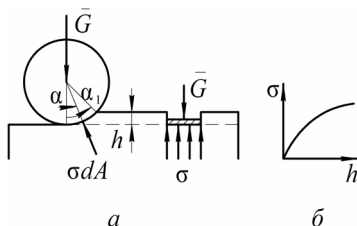


Рисунок 1 – Деформация почвы:

а – схема деформирования почвы колесом и штампом;

б – зависимость между напряжением σ и деформацией почвы h

При изучении процесса вдавливания деформатора установлено [5, 6, 7, 10, 11, 12], что кривая изучаемого явления может быть симметричной лишь в некоторых частных случаях. В общем случае деформирования бесконечного полупространства почвы она асимметрична относительно точки перегиба [5]. Поэтому процесс осадки почвы под воздействием деформатора будем характеризовать аналитическим описанием кривой вдавливания, состоящей из вогнутого и выпуклого участков. Так, Д.И. Золотаревская, используя результаты исследования Г.И. Покровского и предложенную В.В. Кацыгиным зависимость гиперболического тангенса между сопротивлением и осадкой почвы (7), получила следующую формулу [6]:

$$\sigma = p_0 \left[th \frac{E_m}{p_0} (\varepsilon - \varepsilon_m) + th \frac{E_m}{p_0} \varepsilon_m \right], \quad (9)$$

где E_m – максимальный модуль деформации почвы, Па; $\varepsilon = h / h_0$ – относительная осадка; h_0 – эквивалентная высота деформируемого слоя, м; ε_m – относительная осадка почвы, соответствующая точке перегиба кривой.

Формула (9) больше приемлема для практического использования, чем выражение (8), так как входящие в нее коэффициенты имеют физический

смысл и легко определяются из опыта. Однако, она также симметрична относительно точки перегиба, что не совсем точно отражает процесс вдавливания в начальной стадии.

Для нахождения уравнения кривой вдавливания введем вспомогательную систему координат $\bar{\sigma}C\bar{h}$. Начало данной системы координат поместим в точку перегиба C . Выпуклый участок кривой вдавливания в системе координат $\bar{\sigma}C\bar{h}$ описывается уравнением:

$$\bar{\sigma} = pth \frac{k_m}{p} \bar{h}, \quad (10)$$

где k_m – коэффициент объёмного смятия почвы в точке перегиба C , Н/м³.

Кривую вдавливания (рисунок 2) будем описывать двумя уравнениями. Зависимость между сопротивлением и осадкой для вогнутого участка имеет следующий вид [5]:

$$\sigma_1 = \sigma_y - (\sigma_0 + \sigma_y)th \frac{k_m}{\sigma_0 + \sigma_y} (h_y - h). \quad (11)$$

Для практического использования равенство (11) неприемлемо из-за трудности определения напряжения σ_0 , обусловленного сцеплением почвы. Выразим его через коэффициент k_0 объёмного смятия в начале процесса вдавливания ($k_0 = \tan \alpha_0$). Возьмем производную напряжения σ_1 по осадке h из уравнения (19), одновременно воспользовавшись тем, что при $h = 0$, $\sigma_1 = 0$, а $k_0 = d\sigma_1 / dh$.

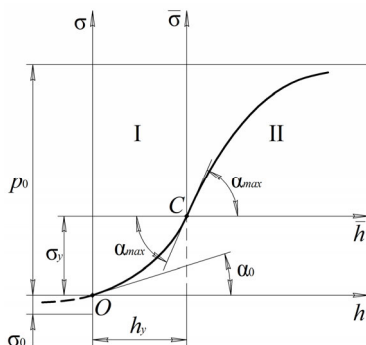


Рисунок 2 – Зависимость между сопротивлением и осадкой штампа

Зависимость сопротивления от глубины на вогнутом участке кривой вдавливания в таком случае будет иметь вид:

$$\sigma_1 = \sigma_y - \frac{k_m h_y}{\text{Arch} \sqrt{\frac{k_m}{k_0}}} th \left(\frac{h_y - h}{h_y} \text{Arch} \sqrt{\frac{k_m}{k_0}} \right). \quad (12)$$

Для выпуклого участка зависимость между сопротивлением и осадкой запишем следующим образом:

$$\sigma_2 = \sigma_y + (p_0 - \sigma_y)th \frac{k_m}{p_0 - \sigma_y} (h - h_y), \quad (13)$$

где σ_2 – сопротивление вдавливанию деформатора во второй стадии, характеризующей выпуклым участком кривой, Па;

Найдём глубину следа в зависимости от давления движителя на почву. Если давление меньше сопротивления вдавливанию в точке перегиба, глубина следа определяется из формулы (12):

$$h = \frac{h_y}{A_0} \left[A_0 - \text{Arth} \frac{A_0 (\sigma_y - \sigma)}{k_m h_y} \right], \quad (14)$$

где $A_0 = \text{Arch} \sqrt{k_m / k_0}$.

Для случая, когда давление движителя на почву превышает сопротивление вдавливанию в точке перегиба, глубину следа находим из выражения (13):

$$h = h_y + \frac{(p_0 - \sigma_y)}{k_m} \text{Arth} \frac{\sigma_y - \sigma}{p_0 - \sigma_y}. \quad (15)$$

По формулам (14) и (15) строим зависимость деформации почвы с различными механическими свойствами от давления на неё (рисунок 3). Рыхлая почва ($\sigma_y = 80$ кПа; $h_y = 0,058$ м; $k_m = 2500$ кПа/м; $k_0 = 300$ кПа/м; $p_0 = 200$ кПа); почва средней плотности ($\sigma_y = 200$ кПа; $h_y = 0,058$ м; $k_m = 5000$ кПа/м; $k_0 = 1500$ кПа/м; $p_0 = 500$ кПа); почва высокой плотности ($\sigma_y = 300$ кПа; $h_y = 0,058$ м; $k_m = 7500$ кПа/м; $k_0 = 2250$ кПа/м; $p_0 = 750$ кПа).

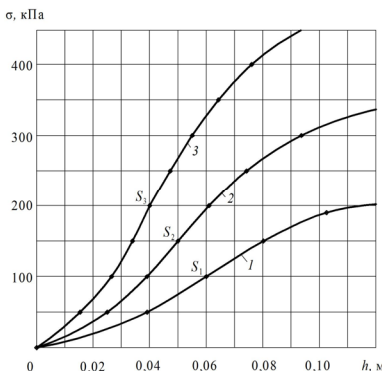


Рисунок 3 – Зависимость деформации от напряжения в почве:

1 – при $k_0 = 300$ кПа/м; 2 – при $k_0 = 1500$ кПа/м;

3 – при $k_0 = 2250$ кПа/м

Из рисунка 3 видно, что для почвы небольшой исходной плотности ($k_0 = 300$ кПа/м) четко выделяются три участка: вогнутый, близкий к прямолинейному и выпуклый. Для почвы с высокой исходной плотностью ($k_0 = 2250$ кПа/м) четко выделяется средний прямолинейный участок, а выпуклый – отсутствует.

Закключение. 1. В общем случае деформирования, когда плотность почвы в различных горизонтах мало различима, зависимость между напряжениями сжатия и осадкой штампа имеет S-образный характер. График этой зависимости, имеющий вогнутый и выпуклый участки, является ассиметричным относительно перегиба.

2. Для определения глубины следа при воздействии колес следует применять предложенные зависимости, описывающие аналитические вогнутый и выпуклый участки кривой деформирования. Из графиков, построенных по полученным зависимостям видно, что с увеличением рыхлости почвы усиливается вогнутость в начальной стадии и выпуклость в конечной стадии деформирования.

Список использованной литературы

1. Орда, А. Н. Свойства почвы и их изменение под воздействием ходовых систем почвообрабатывающих машинно-тракторных агрегатов // А. Н. Орда, А. С. Воробей, В. А. Шкляревич // Инженерный вестник. – 2008. – № 1 (25). – С. 68–73.
2. Орда, А. Н. Эколого-энергетические основы формирования машинно-тракторных агрегатов : автореф. дис. ... д-ра тех. Наук : 05.20.03 / А. Н. Орда; Белорус. аграр. тех. ун. – Минск, 1997. – 36 с.
3. Кацыгин, В. В. Основы теории выбора оптимальных параметров мобильных с.х. машин и орудий / В. В. Кацыгин // Вопросы сельскохозяйственной механики. – 1964. – Т. 13. – С. 5–147.
4. Кулен, А. Современная земледельческая механика / А. Кулен, Х. Купперс. – Москва, Агропромиздан, 1986. – 350 с.
5. Бойков, В. Обоснование зависимости между сжимающими напряжениями и осадкой почвы / В. Бойков, Ч. Жданович, А. Орда // Y Miedzynarodowe symposium Ekologiczne aspekty mechanizacji nawozenia, ochrony roslin i uprawy gleby. – Warszawa, 1998. – S. 161–168.
6. Золотаревская, Д. И. Зависимость между сжимающими напряжениями и осадкой почвы / Д. И. Золотаревская // Механизация и электрификация сел. хоз-ва. – 1980. – № 2. – С. 30–32.
7. Романюк, Н. Н. Снижение уплотняющего воздействия на почву мобильных энергосредств : монография / Н. Н. Романюк // Минск : БГАТУ, 2020. – 200 с.
8. Закономерности уплотнения почвы под воздействием колес сельскохозяйственных машин / И. Н. Шило, Н. Н. Романюк, А. Н. Орда, В. А. Шкляревич, А. С. Воробей // Агропанорама. – 2016. – № 2. – С. 2–8.
9. Влияние количества осей ходовых систем мобильной сельскохозяйственной техники на глубину следа / И. Н. Шило [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. – 2016. – №4. – С. 37–41.

10. Романюк, Н. Н. Определение деформации почвы от вибрационных нагрузок сельскохозяйственных движителей / Н. Н. Романюк // Моделирование и прогнозирование аграрных энергосберегающих процессов и технологий : материалы Международной научно-технической конференции, Минск, 22–24 апреля 1998 г. : в 2 ч. Ч. 2. – Минск : БАТУ, 1998. – С. 34–37.

11. Обоснование закономерностей деформирования почв различных агрофонов под воздействием колес / И.Н. Шило [и др.] // Агропанорама. – 2018. – N 2. – С. 2–6.

12. Влияние количества осей ходовой системы мобильной сельскохозяйственной техники на глубину следа = Influence of the number of undercarriage axles of mobile agricultural machinery on the depth of track / И. Н. Шило [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. – 2016. – N 4. – С. 37–41.

Summary. In the general case of deformation, when the soil density in different horizons is poorly distinguishable, the relationship between compression stresses and stamp settlement has an S-shaped character. The graph of this relationship, which has concave and convex sections, is asymmetrical relative to the inflection. To determine the depth of the trace under the action of wheels, the proposed dependencies should be used, describing the analytical concave and convex sections of the deformation curve. From the graphs constructed using the obtained dependencies, it is evident that with an increase in soil looseness, concavity in the initial stage and convexity in the final stage of deformation increase.

УДК 631.31

Ружьев В.А., кандидат технических наук, доцент;

Губарев В.Д., исследователь, преподаватель-исследователь;

Титов К.С., молодой ученый

*ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет»,
г. Пушкин, Российская Федерация*

ПЕРСПЕКТИВНОЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ РАБОЧЕГО ОРГАНА КУЛЬТИВАТОРА-ГЛУБОКОРЫХЛИТЕЛЯ

Аннотация. Обработка почвы является наиболее энергоемким технологическим процессом в технологии производства сельскохозяйственных культур. Высокие энергозатраты при обработке почвы обусловлены применением традиционных подходов к проектированию геометрии рабочих органов почвообрабатывающих агрегатов. Основная задача перспективного конструктивно-технологического решения – снижение затрат энергии на выполнение процессов формирования требуемой структуры корнеобитаемого слоя и минимизацию износа контактных поверхностей.

Abstract. Soil cultivation is the most energy-intensive technological process in the technology of agricultural crop production. High energy costs during soil cultivation are due to the use of traditional approaches to designing the geometry of the working bodies of soil-cultivating units. The main task of a promising design and technological solution is to reduce energy costs for performing the processes of forming the required structure of the root-inhabited layer and minimizing wear of contact surfaces.