

УДК 630*372/375

ВЛАДИМИР ЯКОВЛЕВИЧ ШАПИРО

доктор технических наук, профессор кафедры высшей математики лесоинженерного факультета, Санкт-Петербургская государственная лесотехническая академия им. С. М. Кирова
unpplta@mail.ru

ИГОРЬ ВЛАДИСЛАВОВИЧ ГРИГОРЬЕВ

доктор технических наук, профессор кафедры технологии лесозаготовительных производств лесоинженерного факультета, Санкт-Петербургская государственная лесотехническая академия им. С. М. Кирова
silver73@inbox.ru

ДМИТРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ ЛЕПИЛИН

аспирант кафедры технологии лесозаготовительных производств лесоинженерного факультета, Санкт-Петербургская государственная лесотехническая академия им. С. М. Кирова
tlzp@inbox.ru

АНТОНИНА ИВАНОВНА ЖУКОВА

доцент кафедры технологии лесозаготовительных производств лесоинженерного факультета, Санкт-Петербургская государственная лесотехническая академия им. С. М. Кирова
tlzp@inbox.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ УПЛОТНЕНИЯ ПОЧВОГРУНТА В БОКОВЫХ ПОЛОСАХ ТРЕЛЕВОЧНОГО ВОЛОКА С УЧЕТОМ ИЗМЕНЧИВОСТИ ТРАССЫ ДВИЖЕНИЯ

В статье представлена модель объемного уплотнения почвы трелевочными тракторами, позволяющая прогнозировать степень ее уплотнения в полосах, прилегающих к волокам, с учетом изменчивости трассы движения тракторов.

Ключевые слова: трелевка, уплотнение почвы, трасса движения, поворот трактора

Проблема уплотнения почвогрунтов, разрушение их структуры в процессе циклического нагружения массой трелевочного трактора и трелевочной системы (ТС) на его базе, является актуальной. Решению вопросов прогнозирования деформации и уплотнения почвогрунта под воздействием движителей машин и древесины при использовании одномерных моделей о вдавливании штампа посвящены работы [1], [2], [3] и др.

Исследования объемной модели деформирования грунта в главных напряжениях направлены на минимизацию вредного воздействия техники на подрост и его корневую систему при многократном проходе ТС [8], что обусловлено требованием движения по заранее намеченным трассам волоков. Однако в процессе трелевки точно выдержать заданное направление движения не представляется возможным, и трактор вынужден неоднократно совершать поворотные движения. В этом случае грунт находится в объемном напряженно-деформированном состоянии и напряжения возникают на произвольных, в общем случае – неглавных площадках, что обуславливает возникновение дополнительных касательных напряжений в направлении, перпендикулярном действию нормальной нагрузки.

Рассмотрим действие на грунт сосредоточенной силы $Q = G + Q_1$, где G – сила тяжести

трактора, Q_1 – сила тяжести пачки, размещенной на тракторе (рис. 1). Процесс деформирования происходит в пространственной декартовой системе координат $Oxyz$, оси которой принимаются главными, а на элементарных площадках массива действуют соответствующие главные напряжения $\sigma_1 = \sigma_z$, $\sigma_2 = \sigma_y$, $\sigma_3 = \sigma_x$, тогда как касательные напряжения отсутствуют.

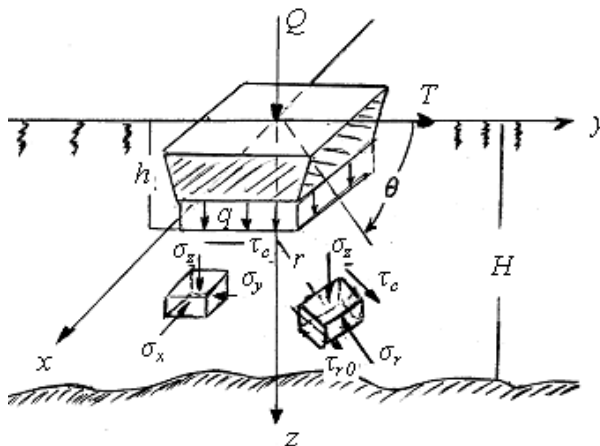


Рис. 1. Схема объемного напряженного состояния грунта при повороте штампа

В процессе погружения грунтозацепа (штампа) на глубину h происходит уплотнение грунта, который испытывает действие вертикальной нагрузки (вертикального давления) q . Поскольку к штампу кроме вертикальной силы Q приложена касательная (горизонтальная) сила T тяги трактора, возникает деформация грунта в направлении действия этой силы. Следствием этого является формирование горизонтальной нагрузки τ_θ (горизонтального давления), характеризующей величину удельного сопротивления грунта срезу.

В момент маневра трактора и отклонения ТС от заданного направления движения на угол θ деформирование грунта целесообразно рассмотреть в цилиндрической системе координат $Ozr\theta$. Компоненты тензора напряжений в этой системе в общем случае при наличии касательных напряжений $\tau_{r\theta}$, совпадающих по направлению с действием нагрузки τ_c , определяются соотношениями [4]:

$$\begin{aligned}\sigma_z &= \sigma_1; \quad \sigma_r = \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta; \\ \sigma_\theta &= \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta; \quad \tau_{r\theta} = -\frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \sin 2\theta.\end{aligned}\quad (1)$$

Из соотношений (1) следует, в частности, что при $\theta = 0$ компоненты тензора напряжений являются главными, то есть имеем:

$$\sigma_z = \sigma_1, \quad \sigma_r = \sigma_2, \quad \sigma_\theta = \sigma_3, \quad \tau_{r\theta} = 0,$$

и будут определяться соотношениями [3]:

$$\sigma_z = -\frac{3Q}{2\pi} z^3 (r^2 + z^2)^{-5/2}, \quad (2a)$$

$$\sigma_r = \frac{Q}{2\pi} \left\{ (1-2\nu) \left[\frac{1}{r^2} - \frac{z}{r^2} (r^2 + z^2)^{-1/2} \right] - 3r^2 z (r^2 + z^2)^{-5/2} \right\}, \quad (2б)$$

$$\sigma_\theta = \frac{Q}{2\pi} \left\{ (1-2\nu) \left[-\frac{1}{r^2} + \frac{z}{r^2} (r^2 + z^2)^{-1/2} \right] + z (r^2 + z^2)^{-3/2} \right\}, \quad (2в)$$

где ν – коэффициент бокового расширения (коэффициент Пуассона).

Из анализа соотношений (2а)–(2в) можно заключить, что если среда абсолютно несжимаема ($\nu = 0,5$), то уравнения, определяющие напряжения в вязко-упругой среде, трансформируются в уравнения чистой упругости. Применительно к поставленной задаче трелевки лесоматериалов такое состояние почвы характерно для весенних и осенних периодов, когда она чрезмерно увлажнена и глубина ее слоев в таком состоянии достигает 0,5 м [1].

На рис. 2 при исходных данных $Q = G + Q_1 = 150 + 40 = 190$ кН и $\nu = 0,35$ представлены зависимости величины $\tau_{r\theta}$, кПа, от координаты r , характеризующей величину удаления элемента массива от штампа, м, для трех значений угла поворота θ .

Как видно из рис. 2, для всех трех значений углового параметра θ отрицательный показатель

степени в экспоненциальной функции обуславливает достаточно интенсивное снижение касательных напряжений в массиве грунта с ростом величины r , то есть по мере удаления от трассы волока.

Необходимо также отметить, что при $r \rightarrow 0$, то есть рассматривая в одномерной постановке процесс деформирования грунта в непосредственной близости от штампа, снижение вертикальных напряжений σ_z подчиняется степенному закону и происходит пропорционально величине $1/z^2$. В этом случае связь σ_z с величиной нормальной нагрузки q описывается с помощью зависимости [1]:

$$\sigma_z = \frac{q}{1 + (z/aD)^2}, \quad (3)$$

где a, D – параметры штампа.

Из (3) следует, что при $z = 0$ $\sigma_z = q$.

Под действием давления q и погружении штампа на глубину h происходит деформация близлежащего элементарного слоя грунта.

Вертикальную координату z целесообразно ограничить от 0 до $H - h$, где H – размер зоны распространения деформаций, то есть удаление твердого недеформируемого основания почвы от свободной поверхности. Тем самым будем использовать подвижную цилиндрическую систему координат с перемещением центра системы (точки O) вглубь массива по мере погружения штампа.

Величина нагрузки q при вдавливании штампа шириной b на глубину h с учетом вертикального давления в боковых полосах, удаленных на расстояние r от направления волока, определена в [8]:

$$q = \frac{E H k(r, h)}{k_\phi R} \left(\frac{1}{\arctg H/R} - \frac{1 - h/H}{\arctg \frac{H-h}{R}} \right), \quad (4)$$

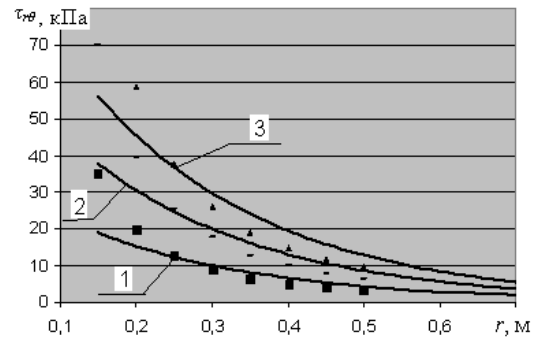


Рис. 2. Изменение величины касательного напряжения по мере удаления от направления волока и роста угла поворота ТС: 1 – $\theta = 5^\circ$ ($\nu = 35,632e^{-4,2291x}$ $R^2 = 0,9195$); 2 – $\theta = 10^\circ$ ($\nu = 70,992e^{-4,2291x}$ $R^2 = 0,9195$); 3 – $\theta = 15^\circ$ ($\nu = 105,81e^{-4,2291x}$ $R^2 = 0,9195$); (здесь и далее R^2 – коэффициент детерминации)

где E – модуль деформации,

$$k_\varphi = tg^{-5/3} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)$$

– коэффициент, учитывающий увеличение общей деформации грунта при погружении ядра уплотнения, φ – угол внутреннего трения, $R = aD$ – параметр штампа, определяемый через величины a и D :

$$a = 1 + \frac{b}{H},$$

D – диаметр круга, равновеликий площади F грунтозацепа, $k(r, h)$ – безразмерная функция, учитывающая снижение напряжений на глубине зоны деформаций h по мере удаления расчетной точки от границы волока.

Величина удельного сопротивления грунта срезу τ_c связана с вертикальной нагрузкой q обобщенным уравнением Кулона:

$$\tau_c = qtg\varphi + C_0, \quad (5)$$

где C_0 – внутреннее сцепление грунта.

На рис. 3 при исходных данных $E = 400$ кПа, $\nu = 0,35$, $C_0 = 12$ кПа, $\varphi = 15^\circ$, $b = 0,08$ м, $F = 0,04$ м², $H = 0,5$ м представлены зависимости $\tau_c(r)$ для трех состояний погружения штампа: $h = 0,05, 0,13$ и $0,25$ м. Величина $h = 0,13$ м соответствует глубине грунтозацепа l_d .

Из анализа данных рис. 3 следует, что с ростом глубины погружения грунтозацепа от 0,05 до 0,13 м, то есть на его полную глубину, угловой коэффициент в уравнении прямых, характеризующий интенсивность снижения нагрузки, пропорционально увеличивается по модулю с 4,96 до 12,53. При дальнейшем погружении грунтозацепа пропорциональность не выполняется, что свидетельствует о проявлении нелинейных процессов деформирования грунта под действием вертикальных и соответствующих горизонтальных нагрузок.

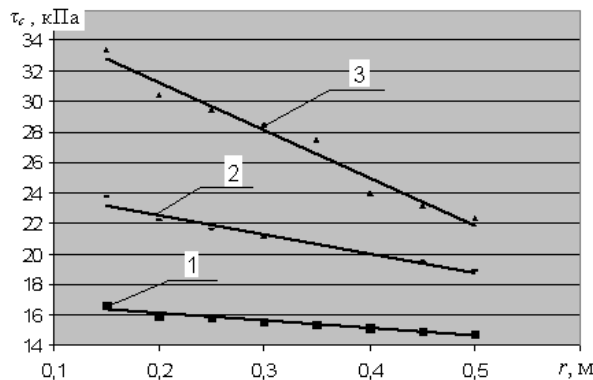


Рис. 3. Зависимость величины горизонтального давления от расстояния удаления от трассы волока:

- 1 – $h = 0,05$ ($y = -4,9571x + 17,129$ $R^2 = 0,9616$);
- 2 – $h = 0,13$ ($y = -12,531x + 25,006$ $R^2 = 0,9612$);
- 3 – $h = 0,25$ ($y = -31,307x + 37,521$ $R^2 = 0,9674$)

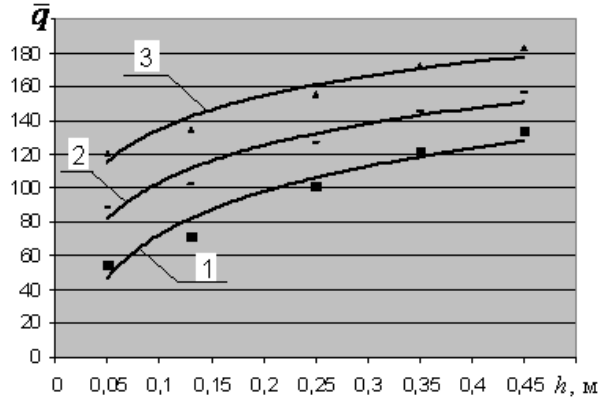


Рис. 4. Зависимости приведенного давления от величины погружения грунтозацепа:

- 1 – $\theta = 5^\circ$ ($y = 28,594\ln(x) + 200,94$ $R^2 = 0,9417$);
- 2 – $\theta = 10^\circ$ ($y = 31,702\ln(x) + 176,48$ $R^2 = 0,9381$);
- 3 – $\theta = 15^\circ$ ($y = 36,864\ln(x) + 157,48$ $R^2 = 0,9464$)

Суммируя величину τ_c с величиной касательного напряжения $\tau_{r\theta}$, получим некоторую результирующую нагрузку τ на грунт, действующую в элементарном слое на глубине h в направлении, перпендикулярном действию нормальной нагрузки q . Тогда величину приведенного давления [1] можно определить как $\bar{q} = \sqrt{q^2 + \tau^2}$.

На рис. 4 для трех значений углового параметра $\theta = 5, 10$ и 15 град. при значении $r = 0,05$ м (в непосредственной близости от волока) представлены зависимости $\bar{q}(h)$.

Процесс уплотнения при циклических нагрузках, когда трелевочный трактор проходит N раз по одному и тому же участку трассы, оценивается с помощью соотношения [2]:

$$\bar{\rho}_1 = 1 + \frac{\omega b \bar{q} (1 - \nu^2)}{EH} (1 + \chi \lg N), \quad (6)$$

где $\bar{\rho}_1$ – относительная плотность:

$$\bar{\rho}_1 = \frac{\rho_1}{\rho_0},$$

$\rho_0 = 850$ кг/м³ – начальная плотность почвы (плотность влажного почвогрунта естественного сложения), χ – эмпирический коэффициент интенсивности накопления необратимой деформации почвы при повторных нагрузках (в расчетах принят равным 1); ω – эмпирический коэффициент, зависящий от размера и формы опорной поверхности (в расчетах принят равным 2,15).

Уплотнение $\bar{\rho}_1$ соответствует фазе упругой деформации $\varepsilon_1 = \bar{\rho}_1 - 1$, когда осуществляется процесс активного формирования ядра уплотнения.

Вязкопластическая деформация грунта ε_2 характеризует вторую фазу процесса уплотнения, когда сила сопротивления уплотнению соизмерима с силой сопротивления сдвигу. Величина уплотнения $\bar{\rho}_2$ определяется в соответствии с результатами исследований [7], а соответствующая деформация равна $\varepsilon_2 = \bar{\rho}_2 - 1$.

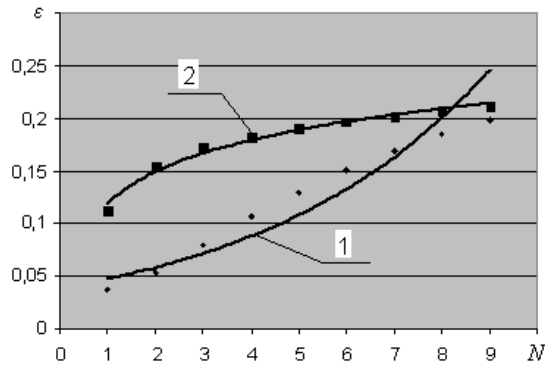


Рис. 5. Изменение деформаций с ростом числа циклов проходки:

1 – упругая деформация, $\varepsilon_1 (y = 0,0433 \ln(x) + 0,1195 R^2 = 0,9846)$;
2 – вязкопластическая деформация, $\varepsilon_2 (y = 0,0386e^{0,2061x} R^2 = 0,9161)$

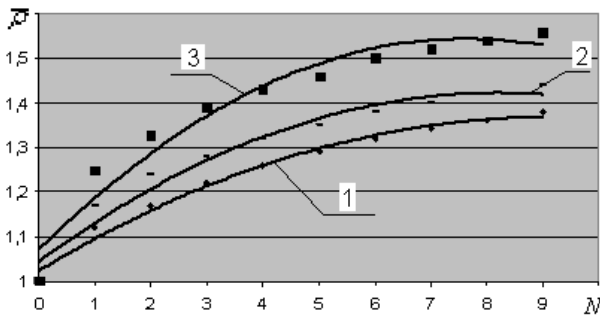


Рис. 6. Зависимости $\bar{\rho}(N)$ с учетом изменения угла поворота ТС:

1 – $\theta = 0 (y = -0,0081x^2 + 0,1237x + 1,0722 R^2 = 0,9462)$;
2 – $\theta = 10 (y = -0,0056x^2 + 0,0919x + 1,0462 R^2 = 0,9645)$;
3 – $\theta = 25 (y = -0,0041x^2 + 0,0752x + 1,0252 R^2 = 0,9867)$

На рис. 5 представлены зависимости $\varepsilon_1(N)$ (кривая 1) и $\varepsilon_2(N)$ (кривая 2), анализ данных которых показывает, что по достижении определенного числа циклов (для данного примера расчета $N = 8$) вязкопластическая деформация практически не увеличивается. В механике грунтов [5] этому состоянию соответствует завершение процесса переупаковки грунта, и дальнейшее уплотнение возможно только с развитием упругих деформаций.

Истинная деформация определяется как $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$, после чего величину суммарного уплотнения можно оценить в виде: $\bar{\rho} = \varepsilon + 1$.

Изменение величины относительной плотности $\bar{\rho}$ от N при погружении грунтозацепа на полную глубину ($h = 0,13$ м) для трех значений углового параметра $\theta = 0, 10$ и 25 град. (кривые 1, 2 и 3 соответственно) представлено на рис. 6.

Как видим, по достижении величиной цикличности уровня $N = 7-8$ графики выходят на свои асимптоты, то есть дальнейшее уплотнение практически не происходит. Можно полагать, что произошли необратимые структурные изменения элементов массива грунта и процесс его упаковки завершен.

Таким образом, результаты выполненных исследований свидетельствуют о том, что величина углового параметра θ , достигая значений 10 и более градусов, оказывает существенное влияние на процесс циклического уплотнения грунта. Данный параметр необходимо учитывать в прогнозных оценках допустимых размеров зон охранных полос, снижающих вредное воздействие ТС на корневую систему подраста и оставляемых на доращивание деревьев при выборочных рубках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агейкин А. С. Вездеходные колесные и комбинированные движители. М.: Машиностроение, 1972. 183 с.
2. Анисимов Г. М., Большаков Б. М. Основы минимизации уплотнения почвы трелевочными системами. СПб.: СПбГЛТА, 1998. 106 с.
3. Бленд Д. Теория линейной вязкоупругости. М.: Мир, 1965. 199 с.
4. Булычев Н. С. Механика подземных сооружений. М.: Недра, 1989. 270 с.
5. Валов С. С. Реологические основы механики грунтов. М.: Высш. шк., 1978. 447 с.
6. Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Жукова А. И. Влияние сдвиговых деформаций на процесс циклического уплотнения почвы // Естественные и технические науки. 2006. № 1(21). С. 174–180.
7. Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Жукова А. И. Особенности динамического уплотнения почвы при ее циклическом нагружении // Актуальные проблемы современной науки. 2006. № 3(30). С. 286–293.
8. Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Рудов С. Е., Жукова А. И. Модель процесса циклического уплотнения грунта в полосах, прилегающих к трелевочному волоку // Вестник КрасГАУ. 2010. № 2. С. 8–14.