

ИГОРЬ ВЛАДИСЛАВОВИЧ ГРИГОРЬЕВ

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

ВЛАДИМИР ЯКОВЛЕВИЧ ШАПИРО

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

МАКСИМ ЕВГЕНЬЕВИЧ РУДОВ

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

АНТОНИНА ИВАНОВНА НИКИФОРОВА

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии лесозаготовительных производств лесоинженерного факультета, Санкт-Петербургская государственная лесотехническая академия им. С. М. Кирова (Санкт-Петербург, Российская Федерация)
tlzp@inbox.ru

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПЛОТНЕНИЯ ПОЧВЫ КОМЛЯМИ ПАЧКИ ХЛЫСТОВ ПРИ ИХ ТРЕЛЕВКЕ

В статье представлена модель объемного уплотнения почвы волочащейся частью пачки трелевочной системы, позволяющая прогнозировать степень ее уплотнения в прилегающих к волокам полосах, с учетом изменчивости трассы движения трактора.

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

При анализе процессов трелевки древесины одной из основных задач является установление особенностей деформации и уплотнения почвогрунта при воздействии на него отдельных элементов трелевочной системы (ТС) – движителя, кроны деревьев, комлей и вершин хлыстов.

Одномерные модели уплотнения почвы в границах волока в результате циклического воздействия движителя ТС нашли свое применение в работах [1], [2], [3]. Объемная модель деформирования грунта [8] использована в задаче минимизации вредного воздействия движителя на почвогрунт как в границах волока, так и за его пределами в боковых полосах с целью охраны подроста и его корневой системы при многократном проходе ТС по заранее намеченным трассам волоков.

Однако в процессе трелевки точно выдержать заданное направление движения не представляется возможным, и ТС вынуждена совершать поворотные движения. Это обуславливает возникновение дополнительных касательных напряжений в направлении, перпендикулярном действию нормальной нагрузки движителя, которые оказывают разрушающее действие на по-

чвогрунт и отрицательно влияют на ее плодородие и качественную структуру [3], [7].

Наряду с отмеченными оценками поворотного воздействия движителя представляют особый интерес исследования воздействия на почвогрунт веса пачки, в частности ее комлевой части, поскольку в этом случае возникает дополнительное уплотнение почвогрунта.

В рамках расчетной схемы воздействия комля хлыста на почвогрунт [3] с учетом оценки доли действующего объема и веса пачки деревьев [4] рассмотрим схему (рис. 1) давления на почвогрунт сосредоточенной силы $Q = P + G$, где Q – сила тяжести хлыста, $P = 0,3Q$ – сила тяжести хлыста, действующая на трактор, $G = 0,7Q$ – сила тяжести хлыста, действующая на почву при трелевке его за вершину, в результате чего часть хлыста может погружаться в почвогрунт на определенную величину первичной зоны осадки h_0 .

На рис. 1а представлена схема погружения комлевой части хлыста 1, где обозначено: M – центр тяжести хлыста, h_k – расстояние от точки 2 опоры хлыста на конике до опорной поверхности 3, L – длина хлыста, l – длина хлыста в зоне касания и погружения на глубину h_0 .

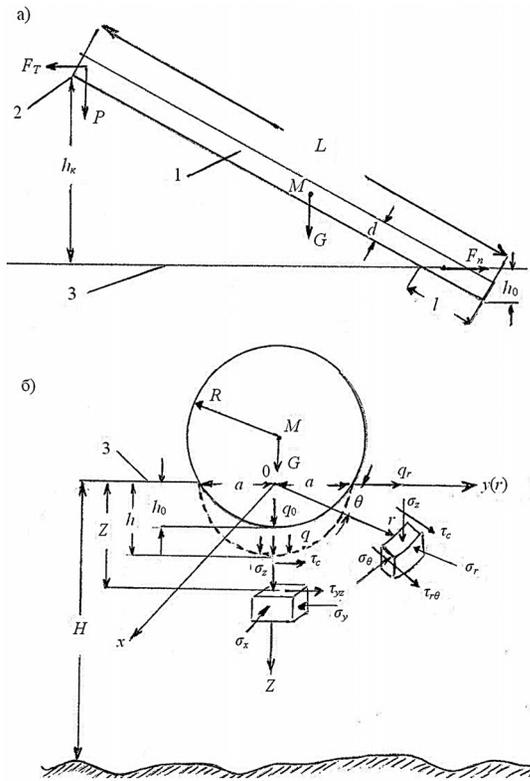


Рис. 1. Схема расчета напряжений при воздействии комля хлыста на почвогрунт: а – схема погружения комлевой части хлыста; б – схема расчета напряжений

Величина h_0 на основании [6] с учетом связи условного радиуса комля, получаемого по таксационному значению диаметра ствола d , определяется в виде:

$$h_0 = \left(3^n \beta \frac{\pi h_k G}{AL \sqrt{d}} \right)^{\frac{1}{n+1,5}}, \quad (1)$$

где коэффициент $\beta \geq 1$ представляет собой отношение величины L к максимально возможной подвешенной части длины хлыста; A и n – параметры почвогрунта и штампа весом G с пятном контакта d в степенных зависимостях $q = Ah^n$, то есть зависимостях величины давления (нагрузки) штампа q от глубины его погружения h [1], [2], [6] в пределах от 0 до глубины H зоны распространения деформаций (удаленности от твердого слоя).

На рис. 1б представлена схема расчета напряжений, возникающих в почвогрунте под действием силы G в пределах зоны деформаций H , в процессе контакта и погружения комлевой части хлыста с учетом его возможного поворота на определенный угол θ .

Действующая на грунт часть хлыста объемом в коре V определяется в соответствии со значениями L^x и d по сортиментным таблицам древоствоев и в расчетах представлена как эквивалентная по объему и весу сфера радиусом $R = \sqrt[3]{\frac{0,7V^x}{\pi}}$ с центром в точке M .

Такое представление действующей части хлыста на почвогрунт позволяет использовать математическую модель деформирования среды на основе принципов механики контактного разрушения при воздействии сферического индентора радиусом R на упругое полупространство [5].

В рамках этой модели основными характеристиками процесса погружения индентора в среду являются величины контактного сближения h_0 и радиуса контактной площадки $a = \sqrt{h_0 R}$, на которой действует усредненное по площади начальное равномерное давление $q_0 = \frac{G}{\pi a^2} = \frac{G}{\pi h_0 R}$.

Оценим начальные параметры контакта при следующих исходных данных нагружения почвогрунта.

Трелевка одиночного хлыста осуществляется при следующих исходных данных: $L = 30,5$ м; $d = 0,24$ м; $V = 0,65$ м³; $G = 2,275$ кН; $h_k = 1,8$ м; $l = 1,525$ м, $\beta^x = 1,05$.

Почвогрунт волока является связным влажным грунтом с величиной влажности W , приблизительно равной величине предела текучести W_T [1]. Начальная плотность естественного сложения почвогрунта принимается $\rho_0 = 800\text{--}900$ кг/м³; модуль Юнга $E = 1$ МПа; величина внутреннего сцепления $C = 12$ кПа; угол внутреннего трения $\varphi = 15^\circ$; несущая способность $q_s = 30$ кПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,25$; $H = 0,4$ м.

В соответствии с методическими положениями [2], [6] для таких условий нагружения установлены значения коэффициентов $A = 0,0564$ м. е. и $n = 1,0206$, входящих в формулу (1), получены следующие параметры контакта:

$$h_0 = 0,047 \text{ м}; a = 0,157 \text{ м}; R = 0,53 \text{ м}; q_0 = 41,64 \text{ кПа}. \quad (2)$$

Процесс деформирования почвогрунта за пределами зоны контакта глубиной h_0 и радиусом a рассмотрим в декартовой системе координат, причем на элементарных площадках массива действуют напряжения (рис. 1б), определяемые в соответствии с соотношениями [5]:

а) вертикальное напряжение:

$$\sigma_z = -q_0 \psi_z(r, z) = -q_0 \left(\frac{z}{\sqrt{u}} \right)^3 \frac{a^2 u}{u^2 + a^2 z^2}, \quad (3a)$$

б) горизонтальное напряжение:

$$\sigma_y = q_0 \psi_y(r, z), \quad (3б)$$

где

$$\psi_y(r, z) = \frac{1-2\nu}{3} \frac{a^2}{r^2 + z^2} \left[1 - \left(\frac{z}{\sqrt{u}} \right)^3 \right] + \left(\frac{z}{\sqrt{u}} \right)^3 \frac{a^2 u}{u^2 + a^2 z^2} + \frac{z}{\sqrt{u}} \left[\frac{(1-\nu)u}{a^2 + u} + (1+\nu) \operatorname{arctg} \left(\frac{a}{\sqrt{u}} \right) - 2 \right],$$

в) тангенциальное напряжение:

$$\tau_{yz} = -q_0 \psi_{yz}(r, z) = -q_0 \frac{a^2 \sqrt{u} z^2 (r^2 + z^2)}{(u + a^2)(u^2 + a^2 z^2)}, \quad (3в)$$

где $\psi_z(r, z)$, $\psi_y(r, z)$ и $\psi_{yz}(r, z)$ – так называемые координатные функции, u – положительный корень квадратного уравнения $\frac{r^2}{a^2 + u} + \frac{z^2}{u} = 1$.

Компонента σ_x может быть определена через механизм бокового расширения грунта в виде $\sigma_x = \frac{\nu}{1 - \nu} \sigma_z$.

Поскольку задача рассматривается в осесимметричной постановке, ось y может быть заменена на ось r , где r – радиальное расстояние от центра контакта до расчетной точки, то есть принимаем $\sigma_y = \sigma_r$.

Как следует из анализа соотношений (3), напряженное состояние почвогрунта зависит от координат расчетной точки и радиуса контактной площадки a , которая, в свою очередь, зависит от h_0 и R .

На рис. 2 для исходных данных контакта (2) представлены зависимости изменения безразмерных функций $\psi_z(r, z)$, $\psi_y(r, z)$ и $\psi_{yz}(r, z)$ от относительной величины $\bar{h} = z/h_0$ непосредственно под сферическим индентором ($r = 0$). Анализ данных рис. 2 позволяет сделать ряд выводов. Во-первых, отрицательные (сжимающие) вертикальные σ_z и преимущественно положительные (растягивающие) радиальные напряжения σ_r свидетельствуют о том, что разрушение массива грунта происходит через механизм сдвига. Во-вторых, тангенциальные напряжения τ_{yz} по величине близки к нулю и слабо изменяются с глубиной по мере роста координаты z . Это означает, что компоненты σ_z , σ_y и σ_x можно принять за главные – соответственно σ_1 , σ_2 и σ_3 .

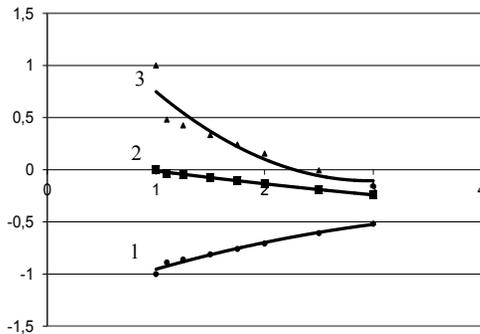


Рис. 2. Характер изменения координатных функций под сферическим индентором:

- 1 – $\psi_z(r, z)$, ($y = -0,0411x^2 + 0,3792x - 1,2919$, $R^2 = 0,9761$);
- 2 – $\psi_y(r, z)$, ($y = 0,2212x^2 - 1,3121x + 1,8398$, $R^2 = 0,8601$);
- 3 – $\psi_{yz}(r, z)$, ($y = 0,0088x^2 - 0,1504x + 0,1305$, $R^2 = 0,9942$)

Поскольку на почвогрунт кроме вертикальной силы G действует касательная (горизонтальная) сила F_T тяги трактора, необходимая для трелевки хлыста, то возникает сила F_n сопротивления его скольжению, в результате происходит деформация почвогрунта в направлении действия этой силы (рис. 1а). Следствием этого является формирование горизонтальных напряжений τ_c , перпендикулярных действию вертикальных напряжений σ_z и обуславливающих

реализацию разрушения массива почвогрунта через механизм сдвига (рис. 1б).

Горизонтальные напряжения τ_c связаны с вертикальными σ_z обобщенным законом Кулона:

$$\tau_c = \sigma_z \operatorname{tg} \varphi + C. \quad (4)$$

В момент отклонения ТС и, следовательно, хлыста от заданного направления движения на угол θ деформирование почвогрунта целесообразно рассмотреть в цилиндрической системе координат $zr\theta$.

Компоненты тензора напряжений в этой системе в общем случае при наличии касательных напряжений $\tau_{r\theta}$, совпадающих по направлению с действием горизонтальных напряжений τ_c , определяются соотношениями:

$$\begin{aligned} \sigma_z &= \sigma_1; & \sigma_r &= \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta; \\ \sigma_\theta &= \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta; & \tau_{r\theta} &= -\frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \sin 2\theta. \end{aligned} \quad (5)$$

Из соотношений (5) следует, в частности, что при $\theta = 0$ компоненты тензора напряжений являются главными, то есть имеем:

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

Результирующая величина $\tau = \tau_c + \tau_{r\theta}$ будет характеризовать суммарные сдвиговые напряжения и в качестве критерия разрушения можно принять условие превышения величиной τ предела несущей способности почвогрунта q_s , то есть:

$$\tau \geq q^s. \quad (6)$$

Величину z , при которой выполняется условие (6), можно рассматривать в качестве предельной величины контактного сближения или максимально возможной глубины зоны осадки хлыста h_s .

Определив с помощью (3) компоненты тензора напряжений, на основании соотношений (4) и (5) вычислили суммарные сдвиговые напряжения τ , кПа в зависимости от относительной координаты \bar{h} для различных значений угла поворота θ в пределах от 0 до 25°.

В результате установлено, что при трелевке одиночного хлыста по данному почвогрунту без каких-либо маневров ТС критерий разрушения сдвигом (6) за пределами контактной площадки ($\bar{h} = 1$) не выполняется, то есть за пределами первой зоны осадки ($z = h_0 = 0,047$ м) разрушение почвогрунта сдвигом не происходит.

В случае если наблюдаются повороты хлыста (угол θ изменяется от 10 до 25°), создаются условия для формирования дополнительной зоны осадки, глубина которой h_s увеличивается с 0,058 до 0,082 м (\bar{h} изменяется от 1,25 до 1,75). Величина радиуса контактной площадки a возрастает в этом случае с 0,176 до 0,208 м.

Указанным значениям h_s в силу принятого закона изменения $q(h)$ и полученных коэффициентов A и n соответствуют величины нагрузки q на

почвогрунт от сферического индентора радиусом R в диапазоне от $q = 27,3$ до $q = 48,33$ кПа.

Обработка данных методами корреляционно-регрессионного анализа позволила с достаточно высоким коэффициентом детерминации ($R^2 > 0,93$) определить для трелевки одиночного хлыста зависимость τ от \bar{h} с учетом углового параметра θ :

$$\tau = \lambda \bar{h}^\eta, \quad (7)$$

где коэффициенты λ и η являются функциями угла θ :

$$\lambda = 0,7605\theta + 23,913; \quad \eta = -(0,0179\theta + 0,241). \quad (8)$$

Из соотношений (6) и (7) следует, что предельную глубину зоны осадки h_s можно определить в виде:

$$h_s = h_0 \left(\frac{q_s}{\lambda} \right)^{\frac{1}{\eta}}. \quad (9)$$

Тогда величина относительного уплотнения почвогрунта в границах волока определяется как [2]:

$$\bar{\rho} = \rho / \rho_0 = \varepsilon + 1 = \frac{h_s}{H} + 1, \quad (10)$$

где ρ – достигнутая плотность грунта, ε – деформация уплотнения.

Радиальное давление q_r вдоль радиуса $r \geq a$, отсчитываемого от границы контактной площадки, описывается уравнением эллипса [5]:

$$q_r = q_0 \sqrt{1 - (a/r)^2}. \quad (11)$$

Как видим, на границе площадки при $r = a$ величина $q_r = 0$ и с ростом относительного расстояния r/a будет возрастать.

Предельное радиальное расстояние r_s , при котором величина q_r превысит величину несущей способности грунта q_s , можно трактовать как размер максимальной зоны уплотнения в радиальном направлении от колеи или как размер (ширину) охранной полосы корневой системы подроста или оставляемых на корню деревьев.

Таким образом получим:

$$r_s = a \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{q_s^2}{q_0^2}}}. \quad (12)$$

Используя соотношение (12) при исходных данных $q_s = 30$ кПа и $q_0 = 41,64$ кПа, установили, что для одиночного хлыста диапазон изменения r_s составляет 0,25–0,30 м.

Выполнив аналогичные расчеты для более широкого диапазона изменения угла поворота хлыста ($\theta = 0-45^\circ$), фиксировались предельные значения h_s , a , r_s , после чего оценивалась величина деформации уплотнения ε . На рис. 3 представлены зависимости деформации уплотнения ε и размера охранной полосы r_s от угла θ° при трелевке одного хлыста ($N_x = 1$) и одном двойном проходе ТС по одному и тому же волоку ($N = 1$).

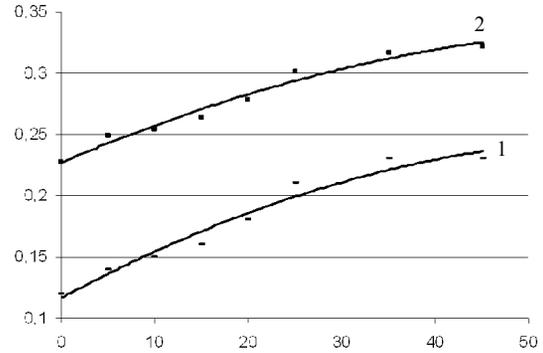


Рис. 3. Зависимость деформации уплотнения (1) и размера охранной полосы (2) от угла поворота θ

Видно, что маневры ТС существенно влияют на величину ε (диапазон изменения ε составляет от 0,12 до 0,23) и, соответственно, на величину относительного уплотнения $\bar{\rho}$, тогда как размер охранной полосы остается в более узком диапазоне $r_s = 0,23-0,33$ м.

Данные рис. 4 отражают характер совместного влияния цикличности и маневренности ТС на величину относительного уплотнения $\bar{\rho}$. Число (N) проходов ТС по одному и тому же волоку учитывалось путем умножения расчетной величины ε на коэффициент $\lambda_N = 1 + \lg N$ [2]. Анализ данных рис. 4 свидетельствует о значительном диапазоне изменения величины $\bar{\rho}$ даже при трелевке одиночного хлыста.

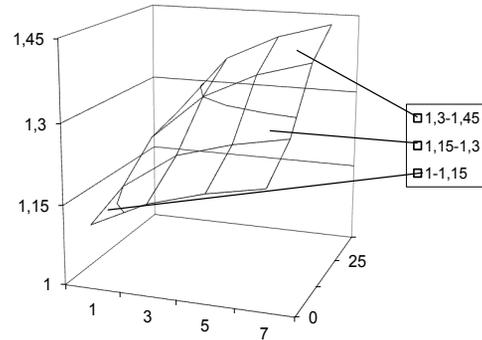


Рис. 4. Влияние угла поворота хлыста на процесс циклического уплотнения почвы

Разработанная математическая модель воздействия одиночного хлыста на почву явилась основой для расчета трелевки пачки аналогичных хлыстов в количестве $N_x = 2, 3-10$ штук объемом до $V_x = 6,5$ м³ и весом до $Q = 32,5$ кН ($G = 22,75$ кН).

Получены следующие начальные параметры контакта при значении $N_x = 10$:

$h_0 = 0,117$ м; $a = 0,363$ м; $R = 1,13$ м; $q_0 = 78,3$ кПа, (13)
для которых сделаны расчеты по выполнению критерия разрушения (6) на основе оценки компонент тензора напряжений (3). В конечном счете были установлены параметры уплотнения почвогрунта $\bar{\rho}$ и размеры охранной полосы r_s .

На рис. 5 представлены результаты расчетов в системе обозначений рис. 3. Абсолютные значения величины r_s существенно выросли, и диапазон их изменения составил $r_s = 1,1-1,6$ м. Деформация уплотнения почвогрунта ε при этом также увеличилась и достигла значения 0,8.

Влияние угла θ и параметра цикличности N на величину уплотнения почвогрунта отражено на рис. 6, где отложены значения $\bar{\rho}$ и θ° для четырех значений величины $N = 1, 3, 5, 7$.

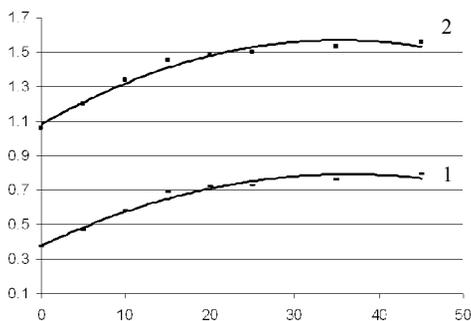


Рис. 5. Зависимость деформации уплотнения и размера охранной полосы от угла поворота пачки хлыстов

Сопоставим полученные расчетные данные с опытными значениями результатов исследования законов распределения изменения плотностей ρ почвогрунтов под движителем от естественного сложения до десятого двойного прохода ТС по волоку при трелевке пачки хлыстов длиной $L = 24$ м и $d = 0,26$ м [3].

Для участка прямолинейного движения ($\theta = 0^\circ$) при одном двойном проходе ТС экспериментальная плотность почвогрунта ρ возрастает с 870 до 1135 кг/м³, то есть величина уплотнения $\bar{\rho} = 1,305$. График 1 рис. 6 для оценки уплотнения почвы под хлыстами дает расчетное значение $\bar{\rho} = 1,365$.

При $N = 7$ опытные значения плотности достигли величины $\rho = 1750$ кг/м³, то есть относительное уплотнение составило $\bar{\rho} = 2$, тогда как расчетное значение $\bar{\rho} = 1,68$. Это позволяет заключить, что процессы уплотнения почвогрунта от нагрузки движителем и пачкой хлыстов сопоставимы и характеризуются близкими по величине параметрами относительного уплотнения $\bar{\rho}$.

Ограничивая сверху величину $\bar{\rho}$ значением 2, что означает уплотнение влажного почвогрунта на всю глубину H зоны распространения деформаций, то есть вплоть до основания твердого слоя, можно сделать вывод о том, что рост величины N диктует необходимость существенного снижения маневров ТС или соответствующего снижения веса пачки.

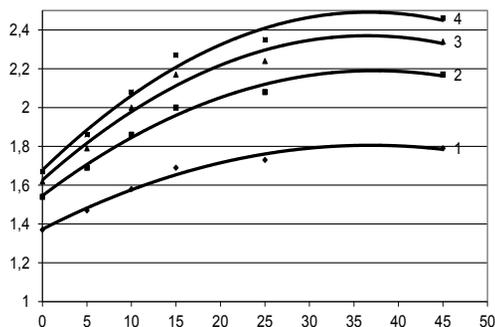


Рис. 6. Изменение $\bar{\rho}(\theta)$ в зависимости от числа N проходов ТС: 1 – один проход ТС ($y = -0,0006x^2 + 0,0444x + 1,6778$; $R^2 = 0,9815$); 2 – три прохода ТС ($y = -0,0006x^2 + 0,0408x + 1,6267$; $R^2 = 0,9797$); 3 – пять проходов ТС ($y = -0,0005x^2 + 0,0345x + 1,5457$; $R^2 = 0,9868$); 4 – семь проходов ТС ($y = -0,0003x^2 + 0,0235x + 1,3729$; $R^2 = 0,981$)

Выполнению первого условия способствует то обстоятельство, что увеличение предельной глубины зоны осадки h_s , то есть глубины обрабатываемой в процессе погружения ТС колеи, препятствует существенному отклонению ТС от заданного направления. Выполнение второго условия ограничено технологическими схемами трелевки и требует выполнения специальных исследований по оптимизации параметров ТС с учетом несущей способности почвогрунта в пределах проектных схем расположения волоков.

Обобщая установленные закономерности уплотнения почвогрунта под действием веса пачки хлыстов, можно отметить необходимость выполнения исследований по оценке предельных значений веса пачки и параметров ее трелевки по конкретным волокам, обеспечивающих в границах волока с учетом допустимых размеров охранных полос оптимальное уплотнение почвогрунта в заданных пределах.

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. Григорьев И. В., Жукова А. И., Григорьева О. И., Иванов А. В. Средоадаптирующие технологии разработки лесосек в условиях Северо-Западного региона Российской Федерации. СПб.: СПбГЛТА, 2008. 176 с.
4. Коротяев Л. В. Уточненная методика расчета объема пачки деревьев при трелевке // Лесной журнал. 2005. № 5. С. 91–97.
5. Морозов Е. М., Зернин М. В. Контактные задачи механики разрушения. Изд. 2-е. М.: ЛИБРОКОМ, 2010. 544 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., Лепилин Д. В., Жукова А. И. Моделирование уплотнения почвогрунта в боковых полосах трелевочного волока с учетом изменчивости трассы движения // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2010. № 6 (111). С. 61–64.
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.