

Научная статья

УДК 627.142.2

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-1-164-176

Расчетные усилия при торцевании лесосплавных пучков в условиях береговых складов

С.В. Посыпанов¹✉, *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID: [ABF-6542-2021](https://orcid.org/0000-0003-0600-7089)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0600-7089>

С.П. Карпачев², *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID: [AAH-8641-2019](https://orcid.org/0000-0001-8509-8956)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8509-8956>

В.И. Клевеко³, *канд. техн. наук, доц.*; *ResearcherID: [G-8404-2016](https://orcid.org/0000-0001-7251-9598)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7251-9598>

¹Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; s.posypanov@narfu.ru✉

²Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), ул. 1-я Институтская, д. 1, г. Мытищи, Московская обл., Россия, 141005; karpachevs@mail.ru

³Пермский национальный исследовательский политехнический университет, просп. Комсомольский, д. 29, г. Пермь, Россия, 614990; vlivkl@mail.ru

Поступила в редакцию 18.06.24 / Одобрена после рецензирования 12.09.24 / Принята к печати 14.09.24

Аннотация. При больших расстояниях доставки круглых лесоматериалов зачастую экономически оправданной является только транспортировка в плотках. Преобладает береговая сплотка лесосплавных пучков. Для повышения их прочности, увеличения полндревесности, предполагающего снижение затрат на буксировку, предусматривается торцевание пучков. В формулах, полученных ранее для определения усилия торцевания, отсутствует коэффициент формы пучка – основной критерий, по которому на лесосплаве оценивают противодействие продольному перемещению лесоматериалов. Дополнительное давление в пучке, обусловленное наличием обвязок, не учитывалось, либо не имело непосредственной связи с коэффициентом формы. Цель исследования – выведение формул для вычисления силы торцевания пучков на береговых складах с учетом наличия обвязок и коэффициента формы; установление характера и степени влияния определяющих ее факторов. Метод – теоретический, базирующийся на положениях теорий гибких нитей и сыпучей среды. Аналитическим путем получена формула для нахождения рассматриваемого усилия. Ее использование в практических расчетах проблематично из-за необходимости многократного вычисления интегралов. Составляющие формулы, требующие вычисления интегралов, заменили параметром K – параметром сопротивления торцеванию. Его значение, соответствующее площади поперечного сечения пучка, равной единице, обозначили k – удельный параметр сопротивления торцеванию. Установили, что этот показатель зависит от коэффициента формы пучка и отношения его высоты к среднему диаметру лесоматериалов. Изменяя данные факторы в диапазонах 1,5–2,5 и 4–20 соответственно, выполнили вычисления k с использованием указанных интегралов. Получили аппроксимирующие зависимости для определения параметра k по отношению высоты пучка к среднему диаметру лесоматериалов, построили графики, позволяющие определять усилие торцевания при практических расчетах, не прибегая к интегрированию. Установили, что изменение от-

ношения высоты пучка к среднему диаметру лесоматериалов от 4 до 20 вызывает примерно 5-кратное увеличение усилия торцевания, зависимость линейная. Уменьшение коэффициента формы от 2,5 до 1,5 приводит к росту этого усилия почти в 2 раза. Его зависимость от плотности лесоматериалов, коэффициента полндревесности, размеров пучка и коэффициента трения скольжения прямая, линейная. Из этих факторов наиболее значим коэффициент трения, варьирование которого может приводить к изменению выходной величины более чем в 2 раза. Ее зависимость от угла внутреннего трения обратная, незначительная.

Ключевые слова: лесосплав, плот, береговой склад, торцевание пучков, сила торцевания

Для цитирования: Посыпанов С.В., Карпачев С.П., Клевеко В.И. Расчетные усилия при торцевании лесосплавных пучков в условиях береговых складов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 1. С. 164–176. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-164-176>

Original article

Calculated Forces during Cross-Cutting of Rafting Bundles in Coastal Warehouse Conditions

Sergey V. Posypanov¹, Doctor of Engineering, Prof.;

ResearcherID: [ABF-6542-2021](https://orcid.org/0000-0003-0600-7089), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0600-7089>

Sergey P. Karpachev², Doctor of Engineering, Prof.;

ResearcherID: [AAH-8641-2019](https://orcid.org/0000-0001-8509-8956), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8509-8956>

Vladimir I. Kleveko³, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [G-8404-2016](https://orcid.org/0000-0001-7251-9598), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7251-9598>

¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; s.posypanov@narfu.ru

²Bauman Moscow State Technical University (Mytishchi Branch), ul. 1-ya Institutskaya, 1, Mytishchi, Moscow Region, 141005, Russian Federation; karpachevs@mail.ru

³Perm National Research Polytechnic University, prosp. Komsomolsky, 29, Perm, 614990, Russian Federation; vlivkl@mail.ru

Received on June 18, 2024 / Approved after reviewing on September 12, 2024 / Accepted on September 14, 2024

Abstract. For long distances of round timber delivery, transport in rafts is often the only economically viable option. The bank bundling of logs predominates. To increase their strength and solid-volume ratio, which implies a reduction in towing costs, cross-cutting of the bundles is provided. The formulas obtained earlier for determining the cutting force do not include the bundle shape coefficient – the main criterion by which the resistance to the longitudinal movement of timber is evaluated during timber rafting. The additional pressure in the bundle due to the presence of strapping has not been taken into account, or has had no direct relationship with the shape factor. The aim of this research has been to derive formulas for calculating the force of cross-cutting of bundles at coastal warehouses, taking into account the presence of strapping and the shape factor, as well as to establish the nature and degree of influence of the factors determining it. The research method has been theoretical, based on the principles of theories of flexible threads and granular media. A formula for calculating the force in question has been obtained analytically. Its use in practical calculations is



problematic due to the need for multiple calculations of integrals. The formula components that require the calculation of integrals have been replaced by the K parameter – the parameter of resistance to cross-cutting. Its value, corresponding to the cross-sectional area of the bundle equal to one, has been designated k – the specific parameter of resistance to cross-cutting. It has been established that this indicator depends on the shape factor of the bundle and the ratio of its height to the average diameter of the log. By varying these factors in the ranges of 1.5–2.5 and 4–20, respectively, k calculations have been performed using the specified integrals. Approximating dependencies have been obtained for determining the k parameter based on the ratio of the bundle height to the average diameter of the log, and graphs have been constructed that make it possible to determine the cutting force in practical calculations without resorting to integration. It has been found that changing the ratio of the bundle height to the average diameter of the log from 4 to 20 causes an approximately 5-fold increase in the cutting force, the relationship is linear. A decrease in the shape factor from 2.5 to 1.5 leads to an increase in this force by almost 2 times. Its dependence on the density of timber, the solid-volume ratio, the size of the bundle and the coefficient of sliding friction is direct and linear. Of these factors, the most significant is the friction coefficient, the variation of which can lead to a change in the output value by more than 2 times. Its dependence on the angle of internal friction is inverse and insignificant.

Keywords: timber rafting, raft, coastal warehouse, cross-cutting of bundles, cutting force

For citation: Posypanov S.V., Karpachev S.P., Kleveko V.I. Calculated Forces during Cross-Cutting of Rafting Bundles in Coastal Warehouse Conditions. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 1, pp. 164–176. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-1-164-176>

Введение

Расстояние транспортировки древесного сырья от лесозаготовителей до крупных переработчиков постоянно увеличивается. Во многих случаях такая транспортировка является экономически оправданной только при использовании наиболее дешевого водного транспорта. В настоящее время доставка лесоматериалов по воде осуществляется в плотках либо судами. Плоты формируются в основном на затопляемых плотбищах, т. е. преобладает береговая сплотка лесоматериалов. Как при традиционных технологиях береговой сплотки [8], так и при альтернативных [11, 12] предусмотрено торцевание лесосплавных пучков. Это способствует увеличению их продольной прочности. В результате торцевания повышается коэффициент полндревесности самих пучков и плота в целом, что снижает удельные затраты на буксировку лесотранспортных единиц. При решении вопросов, связанных с торцеванием лесосплавных пучков, важно знать величину усилий, необходимых для его осуществления, факторы, определяющие эту величину, характер и степень их влияния.

Исследованиям торцевания групп круглых лесоматериалов посвящен ряд работ [1–6, 13]. В большинстве из них предполагалось отсутствие или не принималось во внимание наличие обвязок, которое увеличивает контактные силы между круглыми лесоматериалами в пучке, особенно при малых коэффициентах его формы, что, в свою очередь, обуславливает повышение усилия торцевания. Из всех рассмотренных работ лишь в [3] влияние обвязок учтено посредством введения понятия дополнительного слоя лесоматериалов. Ни в одном источнике в расчетных формулах среди факторов, влияющих на усилие торцевания, нет коэффициента формы пучка. А это основной критерий на ле-

сосплаве, по которому оценивают противодействие продольному перемещению лесоматериалов в пучке. Данные факты свидетельствуют о целесообразности выполнения описываемого здесь исследования.

Цель исследования – получение формул для вычисления силы торцевания лесосплавного пучка в условиях берегового склада с учетом наличия обвязок на пучке и его коэффициента формы; установление характера и степени влияния определяющих факторов на величину этой силы.

Объектом изучения является лесосплавной пучок. Используемый метод – теоретический, основанный на использовании положений теорий гибких нитей и сыпучей среды.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследуя взаимодействия между круглыми лесоматериалами в пучке в поперечном направлении, рассматривали их совокупность как сыпучую среду [14, 16, 19]. Учитывали, в частности, что для групп лесоматериалов, например для штабелей, используются такие понятия как угол естественного откоса, угол внутреннего трения, характерные для сыпучей среды.

Полагаем, что пучок сформирован из лесоматериалов одинакового диаметра, соответствующего среднему в реальной сплочной единице. Они расположены горизонтальными рядами. Отметим, что во всех рассмотренных работах по данной теме эти допущения также принимались. Очевидно, что диаметры лесоматериалов разнообразны, как и их расположение в пучке. Они имеют случайный характер. Учесть это разнообразие практически нереально. Оперирование средними диаметрами отчасти приближает используемую модель к реальным вариантам. Указанные допущения обеспечивают решаемость задачи, позволяют выявить наиболее важные закономерности, оценить усилие торцевания.

Рассматриваемую сыпучую среду разделим на горизонтальные слои, толщина которых равна среднему диаметру лесоматериалов. Один из слоев изображен на расчетной схеме (рис. 1) в виде заштрихованной полосы.

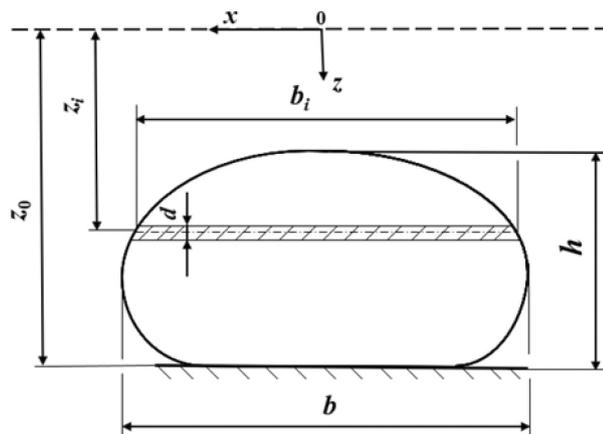


Рис. 1. Расчетная схема поперечного сечения лесосплавного пучка

Fig. 1. The design diagram of the cross-section of a rafting bundle

В результате действия гравитационной силы в сыпучей среде имеет место вертикальное давление соответствующего направления. На уровне горизонтальной оси i -го слоя оно может быть вычислено (Па) по формуле

$$p_{vi} = z_i \rho g \delta, \quad (1)$$

где z_i – аппликата горизонтальной оси i -го слоя, отмеряемая от линии нулевого давления сыпучей среды, м; ρ – плотность круглых лесоматериалов, кг/м³; g – гравитационная постоянная, м/с²; δ – коэффициент полнодревесности лесосплавного пучка.

Наличие указанного давления вызывает в сыпучей среде т. н. распорное, или горизонтальное, давление. На том же уровне оно может быть определено (Па) из выражения

$$p_{ri} = z_i \rho g \delta \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right), \quad (2)$$

где φ – угол внутреннего трения для круглых лесоматериалов, рассматриваемых как сыпучая среда, ...°.

Согласно формуле (1), вертикальное давление увеличивается сверху вниз по линейному закону. По формуле (2) аналогичный вывод можно сделать и для горизонтального давления. То есть силы давления, действующие на круглый лесоматериал слева и справа, снизу и сверху, определяются по средним значениям соответствующих давлений на высоте оси слоя. Вертикальная составляющая усилий, приложенных к круглому лесоматериалу в поперечном направлении (Н)

$$P_{vi} = z_i \rho g \delta L d; \quad (3)$$

горизонтальная составляющая (Н)

$$P_{ri} = z_i \rho g \delta \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) L d, \quad (4)$$

где L – длина пучка, м; d – средний диаметр лесоматериалов, м.

Продольному перемещению круглых лесоматериалов в пучке противодействует сила трения. Величина этой силы для одного круглого лесоматериала в i -м слое может быть установлена из выражения (5), полученного с помощью формул (3), (4).

$$P_{li} = 2 z_i \rho g \delta L d f \left(1 + \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \right), \quad (5)$$

где f – коэффициент трения скольжения при перемещении круглых лесоматериалов относительно друг друга в продольном направлении.

Количество круглых лесоматериалов в слое считаем равным отношению ширины слоя по оси b_i к диаметру лесоматериалов d . Умножение полученного значения на коэффициент ψ , определяющий долю лесоматериалов, подлежащих торцеванию с одной стороны пучка, дает расчетное количество таких лесоматериалов в слое. С принятием во внимание этих положений и формулы (5) получили выражение для установления торцующего усилия, прикладываемого к лесоматериалам одного слоя, которое привели к виду

$$P_{с.лi} = 2 z_i b_i \rho g \psi \delta L f \left(1 + \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \right).$$

Сумма этих усилий по всем слоям дает величину торцующего усилия P_T для лесосплавного пучка в целом. Записали соответствующее выражение, вы-

нося за знак суммы множители, которые принимаются постоянными для данного лесосплавного пучка, под знаком суммы оставили величины, меняющиеся от слоя к слою, и множители, постоянные для всех пучков:

$$P_{\tau} = \psi \rho \delta L f \left(1 + \operatorname{tg}^2 \left(45^{\circ} - \frac{\varphi}{2} \right) \right) \sum_{i=1}^m 2 g z_i b_i, \quad (6)$$

где m – количество слоев.

Ввели обозначение

$$K = \sum_{i=1}^m 2 g z_i b_i. \quad (7)$$

Величину K назвали параметром сопротивления торцеванию. С использованием введенного обозначения формулу (6) можно записать следующим образом:

$$P_{\tau} = \psi \rho \delta L f \left(1 + \operatorname{tg}^2 \left(45^{\circ} - \frac{\varphi}{2} \right) \right) K. \quad (8)$$

Произведение $2g$ в рассматриваемых условиях остается неизменным. Таким образом, на K , согласно выражению (7), влияют только количество слоев; аппликаты осей слоев и их ширины по осям, которые, в свою очередь, зависят от размеров и формы поперечного сечения пучка и количества слоев.

Рассмотрим поперечное сечение лесосплавного пучка, площадью 1. Удельное, т. е. соответствующее единичной площади, K обозначим символом k и назовем удельным параметром сопротивления торцеванию. Линейные характеристики сечения в этом случае будут безразмерными. Форму поперечного сечения пучка на лесосплаве описывают коэффициентом C , равным отношению ширины к высоте сплочной единицы. Поскольку высоту слоя мы приняли равной среднему диаметру лесоматериалов, количество слоев определяется из выражения

$$m = H/d,$$

где H – высота пучка, м.

Для пучка с единичной площадью сечения указанную высоту обозначим символом h .

Выполненный анализ показал, что k определяется коэффициентом C и количеством слоев m , т. е. отношением h/d . Исходя из обычно применяемых в практике лесосплава геометрических характеристик пучков и диаметров сплавляемых круглых лесоматериалов, ориентировались на диапазоны варьирования для коэффициента формы 1,5–2,5, для количества слоев – 4–20.

Наиболее точно форма поперечного сечения лесосплавного пучка описывается с использованием положений теорий гибких нитей [7] и сыпучей среды. При этом пучок рассматривается как гибкая оболочка, заполненная, как было отмечено, сыпучей средой. Функцию оболочки в данном случае выполняют обвязки пучка – аналоги гибких нитей. Их форма соответствует форме поперечного сечения пучка. Она описывается 2 параметрическими уравнениями [18]:

$$x = 0,5 z_0 \left((2 - \sin 2\Theta) \left(K(\Theta) - F(\Theta, \alpha) - 2 \left(E(\Theta) - E(\Theta, \alpha) \right) \right) \right); \quad (9)$$

$$z = z_0 \sqrt{1 - \sin^2 \theta \sin^2 \alpha}, \quad (10)$$

где z_0 – аппликата основания пучка, м; Θ – угол, характеризующий форму гибкой нити, ...°; $K(\Theta)$ и $F(\Theta, \alpha)$ – полный и неполный эллиптические интегралы 1-го рода; $E(\Theta)$ и $E(\Theta, \alpha)$ – полный и неполный эллиптические интегралы 2-го рода [15]; α – параметр тонкой нити, изменяющийся по ее длине, ...° [7].

При исследовании геометрических параметров 2-ярусных 4-пакетных пучков с помощью уравнений, аналогичных (9), (10), с использованием численного метода нами получены характеристики верхних пакетов с единичной площадью поперечного сечения [9]. Часть этих характеристик может быть использована и в рассматриваемом здесь случае (табл. 1).

Таблица 1

Параметры, характеризующие габариты, форму поперечного сечения пучка единичной площади и положение линии нулевого давления
The parameters characterizing the dimensions, cross-sectional shape of a unit area bundle and the position of the zero pressure line

| Θ, \dots° | z_0 | h | b | C |
|-----------------------|-------|-------|-------|------|
| 64,33 | 1,633 | 0,926 | 1,309 | 1,41 |
| 71,59 | 1,263 | 0,864 | 1,393 | 1,61 |
| 79,55 | 0,943 | 0,772 | 1,545 | 2,00 |
| 83,04 | 0,814 | 0,716 | 1,655 | 2,31 |
| 84,95 | 0,742 | 0,677 | 1,740 | 2,57 |

Для 5 приведенных сечений с коэффициентами формы от 1,41 до 2,57 поочередно выполнили следующие расчеты. Приняв определенное количество слоев m из указанного ранее диапазона, вычисляли высоту слоя, т. е. условный диаметр лесоматериалов по формуле

$$d = h/m. \quad (13)$$

Аппликату оси 1-го, т. е. нижнего слоя пучка, устанавливали из выражения

$$z_1 = z_0 - d / 2. \quad (14)$$

Аппликату оси каждого следующего слоя находили путем вычитания из соответствующей аппликаты предыдущего среднего диаметра d .

Для каждого слоя устанавливали величину параметра α тонкой нити, соответствующего высоте расположения оси слоя. При этом использовали выражение, полученное в результате преобразования формулы (10):

$$\alpha = \arcsin \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{z}{z_0}\right)^2}{\sin^2 \theta}}.$$

По параметру α и углу Θ , соответствующему данному коэффициенту формы C , с помощью выражения (9) вычисляли абсциссу x для точки, расположенной на тонкой нити и оси рассматриваемого слоя. При этом эллиптические интегралы определяли, используя соответствующие ряды [20]. Ширину оси слоя b_i находили путем умножения полученного значения абсциссы на 2. Для каждого слоя рассчитывали произведение, находящееся в формуле (7) под знаком суммы. Просуммировав эти произведения по всем слоям, вычисляли k

для данного сочетания коэффициента формы и количества слоев. Такие расчеты выполнены при количестве слоев 4, 7, 10, 13, 17, 20 (табл. 2).

Таблица 2

Пример расчета параметра k при $C = 2,31$ и $m = 10$
An example of calculating the k parameter at $C = 2.31$ and $m = 10$

| i | z_i | α, \dots° | x_i | b_i | $z_i b_i$ | $2gz_i b_i, \text{ м/с}^2$ |
|-----|--------|-----------------------|--------|--------|-----------|----------------------------|
| 1 | 0,7782 | 17,19 | 0,7284 | 1,4567 | 1,134 | 22,242 |
| 2 | 0,7066 | 30,01 | 0,7942 | 1,5884 | 1,122 | 22,021 |
| 3 | 0,6350 | 39,07 | 0,8213 | 1,6427 | 1,043 | 20,465 |
| 4 | 0,5634 | 46,65 | 0,8265 | 1,6530 | 0,931 | 18,272 |
| 5 | 0,4918 | 53,40 | 0,8136 | 1,6273 | 0,800 | 15,702 |
| 6 | 0,4202 | 59,63 | 0,7830 | 1,5659 | 0,658 | 12,910 |
| 7 | 0,3486 | 65,56 | 0,7321 | 1,4643 | 0,510 | 10,015 |
| 8 | 0,2770 | 71,32 | 0,6554 | 1,3108 | 0,363 | 7,124 |
| 9 | 0,2054 | 77,12 | 0,5409 | 1,0818 | 0,222 | 4,360 |
| 10 | 0,1338 | 83,58 | 0,3591 | 0,7182 | 0,096 | 1,885 |
| k | | | | | | 135,0 |

Для указанного ряда количества слоев аналогичные расчеты выполнены при 5 различных коэффициентах формы пучка. Получено 30 таблиц, подобных табл. 2. Значения k представлены в табл. 3. Количество слоев m заменено соответствующей величиной h/d , которой удобнее пользоваться в дальнейших расчетах.

Таблица 3

Результаты расчетов k
The results of k value calculations

| C | k при различных отношениях $h/d, \text{ м/с}^2$ | | | | | |
|------|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 4 | 7 | 10 | 13 | 17 | 20 |
| 1,42 | 104,3 | 180,2 | 256,4 | 332,7 | 434,4 | 510,8 |
| 1,61 | 80,2 | 139,0 | 197,9 | 256,8 | 335,5 | 394,5 |
| 2,00 | 61,1 | 106,3 | 151,5 | 196,7 | 257,1 | 302,3 |
| 2,31 | 54,4 | 92,9 | 135,0 | 174,3 | 228,6 | 269,6 |
| 2,57 | 51,1 | 89,1 | 127,1 | 165,1 | 215,8 | 253,8 |

Результатом расчетов стал ряд аппроксимирующих выражений. Построены графики связи k и определяющих факторов. Поскольку аппроксимирующие зависимости выведены по теоретическим данным, достоверность аппроксимации во всех случаях очень высокая. Это позволило пересчитать результаты на коэффициенты формы пучка, обычно используемые при выполнении проектных работ и указываемые в нормативных документах. Именно при таких коэффициентах формы могут быть использованы приведенные далее аппроксимирующие зависимости. При $C = 2,50$

$$k = 13,0h/d + 0,4; \quad (11)$$

при $C = 2,25$

$$\text{при } C = 2,00 \quad k = 13,9h/d + 0,6; \quad (12)$$

$$\text{при } C = 1,75 \quad k = 14,8h/d + 0,8; \quad (13)$$

$$\text{при } C = 1,50 \quad k = 17,3h/d + 1,2; \quad (14)$$

$$k = 22,7h/d + 2,2. \quad (15)$$

Достоверность аппроксимации приведенных формул выше 0,98 [17].

При переходе от единичной к произвольной площади поперечного сечения с заданным коэффициентом формы изменяются высота и ширина пучка при сохранении соотношения между ними. Пропорционально изменяются и рассмотренные выше произведения $z_i b_i$ и их сумма. То есть анализируемый параметр будет оставаться пропорциональным площади поперечного сечения ω (м²). Таким образом, переход от удельного параметра к абсолютному осуществляется с помощью выражения

$$K = k \omega.$$

С учетом этого преобразовали формулу (8)

$$P_T = \psi \rho \delta L \omega f \left(1 + \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \right) k. \quad (16)$$

Объем лесосплавного пучка (м³) определяется с помощью выражения

$$V = \delta L \omega;$$

масса (кг) –

$$M = \rho \delta L \omega.$$

Таким образом, формула (16) может быть представлена в виде:

$$P_T = \psi \rho V f \left(1 + \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \right) k \quad (17)$$

или

$$P_T = \psi M f \left(1 + \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \right) k. \quad (18)$$

При вычислении усилия торцевания лесосплавного пучка необходимо определить k по одной из формул (11)–(15), соответствующей расчетному коэффициенту C . Далее следует воспользоваться выражением (16). Можно также применить формулу (17) или (18).

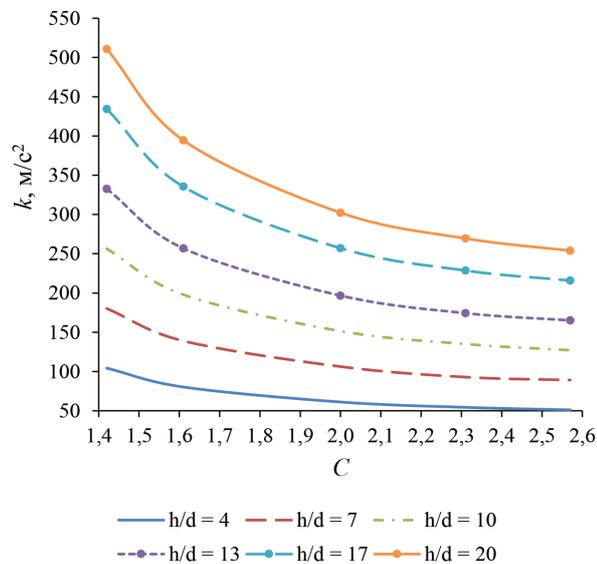
При подобных расчетах коэффициент ψ обычно принимают равным 0,5, т. е. ориентируются на наиболее неблагоприятный случай, когда выдвинуты все лесоматериалы пучка, одна половина из них с одной стороны, вторая – с другой.

Анализируя полученные формулы, установили, что усилие, необходимое для торцевания лесосплавного пучка, линейно возрастает с увеличением его высоты и ширины, длины лесоматериалов, их плотности, коэффициента полндревесности. Степень влияния каждого из перечисленных факторов можно оценить по диапазону его изменения. Лесосплавные пучки сплачивают в основном из еловых и сосновых сортиментов. Их плотность в свежесрубленном состоянии находится обычно в диапазоне 750–850 кг/м³. Коэффициент полндревесности принимают 0,56–0,70, он увеличивается с повышением сред-

него диаметра лесоматериалов. Указанные факторы определяют массу пучка, соответственно, усилие торцевания линейно возрастает с увеличением этой массы. Оно также линейно повышается с увеличением коэффициента трения. Эта зависимость весьма существенна, т. к. указанный коэффициент может изменяться в 2,5 раза. Коэффициент трения при продольном относительном смещении круглых лесоматериалов принимают 0,5, в воде или после выгрузки из воды – 0,2 [10]. Согласно [10], угол внутреннего трения для еловых круглых лесоматериалов – 29° , для сосновых – 26° . Зависимость от этого фактора более сложная. Уменьшение угла от 29° до 26° приводит к увеличению суммы в скобках в формуле (11), а значит, и усилия торцевания лишь на 3–4 %. Судя по виду аппроксимирующих зависимостей (11)–(15), k и, соответственно, усилие торцевания также линейно возрастают с увеличением отношения высоты пучка к диаметру лесоматериалов. Эта зависимость очень значительна. Изменение указанного отношения от 4 до 20 приводит почти к 5-кратному росту k и усилия торцевания. В другой интерпретации, чем меньше диаметр лесоматериалов при прочих равных условиях, тем больше усилие торцевания пучка. Также очень существенно влияет на выходную величину коэффициент формы пучка C . Усилие торцевания увеличивается с уменьшением указанного коэффициента (рис. 2). Уменьшение коэффициента формы от 2,5 до 1,5 обуславливает рост выходной величины примерно в 2 раза. По графикам рис. 2 видно, что в области малых коэффициентов изменение выходной величины более интенсивно.

Рис. 2. Зависимость параметра k от коэффициента формы пучка C

Fig. 2. The dependence of the k parameter on the C bundle shape coefficient



Отметим, что при практических расчетах этими графиками можно воспользоваться для определения k в случаях, для которых выражения (11)–(15) не применимы.

Сравнение результатов, вычисленных по полученным нами формулам, и наиболее известной формуле [10], рекомендуемой для лесосплавных пучков, торцуемых на береговых складах, в которой не учитывается наличие обвязок и отсутствует явная связь выходной величины с коэффициентом формы, показало следующее. При коэффициенте формы 2,5, т. е. при относительно слабом натя-

жении обвязок, показатель, установленный по предложенным здесь формулам, при равных прочих условиях больше примерно на 10 %. При коэффициенте $C = 2,0$ это превышение составляет 26 %, при $C = 1,75$ – 47 %, при $C = 1,5$ – 94 %. Это сравнение наглядно демонстрирует достоверность результатов описанного здесь исследования.

Выводы

1. Основываясь на положениях теорий сыпучей среды и гибких нитей, аналитическим путем получили формулу для вычисления усилия торцевания лесосплавных пучков в условиях берегового склада с учетом наличия обвязок на пучке и его коэффициента формы. Применение этой формулы в практических расчетах проблематично в связи с необходимостью многократного вычисления эллиптических полных и неполных интегралов 1-го и 2-го родов. Составляющие формулы, требующие вычисления интегралов, заменили параметром K . Ввели понятие удельного параметра k , соответствующего единичной площади поперечного сечения пучка.

2. Установили, что параметр k зависит от коэффициента формы пучка и от отношения высоты пучка к среднему диаметру лесоматериалов. Изменяя эти факторы в диапазонах 1,5–2,5 и 4–20 соответственно, с использованием указанных интегралов вычислили k . По результатам вычислений для коэффициентов формы пучка, обычно используемых при выполнении проектных работ и указываемых в нормативных документах, получили аппроксимирующие зависимости, позволяющие определять значения параметра k по отношению высоты пучка к среднему диаметру лесоматериалов. Кроме того, построили графики зависимости, позволяющие определять k , не прибегая к сложным вычислениям, связанным с интегрированием.

3. С помощью полученных аппроксимирующих и аналитических зависимостей оценили влияние определяющих факторов на выходную величину. Наиболее существенно на нее воздействует отношение высоты пучка к диаметру лесоматериалов. Изменение этого фактора от 4 до 20 вызывает примерно 5-кратное увеличение усилия торцевания, зависимость линейная. Весьма существенно влияние коэффициента формы пучка. Его уменьшение от 2,5 до 1,5 приводит примерно к 2-кратному увеличению выходной величины. Зависимость усилия торцевания от плотности лесоматериалов, коэффициента полндревесности пучка, его габаритных размеров, коэффициента трения скольжения прямая, линейная. Из перечисленных здесь факторов наиболее существенно воздействует коэффициент трения, изменение которого может приводить к соответствующему изменению выходной величины более чем в 2 раза. Зависимость усилия торцевания от угла внутреннего трения, который определяется в основном породой сортиментов, обратная, незначительная.

4. Сравнили результаты вычислений по полученным нами формулам и формуле, в которой не учитывается наличие обвязок и отсутствует связь выходной величины с коэффициентом формы. При коэффициенте формы 2,5, т. е. при относительно слабом натяжении обвязок, результат, рассчитанный по предложенным здесь формулам, больше примерно на 10 %. При коэффициенте 2,0 – на 26 %, при 1,75 – на 47 %, при 1,5 – на 94 %.

5. Итоги исследования позволяют на практике рассчитать усилие торцевания лесосплавных пучков, свободно лежащих на твердом основании, учитывая наличие обвязок и принимая во внимание коэффициент формы – важнейшую характеристику этих лесотранспортных единиц. Информация о влиянии определяющих факторов дает возможность принимать наиболее рациональные технические и технологические решения при рассмотрении вопросов, связанных с торцеванием лесосплавных пучков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Борисов М.В. К вопросу определения усилий торцевания пачек (пакетов) бревен // Тр. ВКНИИВОЛТ. 1971. Вып. X. С. 13–19.

Borisov M.V. On the Issue of Determining the Forces of Cross-Cutting of Bundles (Packages) of Logs. *Proceedings of the Volga-Kama Research and Design and Technological Institute of Water Forest Transport*, 1971, iss. 10, pp. 13–19. (In Russ.).

2. Войтко П.Ф. Методика и результаты производственных испытаний передвижных и переносных торцевывающих устройств на рейдах приплава лесопромышленных предприятий // Изв. вузов. Лесн. журн. 2004. № 5. С. 69–77.

Vojtko P.F. Technique and Results of Production Testing of Mobile and Portable Butt Edgers in Log Receiving Ports of Forest-Industrial Enterprises. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2004, no. 5, pp. 69–77. (In Russ.).

3. Войтко П.Ф. Совершенствование процессов выгрузки лесоматериалов с воды и их торцевание на рейдах приплава: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Йошкар-Ола, 2005. 39 с.

Vojtko P.F. *Improving the Processes of Unloading Timber from Water and Their Cross-Cutting at the Log Receiving Ports*: Doc. Tech. Sci. Diss. Abs. Yoshkar-Ola, 2005. 39 p. (In Russ.).

4. Войтко П.Ф., Фадеев А.С. Математические модели формирования лесных грузов гравитационными торцевывающими устройствами // Изв. вузов. Лесн. журн. 2003. № 4. С. 57–65.

Voitko P.F., Fadeev A.S. Mathematical Models of Forest Cargo Formation by Gravitational Trimmers. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2003, no. 4, pp. 57–65. (In Russ.).

5. Грубов С.М. Экспериментальное и теоретическое определение некоторых статистических коэффициентов сопротивления перемещению неокоренной древесины. М.: ЦНИИМЭ, 1971. 118 с.

Grubov S.M. *Experimental and Theoretical Determination of Some Statistical Coefficients of Resistance to Displacement of Unbarked Wood*. Moscow, Central Research Institute of Mechanization and Power Engineering of the Forest Industry, 1971. 118 p. (In Russ.).

6. Донской И.П., Виноградов Я.И. Усилия выравнивания торцов пакетов бревен // Лесосечные, лесоскладские работы и транспорт леса: межвуз. сб. науч. тр. Л.: ЛТА, 1974. Вып. 111. С. 13–17.

Donskoj I.P., Vinogradov Ya.I. Forces to Align the Ends of Log Bundles. *Logging, Timber Storage and Timber Transportation: Interuniversity Collection of Scientific Papers*. Leningrad, Forest Engineering Academy, 1974, iss. 111, pp. 13–17. (In Russ.).

7. Меркин Д.Р. Введение в механику гибкой нити. М.: Наука, 1980. 240 с.

Merkin D.R. *Introduction to Flexible Filament Mechanics*. Moscow, Nauka Publ., 1980. 240 p. (In Russ.).

8. Пятакин В.И., Дмитриев Ю.Я., Зайцев А.А. Водный транспорт леса. М.: Лесн. пром-сть, 1985. 336 с.

Patyakin V.I., Dmitriev Yu.Ya., Zajtsev A.A. *Water Transport of Timber*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1985. 336 p. (In Russ.).

9. Посыпанов С.В. Определение геометрических характеристик двухъярусной пакетной сплотовочной единицы, расположенной на твердом основании // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 5. С. 135–147.

Posypanov S.V. Dimensional Determination of a Two-Storied Package Rafting Unit Placed on a Solid Basement. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2019, no. 5, pp. 135–147. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.5.135>

10. Реутов Ю.М. Расчеты пучков (пакетов) круглых лесоматериалов. М.: Лесн. пром-сть, 1975. 152 с.

Reutov Yu.M. *Calculations of Bundles (Packages) of Round Timber*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1975. 152 p. (In Russ.).

11. Харитонов В.Я., Посыпанов С.В. Опыт внедрения единого транспортного пакета вместо молевого лесосплава // Изв. вузов. Лесн. журн. 2007. № 1. С. 45–52.

Kharitonov V.Ya., Posypanov S.V. Experience of Introducing Transport Package instead of Drift Floating. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2007, no. 1, pp. 45–52. (In Russ.).

12. Харитонов В.Я., Посыпанов С.В. Ресурсы отдаленных лесных массивов и возможность их освоения сплавом // Изв. вузов. Лесн. журн. 2008. № 2. С. 30–36.

Kharitonov V.Ya., Posypanov S.V. Resources of Remote Forestland and Possibility of Their Development by Rafting. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2008, no. 2, pp. 30–36. (In Russ.).

13. Фадеев А.С. Обоснование параметров гравитационного торцевывравнивателя с поворотными щитами для формирования пачек круглых лесоматериалов: дис. ... канд. техн. наук. Йошкар-Ола, 1999. 249 с.

Fadeev A.S. *Justification of the Parameters of a Gravity End Leveler with Rotary Shields for Forming Bundles of Round Timber*: Cand. Tech. Sci. Diss. Yoshkar–Ola, 1999. 249 p. (In Russ.).

14. Цытович Н.А. Механика грунтов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1983. 288 с.

Tsytovich N.A. *Soil Mechanics*: 4th ed., revised and enlarged. Moscow, Vyshaya shkola Publ., 1983. 288 p. (In Russ.).

15. Byrd P.F., Friedman M.D. *Handbook of Elliptic Integrals for Engineers and Scientist*: 2nd ed., revised. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 1971, vol. 67. 360 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-65138-0>

16. Craig R.F. *Soil Mechanics*: 6th ed. London, New York: E. & F.N. Spon, 1997. 485 p.

17. Field A. *Discovering Statistics Using SPSS*: 3rd ed. London, SAGE Publications Ltd, 2009. 856 p.

18. Tölke F. Parameterfunktionen. *Theta-Funktionen und spezielle Weierstraßsche Funktionen. Praktische Funktionenlehre*: vol. 2. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 1966, pp. 83–115. (In Germ.). https://doi.org/10.1007/978-3-642-51616-0_3

19. Verruijt A. *Soil Mechanics*. Delft University of Technology, 2012. 331 p.

20. Whittaker E.T., Watson G.N. *A Course of Modern Analysis*: 4th ed. Cambridge, Cambridge University Press, 1996. 620 p.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article