

УДК 634.378

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.1.141

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАВАЮЩЕГО ТРАНСПОРТНОГО ПАКЕТА КРУГЛЫХ ЛЕСОМАТЕРИАЛОВ ЧИСЛЕННЫМ МЕТОДОМ

С.В. Посыпанов, канд. техн. наук, доц.

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

Применение предложенных нами пакетных двухъярусных сплоченных единиц создает предпосылки для эффективного экологичного лесотранспорта по средним и малым рекам, обеспечивает возможность использования преимуществ водного транспорта даже небольшими лесозаготовительными предприятиями. Геометрические и прочностные параметры этих единиц зависят от геометрических характеристик составляющих их пакетов, в том числе и при нахождении их на плаву. Известные методики определения указанных характеристик плавающих пакетов в существующем виде не позволяют получать результаты с точностью, приемлемой для научных исследований, и не могут быть применены к двухъярусным сплоченным единицам. С использованием эластиковой теории из параметрических уравнений гибких оболочек, заполненных сыпучей средой, получили замкнутую, ориентированную на численное решение, систему уравнений для точного определения геометрических параметров плавающего пакета. Его обвязку рассматривали как комбинацию двух кривых: подводной и надводной. Каждая из них – фрагмент бесперегибной эластики второго рода. Предполагалось, что конфигурация комбинированной оболочки формируется под давлением двух несмешивающихся видов сыпучей среды разной плотности. Граница между средами проходит по поверхности воды. В связи с невозможностью аналитического и недостаточной точностью и неудобством в применении графического решений применили численный метод. Разработали алгоритм точного определения геометрических параметров плавающего пакета численным методом, ориентированный на использование при последующей доработке применительно к двухъярусным пакетным сплоченным единицам. Реализовали его на персональном компьютере. Выполнили расчеты по разработанному алгоритму для диапазонов факторов, встречающихся на практике. Для уменьшения объема вычислений задачу привели к безразмерному виду. Используя результаты вычислений, подобрали аппроксимирующие зависимости, которые, кроме предложенного численного метода, при несколько меньших требованиях к точности можно применять для определения рассматриваемых характеристик в научных исследованиях и практических расчетах. Выполнили экспериментальную проверку на физических моделях, в результате которой убедились в достоверности полученных результатов.

Для цитирования: Посыпанов С.В. Определение геометрических параметров плавающего транспортного пакета круглых лесоматериалов численным методом // Лесн. журн. 2017. № 1. С. 141–153. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.1.141

Ключевые слова: лесосплав, лесоматериалы, пакет, сплоточная единица, эластика, геометрические параметры, численный метод.

Введение

Сравнительно недавно появился новый вид сплоточных единиц – пакетные двухярусные пучки (рис. 1). Их применение создает предпосылки для эффективного экологически щадящего лесотранспорта по средним и малым рекам, а также предоставляет возможность воспользоваться преимуществами водного транспорта даже небольшим лесозаготовителям [6, 8]. Хотя указанные сплоточные единицы уже начали внедряться в производство [8], их характеристики еще исследуются. В данной статье рассмотрены геометрические параметры, которые важны сами по себе, при этом еще определяются прочностные характеристики сплоточных единиц. Упомянутая сплоточная единица состоит из четырех пакетов, уложенных в два яруса. Очевидно, что ее параметры зависят от характеристик составляющих ее пакетов. Предпочтительно, чтобы при определении параметров пакетов и сплоточных единиц использовались аналогичными методами. Информация должна быть достаточно точной, так как ее применение предполагается в научных исследованиях. С учетом изложенного отметим, что основная часть работ, посвященных исследованию пакетов или пучков круглых лесоматериалов, представляет для нас лишь косвенный интерес, поскольку в них изначально форму поперечного сечения пакета принимали аналогичной одной из простейших геометрических фигур, чаще эллипсу или овалу. При произвольном выборе формы указанного сечения нельзя ожидать высокой точности определения его геометрических параметров и, что не менее важно, нельзя получить корректные теоретические решения по установлению прочностных характеристик пакета. Кроме того, имеется в виду, что во время укладки в сплоточную единицу пакет деформируется, и его поперечное сечение еще более отличается от упомянутых фигур.

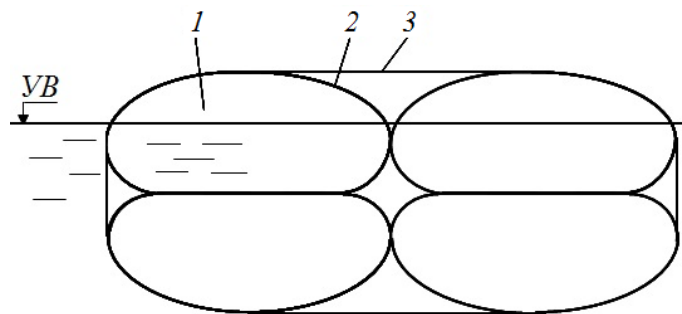


Рис. 1. Схема пакетного двухярусного пучка круглых лесоматериалов: 1 – пакет; 2 – обвязка пакета; 3 – внешняя обвязка пучка (УВ – уровень воды)

Получение более точных геометрических параметров пакетов предполагается при определении реальной формы их поперечного сечения в результате решения дифференциального уравнения равновесия их обвязок. Основанную на этом теорию называют эластиковой [2]. До настоящего времени ее использование можно считать удачным только применительно к пакету, уложенному на горизонтальное основание. В результате выполнения ряда работ (с их постепенным совершенствованием для указанного случая) удалось получить аналитическое решение и удобные в практическом применении аппроксимирующие зависимости для достаточно точного определения геометрических характеристик пакетов [7]. Определенный вклад в это внесен и нами [5].

Исследования по определению геометрических характеристик плавающих пакетов с использованием эластиковой теории [1, 3] немногочисленны и менее успешны. Вероятно, это объясняется сложностью задачи. Авторы указанных работ, отметив проблематичность аналитического решения, прибегли к графическим методам. При этом было предложено в каждом конкретном случае строить целый ряд графиков [3] или использовать готовый комплект довольно сложных в применении номограмм [1], корректность которых вызвала у нас определенные сомнения, подтвердившиеся в процессе дальнейших исследований. Упомянутые графические методы не только неудобны в применении, но и не обеспечивают необходимой точности.

Изложенные факты и обусловили потребность в данной работе.

Цель исследования – разработка алгоритма численного решения системы аналитических выражений, обеспечивающего точное определение геометрических параметров плавающего пакета круглых лесоматериалов, и получение аппроксимирующих зависимостей для менее трудоемкого расчета указанных характеристик.

Объекты и методы исследований

Нами был принят теоретический метод исследования с последующей экспериментальной проверкой результатов.

В связи с необходимостью получения точных результатов и обеспечения возможности корректного теоретического решения вопросов прочности была использована эластиковая теория. Выяснив, что предложенная система уравнений является замкнутой, но не решаемой аналитически, сочли наиболее целесообразным применить численный метод, обеспечивающий высокую точность результатов.

Плавающий пакет круглых лесоматериалов (рис. 2) рассматривали как гибкую невесомую оболочку, заполненную двумя несмешивающимися видами «пакетной среды». Граница между ними проходит по поверхности воды. Плотность среды в надводной части

$$\rho_n = \rho_l \eta, \quad (1)$$

в подводной

$$\rho_{\Pi} = (\rho - \rho_{\text{л}}) \eta, \quad (2)$$

где $\rho_{\text{л}}$ – плотность лесоматериалов;

ρ – плотность воды;

η – коэффициент полнодревесности пакета.

Надводная часть пакета находится под действием силы тяжести, на подводную часть, кроме силы тяжести, действует еще и сила Архимеда. Результирующая сила подводной части направлена вертикально вверх, т. е. навстречу силе надводной части. Указанные силы вызывают вертикальное сжатие пакета, что приводит к возникновению горизонтальных сил распора, уравновешиваемых реакциями оболочки.

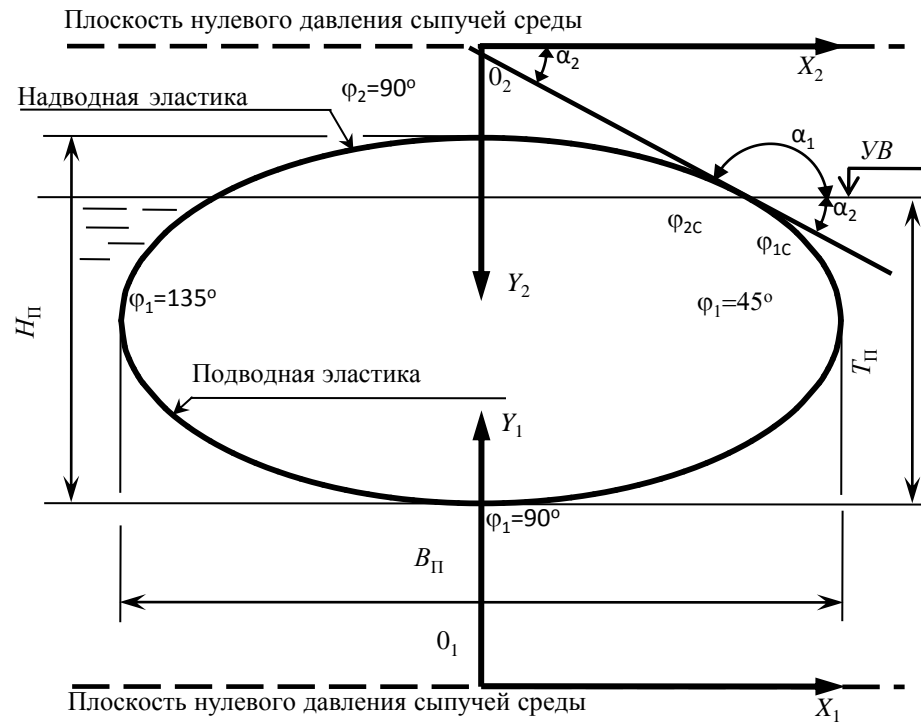


Рис. 2. Расчетная схема плавающего пакета

Обвязку пакета рассматривали как комбинацию двух кривых: подводной и надводной. Каждая из них является фрагментом бесперегибной эластички второго рода. Впервые такие кривые были описаны еще Л. Эйлером. Подводную эластичку рассматривали в системе координат $X_1O_1Y_1$, надводную – в $X_2O_2Y_2$. Точки отсчета систем координат O_1 и O_2 расположены соответственно в подводной и надводной плоскостях нулевого давления «пакетных сред».

При подобных исследованиях пакетов круглых лесоматериалов, размещенных на горизонтальном основании, установлено, что силы внутреннего трения сыпучей среды, существенно сказываясь на силовых характеристиках, практически не влияют на геометрические параметры в диапазоне углов внутреннего трения, характерных для круглых лесоматериалов [7]. При этом формы гибких оболочек, заполненных сыпучей средой [10] и жидкостью такой же плотности, при прочих равных условиях практически не отличаются, что несколько упрощает задачу. В таких случаях можно использовать параметрические уравнения бесперегибных эластиков второго рода в указанных системах координат, полученные еще в XIX в. Беером и Рэнкиным [11]:

$$x_i = \frac{1}{4} H_i f_i; \quad (3)$$

$$y_i = H_i \Delta_i, \quad (4)$$

где

x_i и y_i – абсцисса и ордината данной точки i -й элаستيку;

i – номер элаستيку, для подводной – $i = 1$, для надводной – $i = 2$;

H_i – характерная высота;

$$f_i = f(\Theta_i, \varphi_i) = 2 \left[(2 - \sin^2 \Theta_i) (K(\Theta_i) - F(\Theta_i, \varphi_i)) - 2(E(\Theta_i) - E(\Theta_i, \varphi_i)) \right]; \quad (5)$$

Θ_i – модулярный угол;

φ_i – параметр элаستيку [2];

$K(\Theta_i)$ и $F(\Theta_i, \varphi_i)$; $E(\Theta_i)$ и $E(\Theta_i, \varphi_i)$ – полный и неполный эллиптические интегралы соответственно первого и второго рода [4, 9, 12]:

$$\Delta_i = \Delta(\Theta_i, \varphi_i) = \sqrt{1 - \sin^2 \Theta_i \sin^2 \varphi_i}; \quad (6)$$

Модулярный угол определяет форму элаستيку. Характерная высота H_i задает размер полной элаستيку. Она равна расстоянию по вертикали от основания полной элаستيку до ее плоскости нулевого давления. Указанные величины постоянны для данной кривой. Параметр φ_i меняется вдоль кривой полной элаستيку от 0° до 180° . На рис. 2 указаны только некоторые характерные значения углов φ_i , поскольку на нем изображены лишь фрагменты эластик. Основанием элаستيку в данном случае является горизонтальная прямая, проходящая через точки кривой, соответствующие углам φ_i : 0° и 180° .

Используя приведенные параметрические уравнения, получаем ряд математических выражений для геометрических характеристик поперечного сечения плавающего пакета. Приводим лишь те из них (в совокупности с сопутствующими формулами), которые потребовались нам в описываемых расчетах. На рис. 2 видно, что ширина пакета равна удвоенной абсциссе точки нижней элаستيку, соответствующей углу $\varphi_1 = 45^\circ$. С учетом (3) и (5) запишем:

$$B_{\Pi} = H_1 \left[(2 - \sin^2 \Theta_1) (K(\Theta_1) - F(\Theta_1, 45^\circ)) - 2(E(\Theta_1) - E(\Theta_1, 45^\circ)) \right]; \quad (7)$$

Осадка пакета T_{Π} равна разности ординат точек нижней элаستيку с параметрами 90° и φ_{1C} . Точка, соответствующая углу φ_{1C} , находится на поверхности воды. В ней происходит сопряжение нижней и верхней эластик. Таким образом, в соответствии с формулами (4) и (6):

$$T_{\Pi} = H_1 \left(\sqrt{1 - \sin^2 \Theta_1} \sin^2 \varphi_{1C} - \sqrt{1 - \sin^2 \Theta_1} \right). \quad (8)$$

На основании аналогичных рассуждений для верхней элаستيку получим формулу для нахождения высоты надводной части пакета:

$$H_{\Pi} = H_2 \left(\sqrt{1 - \sin^2 \Theta_2} \sin^2 \varphi_{2C} - \sqrt{1 - \sin^2 \Theta_2} \right), \quad (9)$$

где φ_{2C} – параметр верхней элаستيку в точке сопряжения кривых.

Определим:

высоту пакета

$$H_{\Pi} = T_{\Pi} + H_{\Pi}; \quad (10)$$

коэффициент формы пакета

$$C = \frac{B_{\Pi}}{H_{\Pi}}; \quad (11)$$

коэффициент непропорциональности между высотой и осадкой пакета

$$\zeta = \frac{T_{\Pi}}{H_{\Pi} \rho_0}, \quad (12)$$

где ρ_0 – относительная плотность лесоматериалов,

$$\rho_0 = \frac{\rho_{\text{л}}}{\rho}. \quad (13)$$

Использование параметрических уравнений (3), (4) и известных в математике приемов [12] позволило получить формулы для вычисления площади сегмента элаستيку (14) и соответствующей ему длины дуги (15). Ниже приведены эти формулы для сегментов, ограниченных соответствующей эластикой и поверхностью воды:

$$\omega_i = 0,5 H_i^2 \left(f(\Theta_i, \varphi_{iC}) \Delta(\Theta_i, \varphi_{iC}) - \sin^2 \Theta_i \sin^2 \varphi_{iC} \right); \quad (14)$$

$$L_i = H_i \left(K(\Theta_i) - F(\Theta_i, \varphi_{iC}) \right) \sin^2 \Theta_i. \quad (15)$$

Очевидно, что площадь поперечного сечения пакета

$$\omega = \omega_1 + \omega_2. \quad (16)$$

Периметр этого сечения (или рабочая длина обвязки)

$$L_{\text{р.об}} = L_1 + L_2. \quad (17)$$

В точках сопряжения касательные к нижней эластикой должны быть таковыми, как и к верхней (рис. 2). Определение dy_i/dx_i из свойств касательных и формул (3) и (4) позволило установить зависимость между параметрами φ_{1C} и φ_{2C} :

$$\varphi_{2C} = 90^\circ - \varphi_{1C}. \quad (18)$$

При реализации численного метода определение эллиптических интегралов с помощью таблиц связано с некоторыми неудобствами. Кроме того, при промежуточных значениях модулярного угла и параметра эллиптического интеграла линейная интерполяция в данном случае приводит к существенным погрешностям. В связи с этим указанные интегралы вычисляли с помощью различных рядов [4, 9]. Например, для определения значений неполных эллиптических интегралов первого рода использовали следующий ряд:

$$F(\varphi, k) = A_0 + \frac{1}{2} A_1 k^2 + \frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4} A_2 k^4 + \frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6} A_3 k^6 \dots, \quad (19)$$

где k – модуль эллиптического интеграла,

$$k = \sin \Theta; \quad (20)$$

$$A_0 = \varphi; \quad (21)$$

A_n – коэффициент, определяемый по рекуррентной формуле

$$A_n = \frac{2n-1}{2n} A_{n-1} - \frac{1}{2n} \cos \varphi \sin^{2n-1} \varphi; \quad (22)$$

$n = 0, 1, 2, \dots$

Для уменьшения объема вычислений задачу привели к безразмерному виду. Расчеты выполняли для единичной площади поперечного сечения пакета. Безразмерные линейные характеристики пакета связаны с соответствующими размерными параметрами выражением

$$z = \frac{Z}{\sqrt{\omega}}, \quad (23)$$

где z и Z – соответственно безразмерная (или относительная) и размерная линейные характеристики.

В результате анализа установили, что теоретически форма поперечного сечения плавающего пакета круглых лесоматериалов в отличие от лежащего на горизонтальном основании определяется не только его коэффициентом формы или соотношением площади указанного сечения и рабочей длины обвязок, но и относительной плотностью лесоматериалов. Однако в рассматриваемых расчетах коэффициент формы, как и означенное соотношение, являются выходными величинами. При выполнении этих расчетов форма поперечного сечения пакета определяется модулярными углами эллипсов Θ_1 , Θ_2 и параметром одной из них, например φ_{1C} , в точке сопряжения. Соотношение между Θ_1 и соответствующим сочетанием Θ_2 и φ_{1C} зависит от ρ_0 . Размер сечения может быть задан его площадью или одной из линейных характеристик.

Для реализации численного метода решения данной задачи был разработан следующий алгоритм. В начале задавали относительную плотность лесоматериалов ρ_0 , которую варьировали в диапазоне 0,65...0,90 с интервалом 0,05. Согласно закону Архимеда при единичной площади ω площадь подводной части сечения $\omega_1 = \rho_0$, соответствующая ей надводная площадь

$$\omega_2 = 1 - \omega_1. \quad (24)$$

Далее задавали модулярный угол Θ_1 для подводной элаستي, начиная с 55° . Максимальное значение этого угла $88,7^\circ$. При принятом угле Θ_1 задавали различные сочетания φ_{1C} и Θ_2 . Параметр φ_{1C} варьировал в диапазоне $18 \dots 38^\circ$, угол $\Theta_2 - 65 \dots 90^\circ$. Шаг изменения этих величин может меняться в зависимости от требуемой точности вычислений. Соответствующее данному φ_{1C} значение φ_{2C} определяли по формуле (18). По ω_i , Θ_i и φ_{iC} вычисляли характерные высоты для подводной и надводной эластик с помощью выражения, полученного из (14):

$$H_i = \sqrt{\frac{2\omega_i}{f(\Theta_i, \varphi_{iC})\Delta(\Theta_i, \varphi_{iC}) - \sin^2 \Theta_i \sin^2 \varphi_{iC}}}. \quad (25)$$

Абсциссы обеих эластик в точках сопряжения должны быть одинаковыми, т. е. в соответствии с (3) должно выполняться равенство

$$H_1 f(\Theta_1, \varphi_{1C}) = H_2 f(\Theta_2, \varphi_{2C}). \quad (26)$$

Кроме того, принимали к сведению, что вертикальное давление в точках надводной части пакета может быть определено по формуле

$$P_H = \rho_H g y_H, \quad (27)$$

в подводной –

$$P_{II} = \rho_{II} g y_{II}. \quad (28)$$

где g – ускорение свободного падения;

y_H и y_{II} – ординаты точек соответственно в системах координат $X_2O_2Y_2$ и $X_1O_1Y_1$.

Давления сыпучей среды сверху и снизу в любой ее точке (в том числе на уровне поверхности воды) равны между собой, т. е. в соответствии с (1), (2), (4), (6), (27), (28) должно выполняться равенство

$$H_1(\rho - \rho_{л})\sqrt{1 - \sin^2 \Theta_1 \sin^2 \varphi_{1C}} = H_2 \rho_{л}\sqrt{1 - \sin^2 \Theta_2 \sin^2 \varphi_{2C}}. \quad (29)$$

При расчетах выбор останавливали на том сочетании φ_{1C} и Θ_2 , при котором условия (26) и (29) выполнялись с наибольшей точностью.

Для заданных ρ_0 и Θ_1 , подобранных φ_{1C} , Θ_2 и соответствующих им φ_{2C} , H_1 , H_2 вычисляли с использованием формул (4), (6), (7)–(12), (15), (17) представленные в их левой части геометрические характеристики. Далее увеличивали Θ_1 и все расчеты повторяли, действуя так до тех пор, пока коэффициент формы пакета C не становился больше максимально допустимого значения, равного 3. Затем задавали следующее значение относительной плотности лесоматериалов ρ_0 и действовали аналогично. Расчеты прекращали после прохождения всего диапазона ρ_0 .

Результаты и их обсуждение

Вычисления по предложенному методу рекомендуются при необходимости иметь точные результаты. Кроме того, нами получен ряд сочетаний ρ_0 и C , определяющих форму плавающего пакета, и соответствующие им значения

его ширины b_{Π} , осадки t_{Π} , высоты h_{Π} , рабочей длины обвязки $l_{p,OB}$ при единичной площади поперечного сечения пакета, а также значения коэффициента непропорциональности между его высотой и осадкой ζ , отношения превышения поверхности воды над нижней плоскостью нулевого давления сыпучей среды к указанной осадке h_r . Для рабочей длины обвязки и площади поперечного сечения пакета выполнен перерасчет с единичной площади на единичную высоту, в результате чего получены соответствующие значения длин $l_{p,OB h}$ и площадей ω_h при высоте пакета, равной 1. На основании этих данных подобраны соответствующие аппроксимирующие выражения.

Аппроксимация двухфакторных зависимостей от ρ_0 и C не позволяет получать результаты с высокой точностью. Поэтому для научных целей подобраны аппроксимирующие зависимости от C при различных значениях ρ_0 . Достоверность аппроксимации R^2 у полученных выражений не менее 0,999. Анализ показал, что влияние ρ_0 на вычисляемые величины очень незначительно. Установлено, что уменьшение ρ_0 от 0,80 до 0,65 или увеличение до 0,90 (при прочих равных условиях) в диапазоне $C = 1,25 \dots 3,00$ приводит к изменению h_r не более, чем на 4,2 %, ζ – на 1,6 %, ω_h – на 1,2 %, $l_{p,OB h}$ – на 0,8 %, $l_{p,OB}$ – на 0,3 %, h_{Π} и соответственно b_{Π} – на 0,6 %. Для случаев, когда такие погрешности приемлемы для всего диапазона ρ_0 (0,65...0,90) нами рекомендованы несколько упрощенные формулы соответствующей точности, полученные при обычно используемом значении $\rho_0 = 0,8$.

Для озерных условий при $C = 1,25 \dots 1,50$:

$$h_r = -13,36C^3 + 74,56C^2 - 114,48C + 60,63; \quad (30)$$

для речных условий при $C = 1,60 \dots 3,00$:

$$h_r = -0,18C^3 + 1,45C^2 - 3,95C + 4,72; \quad (31)$$

на всем диапазоне $C = 1,25 \dots 3,00$:

$$H_{\Pi} = 1,137C^{-0,543} \sqrt{\omega}; \quad (32)$$

$$L_{p,OB} = (0,030C^2 + 0,302C + 3,152) \sqrt{\omega}; \quad (33)$$

$$L_{p,OB} = (1,91C + 1,15)H_{\Pi}; \quad (34)$$

$$\omega = (0,895C - 0,141)H_{\Pi}; \quad (35)$$

$$\zeta = -0,013C^2 + 0,082C + 0,864. \quad (36)$$

Заметим, что ω связана с объемом лесоматериалов в пакете V_{Π} следующим выражением:

$$\omega = \frac{V_{\Pi}}{L\eta}, \quad (37)$$

где L – длина пакета.

Сравнение результатов расчетов, полученных численным методом с помощью эластиковой теории и с помощью наиболее часто используемых формул, предполагающих аналогию поперечного сечения плавающего пакета с эллипсом, показало, что различия между ними возрастают с увеличением коэффициента формы C . По некоторым характеристикам при больших C указанные различия существенны даже для практических расчетов. При упомянутой аналогии с эллипсом в диапазоне $C = 2,5 \dots 3,0$ рабочая длина обвязки, например, занижается на 7...9 %, площадь поперечного сечения пакета, а значит, и его объем – на 6...8 %, коэффициент непропорциональности ζ , а следовательно, и осадка – примерно на 5 %, что тоже может быть значимым в условиях малых и средних рек. Достоверность полученных нами результатов подтверждена экспериментально на модельных сплотовых единицах, выполненных в масштабе 1:20. Критериями подобия при моделировании являлись факторы C и ρ_0 .

Более существенно то, что предлагаемые разработки позволяют определить положение плоскостей нулевого давления сыпучей среды, без чего попытки теоретического определения прочностных характеристик рассматриваемого пакета являются несостоятельными. Наиболее точно это можно сделать описанным численным методом, с несколько меньшей точностью – с помощью формул (12), (13), (27), (28), а также (30), (31), (32), (36) или их более точных аналогов, полученных для различных ρ_0 .

Не менее важно, что разработанный и апробированный алгоритм точного определения геометрических параметров плавающего пакета численным методом может быть использован (при некоторой доработке) применительно к двухрусным сплотовым единицам для решения подобных задач, в которых упомянутая аналогия с эллипсом неприемлема, как было отмечено, хотя бы из-за деформации пакетов в такой сплотовой единице.

Заключение

На основе приведенной системы аналитических выражений разработан алгоритм численного метода определения геометрических характеристик плавающего пакета круглых лесоматериалов, обеспечивающий высокую точность вычислений. На основании результатов выполненных расчетов получены аппроксимирующие зависимости, позволяющие при менее высоких требованиях к точности определять указанные характеристики наиболее простым способом. Достоверность результатов теоретических разработок подтверждена экспериментально.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вальков Ю.И. Определение длины обвязки пучка // Лесн. журн. 1966. № 2. С. 21–25. (Изв. высш. учеб. заведений).

2. Воробьев А.Г. О расчете по эластиковой теории пучков пучковых плотов для случая нахождения их на суше // Лесн. журн. 1958. № 4. С. 93–98. (Изв. высш. учеб. заведений).
3. Воробьев А.Г. О расчете по эластиковой теории сигар и пучков пучковых плотов для случая нахождения их наплаву // Лесн. журн. 1958. № 6. С. 93–105. (Изв. высш. учеб. заведений).
4. Журавский А.М. Справочник по эллиптическим функциям. М.; Л: АН СССР, 1941. 235 с.
5. Посыпанов С.В. Комбинированный метод расчета пакета круглых лесоматериалов, уложенного на горизонтальном основании // Лесн. журн. 2011. № 1. С. 47–52. (Изв. высш. учеб. заведений).
6. Посыпанов С.В. Экологические и экономические аспекты транспорта древесины из удаленных лесных массивов // Эколого- и ресурсосберегающие технологии и системы в лесном и сельском хозяйстве: сб. науч. тр. по материалам междунар. заоч. науч.-практ. конф. Вып. № 3, ч. 4 (8–4). Воронеж: ВГЛТА, 2014. С. 135–139.
7. Реутов Ю.М. Расчеты пучков (пакетов) круглых лесоматериалов. М.: Лесн. пром-сть, 1975. 152 с.
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).
9. Byrd P.F., Friedman M.D. *Handbook of Elliptic Integrals for Engineers and Scientists*. New York; Heidelberg; Berlin, 1971, vol. 67. 360 p.
10. Craig R.F. *Soil Mechanics*. London; New York, 1997. 485 p.
11. Rankine W.J.M. *A Manual of Applied Mechanics*. London, 1858. 680 p.
12. Whittaker E.T., Watson G.N. *A Course of Modern Analysis*. UK, Cambridge, 2009. 620 p.

Поступила 16.11.16

UDC 634.378

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.1.141

Numerical Determination of the Geometric Parameters of a Transport Floating Roundwood Bundle

S.V. Posypanov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor
Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya
Severnaya Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation;
e-mail: s.posypanov@narfu.ru

The use of proposed packaged bilevel rafting units creates prerequisites for efficient, environmentally friendly transportation of forest products along the minor and small rivers, for

For citation: Posypanov S.V. Numerical Determination of the Geometric Parameters of Transport Floating Roundwood Bundle. *Lesnoy zhurnal*, 2017, no. 1, pp. 141–153. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.1.141

the use of water transport advantages even by the small logging companies. Geometric and strength parameters of these units depend on the geometric characteristics of their bundles, including the bundles being afloat. The known methods for determining these characteristics of rafting units in their current form do not provide the results with accuracy, acceptable to the scientific research, and cannot be applied to the bilevel rafting units. The closed equation system, focused on the numerical solution, for the accurate determination of the geometric parameters of a floating bundle is obtained with the use of the elastic theory from the parametric equations of flexible shells filled with a granular medium. Its binding is considered as a combination of underwater and surface curves. Each of them is a fragment of non-inflexive second order elasticity. The configuration of the combined shell is considered to be formed under the pressure of two immiscible types of a granular medium of different density. The boundary between the media passes over the water surface. Due to the unsatisfactory results of the analytical and graphical methods, the numerical method is applied. The algorithm for the exact geometric parameters determination of a float unit by the numerical method adjusted for bilevel rafting units is developed. It is implemented on PC. The calculations by the developed algorithm for the factor ranges, encountered in practice, are carried out within the practical data span in the dimensionless form. Using the results of calculations, we develop the approximating dependences, which in addition to the proposed numerical method, with the lower accuracy requirements can be used to determine the considered characteristics for theoretical investigations and practical activities. The reliability of the results is proved via the physical models experiments.

Keywords: timber rafting, timber, bundle, float unit, elastic, geometric parameter, numerical method.

REFERENCES

1. Val'kov Yu.I. Opredelenie dliny obvyazki puchka [Bundle Strapping Length Determination]. *Lesnoy zhurnal*, 1966, no. 2, pp. 21–25.
2. Vorob'ev A.G. O raschete po elastikovoy teorii puchkov puchkovykh plotov dlya sluchaya nakhozheniya ikh na sushe [Application of the Elastic Theory in the Bundle Rafts Bundles Calculation in Case of Finding Them on Land]. *Lesnoy zhurnal*, 1958, no. 4, pp. 93–98.
3. Vorob'ev A.G. O raschete po elastikovoy teorii sigar i puchkov puchkovykh plotov dlya sluchaya nakhozheniya ikh naplavu [Application of the Elastic Theory in the Floating Cigars and Bundle Rafts Bundles Calculation]. *Lesnoy zhurnal*, 1958, no. 6, pp. 93–105.
4. Zhuravskiy A.M. *Spravochnik po ellipticheskim funktsiyam* [Elliptical Functions Reference]. Moscow; Leningrad, 1941. 235 p.
5. Posypanov S.V. Kombinirovanny metod rascheta paketa kruglykh lesomaterialov, ulozhennogo na gorizonta'nom osnovanii [Combined Calculating Method of Round Timber Pile Stacked on Horizontal Foundation]. *Lesnoy zhurnal*, 2011, no. 1, pp. 47–52.
6. Posypanov S.V. Ekologicheskie i ekonomicheskie aspekty transporta drevesiny iz udalennykh lesnykh massivov [Ecological and Economic Aspects of Forest Products Transportation from the Remote Woodlands]. *Ekologo- i resursoberegayushchie tekhnologii i sistemy v lesnom i sel'skom khozyaystve: sb. nauch. tr. po materialam mezhdunar. zaoch. nauch.-prakt. konf.* [Ecological and Resource-Saving Technologies and Systems in Forestry

and Agriculture: Proc. Intern. Sci. Prac. Conf. with Virtual Participation. Iss. 3, part 4 (8–4)]. Voronezh, 2014, pp. 135–139.

7. Reutov Yu.M. *Raschety puchkov (paketov) kruglykh lesomaterialov* [Roundwood Bundles Calculations]. Moscow, 1975. 152 p.

8. Kharitonov V.Ya., Posypanov S.V. Opyt vnedreniya edinogo transportnogo paketa vmesto molevogo lesosplava [Experience of Introducing Transport Package instead of Drift Floating]. *Lesnoy zhurnal*, 2007, no. 1, pp. 45–52.

9. Byrd P.F., Friedman M.D. *Handbook of Elliptic Integrals for Engineers and Scientists*. New York; Heidelberg; Berlin, 1971, vol. 67. 360 p.

10. Craig R.F. *Soil Mechanics*. London; New York, 1997. 485 p.

11. Rankine W.J.M. *A Manual of Applied Mechanics*. London, 1858. 680 p.

12. Whittaker E.T., Watson G.N. *A Course of Modern Analysis*. UK, Cambridge, 2009. 620 p.

Received on November 16, 2016