

УДК 630\*375.4

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОЭФФИЦИЕНТА  
СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЮ ПАЧКИ ДЕРЕВЬЕВ  
(ХЛЫСТОВ) ПРИ ТРЕЛЕВКЕ**

*Л. В. КОРОТЯЕВ*

Архангельский лесотехнический институт

Коэффициент сопротивления перемещению (КСП) пачки деревьев (хлыстов) при трелевке — один из основных критериев рейсовой нагрузки на трелевочную машину и энергоемкости трелевки. Поэтому изучение КСП весьма важно для лесозаготовительного производства в целях совершенствования и повышения эффективности трелевочных машин. Цель нашей работы — построить математическую модель КСП, учитывающую влияние на него различных природных, технологических и производственно-технических факторов, для использования в конструкторских и технологических расчетах и при нормировании трелевочных работ.

Главными факторами, влияющими на КСП пачки деревьев (хлыстов) при трелевке  $\mu$ , как показали исследования [1], являются вес и объем пачки, вид перемещаемого груза (деревья или хлысты), число и средний объем деревьев (хлыстов) в пачке, объем стрелеванной по волоку древесины, способ и скорость трелевки, шероховатость и состояние трелевочного пути, сезон года и жесткость трелевочной системы.

КСП пачки складывается из коэффициентов трения  $\mu_t$  и лобового сопротивления  $\mu_d$ . При  $\mu_d = W_d/P$

$$\mu = \mu_t + \frac{W_d}{P}, \tag{1}$$

где  $W_d$  — лобовое сопротивление движению, Н;

$P$  — нормальная нагрузка на трелевочный волок от веса волочащейся части пачки, Н.

Это уравнение является исходным для выражения влияния различных факторов на  $\mu$ . При

$$P_d^0 = k_n G, \tag{2}$$

где  $k_n$  — доля веса пачки, приходящаяся на волок [5];

$G$  — вес пачки, Н,

получаем уравнение зависимости  $\mu$  от веса пачки:

$$\mu = \mu_t + \frac{W_d}{k_n G}. \tag{3}$$

Уравнение (3) выражает также зависимость коэффициента  $\mu$  от объема пачки, числа деревьев (хлыстов) в ней и среднего объема хлыста (ствола), поскольку вес пачки

$$G = V g \rho / \varphi, \tag{4}$$

а объем пачки  $V$  ( $m^3$ )

$$V = n V_x. \tag{5}$$

В этих уравнениях  $\rho$  — плотность свежесрубленной стволовой древесины, кг/м<sup>3</sup>;  
 $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  
 $\varphi$  — доля стволовой древесины в пачке [2];

$$\varphi = \frac{100 - \rho_k}{100 + 0,01\rho_{кр}(100 - \beta_0)}; \quad (6)$$

$\rho_k$  — вес (объем) коры дерева, % от веса (объема) неокоренного ствола;

$\rho_{кр}$  — вес кроны дерева, % от веса неокоренного ствола [7];

$\beta_0$  — отпад элементов кроны в процессе валки деревьев, % от ее веса [9];

$n$  — число деревьев (хлыстов) в пачке, шт.;

$V_x$  — средний объем хлыста, м<sup>3</sup>.

Влияние объема стрелеванной по волоку древесины  $V_b$  на  $\mu$  [3] учитывается коэффициентом  $k_b$

$$\mu = \mu_{\max} - (\mu_{\max} - \mu_{\min}) k_b, \quad (7)$$

где  $\mu_{\max}$  — максимальное значение КСП пачки (при движении ее непосредственно по вырубке или впервые по неприработанному трелевочному волоку);

$\mu_{\min}$  — минимальное значение КСП пачки (при движении ее по приработанному волоку и наиболее благоприятных условиях скольжения).

$$\mu_{\max} = \mu_{\tau\max} + \frac{W_{л\max}}{k_{\Pi}G}, \quad (8)$$

где  $\mu_{\tau\max}$  — максимальное значение коэффициента трения скольжения пачки (при перемещении ее непосредственно по вырубке или неприработанному трелевочному волоку);

$W_{л\max}$  — максимальное значение лобового сопротивления движению пачки (при перемещении ее в тех же условиях), Н.

$$\mu_{\min} = \mu_{\tau\min} + \frac{W_{л\min}}{k_{\Pi}G}, \quad (9)$$

где  $\mu_{\tau\min}$  — минимальное значение коэффициента трения (при движении пачки по приработанному волоку и наиболее благоприятных условиях скольжения);

$W_{л\min}$  — минимальное значение лобового сопротивления движению (при малой макрошероховатости трелевочного волюка), Н.

Значения коэффициента трения скольжения  $\mu_{\tau\max}$  и  $\mu_{\tau\min}$  установлены опытным путем [3, 8]. Лобовое сопротивление  $W_{л\max}$  может быть найдено по формулам, приведенным в работах [1, 6]. Значение  $W_{л\min}$ , определение которого аналитически затруднено, можно выразить через  $W_{л\max}$ , поскольку известны коэффициенты лобового сопротивления движению  $\mu_{л\max}$ ,  $\mu_{л\min}$  [3, 8] и их отношение  $k_{л}$ :

$$k_{л} = \mu_{л\min} / \mu_{л\max}. \quad (10)$$

Так как

$$\mu_{л\min} = W_{л\min} / k_{\Pi}G, \quad (11)$$

а

$$\mu_{\text{лмакс}} = W_{\text{лмакс}} / k_{\text{п}} G, \quad (12)$$

то

$$\frac{W_{\text{лмин}}}{W_{\text{лмакс}}} = \frac{\mu_{\text{лмин}}}{\mu_{\text{лмакс}}} = k_{\text{л}} \quad (13)$$

и

$$W_{\text{лмин}} = k_{\text{л}} W_{\text{лмакс}}. \quad (14)$$

Тогда

$$W_{\text{л}} = W_{\text{лмакс}} - (W_{\text{лмакс}} - k_{\text{л}} W_{\text{лмакс}}) k_{\text{в}} = W_{\text{лмакс}} [1 - (1 - k_{\text{л}}) k_{\text{в}}]. \quad (15)$$

При трелевке хлыстов в полупогруженном и полуподвешенном положении  $W_{\text{л}} = 0$ , независимо от их ориентации (комлями или вершинами вперед), и  $\mu = \mu_{\text{т}}$ .

Коэффициент  $k_{\text{в}}$  представляет собой отношение фактического объема стрелеванной по волоку древесины  $V_{\text{в}}$  ( $\text{м}^3$ ) к оптимальному  $V_{\text{вопт}}$  ( $\text{м}^3$ ), при котором коэффициент  $\mu$  принимает наименьшее значение  $\mu_{\text{мин}}$  [3], т. е.:

$$k_{\text{в}} = V_{\text{в}} / V_{\text{вопт}}, \quad (16)$$

или, точнее,

$$k_{\text{в}} = (V_{\text{в}} - V) / (V_{\text{вопт}} - V). \quad (17)$$

В этих формулах  $V_{\text{в}}$  выражается как функция расстояния трелевки. Для прямоугольной пасеки [3]

$$V_{\text{в}} = b_{\text{п}} (l_{\text{п}} - l_{\text{тр}}) Q_{\text{га}} / 10\,000, \quad (18)$$

где  $l_{\text{п}}$ ,  $b_{\text{п}}$  — длина и ширина пасеки, м;  
 $l_{\text{тр}}$  — расстояние (по волоку) от ближайшего к лесопогрузочному пункту конца пасеки до ее расчетного поперечника, или расстояние трелевки из разрабатываемого участка пасеки, м;

$Q_{\text{га}}$  — запас древесины на 1 га эксплуатационной площади,  $\text{м}^3$ .

Для треугольной пасеки [3]

$$V_{\text{в}} = \frac{b_{\text{п}}}{2l_{\text{п}}} (l_{\text{п}}^2 - l_{\text{тр}}^2) Q_{\text{га}} / 10\,000. \quad (19)$$

Влияние на  $\mu$  скорости трелевки  $v$  в пределах ее изменения от нуля до критического значения  $v_{\text{кр}}$  учитываем коэффициентом  $k_{\text{с}}$ . Этот коэффициент представляет собой величину, обратную критической скорости перемещения пачки, при которой коэффициент трения  $\mu_{\text{т}}$  снижается до значения  $\mu_{\text{тмин}}$ , т. е.:

$$k_{\text{с}} = 1/v_{\text{кр}}. \quad (20)$$

С учетом коэффициента  $k_{\text{с}}$  уравнение (7) принимает вид

$$\mu = \mu_{\text{макс}} - (\mu_{\text{макс}} - \mu_{\text{мин}}) k_{\text{в}} k_{\text{с}} v. \quad (21)$$

Влияние жесткости трелевочной системы на КСП, проявляющееся в виде прерывистого движения пачки имеет место лишь при трелевке канатными установками и учитывается коэффициентом динамичности  $k_{\text{р}}$  к среднему значению  $\mu_{\text{ср}}$  [4], равным 1,5...1,6. При тракторной трелевке  $k_{\text{р}} = 1$ .

Влияние вида перемещаемого груза, способа трелевки, сезона года, шероховатости и состояние поверхности скольжения пачки учитывается опытными значениями коэффициентов  $\mu_T$  и  $\mu_L$ .

Закономерность изменения коэффициента  $\mu$  под влиянием главных факторов выражается уравнением (1), в котором:

$$\mu_T = \mu_{T_{\max}} - (\mu_{T_{\max}} - \mu_{T_{\min}}) k_B k_C v, \quad (22)$$

а по аналогии с (22)

$$W_L = W_{L_{\max}} - (W_{L_{\max}} - W_{L_{\min}}) k_B k_C v = W_{L_{\max}} [1 - (1 - k_L) k_B k_C v]. \quad (23)$$

Тогда математическая модель коэффициента  $\mu$  для условий движения в общем виде

$$\mu = \mu_{T_{\max}} + \frac{W_{L_{\max}}}{k_{\Pi} G} - \left[ \mu_{T_{\max}} - \mu_{T_{\min}} + \frac{W_{L_{\max}} (1 - k_L)}{k_{\Pi} G} \right] k_B k_C v, \quad (24)$$

или, упрощенно,

$$\mu = \mu_{T_{\max}} + \mu_{L_{\max}} - (\mu_{T_{\max}} - \mu_{T_{\min}} + \mu_{L_{\max}} - \mu_{L_{\min}}) k_B k_C v. \quad (25)$$

По опытным данным автора [3, 8]  $\mu_{T_{\max}}$  равно 0,39 зимой и 0,51 летом,  $\mu_{T_{\min}}$  — соответственно 0,25 и 0,32 [3, 8]; при перемещении по грунту  $\mu_T = 0,49$ . При трелевке деревьев за комли в полупогруженном положении  $\mu_{L_{\max}}$  равно 0,32 зимой и 0,24 летом,  $\mu_{L_{\min}}$  — соответственно 0,21 и 0,05. Отношение  $\mu_{L_{\min}}/\mu_{L_{\max}}$  при трелевке деревьев в полупогруженном положении и полуподвесным способом за комли  $k_L$  равно 0,66 зимой и 0,2 летом, при трелевке еловых деревьев волоком за вершины — соответственно 1 и 0,5. Для валочно-трелевочных машин, работающих в режиме валка—пакетирование и валка—трелевка, а также для трелевочных тракторов, осваивающих пасеку с ближнего от лесопогрузочного пункта конца с продвижением в глубь ее,  $k_B = 0$ . Для тракторов, осваивающих пасеку с дальнего ее конца с продвижением к лесопогрузочному пункту,  $k_B = V_B/2V_{\text{вопт}}$  (в среднем). При трелевке деревьев в полупогруженном положении комлем вперед и хлыстов за вершины наземным способом в летнее время  $V_{\text{вопт}} = 75 \dots 85 \text{ м}^3$ , зимой  $V_{\text{вопт}} = 130 \dots 135 \text{ м}^3$ . При трелевке хлыстов в полупогруженном положении вершиной вперед  $V_{\text{вопт}} = 70 \dots 75 \text{ м}^3$  летом и  $V_{\text{вопт}} = 130 \dots 135 \text{ м}^3$  зимой. При трелевке по хорошо наезженному волоку (при  $V_B \gg V_{\text{вопт}}$ )  $K_B = 1$ . Критическая скорость трелевки  $v_{\text{кр}}$  равна 1 м/с для хлыстов и 1...1,7 м/с зимой и примерно 2 м/с летом для деревьев. При  $v \geq v_{\text{кр}}$  следует принимать в расчет  $k_C v = v/v_{\text{кр}} = 1$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Коротяев Л. В. Теоретический анализ сопротивления движению трелевочных лесоматериалов // Лесозаготовка: Науч. тр. АЛТИ.—1967.—Вып. 19.—С. 17—31. [2]. Коротяев Л. В. Доля ликвидной древесины в рейсовой нагрузке при перемещении деревьев и хлыстов // Исследования по механизации лесозаготовки и транспорту леса: Тр. АЛТИ.—1971.—Вып. 28.—С. 3—8. [3]. Коротяев Л. В. Влияние объема леса, стрелеванного по волоку, на коэффициент сопротивления перемещению пачек деревьев и хлыстов // Лесн. журн.—1981.—№ 1.—С. 43—50.—(Изв. высш. учеб. заведений). [4]. Коротяев Л. В. Исследование релаксационных колебаний канатных установок // Лесосечные, лесоскладские работы и сухопутный транспорт леса: Межвуз. сб. науч. тр.—Л.: ЛТА, 1982.—Вып. 11.—С. 23—27. [5]. Коротяев Л. В. Исследование взаимосвязи между усилием и высотой подъема деревьев и хлыстов за вершины или комли при трелевке // Лесн. журн.—1984.—№ 6.—С. 36—40.—(Изв. высш. учеб. заведений). [6]. Коротяев Л. В. О лобовом сопротивлении перемещению пачек деревьев и хлыстов при трелевке // Комплексная механизация лесозаготовки и транспорт леса: Межвуз. сб. науч. тр.—Л.: ЛТА, 1986.—С. 39—44. [7]. Коротяев Л. В., Ростовцев А. В. Вес кроны

деревьев основных промышленных пород Севера // Лесн. журн.—1972.—№ 5.—С. 56—60.—(Изв. высш. учеб. заведений). [8]. Коротяев Л. В., Ростовцев А. В. Влияние параметров пачки деревьев и хлыстов на коэффициент сопротивления их волочению при трелевке // Лесн. журн.—1980.—№ 4.—С. 36—43.—(Изв. высш. учеб. заведений). [9]. Ростовцев А. В., Коротяев Л. В. Отпад элементов кроны деревьев при валке и формировании трелевочного воя в зависимости от температуры воздуха // Лесн. журн.—1973.—№ 1.—С. 57—59.—(Изв. высш. учеб. заведений).

Поступила 12 мая 1988 г.

УДК 630\*323.2.001.57

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПРОТЯЖКИ СТВОЛА И ОБРЕЗКИ СУЧЬЕВ ДЕРЕВА

В. И. ВАРАВА, Н. А. ГУЦЕЛЮК, С. В. СПИРИДОНОВ

Ленинградская лесотехническая академия

Технология процесса вертикальной протяжки спиленного дерева представлена на рис. а. От дизеля  $D$  крутящий момент передается через муфту сцепления  $MC$  и редуктор гидронасосу  $ГН$ . Гидростатическим давлением по напорной магистрали (шлангам  $Ш$ ) вращение передается четырем гидромоторам  $M$ , а от них через редукторы — рябухам  $P$ . Последние прижимаются рифлями к стволу дерева и перемещают его вниз. При этом три ножа  $H$ , смещенные между собой на  $\Delta \approx \approx 12$  см и прижимаемые к стволу, срезают мутовки дерева.

Усилие прижатия рябух к стволу зависит от диаметра дерева  $D$ , см и аппроксимируется полиномом

$$N_p = a_1 D - a_2 D^2 = 1900D - 30D^2. \quad (1)$$

Усилие прижатия ножей постоянно:  $N_n \approx 3 \cdot 10^3$  Н. Внедряемые в кору ели рифли рябух создают сопротивление с коэффициентом сцепления

$$\varphi_p \approx 0,02 + 0,125 \lg N_p; \quad \text{при } D_m = 30 \text{ см, } N_p = 3 \cdot 10^4 \text{ Н,} \\ \text{получим } \varphi_p = 0,6 \quad (2)$$

Трение качения рябух  $f_p = 0,04 \dots 0,07$ , коэффициент трения скольжения стали ножей по стволу  $f_n \approx 0,2$ .

Расчетные значения диаметра сучка ( $d$ ), расстояния между мутовками ( $l$ ) и максимального усилия срезания сучьев ( $P_{p1}$ ) при  $D \approx 30$  см равны

$$d = 1,2D^{0,3} \approx 3 \text{ см; } l = 11\sqrt[3]{D} \approx 36 \text{ см; } P_{p1} = kd^2 = 7,1 \cdot 10^3 \text{ Н} \\ \text{(для ели } k = 790 \text{ Н/см}^2 = 7,9 \text{ МПа).} \quad (3)$$

Отсюда усилие срезания мутовок из восьми вероятных сучьев  $P_p = z_c F_{p1} / 3 = 19 \cdot 10^3$  Н, сила трения трех ножей  $F_n = 3 f_n N_n = = 1,8 \cdot 10^3$  Н, а сопротивление качению четырех рябух  $F_p = 4 f_p N_p = = 7,2 \cdot 10^3$  Н. Суммарная сила трения  $F_T = F_n + F_p = 9$  кН близка силе тяжести спиленного дерева  $G = mg \approx 9$  кН  $= F_T$ . В этом случае сопротивление протяжки определяется усилием срезания мутовок  $Q_m = F_T - G + P_p = 19$  кН, приведенным к валам моторов, значение которого выявляется из баланса виртуальных работ:

$$M_m = P_p r_p / \gamma_m i_m = 19 \cdot 10^3 \cdot 0,12 / 0,91 \cdot 21 = 120 \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (4)$$