

Научная статья

УДК 627.142.2

DOI: 10.37482/0536-1036-2026-1-161-173

Силовое выравнивание торцов двухъярусных пакетных сплоченных единиц при формировании в воде

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. Карпачёв², *д-р техн. наук, проф.*; ResearcherID: [AAH-8641-2019](https://orcid.org/0000-0001-8509-8956),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8509-8956>

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

²Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, ул. Бориса Галушкина, д. 4, Москва, Россия, 129366; karpachevs@mail.ru

Поступила в редакцию 08.04.25 / Одобрена после рецензирования 20.06.25 / Принята к печати 21.06.25

Аннотация. Перспективные технологии транспортировки круглых лесоматериалов из удаленных районов предусматривают после прохождения мелководных участков формирование из малогабаритных пакетов без нарушения их целостности двухъярусных пакетных сплоченных единиц. В предназначенных для этого устройствах предполагается выравнивание торцов двухъярусных пакетных сплоченных единиц, осуществляемое с целью повышения их прочности и полнодревесности, что позволяет снизить затраты на буксировку по основной части маршрута. Цель исследования – получение формул для расчета сил, требуемых для выравнивания торцов двухъярусных пакетных сплоченных единиц, формируемых в воде; установление характера и степени влияния основных определяющих факторов на указанные силы. Метод исследования – теоретический. Получены аналитические формулы для расчета сил, требуемых при выравнивании торцов лесоматериалов в нижних и верхних пакетах двухъярусных пакетных сплоченных единиц. Определение величины a , входящей в указанные формулы, связано с вычислением интегралов, что в практических расчетах нежелательно. Доказано, что a зависит от коэффициента формы пакетов, от отношения их высоты к диаметру лесоматериалов и от яруса, в котором находятся пакеты. С использованием численных методов установлены значения a при различных сочетаниях определяющих факторов. По результатам вычислений для нормативных коэффициентов формы получены аппроксимирующие зависимости, позволяющие вычислять при практических расчетах a и усилия торцевания для пакетов обоих ярусов. При проектировании устройств расчетное усилие выравнивания торцов двухъярусных пакетных сплоченных единиц складывается из соответствующих удвоенных усилий для верхних и нижних пакетов. Самым значимым фактором, влияющим на усилие выравнивания торцов лесоматериалов в пакете, является отношение его высоты к их диаметру. Увеличение этого отношения в исследованном диапазоне сопровождается возрастанием рассматриваемого усилия для пакетов обоих ярусов в 4,90–5,02 раза. Существенно на выходную величину влияет и коэффициент формы пакетов. Его рост от 1,5 до 2,5 вызывает уменьшение усилия выравнивания на 75–77 % у нижних пакетов и на 52–56 % у верхних. Связь усилия выравнивания с объемом пакета линейная прямая. Для выравнивания торцов лесоматериалов в пакетах верхнего яруса требуется большее усилие, чем в нижних.

Ключевые слова: лесосплав, круглые лесоматериалы, сплоченные единицы, выравнивание торцов лесоматериалов

Для цитирования: Посыпанов С.В., Карпачёв С.П. Силовое выравнивание торцов двухъярусных пакетных сплоченных единиц при формировании в воде // Изв. вузов. Лесн. журн. 2026. № 1. С. 161–173. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-1-161-173>

Original article

Force Alignment of the Ends of Two-Tiered Package Rafting Units during their Formation in Water

*Sergey V. Posypanov*¹, *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. Karpachev*², *Doctor of Engineering, Prof.;*

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

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

²The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, ul. Borisa Galushkina, 4, Moscow, 129366, Russian Federation; karpachevs@mail.ru

Received on April 8, 2025 / Approved after reviewing on June 20, 2025 / Accepted on June 21, 2025

Abstract. Promising technologies for transporting round timber from remote areas involve, after passing through shallow water areas, forming small-sized packages into two-tiered package units without violating their integrity. The devices designed for this purpose are intended to align the ends of two-tiered package rafting units, carried out in order to increase their strength and nontaperity, which allows for a reduction in towing costs along the main part of the route. The aim of the study has been to obtain formulas for calculating the forces required to align the ends of two-tiered package rafting units formed in water and to establish the nature and degree of influence of the main determining factors on these forces. The research method has been theoretical. Analytical formulas have been obtained for calculating the forces required for aligning the ends of logs in the lower and upper packages of two-tiered package rafting units. Determining the value of a , included in the given formulas, is associated with the calculation of integrals, which is undesirable in practical calculations. It has been proven that a depends on the shape coefficient of the packages, on the ratio of their height to the diameter of the logs and on the tier in which the packages are located. Using numerical methods, the values of a have been determined for various combinations of determining factors. Based on the calculation results for the standard shape coefficients, approximating dependencies have been obtained, which make it possible to establish, in practical calculations, a and the end-cutting forces for packages of both tiers. When designing devices, the calculated force for aligning the ends of two-tiered package rafting units consists of the corresponding double forces for the upper and lower packages. The most significant factor influencing the force of alignment of the ends of the logs in a package is the ratio of its height to their diameter. An increase in this ratio in the studied range is accompanied by an increase in the considered force for packages of both tiers by 4.90–5.02 times. The package shape coefficient also significantly influences the output value. Its increase from 1.5 to 2.5 causes a decrease in the alignment force by 75–77 % for the lower packages and by 52–56 % for the upper ones. The relationship

between the alignment force and the volume of the package is linear. To align the ends of logs in the upper tier packages, more force is required than in the lower ones.

Keywords: timber rafting, round timber, rafting units, alignment of log ends

For citation: Posypanov S.V., Karpachev S.P. Force Force Alignment of the Ends of Two-Tiered Package Rafting Units during their Formation in Water. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2026, no. 1, pp. 161–173. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2026-1-161-173>

Введение

Обеспечить экономическую доступность наиболее крупных запасов древесного сырья, находящихся преимущественно на большом удалении от потребителей, во многих случаях можно лишь при доставке его водным транспортом при рациональном использовании разветвленности речных сетей, обусловленной в основном малыми и средними водотоками. Такая доставка, в соответствии с концепцией, изложенной в работах [11, 12], может быть эффективно реализована с соблюдением действующих экологических требований. Согласно ее положениям, пакеты лесоматериалов малых размеров после прохождения мелководных участков с целью снижения затрат на дальнейшую буксировку по основной части маршрута сплавивают без нарушения их целостности в 4-пакетные двухъярусные единицы с использованием устройства [9], предусматривающего в процессе сплотки выравнивание торцов формируемых двухъярусных пакетных сплочных единиц (ДПСЕ) для повышения их прочности и полнодревесности [7], что также предполагает снижение удельных затрат. Указанное действие реализуется в рабочей камере устройства посредством надвигания на торцевую поверхность ДПСЕ одного из боковых щитов. Усилие, требуемое для выравнивания торцов ДПСЕ, является одним из основных параметров устройства. Установление этого параметра следует научно обосновать. Известные сведения по выравниванию торцов лесоматериалов представлены в [1–3, 5, 10, 13]. В них рассматриваются преимущественно лесоматериалы в отдельных пачках, пакетах и пучках, располагающихся на суше. При этом наличие стягивающих обвязок и влияние коэффициента формы сплочных единиц, как правило, не учитываются. Работ по выравниванию торцов ДПСЕ, имеющему существенные особенности, не обнаружено. Этот факт в совокупности с изложенной информацией позволил убедиться в необходимости проведения данного исследования.

Цель – получение формул для расчета сил, требуемых для выравнивания торцов ДПСЕ, формируемых в воде; установление характера и степени влияния основных определяющих факторов на указанные силы.

Объект исследования – формируемая в воде ДПСЕ. *Метод* – теоретический, базирующийся на положениях теорий сыпучей среды [14, 16, 19] и гибких нитей [6, 10].

Результаты исследования и их обсуждение

В данном исследовании опирались на метод, использованный нами в статье [8] при обосновании усилия выравнивания торцов свободно плавающего пакета круглых лесоматериалов. В указанном источнике подробно изложена

суть метода и принятые допущения. Усилия, необходимые для выравнивания торцов пакетов в составе ДПСЕ, существенно отличаются от усилий для свободно плавающего пакета. Пакеты нижнего яруса находятся в полностью затопленном состоянии (рис. 1). Каждый нижний пакет представляется как гибкая оболочка, наполненная сыпучей средой одного вида. Контур поперечного сечения пакета рассматривается здесь как одна полная эллиптика. Ее размер определяет модулярная высота h_1 , форму – модулярный угол δ_1 [6, 10].

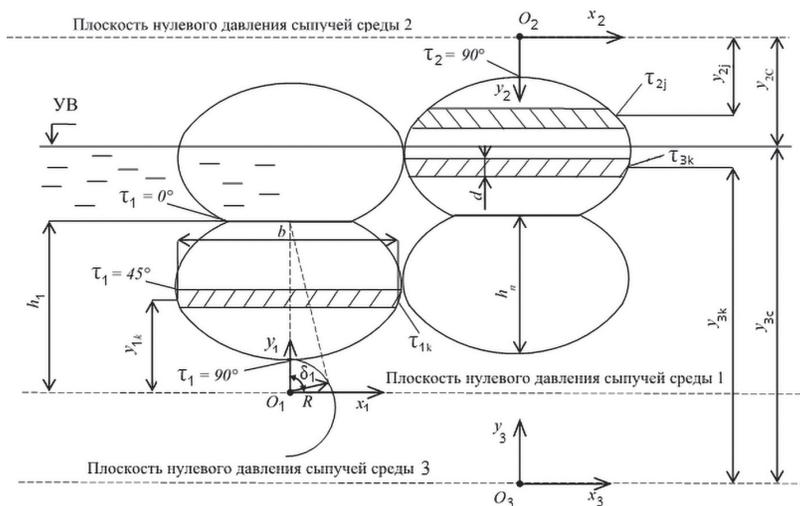


Рис. 1. Расчетная схема ДПСЕ, формируемой в воде. УВ – уровень воды
Fig. 1. The design scheme of the 2-tiered package rafting unit formed in water.
УВ is the water level

Линии, называемые эллипсами, описываются уравнениями [18]

$$x_i = \frac{1}{4} h_i \beta_i; \quad (1)$$

$$y_i = h_i \sigma_i, \quad (2)$$

где i – номер эллипса и ее системы координат; x_i и y_i – координаты; β_i , σ_i – параметры уравнений.

$$\beta_i = 2(2 - \sin^2 \delta_i) (W(\delta_i) - T(\delta_i, \tau_i)) - 4(J(\delta_i) - J(\delta_i, \tau_i)); \quad (3)$$

$$\sigma_i = \sqrt{1 - \sin^2 \delta_i \sin^2 \tau_i}, \quad (4)$$

τ_i – параметр, изменяющийся по длине эллипса, ...° [6, 10]; $W(\delta_i)$, $J(\delta_i)$; $T(\delta_i, \tau_i)$, $J(\delta_i, \tau_i)$ – полные и неполные эллиптические интегралы 1-го и 2-го родов соответственно [15].

На сыпучую среду пакетов нижнего яруса действуют вертикальные силы тяжести и силы Архимеда, направленные в противоположные стороны. Нижние пакеты удерживаются от всплытия верхними. Сыпучая среда нижних пакетов сжимается. Среднее давление в ее слоях определяется по формуле

$$p_{v1} = (\rho_w - \rho_t) g \eta y_{1k}, \quad (5)$$

где ρ_w , ρ_t – плотность воды и лесоматериалов соответственно, кг/м^3 ; g – гравитационная постоянная, м/с^2 ; η – коэффициент полнодревесности пакета лесоматериалов; y_{1k} – ордината оси k -го слоя в системе координат эллипса под номером 1, м.

Для расчетных надводных слоев верхних пакетов формула будет иметь вид

$$P_{v2} = \rho_t g \eta y_{2j} . \quad (6)$$

При наличии вертикальных сил в сыпучей среде появляются и так называемые распорные горизонтальные усилия и соответствующие давления. Ниже уровня воды они определяются из выражения

$$P_{g1} = \lambda_a (\rho_w - \rho_t) g \eta y_{1k} ; \quad (7)$$

выше –

$$P_{g2} = \lambda_a \rho_t g \eta y_{2j} , \quad (8)$$

где λ_a – коэффициент активного распора [10].

Сила, препятствующая сдвигу лесоматериала в пакете в продольном направлении, определяется из формулы

$$F_t = 2f (P_v + P_g) , \quad (9)$$

где P_v , P_g – вертикальные и горизонтальные силы сжатия соответственно, воспринимаемые лесоматериалом в пакете, Н; f – коэффициент трения.

Согласно выражениям, приведенным для вертикальных и горизонтальных давлений, они линейно зависят от ординат. Таким образом, силы сжатия можем определять по средним значениям соответствующих давлений на оси слоя. С учетом этого формулу (9) привели к виду

$$F_t = 2f (p_v dl + p_g dl) , \quad (10)$$

где d , l – средний диаметр и длина лесоматериалов соответственно, м.

Приняв во внимание связь между (7) и (5), (8) и (6), преобразовали выражение (10):

$$F_t = 2p_v d l f (1 + \lambda_a) .$$

Сила, требуемая для выравнивания торцов лесоматериалов в слое пакета

$$F_s = 2n_t \alpha p_v d l f (1 + \lambda_a) , \quad (11)$$

где n_t – общее количество лесоматериалов в данном слое; α – доля лесоматериалов, подлежащих выравниванию с одной из сторон пакета.

$$n_t = b / d , \quad (12)$$

где b – ширина оси слоя, м.

Преобразовали (11) с учетом (12):

$$F_s = 2b p_v \alpha l f (1 + \lambda_a) . \quad (13)$$

С учетом (5) для слоев, находящихся под водой, выражение (13) привели к виду

$$F_{sk} = 2b_k y_k (\rho_w - \rho_t) g \eta \alpha l f (1 + \lambda_a) . \quad (14)$$

Для надводных слоев верхних пакетов формула с принятием во внимание (6) имеет вид

$$F_{sj} = 2b_j y_j \rho_t g \eta \alpha l f (1 + \lambda_a) . \quad (15)$$

В формулах (14), (15) наряду с одинаковыми множителями есть и значительно отличающиеся. Для обозначения групп этих множителей использовали символ A . Для слоев, находящихся под водой,

$$A_i = b_i y_i (\rho_w - \rho_t) , \quad (16)$$

для надводных слоев

$$A_j = b_j y_j \rho_t. \quad (17)$$

Используя (16) и (17), привели выражения (14) и (15) к виду

$$F_{sk} = 2A_k g \eta \alpha l f (1 + \lambda_a);$$

$$F_{sj} = 2A_j g \eta \alpha l f (1 + \lambda_a).$$

Для определения усилия F , требуемого при выравнивании торцов пакета, необходимо просуммировать усилия по всем его слоям:

$$F = 2A_0 g \eta \alpha l f (1 + \lambda_a), \quad (18)$$

где A_0 – сумма величин A по всем слоям пакета, кг/м.

На этапе проектирования плотность лесоматериалов на лесосплаве принимают за 800 кг/м^3 . С учетом этого в соответствии с (16), (17) A_0 фактически является зависимой только от суммы произведений b и y , вычисленной для расчетного количества слоев пакета. Произведения b и y определяются формой его поперечного сечения, характеризуемой коэффициентом формы C , количеством слоев, т. е. h_n/d , а также площадью сечения ω . При фиксированной ω , равной 1, A_0 зависит только от 1-х двух факторов. A_0 при $\omega = 1$ обозначили a . На основании изложенного можем утверждать, что a является функцией от C и h_n/d .

Используя полученные аналитические зависимости, выполнили расчет a , варьируя C и h_n/d . Пакеты в нижнем ярусе ДПСЕ в отличие от варианта, рассмотренного нами в статье [8], при аналогичных C и $\omega = 1$ имеют другие h_n , h и δ . Их расчет и в данном случае осуществлен в соответствии с алгоритмом, описанным в [8], с помощью формул (1)–(4) с применением численных методов.

При каждом расчетном значении C задавали последовательно различное количество слоев. Делением высоты пакета на количество слоев вычисляли высоту слоя. Ординату оси нижнего слоя определяли вычитанием высоты пакета из модулярной высоты и прибавлением половины высоты слоя. Ордината каждого следующего слоя больше, чем у предыдущего на высоту слоя. Для всех осей путем деления их ординат на модулярные высоты вычисляли σ , согласно выражению (2), используя формулу

$$\tau = \arcsin \sqrt{\frac{1 - \sigma^2}{\sin^2 \delta}},$$

полученную в результате преобразования (4), вычисляли углы τ для точек пересечения осей слоев и эластик. По τ определяли β с помощью формулы (3). Интегралы, которые она содержит, вычисляли с использованием рядов [20]. Для указанных точек пересечения по формуле (1) определяли абсциссы. Умножив их на 2, вычисляли ширину оси каждого слоя. Далее находили произведения by и сумму этих произведений для всех слоев. В итоге a вычисляли умножением этой суммы на $\rho_w - \rho_t$.

При варьировании C придерживались интервала от 1,50 до 2,50 с шагом около 0,25. Величине h_n/d присваивали значения 4, 7, 10, 13, 17, 20. Диапазоны варьирования факторов назначены с учетом того, что ДПСЕ могут использоваться не только при реализации основной транспортно-технологической схемы. Их применение возможно также в схемах, не включающих этап первоначального сплава. При всех сочетаниях C и h_n/d вычислено 30 значений a . Основные величины по каждому расчету a приводили в отдельных таблицах. Одна из них представлена ниже (табл. 1).

Таблица 1

Основные величины по расчету a для нижних пакетов при $C = 2,00$ и $h_n/d = 10$
 The main values in the calculations of a for the lower packages at $C = 2.00$ and $h_n/d = 10$

Слой	y , м	σ	τ , ...°	β	b , м	b_y , м ²
1	0,210	0,222	82,5	1,33	0,63	0,132
2	0,287	0,304	75,6	2,12	1,00	0,286
3	0,364	0,386	69,7	2,59	1,22	0,445
4	0,441	0,468	64,0	2,91	1,37	0,604
5	0,518	0,550	58,1	3,11	1,47	0,761
6	0,596	0,632	52,0	3,23	1,52	0,908
7	0,673	0,713	45,4	3,28	1,55	1,039
8	0,750	0,795	38,1	3,24	1,53	1,146
9	0,827	0,877	29,2	3,10	1,46	1,211
10	0,904	0,959	16,7	2,79	1,32	1,189
<i>Итого</i>						7,721

Умножив сумму произведений b_y 7,721 м² на разницу указанных плотностей 1000–800 кг/м³, получили $a = 1545$ кг/м. Результаты всех 30 расчетов a приведены в табл. 2.

Выполнили пересчет приведенных a на соответствующие нормативным величины C , указываемые в технических условиях. Используя их, построили графики (рис. 2).

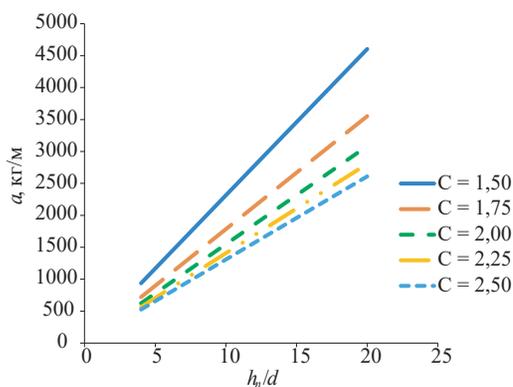
Таблица 2

Результаты расчетов a для нижних пакетов ДПСЕ
 The results of the calculations of a for the lower packages
 of the 2-tiered package rafting units

C	a при h_n/d , кг/м					
	4	7	10	13	17	20
2,57	521	908	1296	1683	2200	2587
2,31	554	965	1377	1788	2336	2748
2,00	623	1084	1545	2006	2620	3081
1,61	817	1417	2018	2619	3420	4021
1,42	1061	1838	2615	3392	4429	5206

Рис. 2. Зависимость a от h_n/d
 при различных C для нижних пакетов
 ДПСЕ

Fig. 2. The dependence of a on h_n/d
 at different C for the lower packages
 of the two-tiered package rafting units



Получили соответствующие аппроксимирующие выражения. Для $C = 1,50$

$$a = 229 h_n/d + 20,5; \quad (19)$$

для $C = 1,75$

$$a = 177 h_n/d + 12,2; \quad (20)$$

для $C = 2,00$

$$a = 154 h_n/d + 8,5; \quad (21)$$

для $C = 2,25$

$$a = 140 h_n/d + 6,2; \quad (22)$$

для $C = 2,50$

$$a = 130 h_n/d + 4,8. \quad (23)$$

Достоверность аппроксимации для (19)–(23) выше 0,99 [17].

Обычно в расчетах принимают $\alpha = 0,5$ [5, 10]. Для лесосплавных транспортных единиц коэффициент трения f берут за 0,2 [4, 10], $g = 9,81$ м/с². Удвоенное произведение 3 этих величин, присутствующее в (18), равно 1,96. Для перехода от a , полученной для единичной площади поперечного сечения, к величине, соответствующей его фактической площади ω , необходимо a умножить на ω . Преобразовав формулу (18) с учетом изложенного, получили

$$F = 1,96l\omega\eta a(1 + \lambda_a). \quad (24)$$

Произведение $l\omega\eta$ равно объему пакета V . То есть (24) можно привести к виду

$$F = 1,96Va(1 + \lambda_a). \quad (25)$$

Основными сплаваемыми породами являются ель и сосна, для первой λ_a рекомендуется принимать 0,361, для второй – 0,406.

В соответствии с (25) необходимое усилие при выравнивании торцов прямо пропорционально объему пакета, отношению его высоты к диаметру лесоматериалов (рис. 2) и коэффициенту λ_a . Из 3 перечисленных факторов h_n/d наиболее существенно влияет на результат. Его изменение от 4 до 20 приводит к увеличению рассматриваемого усилия в 4,90–4,97 раза. Зависимость усилия от коэффициента C наглядно демонстрируют графики (рис. 3). С уменьшением коэффициента в диапазоне 2,5–1,5 необходимое усилие для выравнивания торцов нижнего пакета увеличивается на 75–77 %.

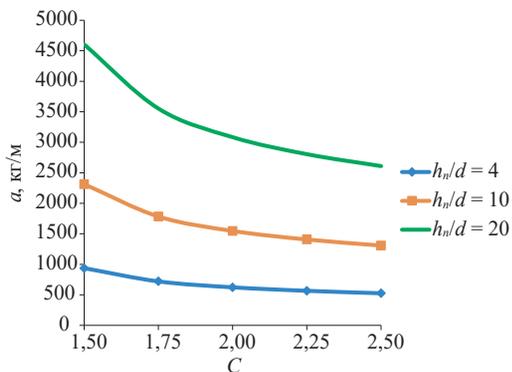


Рис. 3. Зависимость a от C при различных h_n/d для нижних пакетов ДПСЕ

Fig. 3. The dependence of a on C at different h_n/d for the lower packages of the two-tiered package rafting units

При рассмотрении верхних пакетов ДПСЕ имеем дело с сыпучей средой 2 видов. Один вид находится под водой, другой – над водой. Линии обвязок

верхних пакетов рассматриваются как комбинации фрагментов эластик 2 видов, которые сопрягаются на уровне водной поверхности. Таким образом, каждому коэффициенту C пакета соответствуют по 2 величины δ , h и τ . Также для каждого C в системах $x_2O_2y_2$ и $x_3O_3y_3$ существуют y_{2C} и y_{3C} , связанные с точками соединения фрагментов.

На сыпучую среду выше поверхности воды действует сила тяжести. Сыпучая среда в подводной части верхних пакетов помимо силы тяжести воспринимает выталкивающую силу воды и усилия, передаваемые от нижних пакетов. Вертикальное сжатие пакетов в верхнем ярусе существенно больше. В соответствии с выражениями (7), (8) это можно сказать и о горизонтальных давлениях. Очевидно, что для выравнивания торцов верхних пакетов потребуется усилие больше, чем для нижних и для свободно плавающих [8].

Верхние пакеты ДПСЕ, как и нижние, при аналогичных коэффициентах C и единичной площади поперечного сечения отличаются от свободно плавающих по высоте, модулярным углам и высотам, форме сечения. Алгоритмы расчетов, выполняемых для верхних и свободно плавающих пакетов подобны [8].

В ходе расчетов для верхних пакетов придерживались тех же значений C и h_n/d , что и для нижних. Аналогично получили 30 значений a . Одна из 30 таблиц, заполняемых при расчетах a , приведена ниже (табл. 3).

Таблица 3

Основные величины по расчету a для верхних пакетов при $C = 2,00$ и $h_n/d = 10$
The main values in the calculations of a for the upper packages at $C = 2.00$ and $h_n/d = 10$

Слой	y , м	σ	τ , ...°	β	b , м	by , м ²
<i>Подводные слои</i>						
1	1,203	0,682	77,0	0,369	1,181	1,421
2	1,278	0,724	66,7	0,602	1,387	1,773
3	1,353	0,767	58,7	0,724	1,495	2,023
4	1,429	0,810	51,4	0,787	1,550	2,214
5	1,504	0,853	44,1	0,803	1,565	2,353
6	1,579	0,895	36,4	0,775	1,540	2,431
<i>Всего</i>						12,215
<i>Надводные слои</i>						
7	0,322	0,484	61,4	4,426	1,469	0,472
8	0,246	0,371	68,8	4,039	1,341	0,330
9	0,171	0,257	75,9	3,402	1,129	0,193
10	0,096	0,144	83,4	2,351	0,780	0,075
<i>Всего</i>						1,070

Умножив сумму произведений b и y по подводным слоям 12,215 м² на разницу плотностей 1000–800 кг/м³, получили 2443 кг/м. Аналогично, умножив сумму произведений b и y по надводным слоям 1,070 м² на плотность лесоматериалов 800 кг/м³, получили и 856 кг/м. Просуммировав 2443 и 856 установили $a = 3299$ кг/м для данного случая. Результаты всех 30 расчетов a для верхних пакетов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты расчетов a для верхних пакетов ДПСЕ
The results of the calculations of a for the upper packages
of the two-tiered package rafting units

C	a при h_n/d , кг/м					
	4	7	10	13	17	20
2,57	1153	2006	2874	3722	4870	5722
2,31	1212	2108	2930	3910	5115	6010
2,00	1326	2304	3299	4271	5587	6567
1,61	1645	2850	4075	5278	6901	8109
1,42	1915	3399	4893	6209	8086	9579

Как и для нижних пакетов выполнили пересчет a на нормативные C . При различии количественных показателей характер полученных зависимостей a от h_n/d и C для верхних пакетов аналогичен приведенным на рис. 2 и 3. Аппроксимирующие выражения для верхних пакетов имеют вид в случае $C = 1,50$

$$a = 441,4 h_n/d + 37,7; \quad (26)$$

для $C = 1,75$

$$a = 369,5 h_n/d + 22,1; \quad (27)$$

для $C = 2,00$

$$a = 328,0 h_n/d + 14,2; \quad (28)$$

для $C = 2,25$

$$a = 305,1 h_n/d - 9,3; \quad (29)$$

для $C = 2,50$

$$a = 290,1 h_n/d - 8,6. \quad (30)$$

Достоверность аппроксимации и этих выражений не менее 0,99.

И в данном случае фактор h_n/d наиболее существенно влияет на результат. Изменение этого фактора от 4 до 20 приводит к увеличению усилия торцевания в 4,92–5,02 раза. Здесь по сравнению с нижними пакетами уменьшается влияние коэффициента C , оставаясь довольно существенным. С понижением коэффициента от 2,5 до 1,5 усилие для выравнивания торцов растет на 52–56 %.

Наличие эмпирических выражений (19)–(23) для нижних пакетов и (26)–(30) для верхних позволяет с помощью формулы (24) или (25) вычислять усилие для выравнивания торцов.

Выравнивание торцов ДПСЕ может сопровождаться сдвигом не только лесоматериалов в пакетах. Пакеты в целом также могут сдвигаться. Наиболее существенное взаимодействие при этом будет наблюдаться между пакетами разных ярусов. Верхний пакет препятствует всплытию нижнего и при этом воспринимает от него усилие

$$G_k = Vg(\rho_w - \rho_t).$$

При этом сдвигу пакета препятствует сила

$$F_n = Vgf(\rho_w - \rho_t). \quad (31)$$

Значения g, f, ρ_w, ρ_t приняли такими же, что и при выводе (25). В результате из (31) получили

$$F_n = 392V. \quad (32)$$

Используя (25) и (32), установили, что F_n может превысить усилие выравнивания торцов лесоматериалов в пакете при a , меньшей чем 142 кг/м. Величины a , представленные в табл. 2 и 4, значительно больше этого показателя. То есть при проектировании F_n не является расчетной величиной.

Поскольку ДПСЕ состоит из 4 пакетов, для определения усилия, необходимого для выравнивания ее торцов, следует сложить усилия для нижних и верхних пакетов и удвоить полученную сумму.

Заключение

Используя теории гибких нитей и сыпучей среды, получили аналитические формулы для определения расчетных усилий выравнивания торцов лесоматериалов в нижних и верхних пакетах формируемой в воде двухъярусной пакетной сплочной единицы.

Установили, что величина a , входящая в указанные формулы, зависит от коэффициента формы пакетов, от отношения их высоты к диаметру лесоматериалов и от яруса, в котором находятся пакеты. Определение a в каждом случае аналитическим путем связано с вычислением интегралов, что нежелательно при практических расчетах.

Используя численные методы, для пакетов двухъярусной сплочной единицы, формируемой в воде, определили a при различных сочетаниях указанных определяющих факторов. По результатам вычислений для нормативных коэффициентов формы получили аппроксимирующие зависимости, позволяющие устанавливать a для пакетов нижнего и верхнего ярусов. Наличие этих зависимостей позволяет находить требуемые усилия выравнивания торцов с помощью аналитических формул.

Выявили, что силы, необходимые для продольного перемещения отдельных пакетов в составе двухъярусной пакетной сплочной единицы, находящейся в воде, всегда существенно меньше сил, прикладываемых при выравнивании торцов лесоматериалов в пакетах. То есть при проектировании устройств силы первого вида не относятся к расчетным. Для определения усилия для выравнивания торцов двухъярусной пакетной сплочной единицы следует сложить усилия для нижних и верхних пакетов и удвоить полученную величину.

Самым значимым фактором, влияющим на усилие выравнивания торцов лесоматериалов в пакете, является отношение его высоты к их диаметру. Увеличение этого отношения в исследованном диапазоне сопровождается возрастанием усилия для пакетов обоих ярусов в 4,90–5,02 раза. Существенно на выходную величину влияет и коэффициент формы. Его увеличение от 1,5 до 2,5 вызывает уменьшение усилия выравнивания на 75–77 % у нижних пакетов и на 52–56 % – у верхних. Связь усилия выравнивания с объемом пакета линейная прямая. Для выравнивания торцов лесоматериалов в пакетах верхнего яруса требуется большее усилие, чем в нижних.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Войтко П.Ф.* Методика и результаты производственных испытаний передвижных и переносных торцевывравнивателей 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.).

2. *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 Cross-Cutting It at the Log Receiving Ports*: Doc. Tech. Sci. Diss. Abs. Yoshkar-Ola, 2005. 39 p. (In Russ.).

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

Vojtko 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.).

4. *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 and Design Institute of Mechanization and Power Engineering of the Forest Industry, 1971. 118 p. (In Russ.).

5. *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. *Lesosechnye, lesoskladskie raboty i transport lesa*: Interuniversity Collection of Scientific Papers. Leningrad, Forest Engineering Academy Publ., 1974, iss. 111, pp. 13–17. (In Russ.).

6. *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.).

7. *Патякин 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.).

8. *Песков И.А., Посыпанов С.В.* Обоснование усилий, необходимых при торцевании плавающих пакетных сплоченных единиц // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2021. Вып. 235. С. 165–178.

Peskov I.A., Posypanov S.V. Justification of the Forces Required for Leveling Ends of Floating Packaged Rafting Units. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoy Akademii*, 2021, iss. 235, pp. 165–178. (In Russ.).

<https://doi.org/10.21266/2079-4304.2021.235.165-178>

9. *Посыпанов С.В., Песков И.А.* Технология навигационной сплотки двухъярусных пакетных лесотранспортных единиц // Аллея Науки: науч.-практ. электрон. журн. 2018. № 5-8(21). С. 73–75.

Posypanov S.V., Peskov I.A. Technology of Navigation Rafting of 2-Tier Timber Transport Units. *Alleya Nauki. Scientific and Practical Electronic Journal*, 2018, no. 5-8(21), pp. 73–75. (In Russ.).

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 Scientists*: 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