

гового средства может быть использован гусеничный трактор тягового класса 30 кН, для которого $k_t = 52,4 \text{ кН} \cdot \text{м/рад}$ [7]. С другой стороны, для обеспечения устойчивости хода агрегата на базе этого трактора передаточное отношение механизма навески должно быть в интервале от 1,85 до 2,50.

Таким образом, для обеспечения устойчивости движения агрегата рабочие органы рекомендуется размещать сзади или на линии оси подвеса, при этом мгновенный центр вращения механизма навески располагают впереди орудия.

Расчет параметров ФМТА по описанной методике позволяет определить их значения, при которых обеспечивается устойчивое движение агрегата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. А. с. 1459618 СССР, МКИ⁴ А 01 В 59/041. Почвообрабатывающий агрегат / Р. И. Дерюжкин, Ю. И. Полупарнев, И. Е. Донцов (СССР).— № 4146450/30-15; Заявл. 29.09.86; Оpubл. 23.02.89 // Открытия. Изобретения.— 1989.— № 7.— С. 4. [2]. А. с. 1531872 СССР, МКИ⁴ А 01 В 59/048. Почвообрабатывающий агрегат / И. Е. Донцов, Ю. И. Полупарнев (СССР).— № 4318362/30-15; Заявл. 20.10.87; Оpubл. 30.12.89 // Открытия. Изобретения.— 1989.— № 48.— С. 4. [3]. А. с. 1586545 СССР, МКИ⁵ А 01 В 59/048. Почвообрабатывающий агрегат / И. Е. Донцов, Ю. И. Полупарнев (СССР).— № 4491312/31-15; Заявл. 10.10.88; Оpubл. 23.08.90 // Открытия. Изобретения.— 1990.— № 31.— С. 7. [4]. Гячев Л. В. Устойчивость движения сельскохозяйственных машин и агрегатов.— М.: Машиностроение, 1981.— 206 с. [5]. Донцов И. Е. Влияние параметров навески на устойчивость прямолинейного неуравляемого движения фронтального орудия // Агрегатирование сельскохозяйственной техники: Сб. науч. тр. / НПО ВИСХОМ.— М.: НПО ВИСХОМ, 1989.— С. 28—34. [6]. Донцов И. Е., Полупарнев Ю. И. О силовых параметрах почвообрабатывающих орудий. Методика экспериментальных исследований // Роль энергетики и агрегатирования в повышении технического уровня сельскохозяйственных машин: Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. / ВИСХОМ.— М.: ВИСХОМ, 1987.— С. 100. [7]. Панов А. И., Донцов И. Е. Устойчивость движения гусеничного трактора с плугом передней и задней навески // Исследование и разработка почвообрабатывающих и посевных машин: Сб. науч. тр. / ВИСХОМ.— М.: ВИСХОМ, 1988.— С. 24—43. [8]. Руководство по проектированию систем автоматического регулирования / Под. ред. В. А. Бесекерского.— М.: Высш. шк., 1983.— 296 с.

Поступила 11 декабря 1990 г.

УДК 630*531 : 624.042.41

К РАСЧЕТУ СИЛОВОГО МОМЕНТА ОТ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ НА ЕЛОВОЕ ДЕРЕВО

Л. В. КОРОТЯЕВ

Архангельский лесотехнический институт

Для определения сил, действующих на машины для валки леса, необходимо знать ветровую нагрузку на дерево и вызываемый ею силовой момент.

Обычно в инженерных расчетах форму кроны елового дерева рассматривают как конус с треугольной площадью миделевого сечения и с центром тяжести, расположенным на $1/2$ высоты кроны от ее основания (низа) [1, 4, 5]. В действительности, как показали наши измерения в натуре, крона елового дерева имеет параболическую форму со значительно большей площадью миделя по сравнению с конусообразной и с большей координатой центра тяжести [2]. Так, для среднего на Севере елового дерева IV, 2 разряда высот и таксационным диаметром $d_t = 20$ см площадь миделя конусообразной кроны равна $19,7 \text{ м}^2$, а параболической $27,4 \text{ м}^2$, или на 39 % больше. Координата центра тяжести кроны этого дерева при ее высоте 11 м составляет 6,6 м, т. е. больше

на 1,1 м, или на 20 %. Это обстоятельство дает основание считать, что вопрос об определении ветровой нагрузки на еловое дерево и силового момента, создаваемого ею и действующего на машины для валки и пакетирования, до настоящего времени не получил окончательного разрешения. Разработанная автором математическая модель кроны ели [3] с экспериментально-аналитическим выражением закономерностей изменения всех ее параметров позволяет обоснованно решить рассматриваемый вопрос.

При определении численных значений параметров кроны ели измеряли в натуре высоту кроны h_k , ее ширину в максимальном поперечнике $b_{м.п}$ и расстояние от основания кроны до максимального поперечника $h_{м.п}$ у 414 деревьев диаметром d_T от 8 до 40 см для I—V разрядов высот. Средние арифметические значения этих параметров для III, IV и V разрядов высот приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметр	Разряд высот	Значения параметров, м, для деревьев диаметром, см								
		8	12	16	20	24	28	32	36	40
h_k	III	4,8	7,7	9,5	12,5	13,3	17,1	18,7	20,6	20,9
	IV	4,1	7,6	9,7	11,1	12,3	15,2	16,0	15,3	16,9
	V	3,7	5,9	8,5	9,6	11,5	12,0	12,8	14,5	12,8
$b_{м.п}$	III	2,0	2,7	3,2	3,0	4,0	4,4	...	...	3,5
	IV	2,2	2,7	3,1	3,3	4,0	4,0	4,6	4,6	2,9
	V	2,3	2,6	3,1	3,5	3,6	3,7	3,4	4,0	3,5
$h_{м.п}$	III—									
	V	0,6	1,2	1,8	2,2	2,2	2,3	2,3	2,2	1,8

Вываренные по диаметрам дерева высота и ширина кроны ели могут быть вычислены по уравнениям связи [2]

$$h_k = sd_T - td_T^2; \tag{1}$$

$$b_{м.п} = ud_T - vd_T^2, \tag{2}$$

где s, t, u, v — опытные коэффициенты*; их значения приведены в табл. 2.

Таблица 2

Разряд высот	s	t	u	v
III	0,670	0,0027	0,260	0,0038
IV	0,663	0,0057	0,235	0,0030
V	0,600	0,0058	0,280	0,0050

Для расчета ветровой нагрузки на растущее дерево и силового момента, вызываемого ею, необходимо знать, помимо давления ветра, лобовую поверхность (площадь миделевого сечения) кроны и части ствола, расположенной ниже кроны, а также положения центров их тяжести.

Ветровая нагрузка на дерево F_d, H , состоит из нагрузки на крону F_k и на часть ствола ниже кроны F_c :

$$F_d = F_k + F_c. \tag{3}$$

* Опытные коэффициенты всех эмпирических формул найдены методом наименьших квадратов.

Ветровая нагрузка на крону

$$F_k = \Pi_k P, \quad (4)$$

где Π_k — лобовая поверхность кроны, воспринимающая давление ветра, м²;

P — давление ветра, Па [4].

Лобовую поверхность кроны можно выразить через площадь миделевого (в данном случае продольного осевого) сечения кроны A_k и коэффициент ее заполнения сучьями, ветвями, хвойными лапками и хвоей K_3 :

$$\Pi_k = A_k K_3. \quad (5)$$

По опытным данным [4] для ели $K_3 = 0,75$.

Для определения этой площади была измерена ширина кроны b_k через 2 м по длине (высоте) у 95 деревьев. Средние арифметические значения высоты кроны, ширины ее в максимальном поперечнике и площади продольного сечения A_k (найденные как суммы площадей трапеций между измеренными поперечниками) приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметр	Разряд вы-сот	Значения параметров для деревьев диаметром, см						
		8	12	16	20	24	28	32
h_k , м	III	5,2	7,9	9,3	11,7	13,9	...	...
	IV	4,8	7,7	9,3	11,2	13,0	13,3	16,2
	V	4,5	6,2	8,8	10,6	11,9	12,0	14,2
$b_{м.п.}$, м	III	...	2,5	3,0	3,5	4,0	4,4	...
	IV	2,2	2,6	3,1	3,4	4,3	4,05	5,4
	V	2,8	3,0	2,8	3,8	4,0	4,3	4,5
A_k , м ²	III	...	14,2	17,4	30,0	39,9	...	...
	IV	7,3	14,0	18,0	27,1	36,8	38,7	55,7
	V	9,3	13,9	16,6	27,5	31,1	34,5	42,0
$A_{тр}$, м ²	III	5,7	9,9	14,0	20,5	27,8	...	...
	IV	5,3	10,0	14,4	19,0	28,0	27,0	43,8
	V	6,3	9,4	12,3	20,1	23,8	26,1	32,0
$\frac{A_k - A_{тр}}{A_{тр}} 100, \%$	III	...	43,4	24,3	46,3	43,5	...	...
	IV	37,7	40,0	25,0	42,6	31,4	43,3	27,2
	V	47,6	47,9	33,3	36,8	30,7	32,2	31,2

Наши исследования [2] показали, что контур кроны елового дерева удовлетворительно аппроксимируется уравнением квадратной параболы. В координатах yO_1z с расположением начала координат O_1 в вершине кроны (рис. а) оно имеет вид [2, 3]

$$y = \frac{1}{2} (az - cz^2), \quad (6)$$

где y — расстояние от продольной оси кроны до точки на ее контуре (радиус кроны), м;

z — расстояние от верхушки кроны до соответствующего поперечного сечения, м;

a, c — опытные коэффициенты (табл. 4).

При расположении начала координат x, y в основании кроны (точка O на рис. б) уравнение (6) при $z = h_k - x$ принимает вид

$$y = \frac{1}{2} [a(h_k - x) - c(h_k - x)^2]. \quad (7)$$

Расчетные схемы: а — для математического описания ширины кроны ели в координатах zO_1y ; б — для определения параметров кроны ели $A_k, x_{ц.к.}, x_{м.к.}$ в координатах xOy

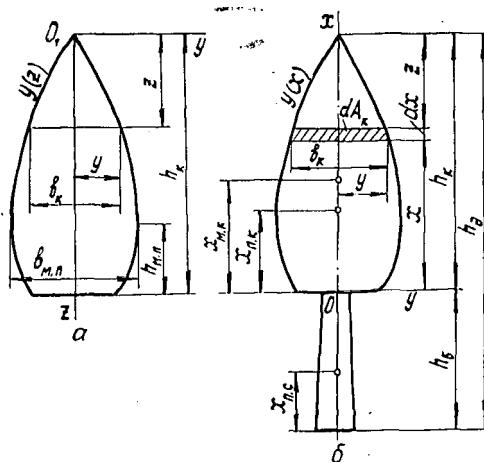


Таблица 4

Связь	Разряд высот	Коэффициенты	Значения коэффициентов для деревьев диаметром, см							
			8	12	16	20	24	28	32	36
$y(x)$ $b_k(x)$	III	a	...	0,814	0,651	0,858	0,809	...	...	...
		c	...	0,0664	0,039	0,052	0,0413	...	...	...
	IV	a	1,196	0,874	0,659	0,813	0,820	0,826	0,619	0,492
		c	0,167	0,077	0,038	0,050	0,042	0,043	0,019	0,0122
	V	a	...	1,375	0,744	0,825	0,682	0,941	0,717	...
		c	...	0,148	0,052	0,047	0,0315	0,054	0,030	...
$\rho_k(x)$	IV,2	p	0,340	0,200	0,200	0,200	0,200	0,500	0,460	...
		q	0,127	0,064	0,060	0,042	0,034	0,028	0,023	...

где x — расстояние от основания кроны до ее соответствующего поперечного сечения, м.

Тогда ширина кроны ели

$$b_k = 2y = a(h_k - x) - c(h_k - x)^2. \tag{8}$$

Элементарная площадь на длине dx

$$dA_k = b_k(x) dx = 2y(x) dx. \tag{9}$$

Интегрируя это выражение с учетом (7), получаем площадь продольного сечения (миделя) кроны ели

$$A_k = 2 \int_0^{h_k} y(x) dx = \left(\frac{a}{2} - \frac{c}{3} h_k \right) h_k^2. \tag{10}$$

Значения A_k , вычисленные по формуле (10), лишь на 0,7...4,9 % больше приведенных в табл. 3.

Для сравнения в табл. 3 приведена площадь миделя треугольной кроны $A_{тр} = 0,5 b_{м.п} h_k$ и погрешность, допускаемая при замене ею площади параболоидной формы. Для деревьев III разряда высот погрешность составляет в среднем 41 %, IV — 36 %, V — 33 %. Выравненные по d_r значения миделя кроны параболоидной формы можно определить по формуле связи

$$A_k(d_T) = kd_T + jd_T^2, \quad (11)$$

где k, j — опытные коэффициенты уравнения: для III разряда высот $k = 0,613$; $j = 0,0428$; для IV разряда $k = 0,814$; $j = 0,0256$; для V разряда $k = 1,039$; $j = 0,0092$.

С учетом выражения (10) формула для определения ветровой нагрузки на крону имеет вид

$$F_k = \left(\frac{a}{2} - \frac{c}{3} h_k \right) h_k^2 K_3 P. \quad (12)$$

При определении силового момента от ветровой нагрузки на крону рекомендуется использовать координату центра тяжести площади продольного осевого (миделевого) сечения

$$x_{п.к} = \frac{1}{A_k} \iint_{(A_k)} x dA_k = \frac{1}{A_k} \int_0^{h_k} 2xy(x) dx. \quad (13)$$

Отсюда

$$x_{п.к} = \frac{1}{12A_k} (2a - ch_k) h_k^3. \quad (14)$$

Значения $x_{п.к}$, вычисленные по формуле (14), приведены в табл. 5.

Таблица 5

Параметр	Разряд высот	Значения параметров для деревьев диаметром, см							
		8	12	16	20	24	28	32	36
$x_{п.к}, м$	III	...	3,2	3,6	4,9	5,8	...	...	...
	IV	2,0	3,1	3,6	4,6	5,4	5,5	5,9	6,4
	V	...	2,4	3,5	4,2	4,5	5,2	5,7	...
$\xi_{п.к}$	III	...	0,405	0,388	0,418	0,417	...	...	...
	IV	0,417	0,403	0,388	0,410	0,415	0,414	0,365	0,370
	V	...	0,388	0,398	0,396	0,378	0,433	0,401	...
$x_{п.с}, м$	IV	1,4	1,9	2,2	2,6	2,8	3,0	3,2	...
$x_{м.к}, м$	III	...	4,7	5,5	7,1	8,5	...	...	...
	IV	2,7	4,6	5,5	6,4	7,1	7,5	9,0	...
	V	2,4	3,6	5,2	6,3	7,1	7,1	7,8	...
$\xi_{м.к}$	III	...	0,590	0,590	0,609	0,612	...	...	...
	IV	0,562	0,597	0,590	0,572	0,547	0,563	0,556	...
	V	0,534	0,573	0,592	0,594	0,593	0,592	0,553	...

Связь $x_{п.к}(d_T)$ выражена уравнением

$$x_{п.к}(d_T) = md_T - nd_T^2. \quad (15)$$

Значения коэффициентов уравнения: для деревьев III разряда $m = 0,282$; $n = 0,002$; для IV разряда $m = 0,289$; $n = 0,00314$; для V разряда $m = 0,254$; $n = 0,00254$.

В табл. 5 приведено также отношение координаты $x_{п.к}$ к высоте кроны ($\xi_{п.к} = x_{п.к}/h_k$). Для деревьев III разряда высот оно составило в среднем 0,408, IV — 0,401, V — 0,387, а для среднего IV, 2 разряда $\xi_{п.к} = 0,4$. Как видно, для кроны параболической формы отношение $\xi_{п.к}$ больше на 0,067, или на 17 %, чем для конусообразной.

При определении силового момента, создаваемого ветровой нагрузкой на еловое дерево, можно с точностью до 3 % принимать

$$x_{п.к} = \xi_{п.к} h_k \approx 0,4h_k. \quad (16)$$

Ветровая нагрузка на бессучковую зону ствола

$$F_c = A_c P, \quad (17)$$

где A_c — лобовая поверхность бессучковой зоны ствола, равная площади ее продольного осевого сечения, м².

Продольное осевое сечение зоны ствола, свободной от сучьев, имеет форму трапеции. Высота ее h_6 , ширина в основании кроны $d_{o.k}$ и в месте спиливания $d_{y.k}$. Следовательно,

$$A_c = \frac{1}{2} (d_{o.k} + d_{y.k}) h_6. \quad (18)$$

Диаметр ствола в основании кроны

$$d_{o.k} = d_T - (h_6 - 1,3) i, \quad (19)$$

где 1,3 — расстояние от шейки корня дерева до сечения с диаметром d_T , м;

h_6 — длина бессучковой зоны ствола, м, $h_6 = (h_d - h_n) \approx h_k/2$ (h_d — высота дерева, м) [2];

i — средний сбеги ствола,

$$i = d_T / (h_d - 1,3). \quad (20)$$

Диаметр ствола в плоскости спиливания, названный нами условным диаметром комля,

$$d_{y.k} = d_T + 1,3i. \quad (21)$$

Ордината центра тяжести площади трапеции A_c

$$x_{п.с} = \frac{2d_{o.k} + d_{y.k}}{3(d_{o.k} + d_{y.k})} h_6. \quad (22)$$

Численные значения координаты центра тяжести продольного осевого сечения бессучковой зоны ствола $x_{п.с}$ приведена в табл. 5.

Силовой момент от ветровой нагрузки на еловое дерево относительно плоскости спиливания

$$M = F_k (x_{п.к} + h_6) + F_c x_{п.с}. \quad (23)$$

Подставив в это выражение F_k , $x_{п.к}$, h_6 , F_c и $x_{п.с}$, после преобразований получим

$$M = \frac{Ph_k^2}{12} \left[K_3 (5a - 3ch_k) h_k + \frac{1}{2} (2d_{o.k} + d_{y.k}) \right]. \quad (24)$$

При определении момента от ветровой нагрузки в расчет обычно принимают координату центра тяжести масс кроны, равную $0,5 h_k$ [1, 4, 5], также заниженную. Крона ели, как показали наши исследования, имеет переменную плотность, возрастающую от основания к вершине по закону [2]

$$\rho_k(x) = p + qx^{2*}. \quad (25)$$

По этой причине центр тяжести масс кроны $x_{м.к}$ смещен вверх от центра ее объема и располагается выше него. Координата центра тяжести масс кроны при $\rho_k(x) = p + qx^2$

$$x_{м.к} = \int_0^{h_k} \frac{x \rho_k(x) 2y(x) dx}{\rho_k(x) 2y(x) dx} = h \frac{5(2a - ch_k) + (3a - ch_k) h_k^2 q/p}{10(3a - 2ch_k) + (5a - 2ch_k) h_k^2 q/p}. \quad (26)$$

* Коэффициенты уравнения p и q приведены в табл. 4.

Значения $x_{м.к}$, вычисленные по формуле (26), приведены в табл. 5. Дробь в формуле (26) выражает отношение координаты центра тяжести масс кроны к ее высоте $\xi_{м.к}$, равное $\xi_{м.к} = x_{м.к}/h_k$. Значения $\xi_{м.к}$ приведены в табл. 5 и в среднем равны: для деревьев III разряда — 0,598, IV — 0,560, V — 0,591, среднего IV,2 разряда — 0,58. Ввиду отсутствия связи $\xi_{м.к}(d_T)$ можно полагать, что

$$x_{м.к} = \xi_{м.к} h_k \approx 0,58 h_k. \quad (27)$$

Связь $x_{м.к}(d_T)$ — параболическая. Уравнение связи

$$x_{м.к} = f d_T - \omega d_T^2. \quad (28)$$

Значения коэффициентов уравнения: для деревьев III разряда $f = 0,423$; $\omega = 0,00338$; IV — $f = 0,42$; $\omega = 0,00454$; V — $f = 0,42$; $\omega = 0,00555$.

Исследования показывают, что координата центра тяжести масс кроны при переменной ее плотности на $(0,06 \dots 0,09) h_k$, или на 12... 18 % больше принятой по существующей методике в расчете силового момента от ветровой нагрузки $(0,5 h_k)$.

Во всех расчетах отклонения вычисленных значений параметров от измеренных не превышают 2σ (σ — средняя квадратичная погрешность).

Выводы

1. Площадь миделевого сечения конусообразной кроны ели (с коэффициентом формы 0,5) не рекомендуется принимать в расчет при определении ветровой нагрузки на дерево, так как она на 40 % меньше фактической. Силовой момент от ветровой нагрузки, даже с учетом координаты центра тяжести масс кроны, при такой площади миделя занижается на 20 %, что уменьшает надежность валочных машин.

2. При определении ветровой нагрузки на еловое дерево и силового момента, создаваемого ею, следует учитывать площадь миделевого сечения кроны параболической формы и центр тяжести миделя как однородной поверхности. Это позволит рассчитать силы, действующие на технологическое оборудование валочных машин, близкие к реальным, что обеспечит большую их надежность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Баринов К. Н., Александров В. А. Проектирование лесопромышленного оборудования: Учеб. пособие.—Л.: ЛГУ, 1988.—233 с. [2]. Коротяев Л. В. Параметры деревьев и хлыстов как объектов лесозаготовительного производства: Учеб. пособие.—Л.: ЛТА, 1982.—80 с. [3]. Коротяев Л. В. Математическая модель кроны северной ели // Лесн. журн.—1984.—№ 1.—С. 46—54. [4]. Полищук А. П. Валка леса.—М.: Лесн. пром-сть, 1972.—176 с. [5]. Шкиря Т. М. Технология и машины лесосечных работ: Учеб. пособие.—Львов: Львов. ун-т, 1988.—264 с.

Поступила 18 октября 1990 г.