

ЗАКОНОМЕРНОСТИ УПЛОТНЕНИЯ ПОЧВЫ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ КОЛЕС СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН

И. Н. Шило

ректор БГАТУ, докт. техн. наук, профессор

Н. Н. Романюк

первый проректор БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

А. Н. Орда

зав. каф. теоретической механики и теории механизмов и машин БГАТУ, докт. техн. наук, профессор

В. А. Шкляревич

ст. преподаватель каф. теоретической механики и теории механизмов и машин БГАТУ

А. С. Воробей

ст. научн. сотр. РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», канд. техн. наук

В статье на основании теории распространения и поглощения энергии получены зависимости плотности различных слоев почвы от оказываемого на нее давления. Рассмотрены варианты деформирования исходной почвы с одинаковыми свойствами по глубине и почвы с плотным подстилаемым основанием.

Ключевые слова: плотность, почва, напряжение, ходовая система, колесо, поглощение энергии, деформация сжатия, деформатор.

In the article on the basis of the distribution and absorption theory of energy dependences of density of soil various layers on pressure put upon it are received. Options of deformation of the initial soil with identical properties on depth and soils with the dense spread basis are considered.

Keywords: density of soil, stress, running system, wheel, energy absorption, compression, distortion, warp.

Введение

Из-за воздействия ходовых систем машинно-тракторных агрегатов (МТА) снижается урожайность сельскохозяйственных культур. Так, урожайность зерновых в следах тракторов снижается на 10-15 %, а корнеклубнеплодов – на 20-30 %. Суммарная площадь следов движителей МТА почти в 2 раза превышает площадь обрабатываемой поверхности.

Повышение плотности почвы, вызванное воздействием движителей тракторов и сельскохозяйственных машин, привело к увеличению твердости почвы в 2-3 раза. Удельное сопротивление при обработке пахотного слоя после прохода тракторов повышается на 15-65 %, а транспортных средств и комбайнов – на 60-90 % [1].

При многократном воздействии на почву идет накопление уплотнения почвы, как в пахотном, так и в подпахотном горизонтах. Плохая заделка семян из-за образовавшейся колеи, высокая плотность почвы по следам ходовых систем значительно снижают биологический урожай сельскохозяйственных культур. Поэтому одним из резервов повышения урожайности и снижения энергетических затрат на их производство является поддержание и регулирование свойств почвы в оптимальном состоянии.

Основная часть

Характер и закономерности уплотнения почвы зависят от размеров и режимов нагружения деформатора, а также от исходного состояния почвенного массива. При наличии взрыхленного слоя конечной толщины в расчетах, как правило, допускают, что уплотняется лишь этот слой.

Тракторы и другая сельскохозяйственная техника уплотняют почву на глубину, превышающую пахотный слой. Высота уплотняемого слоя зависит от размеров ходового аппарата и нагрузки, передаваемой через него на почву.

Анализ механико-математических моделей показал, что при расчете уплотнения почвы лучше всего подходит энергетический метод, учитывающий влияние закона поглощения энергии на изменение свойств почвы. Любое изменение свойств системы характеризуется изменением координат ее состояния, или обобщенных зарядов. Обобщенным зарядом воздействующего на почву колеса является его количество движения [1]:

$$k = m \cdot \mathcal{G},$$

где m – масса колеса, кг;

\mathcal{G} – скорость деформации почвы колесом, м/с.

Н.А. Умов установил, что в сплошных средах происходит распространение энергии и предложил следующую формулу потока энергии [2]:

$$\bar{q} = \bar{\mathcal{G}} \left(p + \rho \cdot E_{\text{вн}} + \rho \frac{\mathcal{G}^2}{2} \right),$$

где \bar{q} – вектор потока энергии;

$\bar{\mathcal{G}}$ – вектор скорости;

p – давление, Па;

ρ – плотность, кг/м³;

$E_{\text{вн}}$ – внутренняя энергия вещества, Дж.

Связь потока энергии и потока массы вещества такова, что энергия и количество массы, проходящие за единицу времени через малую площадку, изменяются пропорционально, а направления движения их совпадают. Н.А. Умов также выявил, что при движении энергии в твердых телах постоянной упругости сила упругости P связана следующей зависимостью с количеством протекающей через элемент в единицу времени энергии \mathcal{E} :

$$P \cdot i_p = -\mathcal{E} \cdot i_s,$$

где i_p – слагающая скорости элемента по направлению силы упругости;

i_s – слагающая скорости по нормали к элементу площадки.

При распространении энергии в почвах происходит ее поглощение. В.В. Кацыгин [3] предложил следующую зависимость распределения энергии J_x впереди деформатора:

$$J_x = J_0 \cdot e^{-\beta_3 \cdot x}, \quad (1)$$

где J_0 – первоначальная энергия, Дж;

β_3 – коэффициент поглощения энергии, м⁻¹;

x – расстояние от опорной поверхности деформатора до точки полупространства, энергия в которой равна J_x , м.

В зависимости от интенсивности поглощения различными слоями почвы потока энергии происходит изменение напряженного состояния почвы, т.е. в ней возникает градиент напряжения. Возникшие в почве напряжения являются обобщенными потенциалами. Изменение обобщенного потенциала (напряжения) вызывает изменение сопряженного с ним обобщенного заряда.

Экспериментально установлено, что при возникновении в почве градиента напряжения, из всех физико-механических свойств ее наибольшему изменению подвергается плотность, поэтому ее можно принять в качестве обобщенного заряда.

Таким образом, увеличение плотности при воздействии колеса на почву является функцией напряжения почвы

$$\rho = f(\sigma).$$

Продифференцируем эту зависимость

$$d\rho = \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} d\sigma,$$

$$\text{Тогда, получим } d\rho = k_1 \cdot d\sigma, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3 \times \text{Па}},$$

где $k_1 = \partial \rho / \partial \sigma$ – коэффициент уплотнения почвы.

Коэффициент k_1 – можно рассматривать как скорость изменения плотности почвы с ростом напряжения.

Установим закономерность распределения напряжений по глубине. При деформировании почвы наряду с ее уплотнением имеет место и сдвиг (рис. 1).

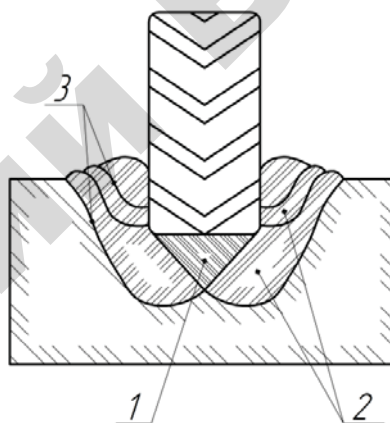


Рисунок 1. Схема образования ядра уплотнения в почве под движителем мобильной сельскохозяйственной техники: 1 – ядро уплотнения почвы; 2 – зоны сдвигов; 3 – площадки скольжения

Зависимость между напряжением σ и деформацией h подчиняется функции гиперболического тангенса, при этом интенсивность роста напряжения отстает от деформации (рис. 2) [3].

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

где p_0 – предел несущей способности почвы, Па;

k – коэффициент объемного смятия почвы, Па/м.

Зависимость деформации сжатия (уплотнения) неограниченного полупространства почвы, имеющей одинаковые физико-механические свойства по глубине, от напряжения пропорциональна (рис. 2, прямая OA):

$$h_{\text{упн}} = \frac{\sigma}{k}. \quad (2)$$

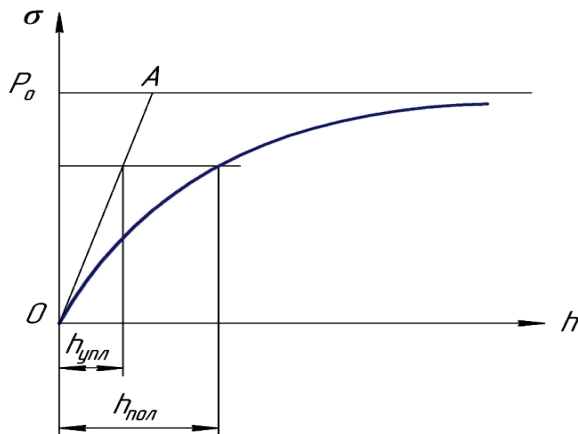


Рисунок 2. Зависимость между напряжением и деформацией почвы

Максимальная деформация уплотнения почвы каким-либо деформатором определяется отношением несущей способности к коэффициенту объемного смятия

$$h_{упл\ max} = \frac{\rho_0}{k}. \quad (3)$$

Затраченная (поглощенная) на уплотнение почвы удельная энергия равна удельной работе, совершаемой деформатором при перемещении его на величину $h_{упл}$:

$$\mathcal{E}_{упл} = \int_0^{\sigma_0} h_{упл}(\sigma) d\sigma \cdot \int_0^{\sigma_0} \frac{\sigma}{k} = \frac{\sigma_0^2}{2 \cdot k}.$$

где σ_0 – напряжение почвы в контакте с деформатором.

На расстоянии x поглощенная энергия будет равна

$$\frac{\sigma_x^2}{2k}$$

Подставив полученные выражения в уравнение (1), имеем

$$\frac{\sigma_x^2}{2k} = \frac{\sigma_0^2}{2k} \cdot e^{-\beta_3 \cdot x}$$

Тогда

$$\sigma_x = \sigma_0 \cdot e^{-(1/2) \cdot \beta_3 \cdot x}$$

Запишем это уравнение в виде

$$\sigma_x = \sigma_0 \cdot e^{-\beta \cdot x}, \quad (4)$$

где $\beta = (1/2) \cdot \beta_3$ – коэффициент распределения напряжений, m^{-1} .

Приращение плотности почвы на участке dx пропорционально градиенту напряжения

$$d\rho_x = k_1 \cdot \psi_x dx,$$

где k_1 – коэффициент уплотнения, $kg/H \cdot m$;

ψ_x – градиент напряжения, Pa/m .

При изучении процесса поглощения почвой энергии В. В. Кацыгиным [3] было принято следующее исходное уравнение:

$$\psi_\sigma = -\beta_3 \cdot J,$$

где ψ_σ – удельная поглощенная энергия, Дж;

J – поток энергии, Дж·м.

Рассуждая аналогично, принимаем, что градиент напряжения пропорционален действующему напряжению

$$\psi_{\sigma_x} = -\beta \cdot \sigma_x.$$

Тогда, приращение плотности

$$d\rho_x = -k_1 \cdot \beta \cdot \sigma_x dx.$$

Подставив зависимость (4) распределения напряжений по глубине в последнее уравнение, получим

$$d\rho_x = -k_1 \cdot \beta \cdot \sigma_0 \cdot e^{-\beta \cdot x} dx. \quad (5)$$

Общий интеграл дифференциального уравнения (5)

$$\rho_x = k_1 \cdot \sigma_0 \cdot e^{-\beta \cdot x} + C$$

Постоянную интегрирования C находим из условия, что при $x = 0$, $\rho = \rho_0$

(ρ_0 – плотность почвы у основания деформатора по окончании процесса деформирования)

$$C = \rho_0 - k_1 \cdot \sigma_0.$$

Частное решение дифференциального уравнения (5):

$$\rho_x = \rho_0 - k_1 \cdot \sigma_0 \cdot (1 - e^{-\beta \cdot x}) \quad (6)$$

представляет собой закон распределения плотности по глубине деформированного полупространства.

Коэффициенты распределения напряжений β и уплотнения почвы k_1 находятся на основании результатов экспериментальных данных по следующим формулам:

$$\beta = \frac{1}{x} \ln \frac{\sigma_0}{\sigma_x}, \quad (7)$$

$$k_1 = \frac{1}{\sigma_0} \cdot \frac{\rho_0 - \rho_x}{1 - e^{-\beta \cdot x}}. \quad (8)$$

Плотность верхнего слоя почвы ρ_0 при напряжении σ_0 – найдем исходя из того, что при воздействии на почву деформатором уплотняется только эффективный ее слой, высота которого зависит от величины контактного напряжения и физико-механических свойств почвы. Из зависимости (4) находим высоту эффективного слоя почвы

$$x_h = \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_x} \right). \quad (9)$$

Напряжение σ_h выбирается из условия развития в зоне его действия только упругих деформаций (отсутствия уплотнения почвы). Его значение обусловлено свойствами почвы и колеблется в пределах 5 – 20 кПа.

Плотность ρ_h на нижней границе эффективного слоя после деформации равна плотности, не подвергшейся воздействию почвы.

Из уравнения (6)

$$\rho_0 = \rho_h + k_1 \cdot \sigma_0 \cdot (1 - e^{-\beta \cdot h}). \quad (10)$$

Учитывая, что $\rho_h = \rho_n$, а значение x_h вычисляется по формуле (9)

$$\rho_0 = \rho_h + k_1 \cdot \sigma_0 \cdot (1 - e^{-\ln(\sigma_0/\sigma_h)}).$$

Поскольку

$$e^{-\ln(\sigma_0/\sigma_h)} = \frac{\sigma_h}{\sigma_0},$$

то получим:

$$\rho_0 = \rho_n + k_1 \cdot \sigma_0 - k_1 \cdot \sigma_h.$$

При отсутствии воздействия ($\sigma_0 = 0$) величина максимальной плотности ρ_0 равняется плотности почвы ρ_n . С учетом этого, член $k_1 \cdot \sigma_h$ (наличие его обусловлено некоторым уплотнением почвы в зоне действия напряжения σ_h) в последнем уравнении должен равняться нулю. Величиной $k_1 \cdot \sigma_h$ можно пренебречь, так как напряжение σ_h во много раз меньше σ_0 .

Оценим величину погрешности в связи с пренебрежением членом $k_1 \cdot \sigma_h$. Воспользуемся при этом экспериментальными данными по уплотнению почвы. При воздействии на почву влажностью 19,2 % давлением 150 кПа плотность увеличилась с 970 до 1260 кг/м³.

Подставив эти данные в последнюю зависимость и приняв $\sigma_h = 10$ кПа, можно записать:

$$1260 = 970 + 150 k_1 - 10 k_1.$$

Если обозначить член $10 k_1$ через x ,

$$1260 = 970 + 15 x - x.$$

Отсюда $x = 20$ кг/м³.

Таким образом, $k_1 \cdot \sigma_h = 20$ кг/м³ при начальной плотности почвы 970 кг/м³, что меньше величины колебаний плотности в зависимости от места взятия образца [1].

Тогда зависимость между плотностью почвы в контакте с деформатором и контактным напряжением, в случае деформации бесконечного полупространства почвы, линейна

$$\rho_0 = \rho_n + k_1 \cdot \sigma_0. \quad (11)$$

Установим, как соотносятся между собой коэффициент k_1 с коэффициентами распределения напряжений β и объемного смятия почвы k .

С этой целью, максимальную плотность почвы при напряжении σ_0 находим из условия, что на

уплотнение эффективного слоя x_h (рис. 1) идет объем почвы с высотой, равной величине деформации уплотнения $h_{\text{упл}}$, определяемой по формуле (2).

Масса слоя, подвергающегося уплотнению, с основанием, равным площади опорной поверхности деформатора F , до деформирования

$$M_{II} = F \cdot \rho_{II} \left(x_h + \frac{\sigma_0}{k} \right).$$

Масса уплотненного эффективного слоя почвы

$$M_{II} = F \int_0^{x_h} \left[\rho_0 - k_1 \cdot \sigma_0 (1 - e^{-\beta \cdot x}) \right] dx$$

Значение этого интеграла равно

$$\begin{aligned} M_{II} &= F \left[\rho_0 \cdot x - k_1 \cdot \sigma_0 \left(x + \frac{1}{\beta} e^{-\beta \cdot x} \right) \right]_0^{x_h} = \\ &= F \left[\rho_0 \cdot x_h - k_1 \cdot \sigma_0 \left(x_h + \frac{1}{\beta} e^{-\beta \cdot x_h} - \frac{1}{\beta} \right) \right]. \end{aligned}$$

Приравняв правую часть полученного выражения к значению массы эффективного слоя почвы до деформирования, получим

$$\rho_0 \cdot x_h - k_1 \cdot \sigma_0 \left(x_h + \frac{1}{\beta} e^{-\beta \cdot x_h} - \frac{1}{\beta} \right) = \rho_{II} \left(x_h + \frac{\sigma_0}{k} \right),$$

откуда

$$\rho_0 = \rho_{II} + k_1 \cdot \sigma_0 + \frac{\rho_{II}}{k} \cdot \frac{\sigma_0}{x_h} - \frac{k_1}{\beta} \cdot \frac{\sigma_0}{x_h} + \frac{k_1}{\beta} \cdot \frac{\sigma_h}{x_h}.$$

Для значений $\beta > 1$ членом $(k_1 / \beta) \cdot (\sigma_h / x_h)$ можно пренебречь.

Тогда

$$\rho_0 = \rho_{II} + k_1 \cdot \sigma_0 + \frac{\rho_{II}}{k} \cdot \frac{\sigma_0}{x_h} - \frac{k_1}{\beta} \cdot \frac{\sigma_0}{x_h}. \quad (12)$$

В соответствии с формулами (11) и (12)

$$\frac{\rho_{II}}{k} \cdot \frac{\sigma_0}{x_h} = \frac{k_1}{\beta} \cdot \frac{\sigma_0}{x_h}.$$

Отсюда

$$k_1 = \frac{\rho_{II} \cdot \beta}{k}.$$

При этом зависимость (11) плотности верхнего слоя почвы от напряжения примет вид

$$\rho_0 = \rho_{II} \left(1 + \frac{\beta}{k} \sigma_0 \right). \quad (13)$$

Зависимость распределения плотности почвы по глубине с учетом полученного значения коэффициента уплотнения k_1 и формулы (13) примет вид

$$\rho_x = \rho_{II} \left(1 + \frac{\beta}{k} \sigma_0 \cdot e^{-\beta \cdot x} \right). \quad (14)$$

Зависимость (14) получена исходя из предположения, что распределение напряжений и плотности почвы по глубине не зависит от величины давления. Однако известно [4], что при достижении давлением величины предела несущей способности почвы, плотность в образовавшемся ядре уплотнения одинакова по глубине. Распределение плотности почвы по высоте уплотненного ядра в этом случае изобразится прямой линией, параллельной оси ординат (рис. 3а), что соответствует характеру протекания пластических деформаций. Поэтому при контактных напряжениях, близких к пределу несущей способности почвы, зависимость (13) может отклониться от пропорциональной (рис. 3б, линия 1).

Установлено [5], что при сжатии сравнительно

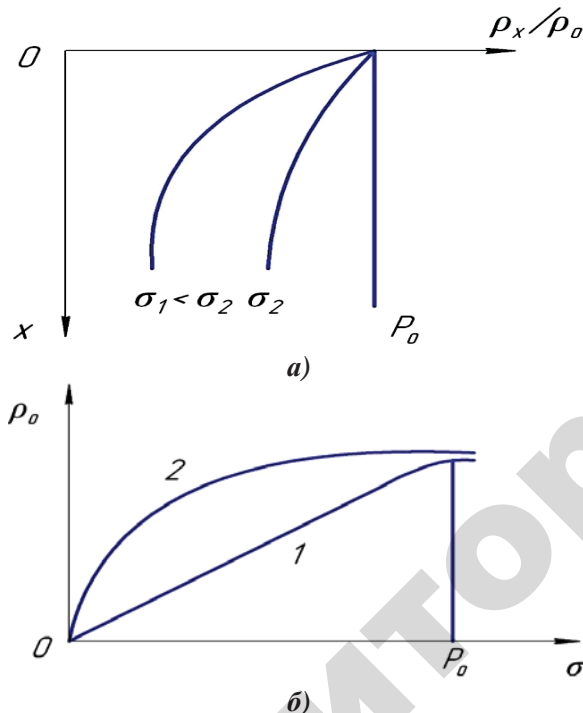


Рисунок 3. Зависимость плотности почвы от напряжения: а – по глубине; б – верхнего слоя; 1 – с возможностью бокового расширения; 2 – без возможности бокового расширения

тонкого слоя грунта без возможности бокового расширения зависимость плотности почвы от удельного давления имеет вид экспоненты (рис. 3б, кривая 2). Нарастание уплотнения почвы в этом случае будет происходить интенсивнее, чем при деформировании полупространства с ограниченной возможностью бокового расширения, так как во втором случае затрачивается дополнительная энергия на уплотнения нижележащих слоев почвы. Однако в связи с тем, что плотность почвы имеет верхний предел, определяемый типом, структурой и влажностью ее, при дальнейшем увеличении давления интенсивность нараста-

ния плотности снижается, что и определяет экспоненциальный характер кривой 2.

Уплотнение верхнего слоя почвы найдем из выражения (13)

$$\frac{\rho_0}{\rho_{II}} = 1 + \frac{\beta}{k} \sigma_0. \quad (15)$$

Таким образом, уплотняющее воздействие можно оценивать величиной плотности почвы в контакте с деформатором (13), или уплотнением верхнего слоя почвы (15), высотой уплотняемого слоя (9) и распределением плотности по глубине (14).

Проанализируем, как соотносятся деформации уплотнения и сдвига для различных типов почв. При воздействии нагрузкой на рыхлые почвы под подошвой штампа наблюдается четкий контур уплотненного ядра [5], линии сдвига внутри массива обнаруживаются лишь при достижении давлением величины, близкой к несущей способности почвы. При нагружении уплотненных песчаных почв на поверхности появляются линии выпора уже при небольших деформациях, после чего происходит формирование уплотненного ядра. Относительная величина сдвига в общей осадке для данного случая выше, чем для рыхлых почв.

Рассмотрим процесс уплотнения почвы, подстилаемой плотным основанием (рис. 4.4а). При выводе зависимости между контактным напряжением и плотностью почвы будем допускать, что уплотняется только пахотный слой, высотой H . Это допущение основано на том, что рыхлая почва характеризуется повышенной способностью поглощения.

Масса слоя почвы, подвергающегося уплотнению штампом с единичной площадью основания, равна

$$M_n = (H - 2 \cdot \nu \cdot h) \cdot \rho_n, \quad (16)$$

где ν – коэффициент бокового расширения почвы для случая деформации почвы с ограниченной возможностью бокового расширения.

После уплотнения эффективный слой почвы имеет высоту $(H - h)$.

Тогда масса слоя почвы после воздействия штампом с единичной площадью

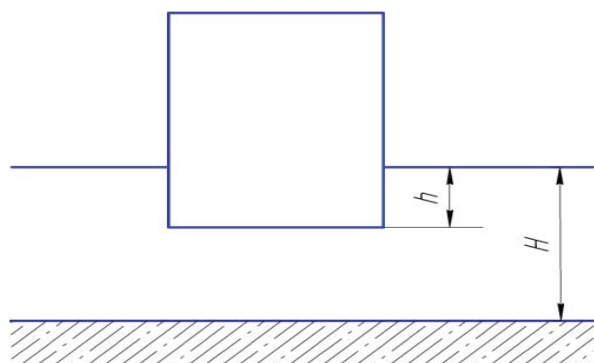
$$M_n = F \int_0^{H-h} \rho(x) dx$$

Зависимость плотности почвы от глубины x выражается формулой (6). С учетом этого

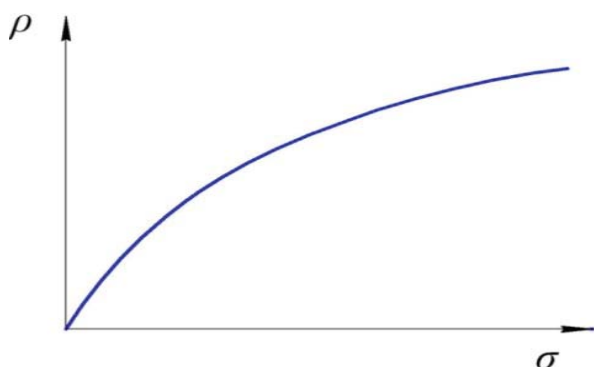
$$M_n = \int_0^{H-h} \left[\rho_0 - k_1 \cdot \sigma_0 \cdot (1 - e^{-\beta \cdot x}) \right] dx$$

Значение этого интеграла равно

$$M_n = \left\{ \rho_0 (H - h) - k_1 \cdot \sigma_0 \cdot \left[(H - h) + \frac{1}{\beta} e^{-\beta \cdot (H-h)} - \frac{1}{\beta} \right] \right\}. \quad (17)$$



а)



б)

Рисунок 4. Влияние плотного подстилающего слоя на уплотнение почвы: а) схема нагружения; б) зависимость между напряжением и плотностью

Из зависимостей (16) и (17) найдем плотность верхнего слоя почвы после уплотнения:

$$\rho_0 = \rho_n \frac{H - 2 \cdot \nu \cdot h}{H - h} + \frac{k_1 \cdot \sigma_0}{H - h} \times \left[(H - h) + \frac{1}{\beta} (e^{-\beta(H-h)} - 1) \right]. \quad (18)$$

Значение величины деформации почвы h предварительно определяется по формуле

$$\sigma = \frac{a}{b} \cdot \operatorname{tg}(a \cdot b \cdot h), \quad (19)$$

где $a = \sqrt{k_0}$;

$$b = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{h_{\text{гнл}} \sqrt{k_0}},$$

$$h_{\text{гнл}} = H \cdot \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{\text{min}}}{(1 + \varepsilon_0)[1 - 2 \cdot \nu(1 + \varepsilon_{\text{min}})]},$$

где $h_{\text{гнл}}$ – предельная величина деформации, м;
 H – высота пахотного слоя, м;

ε_0 – коэффициент пористости почвы до нагружения;

ε_{min} – минимально возможный коэффициент пористости почвы;

ν – коэффициент бокового расширения почвы для случая деформирования с ограниченной возможностью расширения.

Значение коэффициента b находилось из предположения о недеформируемости подстилаемого основания.

Зависимость между плотностью верхнего слоя почвы и величиной контактного напряжения показана на рис. 4, б.

Выводы

Степень уплотняющего воздействия ходовых систем на почву можно оценивать величиной плотности верхнего слоя почвы, характером распределения плотности почвы по глубине и высотой уплотняемого слоя. Предложенные закономерности уплотнения почв позволяют определить основные критерии и величины, которые оказывают наибольшее влияние на изменение свойств почвы. Данные зависимости могут быть использованы для выбора типа и параметров ходовых систем, а также режимов работы почвообрабатывающих машинно-тракторных агрегатов, обеспечивающих допустимое воздействие ходовых систем на почву.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- Орда, А. Н. Эколого-энергетические основы формирования машинно-тракторных агрегатов: автореф. дис... докт. техн. наук: 05.20.03 / А.Н. Орда; Белор. аграрный технич. ун-т. – Мн., 1997. – 269 с.
- Гуло, Д. Д. Пособие для учащихся / Д.Д. Гуло, Н.А. Умов. – М.: Просвещение. – 1977. – 128 с.
- Кацыгин, В. В. Основы теории выбора оптимальных параметров мобильных сельскохозяйственных машин и орудий / В.В. Кацыгин // Вопросы сельскохозяйственной механики: т. 3. – Минск: Ураджай, 1964. – С. 5-147.
- Кушнарев, А.С. Уменьшение водного воздействия на почву рабочих органов и ходовых систем машинных агрегатов при внедрении индустриальных технологий возделывания сельскохозяйственных культур / А.С. Кушнарев, В.М. Мацепуро. – М.: Всесоюзный ордена «Знак Почета» сельскохозяйственный институт заочного образования, 1986. – 56 с.
- Черкасов, И. И. Механические свойства грунтов в дорожном строительстве / И.И. Черкасов. – М.: Транспорт, 1976. – 248 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 15.02.2016