

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ МАНЕВРИРОВАНИЯ
ТРЕЛЮЕМОЙ ПАЧКИ ДРЕВЕСИНЫ НА ПОЧВУ ЛЕСОСЕК**

В статье разработана и исследована математическая модель влияния изменения угла наклона к горизонту и поворотов пачки древесины при ее трелевке на почву.

Ключевые слова: трелевка, уплотнение почвы, воздействие древесины на почву.

Благодаря минимальному «коэффициенту тары» можно полагать, что во время работы канатных трелевочных установок (КТУ) на почву лесосеки оказывает влияние исключительно трелюемая пачка лесоматериалов, поскольку масса перемещающегося с пачкой каната и прицепного устройства много меньше массы самой пачки. Предыдущими исследованиями было установлено, что транспортируемая пачка древесины оказывает на почву существенное влияние. В зависимости от вида трелюемой древесины, это влияние может быть как положительным, так и отрицательным – деревья, трелюемые трактором за комли, рыхлят землю вершинами, а при трелевке хлыстов за вершины происходит сильное уплотнение почвы волочающимися комлями [1].

При работе полуподвесных КТУ в подавляющем большинстве случаев производится трелевка за вершины. В отличие от тракторной трелевки, угол наклона пачки к горизонту будет непостоянным, а, следовательно, пятно контакта и давление пачки на почву лесосеки будут переменными. По мере приближения к мачте пачка будет все больше приподниматься, а давление на почву увеличиваться. При приближении к мачте давление пачки на почву будет максимальным, и комлевая часть пачки будет уплотнять почву. Исходя из этих соображений, можно сделать вывод о том, что чем меньше поднимется пачка – тем лучше, а, следовательно, и высоту мачты желательно иметь наименьшей. С другой стороны, перемещение пачки при ее полном контакте с поверхностью движения приводит к значительным энергозатратам, что повлекло отказ от использования безмачтовых КТУ.

Общее резюме, которое можно сделать из представленной информации, следующее: чем меньше пятно контакта с поверхностью движения, тем меньше энергозатраты, но тем больше уплотнение почвы, а, следовательно,

экологический ущерб, наносимый трелевкой лесной среде.

При наличии возможности изменять высоту мачты возможно нахождение оптимального пятна контакта пачки с почвой, при котором не происходит ее переуплотнения, что позволит оптимизировать работу данного вида первичного транспорта леса по критериям экологичности и энергоёмкости. Поддержание примерно постоянного угла наклона пачки возможно за счет постепенного уменьшения высоты мачты по мере приближения к ней пачки.

Составим математическую модель, позволяющую прогнозировать уплотнение лесной почвы при полуподвесной трелевке, в зависимости от параметров пачки лесоматериалов и высоты головной мачты канатной трелевочной установки. А также получим выражение для определения оптимальной высоты головной мачты, исходя из требований минимизации уплотнения почвы.

Высота мачты влияет на устойчивость самоходного шасси, нагрузку в трансмиссии лебедки, грузоподъемность канатов и производительность [2].

Расчетная схема представлена на рис. 1.

Для определения высоты мачты используем формулу [3]:

$$H = \left(G + G_1 + \frac{2Lq_k}{\cos \beta} \right) \frac{L}{4T_{\max}} - b - l_n \operatorname{tg} \alpha + 2c, \quad (1)$$

где: H – высота головной мачты, м; L – длина хорды канатов, м; l_n – длина погрузочной площадки, м; b – высота тыловой мачты, м; $(G+G_1)$ – грузоподъемность канатов, кН; q_k – распределенная нагрузка от собственного веса тягово-несущего каната, кН/м; β – угол наклона хорды, рад; c – расстояние от пачки деревьев до поверхности склона, 0,5 м;

* - автор, с которым следует вести переписку.

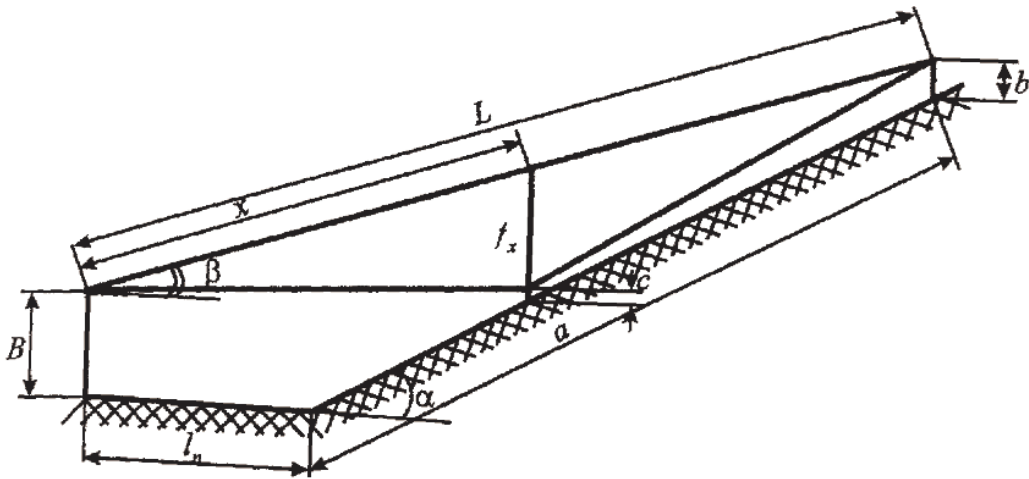


Рис. 1. Схема для расчета высоты мачты самоходной лебедки.

α – угол наклона лесосеки, рад; T_{\max} – наибольшее натяжение в ветвях тягово-несущего каната, кН.

$$T_{\max} = \left(G + G_1 + \frac{2Lq_k}{\cos \beta} \right) \left(1 - \frac{x}{L} \right) \frac{x}{2f_x}, \quad (2)$$

где x – координата приложения нагрузки, м; f_x – стрела провеса каната, м.

$$f_x = \frac{(B + l_n \operatorname{tg} \alpha) \cdot (L - x) + x \cdot b}{L} - c \quad (3)$$

Наибольшее значение f_x достигает при $x=L/2$:

Средний угол наклона пачки определяется по выражению:

$$\alpha_{\text{cp}} = \frac{\pi h \beta}{2 l}, \quad (4)$$

где β – параметр ($\beta=1, 2, 3$); l – длина пачки; h – высота подъема пачки при трелевке.

С учетом угла наклона поверхности движения, угол подъема пачки относительно горизонта определится как:

$$\alpha_{\text{cp}} = \frac{\pi h \beta}{2 l} \pm \gamma, \quad (5)$$

где γ – угол наклона поверхности движения.

В рассматриваемом случае высота подъема пачки может быть определена из выражения:

$$h = \frac{H}{L} l \sqrt{1 + \frac{2H}{L} \sin \gamma + \left(\frac{H}{L} \right)^2}, \quad (6)$$

где L – расстояние до мачты; H – высота мачты.

Если лесосека имеет спокойный рельеф, т. е. можно считать, что $\gamma=0$, тогда можно записать, что $h = \frac{H}{L} l$.

Выражение (5) примет вид:

$$\alpha_{\text{cp}} = \frac{\pi \beta H}{2 L} \sqrt{1 + \frac{2H}{L} \sin \gamma + \left(\frac{H}{L} \right)^2} \pm \gamma. \quad (7)$$

Максимальная глубина погружения комлевой части пачки в почву составит:

$$\Delta = \frac{\pi \beta h}{2 l} l_k = \frac{\pi \beta H}{2 L} l_k \sqrt{1 + \frac{2H}{L} \sin \gamma + \left(\frac{H}{L} \right)^2}. \quad (8)$$

Давление комлевой части пачки на почву составит:

$$P = \frac{0,7G}{l_k \sqrt{2r_k \Delta}} \cos \alpha_{\text{cp}} = A \left(\frac{1}{3} \Delta \right)^n,$$

$$\begin{aligned} \cos \alpha_{\text{cp}} &= \\ &= \cos \left(\frac{\pi \beta H}{2 L} \sqrt{1 + \frac{2H}{L} \sin \gamma + \left(\frac{H}{L} \right)^2} \pm \gamma \right), \quad (9) \end{aligned}$$

где r_k – условный радиус комлей, получаемый по таксационному описанию.

С учетом (8) формула (9) примет вид:

$$\frac{0,7G \cdot \cos \alpha_{cp} \cdot \pi \beta h}{\sqrt{2r_k \Delta} \cdot 2L\Delta} \sqrt{1 + \frac{2H}{L} \sin \gamma + \left(\frac{H}{L}\right)^2} = A \left(\frac{1}{3} \Delta\right)^n \quad (10)$$

Связь между плотностью почвы и ее деформацией имеет известный вид:

$$\frac{\Delta}{B} = \frac{\rho_{max} - \rho_0}{\rho_0}, \quad (11)$$

где B – глубина распространения деформации; ρ_0 – плотность естественного сложения лесной почвы до приложения нагрузки, ρ_{max} – максимальная плотность почвы под комлевой частью пачки.

Значение B здесь можно оценить формулой:

$$B = \frac{\sqrt{2r_k \Delta} \cdot l_k}{\sqrt{2r_k \Delta} + 2l_k} \quad (12)$$

Или

$$B = \frac{\sqrt{2r_k \Delta} \cdot 2L\Delta}{\pi \beta h \sqrt{1 + \frac{2H}{L} \sin \gamma + \left(\frac{H}{L}\right)^2}} \times \frac{1}{\sqrt{2r_k \Delta} + 2} \frac{4L\Delta}{\pi \beta h \sqrt{1 + \frac{2H}{L} \sin \gamma + \left(\frac{H}{L}\right)^2}} \quad (13)$$

Система уравнений (10), (11) и (13) по заданным значениям веса пачки G , γ , r_k , ρ_0 , ρ_{max} позволяет найти предельное расстояние трелевки.

Также практический интерес представляет решение обратной задачи, позволяющее минимизировать отрицательное уплотняющее воздействие волочащейся пачки на почву лесосеки: по конечному углу подъема пачки к горизонту может быть определен предельно допустимый вес пачки, а при наличии возможности оперативной регулировки высотой подвеса блока – требуемый постоянный угол подъема пачки по критерию уплотнения почвы.

При $\gamma=0$ и $\frac{H}{L} \ll 1$ получим:

$$\tilde{\rho}_{max} = \frac{\rho_{max} - \rho_0}{\rho_0} = \frac{\pi \beta H}{2L \sqrt{2r_k \Delta}}, \quad (14)$$

поэтому:

$$\Delta = \frac{\pi^2 \beta^2 H^2}{8 r_k L^2 \tilde{\rho}_{max}} \quad (15)$$

В свою очередь, из (11) следует

$$\Delta = \left[\frac{3^n 0,7G \pi \beta H}{A 2 \sqrt{2r_k} \cdot L} \right]^{\frac{2}{2n+3}} \quad (16)$$

Приравняв (15) и (16), находим оптимальную величину расстояния трелевки по критерию воздействия на почву:

$$L_{np} = \left[\frac{\pi^2 \beta^2 H^2}{8 r_k \tilde{\rho}_{np}} \left(\frac{A \cdot 2 \sqrt{2r_k}}{3^n 0,7G \pi \beta H} \right) \right]^{\frac{2n+3}{4n+8}} \quad (17)$$

Таким образом, получены основные зависимости, позволяющие определять оптимальную величину расстояния трелевки по критерию воздействия на почву, а также оптимальный угол подъема пачки к горизонту при трелевке полуподвесными КТУ.

Основываясь на вышеприведенных методических положениях, на рис. 2 представлена расчетная схема с погружением комлевой части хлыста в почву, дополненная учетом возможного поворота трелеваемой пачки на угол θ , который будет возникать при работе полуподвесной КТУ с поворотами трассы в плане [4].

На рис. 2 обозначено: Q_2 – вес хлыста, приложенный к центру масс M пачки; h_0 и l_k – соответственно высота подъема пачки и длина касания почвы комлевой частью; $\Delta \epsilon$ и $\Delta \delta$ – соответственно глубины погружения комлевой части в вертикальном и боковом в момент поворота направлениях.

Величина погружения $\Delta \epsilon$ подробно рассмотрена выше.

Величина $\Delta \delta$ с учетом коэффициента бокового распора $\kappa_{\delta} = v/(1-v)$, где v – коэффициент Пуассона, может быть определена по формуле:

$$\Delta \delta = \left(\frac{0,7 \pi 3^n v Q_2 h_0 \beta}{AL(1-v) \sqrt{2r_k}} \right)^{\left(\frac{1}{n+3/2} \right)}, \quad (18)$$

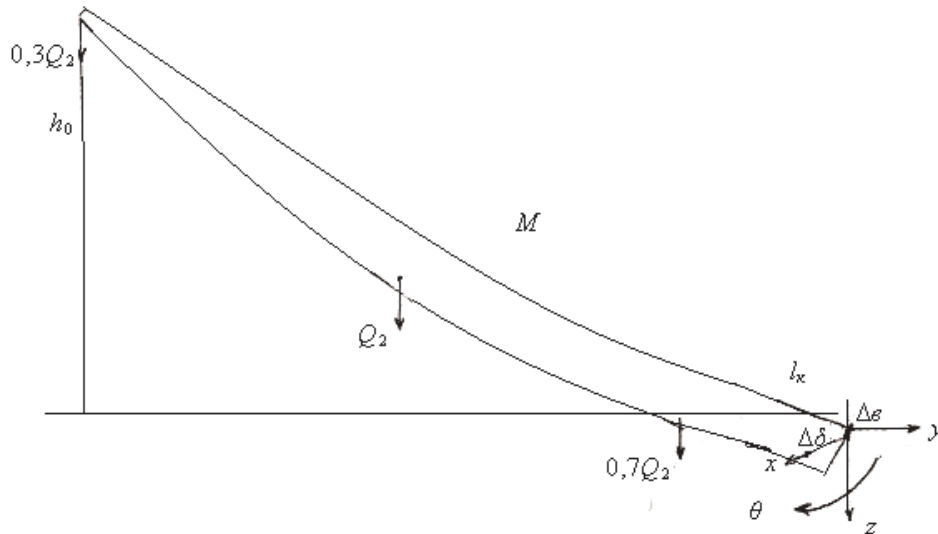


Рис. 2. Расчетная схема при погружении комлевой части хлыста в почву.

где A и n – параметры грунта; L – длина хлыста; $\beta=1, 2, 3$ – параметр синусоиды в зависимости $h = h_0 \left(1 - \sin \frac{\pi x \beta}{2L}\right)$ с текущей координатой x по длине хлыста; r_t – условный радиус комля, определяемый на основании таксационных зависимостей как $r_t = d\sqrt{K/2}$, где K – коэффициент, учитывающий форму ствола (для сосны – 0,45; ели – 0,50; березы – 0,40; осины – 0,41).

Расчет величины $\Delta\delta$ по формуле (18) произведен при треловке хлыстов сосны и следующих значениях входящих параметров: $Q_2=20$ кН; $A=0,1$ м.е.; $n=0,7$; $v=0,35$; $d=0,18$ м; $r_t=0,19$ м; $\beta=1$; $L=8$ м; $h_0=1,7$ м.

В результате расчетов получено значение $\Delta\delta=0,125$ м.

Тогда максимальная плотность ρ_{\max} почвы в пределах боковой поверхности волока определим как:

$$\rho_{\max} = \rho_0 \left(1 + \frac{\Delta\delta}{D}\right), \quad (19)$$

где D – глубина зоны распространения деформаций в боковой части трассы движения пачки, м.

При $D=0,38$ м (грунты достаточно низкой несущей способности, требующие применения КТУ) величина ρ_{\max} составила $1,33 \rho_0$, т. е. величина относительного уплотнения $\bar{\rho}_6 = 1,33$.

На рис. 3 представлена зависимость $\bar{\rho}_6$ от Q_2 при постоянстве всех остальных исходных данных, которая с высокой степенью точности подчиняется логарифмическому закону.

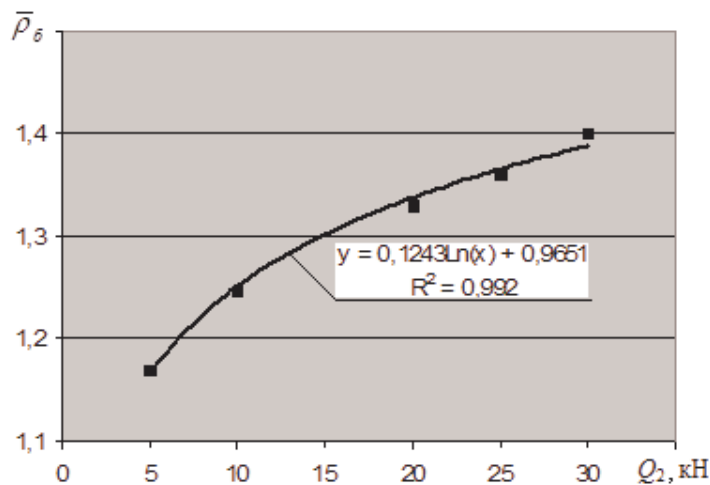


Рис. 3. Влияние веса пачки на величину относительного уплотнения почвы в боковой части волока.

Выполненные расчеты свидетельствуют о том, что, наряду с оценкой величины уплотнения почвы в вертикальном направлении, необходимо при поворотах трелемой пачки учитывать развитие процесса уплотнения в перпендикулярном направлении, т. е. в пределах боковой поверхности.

В результате можно сделать следующие выводы.

1. Получены основные зависимости, позволяющие определять оптимальную величину расстояния трелевки по критерию воздействия на почву, а также оптимальный угол подъема пачки к горизонту при трелевке полуподвесными КТУ.

2. Разработанная математическая модель уплотнения почвы лесосеки пачкой лесоматериалов при ее полуподвесной трелевке канатной трелевочной установкой по почвам различного состояния и степени увлажнения позволяет устанавливать оптимальные параметры трелевки, при которых обеспечивается минимальное вредное воздействие переуплотнения на почву.

3. При повороте пачки на угол 25° на почвах низкой несущей способности величина относительного уплотнения почвы в боковой поверхности волока волочащейся комлевой частью пачки достигает $\bar{\rho}_b = 1,33$. Следова-

тельно, наряду с оценкой величины уплотнения почвы в вертикальном направлении, необходимо при поворотах трелемой пачки учитывать развитие процесса уплотнения в перпендикулярном направлении, т. е. в пределах боковой поверхности.

Литература

1. Анисимов Г.М., Григорьев И.В., Жукова А.И. Экологическая эффективность трелевочных тракторов. СПб.: ГЛТА, 2006. 352 с.

2. Иванов В.А. Обоснование технологии и оборудования для освоения и переработки древесины прибрежной зоны и ложа водохранилищ: дис. ... д-ра. техн. наук. СПб., 2008. 300 с.

3. Пятакин В.И., Иванов В.А., Григорьев И.В. Комплексная экономическая оценка применения канатных трелевочных установок. СПб., 2006. С.199

4. Иванов А.В., Киселев Д.С. Разработка труднодоступных лесосек в условиях Северо-Западного региона Российской Федерации // Экспериментальные и теоретические исследования в области инженерных наук: материалы конф. СПб.: ГПУ, 2008. С. 50-51.

УДК 630*372/375

И.В. Григорьев, В.А. Иванов, А.И. Жукова,
А.В. Иванов, М.Е. Рудов, Ф.В. Свойкин*

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ ДРЕВЕСИНЫ НА ПОЧВУ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ТРЕЛЕВКИ

В статье приведены результаты экспериментальных исследований уплотнения почвы под воздействием части пачки древесины, опирающейся на поверхность движения. Исследования проводились в лабораторных и производственных условиях.

Ключевые слова: трелевка, уплотнение почвы, воздействие древесины на почву.

Известно, что эксперимент (от латинского *experimentum* – проба, опыт) – научно поставленный опыт, наблюдение исследуемого явления. Эксперимент является важнейшей стороной практики и критерием истинности результатов познания [1].

Понятно, что для науки о лесе, являющейся наукой прикладной, эксперимент имеет значение, которое трудно переоценить. Известно, что множество практических расчетов во многих направлениях науки о лесе базируется на эмпирических зависимостях, получен-

* - автор, с которым следует вести переписку.