

УДК 627.142.2

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.135

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХЪЯРУСНОЙ ПАКЕТНОЙ СПЛОТОЧНОЙ ЕДИНИЦЫ, РАСПОЛОЖЕННОЙ НА ТВЕРДОМ ОСНОВАНИИ

С.В. Посыпанов, д-р техн. наук, проф.; ORCID: [0000-0003-0600-7089](https://orcid.org/0000-0003-0600-7089)

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

Двухъярусные пакетные сплотночные единицы играют ключевую роль в реализации концепции экологически щадящей лесотранспортной эксплуатации сети средних и малых рек, обеспечивающей экономическую доступность древесного сырья удаленных лесных массивов России и рациональное использование ресурсов. Применение двухъярусных пакетных сплотночных единиц предполагает необходимость проведения инженерных расчетов, в частности по обоснованию их геометрических характеристик в случае формирования этих сплотночных единиц на твердом основании – на плотбищах. Набор геометрических параметров должен быть достаточным и для корректной оценки их прочностных характеристик. В результате анализа литературных данных предложено провести дополнительное исследование, цель которого – получение зависимостей для определения геометрических характеристик двухъярусных пакетных сплотночных единиц, расположенных на твердом основании. Метод исследования – теоретический. Пакеты рассматривали как невесомые гибкие оболочки, наполненные сыпучей средой одного вида. Обосновали возможность применения для описания поперечного сечения пакетов параметрических уравнений бесперегибных эластик второго рода. Выведена система уравнений, связывающих между собой искомые геометрические характеристики. Аналитическое решение полученной системы оказалось неосуществимым. Разработали и реализовали на компьютере алгоритм решения численным методом. Задачу представили в безразмерном виде. Расчеты выполняли, оперируя удельными характеристиками, соответствующими единичной площади отдельного пакета. Аппроксимируя результаты расчетов, получили зависимости удельных геометрических характеристик двухъярусных пакетных сплотночных единиц, расположенных на твердом основании, от коэффициента формы отдельно лежащего пакета. Переход к абсолютным значениям высоты, ширины сплотночных единиц и длины рабочей части внешней обвязки предусмотрен посредством умножения удельных характеристик на квадратный корень из площади поперечного сечения пакета. Также получено аппроксимирующее выражение для расчета абсолютного значения длины рабочей части внешней обвязки по коэффициенту формы и высоте отдельно лежащего пакета. Для решения вопросов, связанных с прочностными характеристиками сплотночной единицы в рассматриваемых условиях, предложены аппроксимирующие зависимости, позволяющие определять по коэффициенту формы отдельно лежащего пакета положение плоскостей нулевого давления сыпучей среды для нижних и верхних пакетов и соотношение высот этих пакетов. Коэффициенты детерминации предложенных аппроксимирующих зависимостей имеют значения не менее 0,99. Достоверность полученной информации подтверждена экспериментально с помощью физических моделей.

Для цитирования: Посыпанов С.В. Определение геометрических характеристик двухъярусной пакетной сплотночной единицы, расположенной на твердом основании // Лесн. журн. 2019. № 5. С. 135–147. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.135

Ключевые слова: лесосплав, лесоматериалы, пакет, сплочная единица, геометрические параметры лесотранспортных единиц, обвязка, эластичка, алгоритм решения, физическая модель.

Введение

Для рационального использования лесных ресурсов и устранения дефицита древесного сырья необходимо обеспечить экономическую доступность удаленных спелых и перестойных массивов основных лесных регионов Российской Федерации. Реалии таковы, что выполнить это условие можно лишь при задействовании густой сети малых и средних рек. Эффективная экологически щадящая лесотранспортная эксплуатация этих рек возможна при реализации концепции поставок древесного сырья по ним, базирующейся на принципе единого транспортного пакета [8]. Значительная роль в концепции отведена двухъярусным пакетным сплочным единицам (ДПСЕ), формируемым из пакетов небольшого объема (микрпучков). Внедрение в производство ДПСЕ и связанных с ними технологий [8] подтверждает перспективность предлагаемых разработок.

При использовании ДПСЕ необходимо выполнение технологических, а также прочностных расчетов, предполагающих определение геометрических характеристик лесотранспортных единиц. Вопросы определения геометрических характеристик плавающей ДПСЕ и отдельных плавающих пакетов, из которых формируются ДПСЕ, освещены нами ранее [5, 6]. Однако ДПСЕ предполагается формировать как на воде, так и на опорном основании – на плотбище. Использование ДПСЕ позволяет осуществлять сплотку на плотбище без применения специализированной техники, которую могут заменить погрузчики относительно небольшой грузоподъемности, имеющиеся практически у всех лесозаготовительных предприятий. После завершения сплотки эти погрузчики не будут простаивать, а найдут применение в других технологических процессах. Такая замена должна заинтересовать в первую очередь мелких лесозаготовителей, количество которых существенно возросло, а также предприятия, утратившие возможность осуществления традиционной сплотки в связи с износом специализированной техники и невозможностью ее приобретения.

Известно, что геометрические характеристики одной и той же ДПСЕ, находящейся на плаву и лежащей на твердом основании, различаются, т. е. ранее полученные нами для плавающей ДПСЕ зависимости [5] в рассматриваемом случае не применимы. К наиболее значимым относятся различия, связанные с плоскостями нулевого давления сыпучей среды (ПНДСС) [2], от положения которых существенно зависит прочность ДПСЕ.

Анализ работ других авторов не обнаружил информации о геометрических характеристиках ДПСЕ, хотя публикации об указанных характеристиках отдельных пакетов круглых лесоматериалов многочисленны. Большинство работ посвящено пакетам, лежащим на твердом основании. Получение более точных геометрических характеристик таких пакетов обеспечивается при использовании так называемой эластичковой теории [7]. Наиболее полезна информация, представленная в работах [1, 2, 4, 7]. Более поздние исследования выполнялись в развитие ранних. В итоге для отдельно лежащих пакетов получены выражения, дающие достаточно точные для инженерных расчетов ре-

ультаты. В работе [7] отражены результаты исследования пакетов, уложенных в штабеля. Сомнения по корректности аналитических выражений, полученных в результате этого, вносят некоторые противоречия. Например, согласно формуле (78) в работе [7] периметр поперечного сечения пакета, лежащего в нижнем ярусе штабеля, больше означенного периметра отдельно лежащего пакета на весьма значительную величину, которая равна удвоенной ширине поверхности контакта между пакетами верхнего и нижнего ярусов. При этом автором изначально было принято допущение, что рабочая длина обвязки пакета не меняется при его деформациях. Там же приведена формула (номер отсутствует) для вычисления ширины пакета в штабеле, согласно которой указанная ширина больше ширины отдельно лежащего пакета на значительную величину, равную ширине упомянутой выше поверхности контакта. На практике это не подтверждается. Однако информация оказалась полезной, но недостаточной для определения геометрических характеристик ДПСЕ.

Цель нашего исследования – получение зависимостей для определения геометрических характеристик ДПСЕ, лежащей на твердом основании.

Объекты и методы исследования

При исследовании использован теоретический метод с последующей проверкой полученных зависимостей на физических моделях.

Учтено, что пакеты во время сплотки ДПСЕ деформируются в результате взаимодействия между ними, форма их поперечного сечения существенно отличается как от эллипса, так и от других простейших геометрических фигур (см. рисунок). Также учтено, что получение корректных теоретических

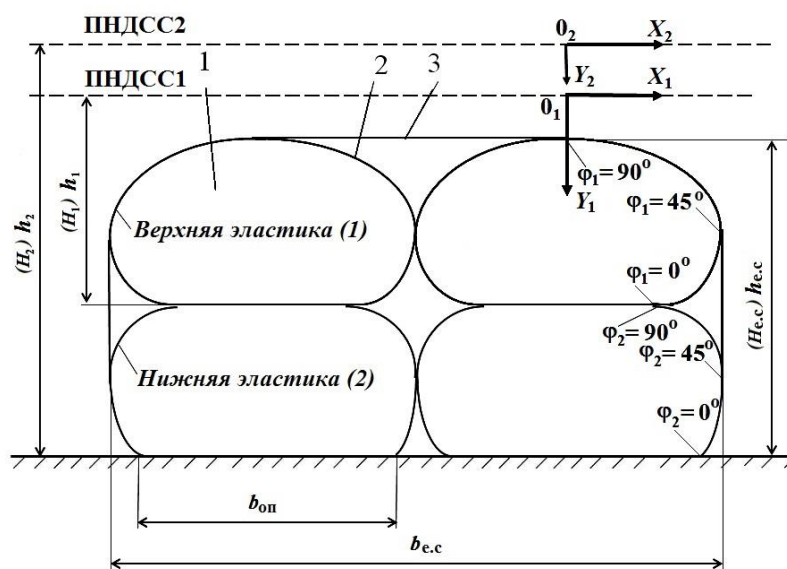


Схема ДПСЕ, расположенной на твердом основании: 1 – пакет;
2 – обвязка пакета; 3 – внешняя обвязка ДПСЕ

Scheme of a two-storied package rafting unit (TPRU) placed on a solid basement: 1 – bundle; 2 – package strapping; 3 – external strapping of a TPRU

решений по определению характеристик прочности ДПСЕ возможно только при наличии информации о местоположении соответствующих ПНДСС. Ее можно получить, используя эластиковую теорию. Прием аналогий поперечного сечения пакета и фигур правильной формы не позволяет установить это местоположение. Важно, что применение эластиковой теории дает возможность более точно определять геометрические характеристики сплочных единиц.

В условиях отсутствия воды все пакеты ДПСЕ в соответствии с эластиковой теорией рассматриваем как невесомые гибкие оболочки, заполненные сыпучей средой одного вида [10]. Роль оболочек здесь выполняют обвязки либо обвязочные комплекты. Очевидно, что форма поперечного сечения пакета соответствует форме его оболочки. В результате действия силы тяжести происходит вертикальное сжатие сыпучей среды, что приводит к возникновению горизонтальных усилий распора. Их уравнивают реакции в обвязках.

Приняли к сведению нецелесообразность чрезмерного утягивания при сплотке ДПСЕ ее внешних обвязок, так как это может привести к ослаблению обвязок пакетов и, соответственно, к ослаблению противодействия продольному смещению лесоматериалов в них. По этой же причине не рекомендуется излишне прижимать один пакет к другому в одном ярусе. На практике убедились [8], что пакеты в ДПСЕ удерживаются при транспортировке вполне надежно при утяжке внешних обвязок, не вызывающей существенного изменения формы пакетов. Поэтому влияние внешних обвязок, а также влияние взаимодействия между пакетами одного яруса на их размеры и форму сочли несущественными.

Контактную поверхность между верхними и нижними пакетами считали горизонтальной и плоской, т. е. приняли допущение, что между верхним и нижним ярусами находится горизонтальная плоская жесткая прокладка бесконечно малой толщины. Это дало возможность не усложнять и так уже нелегкую задачу и получить достаточно точные результаты (судя по данным экспериментальной проверки).

В ходе наиболее успешных исследований, выполненных с использованием эластиковой теории, было установлено, что внутреннее трение сыпучей среды, весьма существенно влияя на силовые характеристики пакета, практически не сказывается на его геометрических параметрах в диапазоне значений угла внутреннего трения, соответствующих круглым лесоматериалам [7]. В таком случае форма поперечного сечения пакетов может быть описана параметрическими уравнениями бесперегибных эластик второго рода [12]:

$$x_i = 0,25H_i \left[\left(2 - \sin^2 \Theta_i \right) \left(K(\Theta_i) - F(\Theta_i, \varphi_i) \right) - 2 \left(E(\Theta_i) - E(\Theta_i, \varphi_i) \right) \right]; \quad (1)$$

$$y_i = H_i \sqrt{1 - \sin^2 \Theta_i \sin^2 \varphi_i}, \quad (2)$$

где x_i и y_i – координаты данной точки элаستي, м; i – номер элаستي и ее системы координат; H_i – модулярная высота, м; Θ_i – модулярный угол, ...°; $K(\Theta_i)$ и $F(\Theta_i, \varphi_i)$ – полный и неполный эллиптические интегралы первого рода; $E(\Theta_i)$ и $E(\Theta_i, \varphi_i)$ – полный и неполный эллиптические интегралы второго рода [14, 15]; φ_i – параметр элаستي, ...° [9, 13].

Модулярная высота характеризует размер полной эластике. Это расстояние по вертикали от основания эластике до ПНДСС ее сыпучей среды (см. рисунок). Модулярный угол задает форму эластике. Между этим углом и коэффициентом формы пакета однозначная связь. Параметр эластике φ_i – величина, изменяющаяся вдоль нее.

В рассматриваемом случае обвязкам и нижних, и верхних пакетов соответствует только по одной разновидности эластик второго рода. Верхней эластике присвоен номер 1, нижней – 2. ПНДСС верхних (ПНДСС1) и нижних (ПНДСС2) пакетов находятся выше ДПСЕ. $X_1O_1Y_1$ – система координат эластике 1, $X_2O_2Y_2$ – 2. Начала этих систем расположены в соответствующих ПНДСС.

Использование формул (1) и (2), а также сопутствующих зависимостей дало возможность получить систему уравнений, отражающих связи между геометрическими характеристиками ДПСЕ в рассматриваемых условиях. Уравнения упомянутой системы представлены ниже. Аналитическое решение ее оказалось невозможным. В уравнениях означенной системы характеристики, интересующие нас, определяются факторами Θ_i , H_i и φ_i . Измерение этих факторов в практической деятельности проблематично. Используемые в практике геометрические характеристики невозможно выразить через иные общепринятые параметры преимущественно из-за эллиптических интегралов, входящих в уравнения. Поэтому воспользовались численным методом решения.

При решении задачи численным методом определение значений эллиптических интегралов по таблицам [11] усложняет программирование. Кроме того, значения интегралов в указанных таблицах даны для Θ и φ , меняющихся дискретно с определенным шагом. При Θ и φ , имеющих промежуточные значения, линейная интерполяция приводит в нашем случае к значительным погрешностям. Поэтому эллиптические интегралы вычисляли, применяя различные ряды [3]. Например, для вычисления неполных эллиптических интегралов второго рода использовали следующий ряд:

$$E(\varphi, k) = A_0 - \frac{1}{2} A_1 k^2 - \frac{1}{8} A_2 k^4 - \frac{1}{16} A_3 k^6 - \frac{5}{128} A_4 k^8 - \frac{7}{256} A_5 k^{10} - \dots - \frac{1 \cdot 3 \dots (2n-3)}{2 \cdot 4 \dots 2n} A_n k^{2n} - \dots,$$

где $A_0 = \varphi$; A_n – величина, определяемая по формуле

$$A_n = \frac{2n-1}{2n} A_{n-1} - \frac{1}{2n} \cos \varphi \sin^{2n-1} \varphi,$$

$n = 0, 1, 2, \dots$; k – модуль эллиптического интеграла, численно равный $\sin \Theta$.

При расчетах оперировали удельными линейными характеристиками, соответствующими пакету с единичной площадью поперечного сечения. Приведение решения к безразмерному виду дало возможность значительно уменьшить количество вычислений, обеспечив требуемую универсальность результатов. Связь безразмерных линейных характеристик (обозначены строчными буквами) и соответствующих размерных параметров (обозначены прописными буквами) отражает формула

$$z = \frac{Z}{\sqrt{\omega}}, \quad (3)$$

где Z – размерная линейная характеристика, м; z – соответствующая безразмерная или удельная линейная характеристика; ω – площадь поперечного сечения пакета, м².

При нахождении ДПСЕ на суше относительная плотность лесоматериалов ρ_0 не является фактором, определяющим ее геометрические характеристики. Формы поперечных сечений пакетов, а значит и всей ДПСЕ, в рассматриваемых условиях зависят от соотношения рабочей длины обвязок пакета и площади его поперечного сечения. Указанное соотношение однозначно определяется коэффициентом формы пакета, размещенного отдельно. Упомянутый коэффициент – в данном случае единственный определяющий фактор в задаче. Однако при применяемом математическом аппарате невозможно непосредственное варьирование значения указанного определяющего фактора, так как коэффициент формы не является аргументом задействованных функций. Приходится варьировать модулярный угол, таким образом меняя форму элаستيку и, соответственно, форму поперечного сечения пакетов одного из ярусов. Для каждого значения означенного угла подбираются значения модулярного угла и модулярной высоты элаستيку, соответствующей пакетам другого яруса. Выбор останавливается на паре значений подбираемых величин, при которой площадь поперечного сечения пакетов и рабочая длина обвязок будут такими же, как у первой пары пакетов. Из изложенного следует, что решение задачи, рассматриваемой здесь, выполняется по алгоритму, отличающемуся от использованных нами в работах [5, 6].

Вначале расчеты выполняются по пакетам верхнего яруса. Задается значение угла Θ_1 для верхней элаستيку. Эта величина варьируется в диапазоне 45°...87°. Результаты расчетов пробного характера за пределами указанного диапазона не принимали во внимание, поскольку значения коэффициентов формы пакетов получались при этом либо меньше 1,25 либо больше 3,00.

При площади поперечного сечения пакета ω , принятой равной единице, модулярная высота для верхней элаستيку определяется по формуле

$$h_1 = \sqrt{\frac{1}{K(\Theta_1)(2 - \sin^2 \Theta_1) - 2E(\Theta_1)}}.$$

Заметим, что зависимости площадей, ограниченных эластикой и их фрагментами, а также их длин от модулярных высот, углов и параметров эластик были установлены с помощью уравнений (1), (2) и известных из математики приемов, связанных с плоскими фигурами, имеющими криволинейные очертания [14].

Далее вычисляются высота ($h_{в.п}$) и ширина ($b_{в.п}$) пакетов верхних ярусов:

$$h_{в.п} = h_1(1 - \cos \Theta_1);$$

$$b_{в.п} = h_1[(2 - \sin^2 \Theta_1)(K(\Theta_1) - F(\Theta_1, 45^\circ) - 2(E(\Theta_1) - E(\Theta_1, 45^\circ))].$$

В результате деления $b_{в.п}$ на $h_{в.п}$ определяется значение коэффициента формы пакетов $C_{в.п}$.

С помощью выражения

$$l_{в.п} = 2h_1(K(\Theta_1) - E(\Theta_1))$$

вычисляется длина рабочей части обвязки пакета верхнего яруса.

По формуле

$$h_{б.в} = h_1 \left(1 - \sqrt{1 - \sin^2 \Theta_1 \sin^2 45^\circ} \right)$$

рассчитывается высота расположения крайних боковых точек верхних пакетов над поверхностью их контакта с нижними.

Расчеты по нижним пакетам выполнялись для разных сочетаний модулярных характеристик соответствующей элаستيку: угла Θ_2 и высоты h_2 . Диапазоны их варьирования: соответственно $31,721^\circ \dots 52,980^\circ$ и $1,460 \dots 6,589$, минимальные шаги: соответственно $0,001^\circ$ и $0,001$. Вычисления, описанные далее, осуществляются по всем рассматриваемым сочетаниям Θ_2 и h_2 .

Нагрузка на твердое основание от ДПСЕ равна действующей на нее силе тяжести. Для одного из вертикальных рядов пакетов нагрузка, приходящаяся на 1 м длины сплочной единицы, может быть определена как

$$G = 2\eta\omega\rho_{\text{л}}g, \quad (4)$$

где η – коэффициент полнодревесности пакетов; $\rho_{\text{л}}$ – плотность лесоматериалов, кг/м^3 ; g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

Указанная нагрузка может быть выражена и через давление на основание сыпучей среды:

$$G = \rho_{\text{л}}gh_2\eta b_{\text{о.п}}, \quad (5)$$

где h_2 – модулярная высота второй эластик; $b_{\text{о.п}}$ – ширина площади контакта нижнего пакета с основанием.

Из выражений (4), (5) имеем:

$$b_{\text{о.п}} = 2\omega/h_2.$$

По данной формуле и рассчитывается в программе $b_{\text{о.п}}$.

С помощью выражения (2) вычисляется в координатной системе нижней эластик ордината поверхности контакта между нижним и верхним пакетами. Отметим, что ордината указанной поверхности равна ординате точки, соответствующей значению $\varphi_2 = 90^\circ$ на нижней эластике (см. рисунок). Посредством вычитания означенной ординаты из модулярной высоты h_2 определяется высота нижних пакетов $h_{\text{н.п}}$.

Далее рассчитывается суммарная длина составляющих величины $b_{\text{о.п}}$, находящихся под криволинейными фрагментами поперечного сечения пакета нижнего яруса:

$$b_{\text{к}} = h_2 \left((2 - \sin^2 \Theta_2) K(\Theta_2) - 2E(\Theta_2) \right).$$

Путем вычитания $b_{\text{к}}$ из $b_{\text{о.п}}$ находится ширина верхней контактной поверхности нижнего пакета $b_{\text{к.п}}$.

Определяется суммарная длина криволинейных фрагментов ($l_{\text{к.н.п}}$) и длина рабочей части ($l_{\text{н.п}}$) обвязки пакета нижнего яруса:

$$l_{\text{к.н.п}} = h_2 K(\Theta_2) \sin^2 \Theta_2 ;$$

$$l_{\text{н.п}} = b_{\text{о.п}} + b_{\text{к.п}} + l_{\text{к.н.п}} .$$

Вычисляется площадь прямоугольной составляющей поперечного сечения нижнего пакета:

$$\omega_{\text{п.с}} = h_{\text{н.п}} b_{\text{к.п}}.$$

По формуле

$$\omega_2 = ((2 - \sin^2 \Theta_2) K(\Theta_2) - 2E(\Theta_2)) h_2^2$$

рассчитывается суммарная площадь двух фрагментов поперечного сечения пакета нижнего яруса, примыкающих с боков к прямоугольной составляющей. В результате суммирования $\omega_{\text{п.с}}$ и ω_2 вычисляется площадь ω рассматриваемого сечения в целом.

Значение $l_{н.п}$ сравнивается с длиной рабочей части обвязки, ранее полученной для пакета верхнего яруса, значение ω – с единицей. При сравнении по известным формулам находятся в процентах величины относительных различий, их модули суммируются. Из всех рассчитанных вариантов с различными сочетаниями Θ_2 и h_2 отбирается тот, у которого сумма модулей минимальна.

Для отобранного варианта в соответствии с выражением

$$b_{н.п.к} = h_2 \left[(2 - \sin^2 \Theta_2) (K(\Theta_2) - F(\Theta_2, 45^\circ)) - 2(E(\Theta_2) - E(\Theta_2, 45^\circ)) \right]$$

определяется суммарная ширина криволинейных фрагментов поперечного сечения пакета нижнего яруса.

Полная ширина нижнего пакета

$$b_{н.п} = b_{н.п.к} + b_{к.н.}$$

Путем деления этой ширины на высоту пакета нижнего яруса вычисляется соответствующий ему коэффициент формы $C_{н.п}$.

С использованием формулы

$$h_{б.н} = h_2 \left(1 - \sqrt{1 - \sin^2 \Theta_2 \sin^2 45^\circ} \right)$$

находится высота расположения крайних боковых точек пакетов нижнего яруса над основанием.

Затем задается очередное значение угла Θ_1 для верхней эластики и вновь выполняются вычисления по описанному выше алгоритму. Такие действия повторяются, пока не будет получено достаточное количество значений коэффициента формы для выбранного ранее диапазона.

Расчеты, описанные ниже, проводятся по отобранным вариантам. В результате суммирования высот нижних $h_{н.п}$ и верхних $h_{в.п}$ пакетов определяется высота ДПСЕ – $h_{е.с}$. Ее ширина находится из выражения

$$b_{е.с} = 2b_{п.макс},$$

где $b_{п.макс}$ – большая из $b_{н.п}$ и $b_{в.п}$ в данном варианте ширина пакета (отличается незначительно).

Путем деления $b_{е.с}$ на $h_{е.с}$ определяется коэффициент формы $C_{е.с}$ ДПСЕ в рассматриваемых условиях.

Составляющие длины рабочей части внешней обвязки и длина указанной части в целом $l_{е.с}$ вычисляются в следующей последовательности.

По формуле

$$l_{к.н.с} = h_2 \sin^2 \Theta_2 (K(\Theta_2) - F(\Theta_2, 45^\circ))$$

находится общая длина криволинейных фрагментов внешней обвязки ДПСЕ, прилегающих к пакетам нижнего яруса.

С помощью выражения

$$l_{к.в.с} = h_1 \sin^2 \Theta_1 (K(\Theta_1) - F(\Theta_1, 45^\circ))$$

вычисляется общая длина криволинейных фрагментов рассматриваемой обвязки, прилегающих к пакетам верхнего яруса.

Анализируя результаты расчетов, реализованных по приведенному алгоритму, установили, что длины прямолинейных боковых фрагментов внешней обвязки, определенные с учетом их незначительного наклона, обусловленного разницей ширины пакетов нижнего и верхнего ярусов, почти равны длинам вертикальных отрезков соответствующей высоты. Причина этого – незначительная разница ширины пакетов нижнего и верхнего ярусов. В связи

с этим боковые фрагменты обвязки ДПСЕ условно считаем вертикальными. Их общая длина вычисляется по формуле

$$l_{б.с} = 2(h_{н.п} - h_{б.н} + h_{б.в}).$$

В соответствии с уравнением

$$l_{г.с} = 2b_{п.мак}$$

находится общая длина горизонтальных фрагментов внешней обвязки ДПСЕ.

С использованием выражения

$$l_{е.с} = b_{о.п} + l_{г.с} + l_{б.с} + l_{к.н.с} + l_{к.в.с}$$

определяется длина рабочей части внешней обвязки.

Далее вычисляются значения относительных модулярных высот верхней $h_{о.1}$ и нижней $h_{о.2}$ эластик в результате деления h_1 и h_2 на $h_{в.п}$. В предполагаемых прочностных расчетах удобнее оперировать относительными модулярными высотами.

Рассчитываются относительные высота $h_{о.н.п}$ и ширина $b_{о.н.п}$ пакетов нижнего яруса:

$$h_{о.н.п} = h_{н.п}/h_{в.п};$$

$$b_{о.н.п} = b_{н.п}/b_{в.п}.$$

Этими характеристиками удобно пользоваться при сопоставлении размеров пакетов в разных ярусах. Они наглядно отражают степень деформации нижних пакетов.

Результаты исследования и их обсуждение

Реализация описанного алгоритма на компьютере и выполнение расчетов по нему позволили получить данные, по которым были подобраны аппроксимирующие выражения, предназначенные для определения основных геометрических характеристик ДПСЕ, размещенной на твердом основании.

Для вычисления удельных высоты и ширины ДПСЕ, находящейся в рассматриваемых условиях, предложены следующие уравнения:

$$h_{е.с} = 0,162C^2 - 1,10C + 3,05;$$

$$b_{е.с} = 0,709C + 1,64, \quad (6)$$

где C – коэффициент формы пакета, лежащего отдельно на твердом основании.

В случае необходимости получения более точных результатов, например при научных исследованиях, вместо зависимости (6) предлагается формула с достоверностью аппроксимации $R^2 = 0,999$:

$$b_{е.с} = -0,0463C^2 + 0,900C + 1,46.$$

Рассчитать удельную длину рабочей части внешней обвязки можно с помощью выражения

$$l_{е.с} = 0,720C + 6,98. \quad (7)$$

При необходимости получения повышенной точности результатов предлагается формула с достоверностью аппроксимации $R^2 = 0,999$:

$$l_{е.с} = 0,125C^2 + 0,188C + 7,50. \quad (8)$$

Чтобы перейти от удельных величин к абсолютным следует воспользоваться формулой (3).

Для определения абсолютной величины длины рабочей части обвязки ДПСЕ по коэффициенту формы C и высоте $H_{п.с}$ отдельно лежащего пакета предложено выражение

$$L_{е.с} = (3,795C + 3,30)H_{п.с}$$

Анализ полученных значений $h_{o,н.п}$ показал, что в отличие от плавающей ДПСЕ [5] здесь высота пакетов в нижнем ярусе меньше, чем в верхнем. Различия по высоте пакетов не превышают 6,6 %. Указанное значение имеет место в случаях формирования ДПСЕ из пакетов с большими коэффициентами формы. С уменьшением этого коэффициента снижается и рассматриваемая разница, достигая минимального значения, равного 3,0 % при коэффициенте формы 1,33. При дальнейшем уменьшении коэффициента формы разница по высоте опять возрастает, интенсивно приближаясь к максимальному значению.

Относительную высоту пакетов нижнего яруса можно вычислить по формуле

$$h_{o,н.п} = 0,0181C^2 - 0,0986C + 1,0679. \quad (9)$$

Применение этой формулы предусмотрено в основном при подготовке материалов, обеспечивающих возможность оценки прочности ДПСЕ в рассматриваемых условиях.

Большинство выше приведенных аппроксимирующих зависимостей получено для значения коэффициента $C = 1,25 \dots 3,00$. Исключением являются выражения (7) – (9), которые справедливы при $C = 1,33 \dots 3,00$. Принятая с запасом нижняя граница упомянутого ранее диапазона (1,25) для них незначительно смещена в целях предотвращения существенного ухудшения аппроксимации.

Результаты выполненных расчетов показывают, что при минимальном коэффициенте формы $C = 1,25$ пакеты в нижнем ярусе шире, чем в верхнем, на 3,8 %. Однако уже при значениях C , превышающих 1,40, различие по ширине почти отсутствует. Эта информация использована при определении рабочей длины внешней обвязки ДПСЕ.

Для $h_{o,1}$ и $h_{o,2}$ по результатам описанных расчетов получены следующие аппроксимирующие зависимости:

при $C = 1,25 \dots 1,50$

$$h_{o,1} = -32,88C^3 + 146,88C^2 - 220,22C + 112,44;$$

$$h_{o,2} = 46,59C^3 - 188,40C^2 + 246,66C - 99,50;$$

при $C = 1,50 \dots 3,00$

$$h_{o,1} = -0,351C^3 + 2,72C^2 - 7,09C + 7,32;$$

$$h_{o,2} = -0,866C^3 + 6,76C^2 - 17,85C + 18,39.$$

Эти выражения предназначены для решения вопросов, относящихся к определению прочностных характеристик ДПСЕ.

Достоверность аппроксимации R^2 всех зависимостей, представленных в статье, не менее 0,99.

С использованием физических моделей, изготовленных в масштабе 1 : 20, была выполнена проверка полученной информации.

Выводы

1. Получена система аналитических уравнений, отражающих связи между геометрическими характеристиками ДПСЕ, расположенной на твердом основании.

2. Предложен и реализован в компьютерной программе алгоритм решения этой системы численным методом.

3. Выполнены вычисления по предложенному алгоритму, результаты которых использованы для получения аппроксимирующих зависимостей, предназначенных для вычисления в инженерной практике высоты и ширины ДПСЕ, расположенной на твердом основании, длины рабочей части ее внешних обвязок. Также получены необходимые при оценке прочности ДПСЕ аппроксимирующие зависимости для определения относительных модулярных высот пакетов нижнего и верхнего ярусов и соотношения их фактических высот.

4. С использованием физических моделей экспериментально подтверждены результаты, полученные теоретически.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Вахрушев М.М. Расчет пакета лесоматериалов в гибкой обвязке, лежащего на плоскости // Лесн. журн. 1965. № 5. С. 50–59. (Изв. высш. учеб. заведений). [Vakhrushev M.M. Calculation of a Bundle of Logs in Elastic Strapping Lying on a Flat Surface. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 1965, no. 5, pp. 50–59].

2. Воробьев А.Г. О расчете по эластической теории пучков пучковых плотов для случая нахождения их на суше // Лесн. журн. 1958. № 4. С. 93–98. (Изв. высш. учеб. заведений). [Vorob'yev A.G. On the Calculation of Bundle Rafts' Bundles Placed Ashore According to the Elasticity Theory. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 1958, no. 4, pp. 93–98].

3. Журавский А.М. Справочник по эллиптическим функциям. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1941. 235 с. [Zhuravskiy A.M. *Handbook on Elliptic Functions*. Moscow, AN SSSR Publ., 1941. 235 p.]

4. Меркин Д.Р. К вопросу об определении натяжения в обвязке и формы пучка // Тр. ЛТА им. С.М. Кирова. 1961. № 96. С. 67–70. [Merkin D.R. To the Issue of Determining the Tension in a Bundle and the Bundle Form. *Trudy LTA imeni S.M. Kirova*. 1961, no. 96, pp. 67–70].

5. Посыпанов С.В. Исследование геометрических характеристик плавающей двухъярусной пакетной сплотовой единицы // Изв. СПбЛТА. 2016. Вып. 215. С. 176–191. [Posypanov S.V. Investigation of the Geometric Characteristics of a Floating Two-Storied Bundle Rafting Unit. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii* [News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy], 2016, no. 215, pp. 176–191].

6. Посыпанов С.В. Определение геометрических параметров плавающего транспортного пакета круглых лесоматериалов численным методом // Лесн. журн. 2017. № 1. С. 141–153. (Изв. высш. учеб. заведений). [Posypanov S.V. Numerical Determination of the Geometric Parameters of a Transport Floating Roundwood Bundle. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2017, no. 1, pp. 141–153]. DOI: [10.17238/issn0536-1036.2017.1.141](https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.1.141); URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/817/posypanov.pdf>

7. Реутов Ю.М. Расчеты пучков (пакетов) круглых лесоматериалов. М.: Лесн. пром-сть, 1975. 152 с. [Reutov Yu.M. Roundwood Bundles Calculations. Moscow, Lesnaya Promyshlennost' Publ., 1975. 152 p.]

8. Харитонов В.Я., Посыпанов С.В. Опыт внедрения единого транспортного пакета вместо молевого лесосплава // Лесн. журн. 2007. № 1. С. 45–52. (Изв. высш. учеб. заведений). [Kharitonov V.Ya., Posypanov S.V. Experience of Introducing Transport Package instead of Drift Floating. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2007, no. 1, pp. 45–52]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/3c6/3c66c8d06d36d7b633ef4eb67892e4d6.pdf>

9. Byrd P.F., Friedman M.D. *Handbook of Elliptic Integrals for Engineers and Scientist*. Berlin, Springer, 1971. 360 p. DOI: [10.1007/978-3-642-65138-0](https://doi.org/10.1007/978-3-642-65138-0)
10. Craig R.F. *Soil Mechanics*. London, Spon Press, 1997. 485 p.
11. Gradshteyn I.S., Ryzhik I.M. *Tables of Integrals, Series and Products*. San Diego, CA, Academic Press, 2000. 1163 p.
12. Rankine W.J.M. *A Manual of Applied Mechanics*. London, Charles Griffin and Company, 1872. 648 p.
13. Tölke F. Parameterfunktionen. *Praktische Funktionenlehre, Band 2: Theta-Funktionen und spezielle Weierstraßsche Funktionen*. Berlin, Springer, 1966, pp. 83–115. DOI: [10.1007/978-3-642-51616-0](https://doi.org/10.1007/978-3-642-51616-0)
14. Whittaker E.T., Watson G.N. *A Course in Modern Analysis*. US, Book Jungle, 2009. 620 p.
15. Zwillinger D. *Handbook of Differential Equations*. Boston, Academic Press, 1997. 801 p.

DIMENSIONAL DETERMINATION OF A TWO-STORIED PACKAGE RAFTING UNIT PLACED ON A SOLID BASEMENT

S.V. Posypanov, *Doctor of Engineering, Prof.*; ORCID: [0000-0003-0600-7089](https://orcid.org/0000-0003-0600-7089)
Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov,
Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation;
e-mail: s.posypanov@narfu.ru

Two-storied package rafting units (TPRU) are essential for implementation of the concept of environmentally friendly forest transport operation of medium and small rivers' system, which provides commercial accessibility of wood raw materials from the remote forest areas of Russia, and sustainable use of resources. The use of TPRU implies the need of engineering calculations, for instance, to substantiate their dimensions in case of the units formation on a solid basement (at log storage area). Selection of dimensions should be sufficient for the correct assessment of their structural behavior. An additional study, the purpose of which is to obtain dependences for determination of dimensions of TPRU, was proposed to conduct as a result of the literature data analysis. The research method is theoretical. The packages were considered as weightless flexible shells filled up with one type of loose medium. We have validated the capability of use the second order parametric equations of elastics with no inflexion point for describing cross-section of packages. A system of equations that connect the desired dimensions is derived. The analytical solution of the obtained system turned out to be impracticable. A computer algorithm for solving the numerical method was developed and implemented. The calculations were performed by operating with specific characteristics corresponding to the unit area of a separate package. The dependences of specific dimensions of TPRU placed on a solid basement on the shape factor of a separately lying package were obtained by approximating the calculation results. Transition to the absolute values of height, width, and length of the rafting units and the working section length of the external strapping is provided by multiplying the specific characteristics by the square root of the package cross-sectional area. An approximating equation is also obtained for calculating the absolute value of the working part length of the external strapping by the shape factor and the height of a separately lying package. The approximating dependencies, which allow to determine by the shape factor of a detached package the position of the zero pressure surfaces of a loose medium for lower and upper packages, as well as correlation between the heights of the mentioned packages, were proposed to resolve the issues related to the strength characteristics of a rafting unit under the considered conditions. The determination coefficients of the suggested approximating dependencies have values not less than

0.99. The theoretic data reliability is confirmed by the experimental technique applying the physical models.

For citation: Posypanov S.V. Dimensional Determination of a Two-Storeyed Package Rafting Unit Placed on a Solid Basement. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 5, pp.135–147. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.135

Keywords: timber rafting, timber, package, rafting unit, dimensions of hauling units, strapping, elastic, solution algorithm, physical model.

Поступила 18.01.19 / Received on January 18, 2019
