

УДК 621.798.4: 630\*848.7

**П.Ф. Войтко, А.С. Фадеев**

Войтко Петр Филиппович родился в 1945 г., окончил в 1968 г. Марийский политехнический институт, кандидат технических наук, профессор кафедры транспорта леса Марийского государственного технического университета, заслуженный деятель науки Республики Марий Эл. Имеет 80 печатных работ в области водного транспорта леса и лесоперевалочных процессов.



### **МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ЛЕСНЫХ ГРУЗОВ ГРАВИТАЦИОННЫМИ ТОРЦЕВЫРАВНИВАТЕЛЯМИ**

Составлены три математические модели формирования пакетов круглых лесоматериалов перед погрузкой в транспортные средства.

Ключевые слова: математическая модель, формирование лесных грузов, гравитационные торцевыравниватели.

Институт ВКНИИВОЛТ совместно с МарГТУ разработали гравитационные торцевыравниватели К-127, К-142, К-153 к башенным и порталным кранам для формирования лесных грузов перед погрузкой в транспортные средства (автомобили, суда, железнодорожные платформы и полувагоны).

Проблеме формирования лесных грузов гравитационными торцевыравнивателями посвящены работы Я.И. Виноградова, И.П. Донского, М.В. Борисова, В.Е. Игутова, Н.Е. Варакса, В.М. Филашова, К.А. Свиридюка, Д.И. Николенко и других исследователей [1, 2, 4–8 и др.].

Целью нашей работы является обоснование математической модели формирования пакетов круглых лесоматериалов гравитационными торцевыравнивателями. С одной стороны, она должна быть простой для практического применения, а с другой – достаточно точно описывать исследуемый процесс и давать возможность определить максимальные усилия торцевания, развиваемые поворотным щитом.

Сопоставляли следующие модели, составленные с использованием: уравнений статики; общего уравнения динамики; дифференциальных уравнений Лагранжа II рода. Исследуем каждую из них.

1. Рассмотрим принципиальную схему сил, действующих на гравитационный торцевыравнивающий щит Г-образной формы при выравнивании торцов круглых лесоматериалов (рис. 1), который может поворачиваться под действием силы тяжести пачки  $G/2$  относительно оси  $O$ .

Щит, шарнирно закрепленный в точке  $O$ , имеет одну степень свободы, а положение горизонтальной части щита длиной  $l_0 + l_{01}$  определяет положение торцов круглых лесоматериалов. При взаимодействии торцов бревен с вертикальной частью щита возникают нормальная составляющая сила  $N$  и сила тре-

ния скольжения  $F_{тр}$  торцов по внутренней поверхности щита, направленная в противоположную сторону движения пачки бревен (вдоль вертикальной части

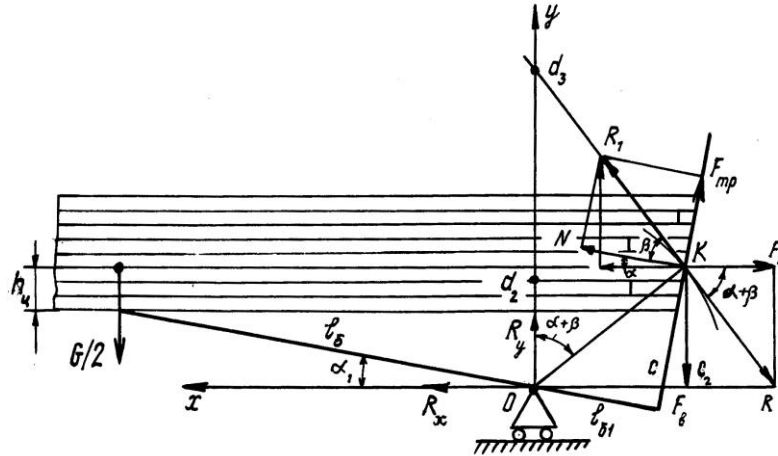


Рис. 1. Схема сил, действующих на поворотный щит гравитационного торцевывравнивателя

щита вверх). Равнодействующая сила  $R_1$  направлена по касательной к траектории движения точки  $K$  (перпендикулярна к отрезку  $OK$ ). Она наклонена под углом  $\beta$  к нормальной реакции  $N$ . Коэффициент трения скольжения торцов  $\varphi$  круглых лесоматериалов по вертикальной части торцевывравнивающего щита равен  $\text{tg } \beta$ .

Разложим равнодействующую силу  $R = R_1$  на горизонтальную составляющую  $F_r$ , перемещающую торцы круглых лесоматериалов внутрь пачки, и вертикальную  $F_b$ , вызывающую кострение торцов. При взаимодействии вертикальной части торцевывравнивающего щита с выступающими торцами круглых лесоматериалов равнодействующая  $R$  направлена в сторону, противоположную  $R_1$ .

Допустим, что под действием сил тяжести пачки бревен  $G_n/2$  щит поворачивается относительно оси  $O$ , а его горизонтальная часть  $l_6$  наклонена к горизонту под углом  $\alpha_1$ , тогда равнодействующая  $R$  будет наклонена к горизонту под углом  $\alpha_1 + \beta$ . Следовательно,

$$F_r = -R \cos(\alpha_1 + \beta); \quad (1)$$

$$F_b = -R \sin(\alpha_1 + \beta) \quad (2)$$

или

$$F_b = F_r \text{tg}(\alpha_1 + \beta). \quad (3)$$

Из приведенной схемы сил (рис. 1) видно, что  $N = R_1 \cos \beta$ ;  $R_1 = R$ , откуда

$$R = N / \cos \beta. \quad (4)$$

Подставим в формулы (1) и (2) выражение  $R$  из (4):

$$F_r = -N \cos(\alpha_1 + \beta) / \cos \beta; \quad F_b = -N \sin(\alpha_1 + \beta) / \cos \beta.$$

После преобразования получим

$$F_r = -N(\cos\alpha_1 - \operatorname{tg}\beta \sin\alpha_1); \quad (5)$$

$$F_b = -N(\sin\alpha_1 - \operatorname{tg}\beta \cos\alpha_1). \quad (6)$$

Найдем  $N$  из (5):

$$N = -F_r / (\cos\alpha_1 - \operatorname{tg}\beta \sin\alpha_1). \quad (7)$$

Подставим  $N$  из (7) в (6), тогда

$$F_b = F_r(\sin\alpha_1 + \operatorname{tg}\beta \cos\alpha_1) / (\cos\alpha_1 - \operatorname{tg}\beta \sin\alpha_1). \quad (8)$$

Разделим числитель и знаменатель выражения (8) на  $\cos\alpha_1$ :

$$F_b = F_r(\operatorname{tg}\alpha_1 + \operatorname{tg}\beta) / (1 - \operatorname{tg}\beta \operatorname{tg}\alpha_1) = F_r \operatorname{tg}(\alpha_1 + \beta). \quad (9)$$

Выражения (9) и (3) идентичны.

Составим уравнения равновесия системы сил, используя уравнения статики [3].

Первое уравнение:

$$\sum x = 0: R_x + R_1 \cos(\alpha_1 + \beta) = 0,$$

отсюда

$$R_x = -R_1 \cos(\alpha_1 + \beta). \quad (10)$$

Подставив в (10)  $R = R_1$  из (1), получим

$$R_x = F_r.$$

Второе уравнение:

$$\sum y = 0: -G_n/2 + R_y + R \sin(\alpha_1 + \beta) = 0,$$

отсюда

$$R_y = G_n/2 - R \sin(\alpha_1 + \beta). \quad (11)$$

После подстановки выражения  $-R \sin(\alpha_1 + \beta)$  из (2) в (11) находим

$$R_y = G_n/2 + F_b.$$

Третье уравнение:

$$\sum m_o = 0: (G_n/2) l_6 \cos\alpha + R \cdot OK = 0,$$

отсюда

$$R = -G_n l_6 \cos\alpha_1 / 2OK. \quad (12)$$

Подставив  $R$  из (1) в (12), получим

$$F_r = G_n l_6 \cos\alpha_1 \cos(\alpha_1 + \beta) / 2OK. \quad (13)$$

Выражение для  $OK$  найдем из элементарных геометрических построений (рис. 1):

$$OK = [l_{61} \sin(\alpha_1 + \beta) - h_n \cos\beta + l_6 \sin\alpha_1 \cos\beta] / \cos\alpha_1. \quad (14)$$

Подставляя  $OK$  из (14) в (13), после преобразований находим

$$F_r = \frac{(G_i / 2) l_a \cos^2 \alpha_1}{l_{a1} \operatorname{tg}(\alpha_1 + \beta) - \frac{h_6 \cos \beta}{\cos(\alpha_1 + \beta)} + \frac{l_a \sin \alpha_1 \cos \beta}{\cos(\alpha_1 + \beta)}}. \quad (15)$$

Проверим полученное выражение (15), для чего используем теорему моментов: момент равнодействующей силы относительно точки равен сумме моментов ее составляющих [2]. Разложим равнодействующую силу  $R$  на две составляющие  $F_r$  и  $F_b$  (рис. 1) и запишем уравнение моментов относительно точки  $O$ :

$$(G_n/2) l_6 \cos \alpha_1 - F_r (h_u + l_6 \sin \alpha_1) - F_b [(l_{61} / \cos \alpha_1) + (l_6 \sin \alpha_1 + h_u) \operatorname{tg} \alpha_1] = 0.$$

Отсюда находим

$$(G_n/2) l_6 \cos \alpha_1 = F_r (h_u + l_6 \sin \alpha_1) + F_b [(l_{61} / \cos \alpha_1) + (l_6 \sin \alpha_1 + h_u) \operatorname{tg} \alpha_1]. \quad (16)$$

Подставляя в (16)  $F_b$  из (9), получаем

$$(G_n/2) l_6 \cos \alpha_1 = F_r (h_u + l_6 \sin \alpha_1) + F_r \operatorname{tg} (\alpha_1 + \beta) [(l_{61} / \cos \alpha_1) + (l_6 \sin \alpha_1 + h_u) \operatorname{tg} \alpha_1],$$

откуда найдем усилие торцевания  $F_T = F_r$ :

$$F_T = \frac{(G_i / 2) l_a \cos \alpha_1}{(h_6 + l_a \sin \alpha_1) + \operatorname{tg}(\alpha_1 + \beta) \left[ \frac{l_{a1}}{\cos \alpha_1} + (l_a \sin \alpha_1 + h_6) \operatorname{tg} \alpha_1 \right]}. \quad (17)$$

Преобразуем знаменатель в выражении (17):

$$F_T = (G_n / 2) l_6 \cos^2 \alpha_1 / [l_{61} \operatorname{tg}(\alpha_1 + \beta) - h_u \cos \beta / \cos(\alpha_1 + \beta) + l_6 \sin \alpha_1 \cos \beta / \cos(\alpha_1 + \beta)]. \quad (18)$$

Выражение (18) идентично (15).

2. Составим дифференциальное уравнение движения торцевывающего щита Г-образной формы при взаимодействии торцов бревен с вертикальной частью щита, используя общее уравнение динамики для данной системы сил [3]. К рассматриваемой системе приложим задаваемую силу тяжести пачки  $G_n/2$ . К этой силе добавим момент от равнодействующей силы  $R$  относительно оси поворота точки  $O$ . Так как пачка опускается вниз, то к ней приложена сила инерции  $I_1$ , направленная вверх (в противоположную сторону). Обозначим ординату опускания пачки через угол поворота горизонтальной части Г-образного щита рычага:

$$y_n = l_6 \sin \alpha_1. \quad (19)$$

Найдем производные по времени выражения (19):

$$\dot{y}_1 = \alpha_1 l_6 \cos \alpha_1; \quad \ddot{y}_1 = \ddot{\alpha}_1 l_6 \cos \alpha_1 + \dot{\alpha}_1 l_6 (-\sin \alpha_1) \dot{\alpha}_1.$$

Отсюда

$$\ddot{y}_i = l_6(\ddot{\alpha}_1 \cos \alpha_1 - \dot{\alpha}_1^2 \sin \alpha_1). \quad (20)$$

При опускании пачки горизонтальная часть щита получит возможное перемещение в направлении уменьшения угла на величину  $\delta\alpha_1$ . Перемещение пачки по вертикали выразим через  $\delta\alpha_1$ , для этого вычислим вариацию выражения (19):

$$\delta y_{\text{п}} = l_6 \cos \alpha_1 \delta \alpha_1.$$

Сила инерции, действующая на пачку, равна

$$I_1 = m \ddot{y}_i.$$

Масса пачки  $m = G_{\text{п}}/2g$ , а ускорение находим по выражению (20), тогда

$$I_1 = (G_{\text{п}}/2g) l_6(\ddot{\alpha}_1 \cos \alpha_1 - \dot{\alpha}_1^2 \sin \alpha_1).$$

Составим общее уравнение динамики для данной системы сил и приравняем нулю сумму работ задаваемых сил и сил инерции на возможных перемещениях точек системы:

$$G_{\text{п}}/2g \delta y_{\text{п}} + I_1 \delta y_{\text{п}} + m_{R(0)} \delta \alpha_1 = 0. \quad (21)$$

Подставим в (21) выражение  $\delta y_{\text{п}}$ ,  $I_1$ ,  $m_{R(0)}$  и почленно сократим уравнение (21) на  $\delta \alpha_1$ , тогда

$$\begin{aligned} & -G_{\text{п}} l_6 \cos \alpha_1 \delta \alpha_1 / 2g + G_{\text{п}} l_6 (\ddot{\alpha}_1 \cos \alpha_1 - \dot{\alpha}_1^2 \sin \alpha_1) l_6 \cos \alpha_1 \delta \alpha_1 / 2g + \\ & + R [l_{61} I_1 \sin(\alpha_1 + \beta) + h_{\text{ц}} \cos \beta + l_6 \cos \beta \sin \alpha_1] / \cos \alpha_1 \delta \alpha_1 = \\ & = G_{\text{п}}/2 l_6 \cos \alpha_1 + G_{\text{п}}/2g l_6^2 \cos \alpha_1 (\alpha_1 \cos \alpha_1 - \alpha_1^2 \sin \alpha_1) + \\ & + R / \cos \alpha_1 [l_{61} \sin(\alpha_1 + \beta) + h_{\text{ц}} \cos \beta + l_6 \cos \beta \sin \alpha_1] = 0. \end{aligned} \quad (22)$$

Так как нас интересует усилие торцевания  $F_{\text{т}}$ , то в (22) подставим значение  $R$  из (1), тогда

$$\begin{aligned} & -G_{\text{п}} l_6 \cos \alpha_1 / 2g + G_{\text{п}} l_6^2 \cos \alpha_1 / 2g (\ddot{\alpha}_1 \cos \alpha_1 - \dot{\alpha}_1^2 \sin \alpha_1) + \\ & + F_{\text{т}} \frac{l_{a1} \sin(\alpha_1 + \beta) + h_6 \cos \beta + l_a \cos \beta \sin \alpha_1}{\cos(\alpha_1 + \beta)} = 0. \end{aligned} \quad (23)$$

Выразим угловую скорость и ускорение через линейные. Из выражения (20) найдем угловую скорость

$$\dot{\alpha}_1 = \dot{y}_i / l_6 \cos \alpha_1 \text{ или } \dot{\alpha}_1 = l_6 (\ddot{\alpha}_1 \cos \alpha_1 - \dot{y}_i^2 \sin \alpha_1 / l_a^2 \cos^2 \alpha_1), \quad (24)$$

откуда

$$\ddot{\alpha}_1 \cos \alpha_1 = \ddot{y}_i / l_6 + \dot{y}_i^2 \sin \alpha_1 / l_6 \cos^2 \alpha_1. \quad (25)$$

Подставим (24) и (25) в (23), после преобразования получим

$$- G_{\Pi} l_6 \cos \alpha_1 \ddot{y} / 2g = \frac{G_i}{2} l_6 \cos \alpha_1 - F_T \frac{l_{a1} \sin(\alpha_1 + \beta) + h_6 \cos \beta + l_a \cos \beta \sin \alpha_1}{\cos \alpha_1 \cos(\alpha_1 + \beta)}. \quad (26)$$

По формуле (26) определим усилие торцевания

$$F_T = \frac{G_i l_a \cos^2 \alpha_1 (g - \ddot{y})}{2g \left[ l_{a1} \operatorname{tg}(\alpha_1 + \beta) + \frac{h_6 \cos \beta}{\cos(\alpha_1 + \beta)} + \frac{l_a \cos \beta \sin \alpha_1}{\cos(\alpha_1 + \beta)} \right]}. \quad (27)$$

3. Теперь составим дифференциальное уравнение движения Г-образного щита торцевывравнителя при соприкосновении торцов бревен с вертикальной частью торцевывравнивающего щита, используя уравнение Лагранжа II рода [1]:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}_1} \right) - \frac{\partial T}{\partial \alpha_1} = G_{\alpha}.$$

Определим обобщенную силу  $G_{\alpha}$ , для этого вычислим сумму работ внешних сил на возможных перемещениях точек системы, соответствующих обобщенному возможному перемещению  $\delta \alpha_1$ :

$$\delta A = \delta A(G_{\Pi}/2) - \delta A(M_{R0}). \quad (28)$$

Элементарная работа силы тяжести пачки  $G_{\Pi}/2$  равна

$$\delta A(G_{\Pi}/2) = G_{\Pi} l_6 \cos \alpha_1 \delta \alpha_1 / 2. \quad (29)$$

Элементарная работа от момента  $M_{R0}$  равнодействующей силы (рис. 1) равна  $\delta A = (M_{R0}) = R OK \delta \alpha_1$ , или с учетом (14)

$$\delta A(M_{R0}) = R[l_{61} \sin(\alpha_1 + \beta) + h_{\Pi} \cos \beta + l_6 \cos \beta \sin \alpha_1] \delta \alpha_1 / \cos \alpha_1. \quad (30)$$

Работа от момента  $M_{R0}$  отрицательна, так как направление момента равнодействующей  $R$  относительно точки поворота  $O$  и возможные перемещения  $\delta \alpha_1$  противоположны. Подставляя (29) и (30) в (28), получаем

$$\delta A = \delta \alpha_1 \{ G_{\Pi} l_6 \cos \alpha_1 / 2 - R[l_{61} \sin(\alpha_1 + \beta) + h_{\Pi} \cos \beta + l_6 \cos \beta \sin \alpha_1] / \cos \alpha_1 \}. \quad (31)$$

Обобщенной силой  $G_{\alpha}$  является коэффициент, записанный в фигурных скобках выражения (31):

$$G_{\alpha} = G_{\Pi} l_6 \cos \alpha_1 / 2 - R[l_{61} \sin(\alpha_1 + \beta) + h_{\Pi} \cos \beta + l_6 \cos \beta \sin \alpha_1] / \cos \alpha_1. \quad (32)$$

Так как нас интересует  $F_T = F_{\Gamma}$ , то во второе слагаемое выражения (32) вместо  $R$  подставим его выражение из (1), тогда

$$G_{\alpha} = G_{\Pi} l_6 \cos \alpha_1 / 2 - F_T [l_{61} \sin(\alpha_1 + \beta) + h_{\Pi} \cos \beta + l_6 \cos \beta \sin \alpha_1] / \cos \alpha_1 \cos(\alpha_1 + \beta). \quad (33)$$

Вычислим кинетическую энергию системы, состоящей только из кинетической энергии силы тяжести пачки бревен  $G_{\Pi}$ :

$$T = mV^2/2. \quad (34)$$

Масса пачки бревен  $m = G_n/2g$ , а линейная скорость  $V = \dot{\alpha}_1 l_6 \cos \alpha$ .

Подставляя в (34)  $m$  и  $V$ , находим

$$T = G_n \dot{\alpha}_1^2 l_a^2 \cos^2 \alpha_1 / 2g. \quad (35)$$

Частная производная выражения (35) по обобщенной скорости  $\delta \dot{\alpha}_1$  равна

$$\partial T / \partial \dot{\alpha}_1 = \frac{G_n}{g} \dot{\alpha}_1 l_a^2 \cos^2 \alpha_1. \quad (36)$$

Теперь возьмем производную по времени от выражения (36):

$$d/dt(\partial T / \partial \dot{\alpha}_1) = (\ddot{\alpha}_1 G_n l_a^2 \cos^2 \alpha_1 - \dot{\alpha}_1^2 G_n l_a^2 2 \cos \alpha_1 \sin \alpha_1) / g. \quad (37)$$

Найдем частную производную от кинетической энергии по обобщенной координате  $\alpha_1$ :

$$\partial T / \partial \alpha_1 = -\dot{\alpha}_1 G_n l_a^2 \cos \alpha_1 \sin \alpha_1 / 2g. \quad (38)$$

Подставив выражения (33), (37) и (38) в уравнение Лагранжа, после преобразований получим дифференциальное уравнение движения торцевывравнивающего щита при соприкосновении с выступающими торцами бревен:

$$\ddot{\alpha}_1 - \dot{\alpha}_1^2 \operatorname{tg} \alpha_1 - g / l_6 \cos \alpha_1 + F_\tau 2g [l_{61} \sin(\alpha_1 + \beta) + h_{ц} \cos \beta + l_6 \cos \beta \sin \alpha_1] / G_n l_6^2 \cos^3 \alpha_1 \cos(\alpha_1 + \beta) = 0. \quad (39)$$

Из выражения (39) найдем искомую силу торцевания  $F_\tau$ , развиваемую поворотным щитом, которая после замены угловой скорости и углового ускорения щита на линейные примет вид

$$F_\tau = \frac{G_n l_a^2 \cos^2 \alpha_1 (g - \ddot{y})}{2g \left[ l_{a1} \operatorname{tg}(\alpha_1 + \beta) + \frac{h_6 \cos \beta}{\cos \beta (\alpha_1 + \beta)} + \frac{l_a \cos \beta \sin \alpha_1}{\cos(\alpha_1 + \beta)} \right]}. \quad (40)$$

Из выражения (40) следует, что усилие торцевания, развиваемое поворотным щитом гравитационного торцевывравнивателя, зависит от веса пачки  $G_n$ , ускорения движения пачки круглых лесоматериалов  $\ddot{y}$ ; угла поворота торцевывравнивающего щита  $\alpha_1$ ; расположения центра тяжести пачки  $h_{ц}$ ; соотношения длин горизонтальной части щита  $l_6$  и  $l_{61}$  от оси его поворота. Возможны следующие случаи движения пачки в торцевывравнивателе.

1. Если пачка круглых лесоматериалов опускается в торцевывравниватель равномерно, что наблюдается при работе крана со строповыми захватами, т. е.  $\ddot{y} = 0$ , то выражение (40) примет вид

$$F_T = \frac{G_i l_a \cos^2 \alpha_1 / 2}{l_{a1} \operatorname{tg}(\alpha_1 + \beta) + \frac{h_0 \cos \beta}{\cos(\alpha_1 + \beta)} + \frac{l_a \cos \beta \sin \alpha_1}{\cos(\alpha_1 + \beta)}}. \quad (41)$$

2. Если пачка круглых лесоматериалов опускается в торцевывравнитель с ускорением, равным ускорению свободного падения тел  $\ddot{y} = g$ , то выражение (40) примет вид

$$F_T = \frac{G_i l_a \cos^2 \alpha_1}{l_{a1} \operatorname{tg}(\alpha_1 + \beta) + \frac{h_0 \cos \beta}{\cos(\alpha_1 + \beta)} + \frac{l_a \cos \beta \sin \alpha_1}{\cos(\alpha_1 + \beta)}}. \quad (42)$$

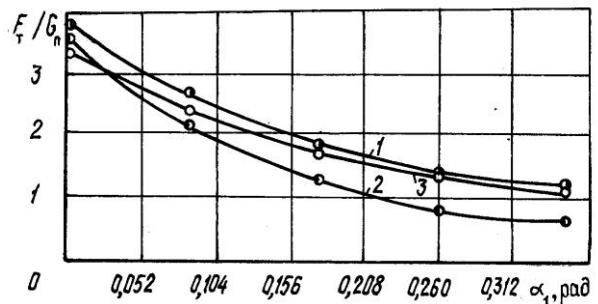
Следовательно, при опускании пачки круглых лесоматериалов с ускорением, равным ускорению свободного падения тел, усилие торцевания, развиваемое поворотным щитом гравитационного торцевывравнителя, возрастет в два раза.

3. Если пачку круглых лесоматериалов опускать в торцевывравнитель с ускорением  $\ddot{y} \leq -gn$ , где  $n = (0,1; 0,2; \dots; 1,0)$ , то усилие торцевания, развиваемое поворотным щитом гравитационного торцевывравнителя, будет больше на величину  $K$ :

$$K = (g - \ddot{y}) / g = g - (-gn) / g = g(1 + n) / g.$$

Опускание пачки круглых лесоматериалов в торцевывравнитель с ускорением осуществляется, если кран оснащен грейферным захватом.

Рис. 2. График зависимости  $F_T / G_n = f(\alpha_1)$ : 1 – расчетная с ребрами; 2 – расчетная без ребер; 3 – экспериментальная



При сопоставлении различных математических моделей процесса формирования пачек круглых лесоматериалов видно, что аналитические зависимости (15) и (18), (27) и (40) идентичны. Результаты сопоставления позволили ВКНИИВОЛТУ рекомендовать для практических расчетов гравитационных торцевывравнителей К-127, К-142, К-153 использовать аналитические зависимости (27) и (40).

Достоверность математической модели (40) подтверждается результатами производственных испытаний торцевывравнителей К-127 на Болтинской и Лимендской лесоперевалочных базах Котласской сплавной конторы (рис. 2).



Для улучшения процесса торцевания и уменьшения кострея круглых лесоматериалов в торцевывравнителе на внутренней поверхности поворотных щитов устанавливали горизонтальные и вертикальные ребра, что позволило увеличить усилие торцевания щита на 30 %.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Борисов М.В.* Расчет усилия торцевания // Лесн. пром-сть. – 1969. – № 7. – С. 6–7.
2. *Варакса Н.Е., Виноградов Я.И.* Экспериментальное исследование торцевывравнивания поворотным надвиганием щитов // Технология и комплексная механизация лесозаготовительных работ: Межвуз. сб. науч. тр. / СибЛТИ, 1974. – Вып. 2. – С. 234 – 240 с.
3. *Воронков И.М.* Курс теоретической механики. – М.: Наука, 1965. – 596 с.
4. *Донской И.П., Виноградов Я.И.* Усилия выравнивания торцов пакетов бревен // Лесосечные, лесоскладские работы и транспорт леса: Межвуз. сб. науч. тр. / ЛТА. – 1974. – Вып. 111. – С. 84–89.
5. *Игутов В.Е.* Исследование силовых и геометрических параметров торцевывравнивающих устройств на базе статической модели беспрокладочного штабеля из круглых лесоматериалов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Йошкар-Ола, 1971. – 29 с.
6. *Николенко Д.И.* К вопросу о торцевании круглого леса в процессе перегрузки // Сб. науч. тр. / Одес. ин-т инж. морск. флота. – 1989. – Вып. 12. – С. 97–100.
7. *Свиридюк К.А.* Аналитические исследования процесса выравнивания торцов бревен в установках гравитационного типа // Сб. науч. тр. / ЦНИИМЭ. – 1975. – Вып. 143. – С. 122–129.
8. *Филашов В.М.* К расчету накопителей и торцевывравнителей бревен // Лесн. журн. – 1972. – № 3. – С. 19–20. – (Изв. высш. учеб. заведений).

Марийский государственный  
технический университет

ВКНИИЛП

Поступила 24.01.03

*P.F. Voitko, A.S. Fadeev*

#### **Mathematical Models of Forest Cargo Formation by Gravitational Trimmers**

Three mathematical models have been set up for forming roundwood bunches before loading them to machines.

---