

УДК 630\*848.7: 621.798.4

### ***П. Ф. Войтко***

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 85 печатных работ в области водного транспорта леса и лесоперевалочных процессов.



## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ПАЧКИ ЛЕСНЫХ ГРУЗОВ**

Составлена математическая модель процесса формирования лесных грузов передвижными торцевывравнителями перед погрузкой в транспортные средства на предприятиях с рейдами приплава.

*Ключевые слова:* математическая модель, формирование лесных грузов, пучки и пачки из круглых лесоматериалов, передвижные торцевывравнители.

Применение торцевывравнителей на лесопромышленных предприятиях с рейдами приплава обусловлено несовершенством технологического оборудования, используемого на лесоскладских работах, а также условиями транспортировки круглых лесоматериалов по водным путям и перевозки их в смешанном сообщении. Проблеме торцевания лесных грузов из круглых лесоматериалов посвящены исследования ряда авторов [1, 2, 4–13 и др.].

Цель нашей работы – вывод математической модели формирования лесных грузов из круглых лесоматериалов с помощью передвижных торцевывравнителей. Объектом исследований служат разработанные институтом ВКНИИВОЛТ при участии МарГТУ передвижные торцевывравнители ТПК-10, ЛВ-169 к башенным и порталным кранам для формирования лесных грузов перед погрузкой в транспортные средства (автомобили, суда, вагоны). Предметом исследований является определение параметров передвижных торцевывравнителей к башенным кранам КБ-572.

При выравнивании торцов лесных грузов (бревна и пакеты) на них действуют силы трения перемещению круглых лесоматериалов относительно друг друга и обвязки, а также со щитами торцевывравнивающих устройств. Силы трения, преодолеваемые при выравнивании торцов, зависят от многих факторов, в том числе от натяжения в обвязке лесотранспортной грузовой единицы. Усилие торцевания  $F$ , которое необходимо приложить к рабочему органу торцевывравнителя, является основным.

Для исследования процесса формирования лесных грузов передвижными торцевывравнивателями применяли метод сыпучей среды с учетом сил трения [4]. Примем следующие допущения и ограничения. Лесной груз в торцевывравнивателе (рис. 1) представляет собой сыпучую

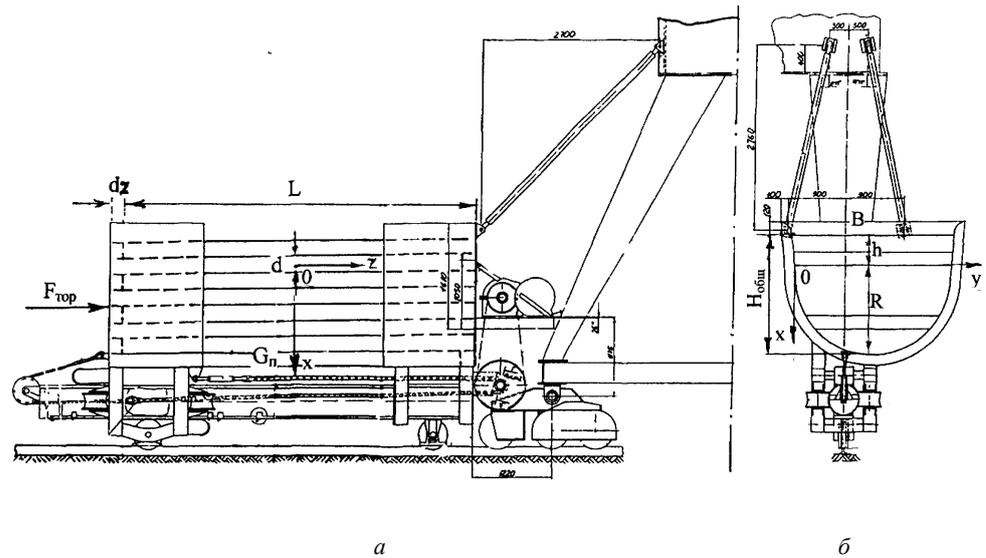


Рис. 1. Расчетная схема формирования круглых лесоматериалов передвижным торцевывравнивателем ТПК-10: *a* – вид сбоку; *б* – вид в поперечном сечении

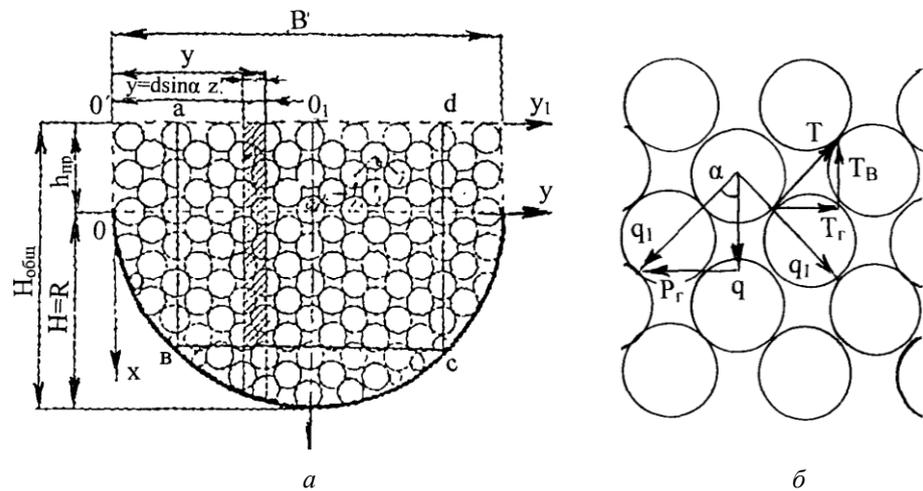


Рис. 2. Расчетная схема: *a* – расположение круглых лесоматериалов в люлке формирующего устройства; *б* – расположение бревен при их продольном перемещении

среду, состоящую из обвязанных гибкими связями круглых лесоматериалов одинакового диаметра  $d$ , веса  $q$ , сбежистости и шероховатости боковой по-

верхности. Массы связей (обвязок) очень малы по сравнению с массой груза, поэтому их не учитывают. Поперечное сечение формирующего устройства торцевывравнителя имеет форму плоских симметричных фигур (полукруг, прямоугольник, равнобедренный треугольник, трапеция) или сложных фигур (полукруг+прямоугольник). Схема расположения круглых лесоматериалов в формирующем устройстве (рис. 2, а) предполагает, что каждое бревно касается четырех соседних (рис. 2, б).

Обозначим коэффициенты трения между бревнами  $f_b$ , между ними и обвязкой  $f_{б.о.}$ , между бревнами и опорными стойками формирующего устройства  $f_{б.с.}$ . Влияние проволочных обвязок на лесной груз учитывают приведенной равномерно распределенной нагрузкой из слоев бревен высотой  $h_{пр}$ . Для составления математической модели использовали методы математического анализа и уравнений статики.

Определим нормальные силы, действующие на пучок круглых лесоматериалов, помещенных в передвижной торцевывравнитель ТПК-10 сложной формы формирующего устройства. При выравнивании торцов вертикальными щитами влияние усилий от обвязок можно найти двумя способами:

$$T = P_0 r \quad (1)$$

или

$$T = G_n K, \quad (2)$$

где  $P_0$  – интенсивность нагрузки на обвязки, Н/м;

$r$  – радиус кривизны контура обвязки, м;

$G_n$  – вес пучка бревен, Н;

$K$  – коэффициент пропорциональности.

Заменим давление от обвязок приведенной равномерно распределенной нагрузкой из дополнительных слоев бревен высотой  $h_{пр}$  и весом

$$G_{пр} = h_{пр} \gamma_d \rho LB, \quad (3)$$

где  $\gamma_d$  – плотность древесины, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho$  – коэффициент полндревесности пучка бревен;

$L$  – длина круглых лесоматериалов, м;

$B$  – ширина торцевывравнителя, м.

Интенсивность равномерно распределенной нагрузки  $P_{0_1}$  на участке шириной  $B$  выразим как

$$P_{0_1} = G_{пр} / B. \quad (4)$$

Подставив выражение (3) в (4), получим

$$P_{0_1} = h_{пр} L \gamma_d \rho. \quad (5)$$

Приравняв выражения (1) и (5), получим выражение для определения  $h_{пр}$ :

$$h_{пр} = T / (r L \gamma_d \rho). \quad (6)$$

Подставив  $T$  из (2) в (6) и выразив вес пучка через ее геометрические размеры  $G_n = L S_n \gamma_d$ , найдем

$$h_{\text{пр}} = KG_{\text{пр}}/(rL\gamma_{\text{др}}) = KS_{\text{пр}}/r, \quad (7)$$

где  $S_{\text{пр}}$  – площадь поперечного сечения.

Зная приведенную высоту  $h_{\text{пр}}$  от усилий в обвязках (7), найдем количество дополнительных рядов бревен:

$$n_{\text{пр}} = h_{\text{пр}}/(d \cos \alpha), \quad (8)$$

где  $\alpha$  – угол взаимного расположения бревен в пучке, рад.

Подставив значение  $h_{\text{пр}}$  из (7) в (8), получим

$$n_{\text{пр}} = KS_{\text{пр}}/(rd \cos \alpha). \quad (9)$$

Итак, от усилий в обвязках на сортиментный пучок дополнительно действует приведенный слой среды, содержащий  $n_{\text{пр}}$  бревен.

Нормальные силы, действующие на единичное бревно, определим по формуле

$$N_1 = N_i + N_{\hat{a}} + 2N_{\hat{a}\hat{e}}. \quad (10)$$

Поскольку на бревно, кроме вышележащих  $n$  слоев, действует и приведенный слой сортиментов  $n_{\text{пр}}$ , то нормальные усилия, приложенные к бревну снизу ( $N_{\text{н}}$ ) и сверху ( $N_{\text{в}}$ ), равны:

$$N_{\text{н}} = q(n + n_{\text{пр}}); \quad (11)$$

$$N_{\text{в}} = q(n + n_{\text{пр}} - 1). \quad (12)$$

Распорное усилие  $N_{\text{бок}}$  определим с учетом сил трения и взаимного расположения бревен между собой [12]:

$$N_{\text{бок}} = q(\text{tg } \alpha - \mu)(n + n_{\text{пр}} - 1)/2, \quad (13)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения бревен поперек волокон.

Подставив значения составляющих нормальных сил (11), (12) и (13) в выражение (10), получим нормальную силу, действующую на бревно:

$$N_1 = q\{(n + n_{\text{пр}}) + [(n + n_{\text{пр}}) - 1][1 + (\text{tg } \alpha - \mu)]\}. \quad (14)$$

Заменив последний множитель второго слагаемого  $[1 + (\text{tg } \alpha - \mu)]$  на  $\psi$ , найдем

$$N_1 = q\{(n + n_{\text{пр}}) + [(n + n_{\text{пр}}) - 1]\psi\}. \quad (15)$$

Нормальное усилие, действующее на первое бревно в приведенном слое,

$$N_{1\text{пр}} = q. \quad (16)$$

То же в пучке

$$N_{1(1\text{п})} = q\{(1 + n_{\text{пр}}) + [(n + n_{\text{пр}}) - 1]\psi\} = q[(1 + n_{\text{пр}}) + n_{\text{пр}}\psi]. \quad (17)$$

Усилие продольного перемещения любого бревна, находящегося в любом сечении пучка, найдем по формуле

$$F_1 = f_c q\{(1 + n_{\text{пр}}) + [(n + n_{\text{пр}}) - 1]\psi\}. \quad (18)$$

Усилие, необходимое для перемещения бревен, находящихся в любом горизонтальном ряду пучка, определим по выражению

$$F_{ir} = f_c m q (n + n_{np}) n_k \{1 + [1 + 1 / (n + n_{np})] \psi\}, \quad (19)$$

где  $m$  – коэффициент отношения выступающих бревен к общему их числу.

В формуле (19) выражение  $(n + n_{np}) n_k$  есть количество круглых лесоматериалов, находящихся в контуре, ограниченном сечением  $abcd$  (рис.2, а), которое может быть найдено через площадь поперечного сечения контура  $S$ :

$$i = 4\rho S / (\pi d^2). \quad (20)$$

Вес одного бревна найдем по формуле

$$q = \pi d^2 L \gamma_d / 4. \quad (21)$$

Количество сортиментов в вертикальном ряду можно выразить через угол взаимного расположения бревен  $\alpha$  и высоту столба среды  $x_{общ} = H + h_{np}$ :

$$n_{общ} = n + n_{np} = x_{общ} / (d \cos \alpha). \quad (22)$$

Подставив выражения (20)–(22) в (19), найдем усилие перемещения любого горизонтального слоя пучка:

$$F_{ir} = f_c m \gamma_d \rho L S [1 + (1 - d \cos \alpha / x_{общ}) \psi]. \quad (23)$$

Для определения общего усилия торцевания пучка необходимо просуммировать значения сил перемещения всех горизонтальных рядов бревен или проинтегрировать выражение (23). Из формы поперечного сечения пучка видно, что с изменением высоты столба среды пучка изменяется и площадь контура, которая зависит от количества бревен в вертикальном ряду:

$$S = f (n + n_{np}).$$

Общее усилие, необходимое для выравнивания круглых лесоматериалов пучка, определим по формуле

$$F_{\text{и\u0430\u0443. \u0430}} = \frac{f_c m \gamma_d \rho L}{d \cos \alpha} \int_{h_{\text{нп}}}^{H+h_{\text{нп}}-d} \left[ S(x) + \psi S(x) - \psi S(x) \frac{d \cos \alpha}{x_{\text{и\u0430\u0443}}} \right] dx, \quad (24)$$

где  $f_c$  – коэффициент сопротивления бревен при их относительном перемещении вдоль волокон;

$S(x)$  – площадь контура формировочного устройства торцевывающего устройства,  $\text{м}^2$ .

Для пачки круглых лесоматериалов при  $h_{np} = 0$  и отсутствии обвязок выражение (24) принимает вид

$$F_{\text{общ. г}} = f_c m \gamma_d \rho L / (d \cos \alpha) \int_0^{H-d} [S(x) + \psi S(x) - \psi S(x) d \cos \alpha / x_{\text{общ}}] dx. \quad (25)$$

Чтобы определить общее усилие торцевания пачки круглых лесоматериалов по формуле (25), необходимо предварительно найти закономерность изменения площади контура  $S(x)$  формировочного устройства торце-

выравнивателя и проинтегрировать выражение (25) от нуля до  $H$ :

$$F_{\text{общ.г.р}} = f_c m G_n 4R / (3\pi d \cos \alpha) \{ (1 + \psi) \times \\ \times [1 - \sqrt{1 - (1 + h/R)^2 (1 - h/(R-h))^2}]^3 - 3\psi \pi d \cos \alpha / 4 \}. \quad (26)$$

Модернизированный передвижной торцевывравниватель ЛВ-169 отличается от ТПК-10 трапецидальной формой поперечного сечения люльки [3]. Определим усилие торцевания пачки круглых лесоматериалов, размещенной в этом формирующем устройстве. Рассмотрим его площадь в системе координат  $x_0 O_1 y$  (рис. 3), которая ограничена прямыми  $AB$ ,  $BC$  и  $CO_1$ ,  $O_1 A$  на осях координат. Площадь формирующего устройства может быть описана уравнением

$$y = b + b_1 - b_1 x / H, \quad (27)$$

при  $x = 0$   $y = b + b_1$ ; при  $x = H$   $y = b$ .

Так как форма трапеции имеет ось симметрии  $O_1 x_0$ , то, определив площадь  $O_1 ABC$  и удвоив результат, получим площадь люльки формирующего устройства. Проинтегрируем выражение (27):

$$S_{\text{трап}} = 2 \int_0^H (b + b_1 - \frac{b_1 x}{H}) dx.$$

После преобразований получим

$$S_{\text{трап}} = H(2b + b_1). \quad (28)$$

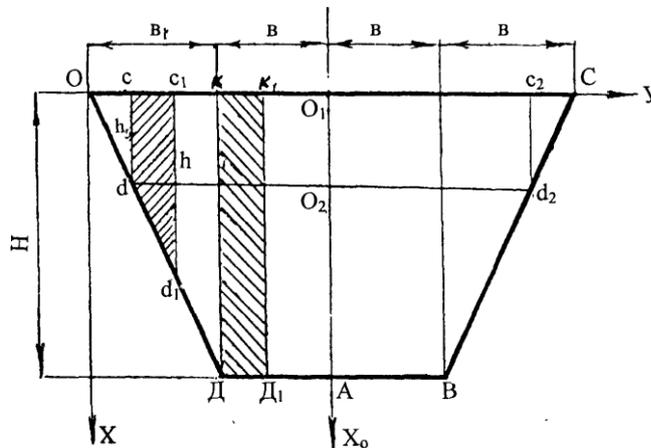


Рис. 3. Формирующее устройство торцевывравнивателя, имеющего трапецидальную форму поперечного сечения:  $H$  – высота устройства;  $b$  – нижнее полуоснование;  $b_1 + b$  – верхнее полуоснование;  $h$  – большое основание трапеции;  $h_0$  – малое основание трапеции

Для площади прямоугольного контура  $O_1 cd O_2$ , вписанного в формирующее устройство, получим

$$S_{O_1cdO_2} = x(b + b_1 - b_1x/H), \quad (29)$$

при  $x = 0$   $S_{O_1cdO_2} = 0$ ; при  $x = H$   $S_{O_1cdO_2} = Hb$ .

Искомая площадь прямоугольного контура, вписанного в формирующее устройство торцевывравнивателя, равна:

$$S_{cdd_2c_2} = 2x(b + b_1 - b_1x/H). \quad (30)$$

Выражения (30) подставим в формулы (23) и (25), по которым можно определить усилие торцевания для любого горизонтального ряда бревен и для общего усилия торцевания сортиментной пачки по зависимости перемещения бревен горизонтальными рядами:

$$F_i = f_c m \gamma_d \rho L [2xb + 2xb_1 - 2b_1x^2/H] [1 + \psi - \psi d \cos \alpha/x]; \quad (31)$$

$$F_{\text{общ}} = f_c m \gamma_d \rho L / (d \cos \alpha) \int_0^{H-d} [2xb + 2xb_1 - 2b_1x^2/H] [1 + \psi - \psi d \cos \alpha/x] dx. \quad (32)$$

Исследуем выражение (31) с помощью производной. Обозначим  $f_c m \gamma_d \rho L = \xi$ . Сделав преобразование и взяв первую производную, получим

$$F_i' = \xi [2b + 2b_1 - 4b_1x/H + \psi(2b + 2b_1 - 4b_1x/H) + 2b_1\psi d \cos \alpha/H] = 0. \quad (33)$$

Если  $\xi = 0$ , тогда выражение в квадратных скобках равно 0. Произведем перегруппировку:

$$2b + 2b_1 + \psi(2b + 2b_1) - 4xb_1/[H(1 + \psi)] + 2b\psi d \cos \alpha/H = 0.$$

После преобразования найдем

$$x_{\text{экстр}} = H(b + b_1)/(2b_1) + \psi d \cos \alpha/[2(1 + \psi)]. \quad (34)$$

Возьмем вторую производную выражения (33):

$$F_i'' = \xi [-4b_1/H - 4\psi b_1/H] = -\xi 4b_1(1 + \psi)/H. \quad (35)$$

Выражение (35) имеет отрицательное значение, следовательно, после подстановки  $x_{\text{экстр}}$  из формулы (34) в (31) получим максимальное усилие торцевания горизонтального ряда бревен. Выражение (34) показывает, что это усилие наблюдается ниже высоты центра тяжести площади прямоугольного контура, вписанного в формирующее устройство, за счет влияния распорных сил.

Для определения общего усилия торцевания пачки круглых лесоматериалов, расположенной в формирующем устройстве торцевывравнивателя, выполненного в форме равнобедренной трапеции, проинтегрируем уравнение (32), в котором выражение  $f_c m \gamma_d \rho L / (d \cos \alpha)$  перед интегралом обозначим через  $\xi$ . После интегрирования и преобразования получим

$$F_{\text{общ.г.р.}} = f_c m G_{\text{п}} H (1 - d/H)^3 (3b + b_1) / 3d \cos \alpha (2b + b_1) \{ (1 + \psi) [H/(H - d) + 2b_1d/(H - d)(3b + b_1)] - 3\psi d \cos \alpha / (3b + b_1) [H(2b + b_1) + b_1d]/(H - d)^2 \}. \quad (36)$$

Предложенные математические модели позволяют определить усилия торцевания пачек круглых лесоматериалов, размещенных в формировочных устройствах передвижных торцевывравнителей разных форм поперечного сечения: сложной (полукруг + прямоугольник) – по формуле (26); трапециевидальной – (36); прямоугольной:

$$F_{\text{общ.в.р}} = \rho \sin \alpha f_c m G_{\text{п}} H (1 - d/B) / 2d\pi (2 - d \sin \alpha / H)^2 \times \{ (1 + \psi)/4 + \{ (1 + \psi) + d \pi (1 - \psi) / [H(2 - d \sin \alpha / H) 2\rho \sin \alpha] \}, \quad (37)$$

треугольной:

$$F_{\text{общ.г.р}} = f_c m G_{\text{п}} H (1 - d/H)^3 / 3d \cos \alpha [(1 + \psi)(H + 2d)/(H - d) - 3\psi d \cos \alpha (H + d)/(H - d)^2], \quad (38)$$

полукруга:

$$F_{\text{общ.г.р}} = f_c m G_{\text{п}} 4R / (3\pi d \cos \alpha \pi) \{ (1 + \psi) [1 - \sqrt{1 - (1 - d/R)^2}]^3 \} - 3\psi \pi d \cos \alpha / 4. \quad (39)$$

Достоверность полученных математических моделей подтверждается результатами производственных испытаний передвижных торцевывравнителей ТПК-10, ЛВ-169 на Кировской ЛПБ [3] и аналогичными исследованиями других авторов. Составлен алгоритм расчета усилий торцевания пучков и пачек круглых лесоматериалов передвижными торцевывравнителями на предприятиях с рейдами приплава.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисов М.В. Расчет усилия торцевания / М.В.Борисов // Лесн. пром-сть. – 1969. – № 7. – С. 6–7.
2. Варакса Н.Е. Экспериментальное исследование торцевывравнивания поворотным надвиганием щитов / Н.Е. Варакса, Я.И. Виноградов // Технология и комплексная механизация лесозаготовительных работ: межвуз. сб. науч. тр. / СибЛТИ, 1974. – Вып. 2. – С. 234–240.
3. Войтко П.Ф. Формирование лесных грузов на предприятиях с рейдами приплава / П.Ф. Войтко. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2003. – 495 с. – Деп. в ВИНТИ 24.07.03; №1458-В2003.
4. Донской И.П. Усилия выравнивания торцов пакетов бревен / И.П. Донской, Я.И. Виноградов // Лесосечные, лесоскладские работы и транспорт леса: межвуз. сб. науч. тр./ ЛТА, 1974. – Вып. 111. – С. 84–89.
5. Жарков Н.И. Технология и механизация выравнивания торцов пачек круглых лесоматериалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Н.И. Жарков. – Минск, 1987. – 17 с.
6. Кожанов Д.И. Исследование процессов торцовки и переплотки пучков / Д.И. Кожанов // Тр. / ВКФ ЦНИИлесосплава. – М., 1959. – Вып. 5. – С. 95.
7. Лебедь С.С. Теоретические основы исследования процессов формирования пакетов круглых лесоматериалов / С.С. Лебедь // Технология и оборудование заготовки и переработки древесины: Респ. межвуз. сб. науч. тр.– Минск, 1988. – Вып. 3.– С. 19–30.
8. Лукин В.Т. Влияние формы поперечного сечения пакетов бревен на усилие их торцевания / В.Т. Лукин // Перспективы механизации рейдовых и лесоскладских работ: сб. тр. / ЦНИИлесосплава. – М., 1978. – С. 113–118.

9. *Николенко Д.И.* К вопросу о торцевании круглого леса в процессе перегрузки / Д.И. Николенко // Сб. науч. тр./ Одес. ин-т инж. морск. флота. – М.: ЦРИА «Морфлот», 1979. – Вып. 12. – С. 97–100.

10. *Свиридюк К.А.* Аналитические исследования процесса выравнивания торцов бревен в установках гравитационного типа / К.А. Свиридюк// Сб. науч. тр. / ЦНИИМЭ. – 1975. – Вып. 143. – С. 122–129.

11. *Сокикас В.И.* Исследование взаимодействия круглых лесоматериалов с формирующим устройством при торцевывравнивании: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / В.И. Сокикас. – Красноярск, 1975. – 22 с.

12. *Труфанов А.А.* Выбор сечения обвязок сплавных пучков бревен / А.А. Труфанов // Лесн. пром-сть. – 1950. – № 8. – С. 9.

13. *Фадеев А.С.* Исследование усилия торцевания, развиваемого поворотным щитом гравитационного торцевывравнивателя / А.С. Фадеев, Г.С. Вахонина // Механизация работ на лесосплаве: сб. тр. / ЦНИИлесосплава, 1990. – С. 116–127.

Марийский государственный  
технический университет

Поступила 09.08.04

*P.F. Voitko*

### **Mathematical Model of Formation Process of Timber Cargo Bundle**

Mathematical model has been developed for formation process of timber cargo bundle by mobile trimmers before loading to transport facilities at the enterprises with inflow raids.

---