

ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ ЛЕСНОГО ДЕЛА

УДК 630*378

DOI: 10.15350/2306-2827.2016.2.61

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ДВУХЪЯРУСНОЙ ПАКЕТНОЙ СПЛОТОЧНОЙ ЕДИНИЦЫ

С. В. Посыпанов

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова,
Лесотехнический институт,
Российская Федерация, 163002, Архангельск, Набережная Северной Двины, 17
E-mail: s.posypanov@narfu.ru

Предложены критерии для комплексной оценки продольной прочности двухъярусных пакетных сплottedных единиц. Выявлены факторы, определяющие эту прочность, получены формулы для вычисления указанных критериев, оценён характер и степень влияния определяющих факторов на критерии. Представлены графики для упрощения практических расчётов. Оценены различия продольной прочности отдельных пакетов и размещённых в том или ином ярусе, даны рекомендации по размещению пакетов в сплottedной единице.

Ключевые слова: лесосплав; вода; круглые лесоматериалы; пакет; пучок; сплottedная единица; обвязка; прочность; эластичность; сыпучая среда.

Введение. Использование двухъярусных пакетных сплottedных единиц позволяет эффективно организовать экологически щадящий малозатратный транспорт круглых лесоматериалов [1, 2] по малым и средним рекам. При его реализации после прохождения мелководных участков маршрута малогабаритные пакеты с высокой производительностью сплавиваются в двухъярусные пучки для обеспечения экономичности дальнейшей буксировки.

Пакетные технологии при береговой сплотке открывают возможности по использованию преимуществ водного транспорта леса [1, 2] и небольшим лесозаготовителям, поскольку позволяют

формировать плоты без использования узкоспециализированной техники, не окупающейся при малых объёмах работ. У указанных технологий имеется ещё ряд достоинств, более подробную информацию о которых можно найти в работе [3]. Обозначенные достоинства способствовали внедрению двухъярусных пакетных сплottedных единиц [3, 4].

Требования экологической безопасности, стремление исключить потери древесины при транспортировке придают особую значимость вопросам прочности лесотранспортных единиц и, в частности, двухъярусных пакетных пучков. Часть обозначенных вопросов, связанную с

© Посыпанов С. В., 2016.

Для цитирования: Посыпанов С. В. Исследование продольной прочности двухъярусной пакетной сплottedной единицы // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2016. № 2 (30). С. 61–73. DOI: 10.15350/2306-2827.2016.2.61

прочностью такелажной оснастки указанных сплоченных единиц, мы рассмотрели ранее [5]. Однако прочность сплоченных единиц предполагает не только прочность их такелажа, но и сохранение их формы. При транспортировке в результате волнения водной поверхности, взаимодействий сплоченных единиц друг с другом, с береговыми откосами, дном водоёма, механизмами, наплавными сооружениями возможны продольные смещения лесоматериалов относительно друг друга и относительно обвязок, что приводит к нарушению формы, а иногда и нарушению целостности сплоченных единиц. Для краткости способность сплоченной единицы противостоять указанным продольным смещениям мы решили назвать её продольной прочностью, прочность сплоченного такелажа – поперечной.

В результате информационного поиска нами обнаружено достаточно большое количество работ, связанных с прочностью сплоченных единиц [6–12], но в основном они посвящены изучению пакетов или обычных пучков круглых лесоматериалов. В указанных работах внимание акцентировано преимущественно на прочности такелажа.

Свойство, именованное нами продольной прочностью сплоченной единицы, принято обычно называть её волноустойчивостью [5]. Однако заметим, что волнение водной поверхности – это лишь один из возможных, перечисленных выше факторов, которые могут привести к продольной деформации сплоченной единицы, выплыванию из неё лесоматериалов при сохранении целостности такелажа. Волноустойчивость, или продольную прочность лесосплавного пучка, принято характеризовать его коэффициентом формы C , который равен отношению ширины сплоченной единицы к её высоте. Меньшее значение C соответствует большей волноустойчивости. При этом в случае транспортировки сплоченных единиц в условиях повышенной трудности, в том

числе на средних и малых реках, где волнение весьма незначительно, обычно назначают небольшие коэффициенты формы. Это связано с тем, что от коэффициента формы в действительности зависит именно продольная прочность сплоченной единицы, частным случаем которой является волноустойчивость.

В литературе мы не нашли прямых указаний на то, что плотность лесоматериалов влияет на волноустойчивость пучков, а тем более на их продольную прочность. Тем не менее этот фактор в случае значительного его варьирования обычно учитывают при нормировании коэффициента C . Например, в технических условиях для одного и того же маршрута для пучков из сосновых и еловых лесоматериалов может быть указано максимально допустимое значение C равное 2,5, а для пучков из лиственных сортиментов – 1,75 [13]. Однако информации о комплексной количественной оценке прочности сплоченных единиц с учётом обоих факторов нами не обнаружено. Не обнаружили мы и каких-либо сведений об исследованиях продольной прочности или волноустойчивости двухъярусных пакетных сплоченных единиц.

В определённой степени рассматриваемая тема перекликается с вопросами торцевания пакетов круглых лесоматериалов. Торцевание исследовали, например, М. В. Борисов [13, 14], Ю. М. Реутов [12], П. Ф. Войтко [14, 15] и ряд других учёных. Следует отметить, что в работах первых двух авторов не учитывается давление на лесоматериалы со стороны обвязок, которое может быть весьма значительным, особенно при малых коэффициентах формы. Это приводит к существенному занижению усилий торцевания. П. Ф. Войтко исследовал пакеты в обвязках и без них. Им давление со стороны обвязок было учтено. Однако указанный автор рассматривал торцевание только на суше. Заметим, что во всех перечисленных работах был принят значительный

ряд допущений, к основным из которых можно отнести равенство по диаметру всех лесоматериалов пакета, контакт каждого лесоматериала с четырьмя соседними, размещение лесоматериалов ровными рядами и т. д. Основной задачей отмеченных исследований являлось определение усилий торцевания. При наличии некоторой общности вопросов продольной прочности сплочных единиц и торцевания различия между ними существенны. При оценке продольной прочности не требуется определения усилий, необходимых для задвигания внутрь сплочной единицы конкретного количества лесоматериалов. Важно оценить её общую осреднённую способность противостоять продольным деформациям.

Заметим, что в рассмотренных работах по торцеванию информации о влиянии на этот процесс такого фактора, как коэффициент формы, в явном виде не обнаружено. При этом на лесосплаве он считается основным критерием волноустойчивости сплочных единиц, которая непосредственно связана с их продольной прочностью. Никакой информации по торцеванию двухъярусных пакетных сплочных единиц нами не найдено.

Пакеты в рассматриваемой сплочной единице оказывают взаимное влияние друг на друга. Характеристики отдельного пакета меняются при укладке его в двухъярусную сплочную единицу. При нахождении в воде указанное влияние дополнительно усложняется. С учётом изложенного выше было принято решение о необходимости проведения данного исследования.

Цель работы – получение информации, необходимой для оценки и обеспечения продольной прочности двухъярусных пакетных сплочных единиц. Для достижения указанной цели были поставлены следующие **задачи**:

1) выявить факторы, определяющие продольную прочность рассматриваемой сплочной единицы;

2) получить математические зависимости для определения критериев комплексной оценки указанной продольной прочности;

3) установить характер и степень влияния определяющих факторов на продольную прочность двухъярусной пакетной сплочной единицы;

4) подготовить графические материалы для упрощения практических расчётов;

5) оценить различия в продольной прочности пакетов нижнего и верхнего ярусов;

6) проанализировать изменения продольной прочности отдельных пакетов после укладки их в двухъярусную сплочную единицу;

7) дать рекомендации по размещению пакетов в сплочной единице при транспортировке в ней совместно с лесоматериалами хорошей плавучести тонкомерных или листовенных сортиментов

Метод исследования – теоретический. При его реализации использовали приём комбинированного применения теории эластик [8, 12, 16] и сыпучей среды [17]. Он был апробирован нами ранее при проведении исследований с отдельным пакетом лесоматериалов [18]. Результаты, полученные с помощью этого приёма, соответствовали экспериментальным данным. Факты, полученные в ходе данного теоретического исследования, сопоставляли с фактами, известными из практики.

При решении поставленных задач мы опирались на положения, использованные нами ранее при исследовании усилий в такелажной оснастке плавающей двухъярусной пакетной сплочной единицы, и полученные при этом формулы.

Пакеты круглых лесоматериалов сплочной единицы (рис. 1) рассматривали как гибкие оболочки пренебрежимо малой массы [8, 12, 16], заполненные под давлением сыпучей средой [17]. У плавающей сплочной единицы пакеты нижнего яруса расположены под водой и на

них наряду с силой тяжести действует вертикальная выталкивающая сила. Равнодействующая этих сил прижимает нижние пакеты к верхним. Пакеты верхнего яруса имеют подводные и надводные части. Последние находятся под воздействием силы тяжести, на подводные действует ещё и вертикальная выталкивающая сила жидкости. Равнодействующая указанных усилий уравнивается реакцией пакетов нижнего яруса.

Указанные силы обуславливают возникновение в пакетах вертикальных давлений. Эти давления в сыпучей среде подчиняются линейному закону и в данном случае увеличиваются с приближением к поверхности воды. В надводной части

$$p = \rho_L g \eta h_{ОВ}, \quad (1)$$

в подводной

$$p = (\rho_B - \rho_L) g \eta h_{ОВ}, \quad (2)$$

где p – вертикальное давление в данной точке сыпучей среды, Па; ρ_B – плотность воды, кг/м³; ρ_L – плотность лесоматериалов, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; η – коэффициент полнотелности пакетов; $h_{ОВ}$ и $h_{ОН}$ – расстояния по вертикали рассматриваемых точек соответственно от верхней и нижней плоскостей нулевого давления сыпучей среды, м (рис. 1).

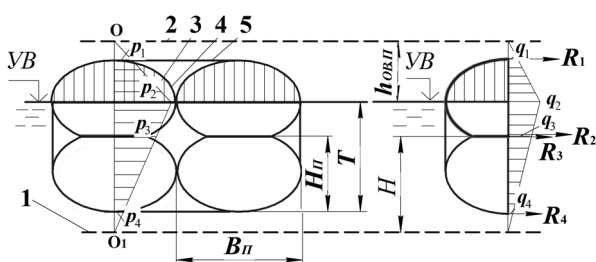


Рис. 1. Схема двухъярусной пакетной сплочной единицы в плавающем состоянии: 1 – нижняя плоскость нулевого давления; 2 – верхняя плоскость нулевого давления; 3 – пакет; 4 – пакетная обвязка; 5 – пучковая обвязка

В результате вертикального сжатия пакетов в них возникают силы распора [17], уравниваемые реакциями в обвязках. Можно также сказать, что вертикальные

давления в сыпучей среде обуславливают возникновение горизонтальных

$$q = p \lambda_a, \quad (3)$$

где q – горизонтальное давление в данной точке сыпучей среды, Па; λ_a – коэффициент активного давления.

На рис. 1 изображены эпюры вертикальных и горизонтальных давлений. Их конфигурации аналогичны. Эпюры отличаются лишь значениями давлений на одних и тех же уровнях и естественно направлением этих давлений.

Круглые лесоматериалы в пакетах удерживаются от продольного смещения силами трения между соседними лесоматериалами, а также между лесоматериалами и обвязками. Величина этих сил зависит от поперечных контактных усилий между указанными объектами и коэффициента трения при продольном относительном перемещении лесоматериалов. Контактные усилия могут быть разложены на горизонтальные и вертикальные составляющие. Очевидно, что первые пропорциональны горизонтальному давлению сыпучей среды в месте расположения данного лесоматериала, вторые – вертикальному. Строго говоря, давления по верхнему и нижнему краям лесоматериала различны. Однако, учитывая, что и вертикальные, и горизонтальные давления в сыпучей среде имеют линейное распределение по вертикали и аналогичны в различных точках горизонтали, воздействие их на лесоматериал можем оценивать по их средним значениям, соответствующим местоположению его оси. Давления, а значит и контактные усилия, действующие на лесоматериалы, расположенные в различных местах сплочной единицы, даже при равенстве прочих условий различны. Но поскольку нас интересуют не конкретные лесоматериалы, а продольная прочность пакетов в сплочной единице и сплочной единицы в целом, то мы можем ориентироваться на осреднённые характеристики.

Продольная прочность пакета в пучке может быть оценена по средней силе со-

противления продольному относительно-му смещению лесоматериала в нём. В этом случае можно считать, что вертикальные и горизонтальные составляющие контактных усилий пропорциональны соответственно средним вертикальным и горизонтальным давлениям в пакете. Очевидно также, что чем больше диаметры, тем меньше лесоматериалов при прочих равных условиях размещается на любой вертикали и горизонтали, соответственно тем большая часть результирующих сил давлений на этих вертикалях и горизонталях приходится на один лесоматериал. Не вызывает сомнений и пропорциональность контактных усилий длине пакета. Учитывая изложенное, а также то, что вертикальные давления на лесоматериал действуют сверху и снизу, а горизонтальные – слева и справа, можем записать

$$Q = 2dLf(p_0 - q_0), \quad (4)$$

где Q – средняя сила сопротивления продольному относительно-му смещению лесоматериала в пакете сплотовой единицы, Н; d – средний диаметр лесоматериалов в пакете, м; L – длина пакета, м; f – коэффициент трения при продольном относительно-м перемещении лесоматериалов; p_0 и q_0 – средние вертикальные и горизонтальные давления сыпучей среды в пакете, Па.

Преобразуем формулу (4) с учётом выражения (3)

$$Q = 2dLfp_0(1 + \lambda_a), \quad (5)$$

Учитывая, что Q рассматривается как критерий продольной прочности пакета, постоянный множитель 2 в формулах (4), (5) можно было бы исключить. Мы не сделали этого в связи с предполагаемым сопоставлением усилия Q с сопротивлением продольному смещению пакетов сплотовой единицы относительно друг друга.

Среднее значение вертикального давления для пакета можно определить, разделив площадь соответствующей эпюры на высоту пакета. Для верхних пакетов

$$p_{0B} = \frac{0,5(p_1 - p_2)(2H_{II} - T) + 0,5(p_2 - p_3)(T - H_{II})}{H_{II}} \quad (6)$$

для нижних

$$p_{0H} = 0,5(p_3 + p_4), \quad (7)$$

где p_{0B} и p_{0H} – средние вертикальные давления в верхних и нижних пакетах; p_1 , p_2 , p_3 и p_4 – вертикальные давления сыпучей среды соответственно на уровнях верхнего края пучка, поверхности воды, границы между нижними и верхними пакетами и на уровне нижнего края сплотовой единицы, Па; H_{II} – высота пакета, м; T – осадка сплотовой единицы, м.

Выразим осадку сплотовой единицы через высоту пакета

$$T = 2H_{II}\rho_0\zeta, \quad (8)$$

где ζ – коэффициент непропорциональности между высотой и осадкой сплотовой единицы; ρ_0 – относительная плотность лесоматериалов.

$$\rho_0 = \rho_L / \rho_B. \quad (9)$$

Подставим в формулу (6) вместо T правую часть выражения (8) и после преобразований получим

$$p_{0B} = (p_1 + p_2)(1 - \rho_0\zeta) + (p_2 + p_3)(\rho_0\zeta - 0,5). \quad (10)$$

Для определения вертикальных давлений на указанных уровнях необходимо установить положение плоскостей нулевого давления сыпучей среды или точек O и O_1 (рис. 1). Для этого мы воспользовались эластической теорией [8, 12, 16]. При этом пакет нижнего яруса мы сочли аналогичным пакету, уложенному на горизонтальное основание при отсутствии воды только в перевёрнутом виде. В данном случае сжимающее усилие направлено снизу вверх, а основание пакета находится над ним. Соответственно плоскость нулевого давления его сыпучей среды размещена ниже основания пакета на величину H , называемую характерной высотой [8, 12, 16]. В указанных условиях плотность лесоматериалов заменяем разностью $\rho_B - \rho_L$.

В связи с тем, что полученные с помощью эластиковой теории аналитические формулы, содержащие полные и неполные эллиптические интегралы [19], не позволяют в явном виде выразить одни употребляемые на практике геометрические характеристики пакета через другие, мы выполнили следующие действия. С целью уменьшения при последующей аппроксимации количества переменных использовали понятие относительной характерной высоты, определяемой из выражения:

$$h_p = \frac{H}{H_{II}}. \quad (11)$$

Задаваясь различными величинами модулярного угла [8, 12, 16], измерение которого на практике довольно затруднительно, с помощью упомянутых аналитических формул [18] вычислили соответствующие значения относительной характерной высоты h_p и коэффициента формы пакета C . Отметим, что этот коэффициент равен отношению ширины пакета B_{II} к его высоте H_{II} . Полученные результаты аппроксимировали. Для речных условий, то есть для интервала $C=1,50 \dots 3,00$ предложили уравнение

$$h_p = -0,136C^3 + 1,275C^2 - 3,921C + 5,057, \quad (12)$$

для озёрных условий, то есть для интервала $C=1,16 \dots 1,50$

$$h_p = -46,35C^3 + 202,4C^2 - 296,4C + 147,2. \quad (13)$$

Достоверность аппроксимации для уравнения (12) $R^2 = 0,996$, для уравнения (13) $R^2 = 0,999$.

В соответствии с выражением (2)

$$p_2 = (\rho_B - \rho_L) g \eta (T + H - H_{II}), \quad (14)$$

$$p_3 = (\rho_B - \rho_L) g \eta H, \quad (15)$$

$$p_3 = (\rho_B - \rho_L) g \eta (H - H_{II}). \quad (16)$$

Положение верхней плоскости нулевого давления сыпучей среды для надводной части сплочной единицы или точки О (рис. 1) установили, исходя из того, что давление p_2 , определяемое по формуле

(14), может быть определено также согласно формуле (1) из выражения

$$p_2 = \rho_L g \eta h_{OB,II}, \quad (17)$$

где $h_{OB,II}$ – расстояние по вертикали от уровня воды до верхней плоскости нулевого давления сыпучей среды (рис. 1).

Приравняли правые части равенств (14) и (17), выразили $h_{OB,II}$ и после преобразований получили

$$h_{OB,II} = \frac{\rho_B - \rho_L}{\rho_L} (T + H - H_{II}). \quad (18)$$

В соответствии с выражениями (1), (18) и рис.1 записали

$$p_1 = \rho_L g \eta \times \left(\frac{\rho_B - \rho_L}{\rho_L} (T + H - H_{II}) - (2H_{II} - T) \right). \quad (19)$$

После алгебраических преобразований выражения (19) получили

$$p_1 = g \eta (\rho_B (T + H - H_{II}) - \rho_L (H + H_{II})). \quad (20)$$

Подставив в уравнения (7) и (10) вместо p_1, p_2, p_3, p_4 правые части выражений (14), (15), (16), (20) и выразив с помощью (8), (11) T и H через H_{II} , учтя соотношение (9), после алгебраических преобразований получили формулу общего вида для средних вертикальных давлений сыпучей среды в верхних и нижних пакетах

$$p_0 = H_{II} \eta g A_0, \quad (21)$$

где A_0 – характеристика пакета, зависящая от его положения в сплочной единице, коэффициента формы и плотности лесоматериалов, кг/м^3 .

Для верхних пакетов этой характеристике соответствует выражение

$$A_{0B} = 2\rho_L \left[\left(2\zeta - \rho_0 \zeta + \frac{h_p - 1}{\rho_0} - h_p \right) (1 - \rho_0 \zeta) + \left(\frac{1}{\rho_0} - 1 \right) (\rho_0 \zeta + h_p - 0,5) (\rho_0 \zeta - 0,5) \right], \quad (22)$$

для нижних

$$A_{0H} = (\rho_B - \rho_L) (h_p - 0,5). \quad (23)$$

Отметим, что величины h_p согласно формулам (12), (13), ρ_0 и ζ , присутствующие в выражениях (22), (23), зависят

только от C и ρ_L . Плотность воды ρ_B в данном случае можно считать постоянной.

В результате подстановки в уравнение (5) вместо p_0 правой части выражения (21) получили следующую формулу для определения критерия продольной прочности пакетов в рассматриваемой сплottedной единице

$$Q = 2LH_{II}d\eta gfA_0(1 + \lambda_a). \quad (24)$$

Для определения λ_a используется выражение [12, 17]

$$\lambda_a = tg^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi_{mp}}{2} \right), \quad (25)$$

где φ_{mp} – угол внутреннего трения сыпучей среды.

Величины критериев продольной прочности для верхних пакетов Q_B и нижних Q_H различны. Общий для сплottedной единицы критерий продольной прочности пакетов Q_{OB} может быть определён по формуле

$$Q_{OB} = 0,5(Q_B + Q_H). \quad (26)$$

При оценке продольной прочности двухъярусной пакетной сплottedной единицы помимо способности противодействовать продольным относительным перемещениям отдельных лесоматериалов представляет интерес и способность противостоять продольным перемещениям пакетов относительно друг друга. Установлено, что утяжка внешних обвязок пакетной сплottedной единицы с приложением больших усилий может привести к некоторому переформированию пакетов. В результате у пакетов с большими коэффициентами формы их обвязки с внешних сторон несколько ослабляются и недостаточно прочно удерживают отдельные лесоматериалы. Несмотря на то, что на практике не отмечены случаи значительного относительного продольного перемещения этих лесоматериалов при транспортировке, производителям не рекомендована без особой необходимости утяжка внешних обвязок с большими усилиями. В связи с этим мы рассматриваем

наиболее неблагоприятный в изучаемом аспекте вариант, при котором натяжения во внешних обвязках сплottedной единицы пренебрежимо малы по сравнению с усилиями, обусловленными запасом плавучести нижних пакетов. Исходя из тех же соображений, пренебрежимо малыми считаем и контактные боковые усилия между пакетами одного яруса.

С учётом изложенных выше положений будем считать, что пакеты в плавающей двухъярусной сплottedной единице от относительных продольных смещений удерживаются преимущественно силами трения между пакетами нижнего и верхнего ярусов. Сила трения между двумя пакетами определяется из выражения

$$Q_{МП} = T_k f, \quad (27)$$

где T_k – контактное усилие между пакетами нижнего и верхнего ярусов, Н.

В данном случае контактное усилие определяется как равнодействующая сил тяжести и Архимеда для нижнего пакета,

$$T_k = (\rho_B - \rho_L) g V_{II}, \quad (28)$$

где V_{II} – объём лесоматериалов в пакете, м³.

С учётом выражения (28) формулу (27) приведём к виду

$$Q_{МП} = (\rho_B - \rho_L) g V_{II} f. \quad (29)$$

Для аналогии с формулой (24), предложенной для отдельных лесоматериалов, выразим объём V_{II} через габаритные размеры пакета

$$V_{II} = 0,1(8,9C - 1)\eta LH_{II}^2. \quad (30)$$

Принято считать, что эта формула даёт более точные результаты при определении V_{II} по сравнению с другими [12].

В результате подстановки в выражение (29) вместо V_{II} правой части уравнения (30) получили

$$Q_{МП} = 0,1LH_{II}^2\eta gf(8,9C - 1)(\rho_B - \rho_L). \quad (31)$$

Интерпретация результатов. В соответствии с формулой (24) способность пакетов в плавающей сплottedной единице удерживать отдельные лесоматериалы от относительных продольных смещений линейно возрастает при увеличении дли-

ны, высоты, полнодревесности пакетов, диаметра лесоматериалов и коэффициента трения при их продольном относительном движении. По поводу зависимости от длины и высоты отметим известный из практики факт [5] большей волноустойчивости, а значит и большей продольной прочности сплавных пучков крупного размера. Значение коэффициента трения f для всех видов сплавных круглых лесоматериалов в литературе [12] приводится одно и то же и равно 0,2.

Совместный анализ формул (24), (25) позволил установить, что увеличение угла $\varphi_{тр}$ приводит к уменьшению критерия Q , зависимость близкая к линейной. Заметим, однако, что этот угол для круглых лесоматериалов варьируется в небольшом диапазоне, поэтому его изменение не вызывает существенного изменения λ_a , а следовательно, и Q . Для еловых лесоматериалов $\varphi_{тр}$ равен 29° , для сосновых – 26° [12]. Такое уменьшение угла $\varphi_{тр}$ приводит к увеличению критерия Q всего лишь на 3,2 %, то есть применительно к практическим условиям λ_a можно считать

постоянным. При этом присутствие λ_a в формуле (23) обуславливает увеличение критерия Q не менее, чем на 35 %. В связи с этим мы не исключаем λ_a из выражения (24) по той же причине, по которой ранее оставили постоянный множитель 2.

Зависимость Q через A_0 от коэффициента формы пакетов C и плотности лесоматериалов ρ_L наглядно демонстрируют графики, представленные на рис. 2, которые рекомендуются для определения значений $A_{ОВ}$ и $A_{ОН}$ при практических расчётах. Заметим, что кривые при коэффициентах формы 2,5 и 3,0 почти совпадают. Уменьшение ρ_L от 900 до 750 кг/м³ увеличивает продольную прочность верхних пакетов на 95–105 %, нижних – на 150 %. Изменение C от 2,50 до 1,75 приводит к увеличению указанного критерия у верхних пакетов на 20–25 %, у нижних – на 46 %. Заметим, что обычно при оценке волноустойчивости пучков основное внимание уделяется их коэффициенту формы. Здесь же мы видим, что ρ_L для продольной прочности пакетов сплоченной единицы имеет гораздо большее значение, чем C .

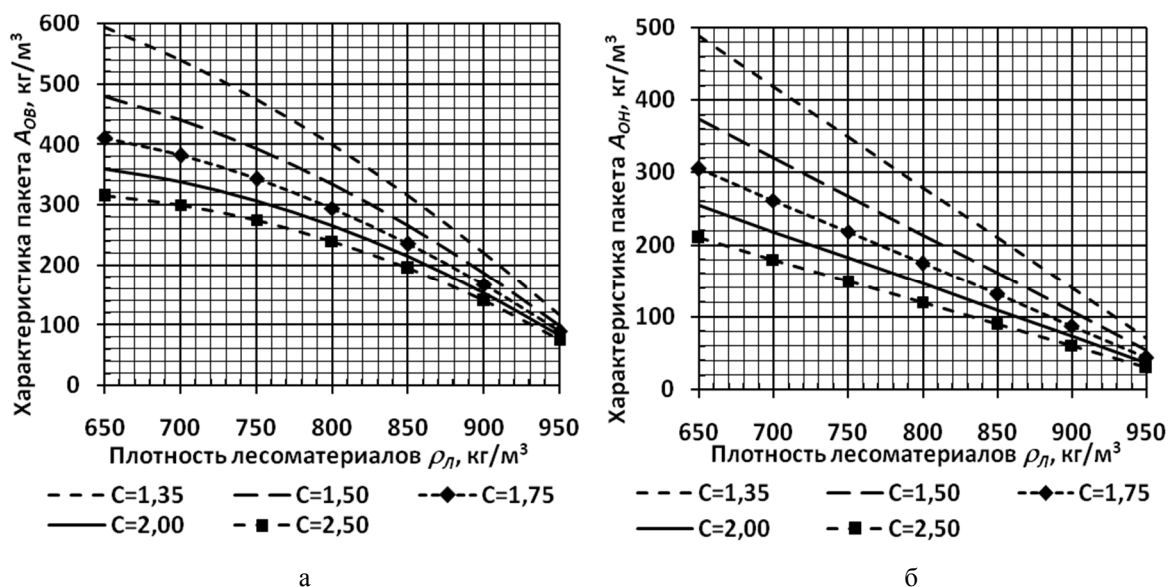


Рис. 2. Графики зависимостей характеристики A_0 от плотности лесоматериалов ρ_L при различных коэффициентах формы C : а – для верхних пакетов; б – для нижних пакетов

Сравнивая значения A_0 верхних и нижних пакетов, установили, что продольная прочность у первых при равенстве прочих условий существенно больше, чем у вторых. Причём разница в прочности тем больше, чем больше ρ_L и C . Так, при $\rho_L=650 \text{ кг/м}^3$ и $C=1,35$ она составляет 22 %, а при $\rho_L=900 \text{ кг/м}^3$ и $C=2,50$ – 134 %, при распространённом сочетании $\rho_L=800 \text{ кг/м}^3$ и $C=2,00$ – 83%. С учётом изложенного при транспортировке в рассматриваемых сплочных единицах с лесоматериалами хорошей плавучести сортиментов лиственных пород или тонкомерных лесоматериалов пакеты из первых следует укладывать в нижний ярус. Эту рекомендацию следует учитывать и тогда, когда пакеты заметно отличаются по диаметру лесоматериалов даже если они одного сортимента.

Ранее нами была выполнена оценка продольной прочности отдельных плавающих пакетов круглых лесоматериалов или пучков. Сравнительный анализ показывает, что установка пакетов, например, с коэффициентом формы $C=2,0$ в нижний ярус рассматриваемой сплочной единицы приводит к увеличению их продольной прочности на 31 % при плотности лесоматериалов $\rho_L=900 \text{ кг/м}^3$ и на 78 % – при $\rho_L=650 \text{ кг/м}^3$. Значение C в данном случае существенно на результат не влияет.

Влияние ρ_L и C на увеличение продольной прочности пакетов при укладке их в верхний ярус в отличие от предыдущего случая становится сопоставимым. В диапазоне $C=1,75\text{--}2,50$, характерном для речных условий, и при $\rho_L=650\text{--}900 \text{ кг/м}^3$ указанная прочность при этом увеличивается на 140–207 %. Причём возрастание продольной прочности здесь тем больше, чем больше ρ_L и C , хотя сама эта прочность, как было отмечено, находится в обратной зависимости от указанных факторов. Заметим также, что влияние одного фактора возрастает при увеличении другого. В озёрных условиях зависимость несколько иная. При $C=1,50$ продольная прочность пакетов при укладке

их в верхний ярус увеличивается на 129 % практически независимо от ρ_L . При меньших значениях C с увеличением ρ_L увеличение прочности уменьшается.

Средняя продольная прочность пакетов в пучке больше, чем у отдельных аналогичных пакетов на плаву на 69–122 % в диапазонах $C=1,35\text{--}2,50$ и $\rho_L=650\text{--}900 \text{ кг/м}^3$. Разница прочностей тем больше, чем меньше ρ_L и чем больше C . Влияние C возрастает с увеличением ρ_L , влияние ρ_L с увеличением C уменьшается. При распространённом сочетании $C=2,00$ и $\rho_L=800 \text{ кг/м}^3$ указанная разница равна 106 %, то есть в этом типичном случае средняя продольная прочность пакетов в пучке примерно в два раза больше, чем у отдельных аналогичных пакетов.

Учитывая, что некоторые величины в уравнении (24) постоянны или могут считаться постоянными, согласно приведённым выше положениям, представим его в более простом виде

$$Q=5,37LH_{\Pi}d\eta A_0. \quad (32)$$

Аналогично поступим и с формулами (29), (31). После этого они примут вид:

$$Q_{МП}=1,96(\rho_B-\rho_L)V_{\Pi}; \quad (33)$$

$$Q_{МП}=0,196LH_{\Pi}^2\eta(8,9C-1)(\rho_B-\rho_L). \quad (34)$$

Анализ выражений (33), (34) позволяет установить, что, несмотря на присутствие в правой части равенства (34) длины пакетов, квадрата их высоты, коэффициента формы и коэффициента полнодревесности, в итоге величина $Q_{МП}$ определяется объёмом лесоматериалов в пакете и их плотностью. Зависимость от V_{Π} линейная прямая, от ρ_L – линейная обратная. Влияние указанных коэффициентов, длины и высоты обусловлено лишь тем, что они совместно определяют объём лесоматериалов в пакете.

Для удобства сопоставления критериев Q и $Q_{МП}$ введём характеристику

$$B_0=(8,9C-1)(\rho_B-\rho_L), \quad (35)$$

зависящую, как и A_0 , от коэффициента формы пакетов и плотности лесоматериалов. Разделим выражение (34) на (32) и после упрощений получим

$$\frac{Q_{МП}}{Q} = 0,0365 \frac{H_{II}}{d} \frac{B_0}{A_0}. \quad (36)$$

Формула (36) показывает, что отношение рассматриваемых критериев определяется отношениями высоты пакета и среднего диаметра лесоматериалов, а также характеристик B_0 и A_0 . Зависимость от второго отношения – это изначально зависимость от ρ_L и C . Установили, что указанное отношение увеличивается с уменьшением ρ_L и с увеличением C . Влияние второго фактора гораздо сильнее, чем первого. Расчёты показывают, что при наиболее часто имеющих место коэффициентах формы и высотах пакетов, плотностях и диаметрах лесоматериалов, по крайней мере, в речных условиях сила сопротивления относительно продольному смещению пакетов, как правило, существенно больше соответствующей средней силы для отдельных лесоматериалов. Например, при характеристиках близких к средним, а именно при высоте пакетов 0,8 м, их коэффициенте формы 2,0, диаметре лесоматериалов 0,14 м, их плотности 800 кг/м³ $Q_{МП}/Q=3,41$. Это зна-

чит, что вероятность продольного относительного смещения пакетов меньше, чем отдельных лесоматериалов. Наименьшие значения отношения $Q_{МП}/Q$ имеют место при малых C , характерных для озёрных условий. Однако это не значит, что в этих случаях сопротивление относительно смещению пакетов будет наименьшим по абсолютной величине. Дело в том, что при малых C довольно велика продольная прочность пакетов Q . Это и обуславливает меньшие значения $Q_{МП}/Q$.

Выводы. Предложенные в данной работе критерии комплексной оценки продольной прочности, полученные формулы и графики дают возможность сравнивать по этому показателю двухъярусные пакетные сплотовые единицы с различным набором характеристик. Приведённая информация о характере и степени влияния на продольную прочность определяющих факторов способствует повышению эффективности действий по увеличению указанной прочности. Полученные сведения позволяют оптимально расположить пакеты из различных сортиментов в рассматриваемой сплотовой единице.

Список литературы

1. Посыпанов С.В. Экологические и экономические аспекты транспорта древесины из удаленных лесных массивов // Эколого- и ресурсосберегающие технологии и системы в лесном и сельском хозяйстве: сборн. научн. тр. по материал. междунаrod. заоч. науч.-практ. конф. Вып. № 3, ч.4 (8-4). Воронеж: ВГЛТА, 2014. С. 135-139.
2. Харитонов В.Я., Посыпанов С.В. Ресурсы удаленных лесных массивов и возможность их освоения сплавом // Лесной журнал. 2008. № 2. С. 30-36.
3. Харитонов В.Я., Посыпанов С.В. Опыт внедрения единого транспортного пакета вместо молевого лесосплава // Лесной журнал. 2007. № 1. С. 45-52.
4. Посыпанов С.В. Апробация в производственных условиях конструкций плотов зимней сплотовки из двухъярусных сплотовых единиц // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: сб. научн. тр. по материал. междунаrod. заоч. науч.-практ. конф. Вып. № 5, ч.4 (10-4). Воронеж: ВГЛТА, 2014. С. 240-244.
5. Посыпанов С.В. Исследование усилий в такелажной оснастке плавающей двухъярусной пакетной сплотовой единицы // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2015. № 3 (27). С. 55-65.
6. Вахрушев М.М. Расчет пакета лесоматериалов в гибкой обвязке, лежащего на плоскости // Лесной журнал. 1965. № 5. С. 18-21.
7. Володенков Ф.И. Определение усилий в обвязках пучков из бревен // Сборник научных трудов по лесосплаву. 1965. № 5. С. 64-96.
8. Воробьев А.Г. О расчете по эластической теории пучковых плотов для случая нахождения их на суше // Лесоинженерное дело: научн. докл. Высшей школы. 1958. Вып № 3. С. 40-45.
9. Донской И.П. Определение натяжения в обвязке пучка плавающего по спокойной воде и лежащего на суше. Л.: ЛТА, 1960. 38 с.
10. Калихевич И.Н. Вопросы теоретического изучения расчета пучковых плотов // Труды Лесотехнической академии им. С.М. Кирова. 1938. № 63. С. 65-68.
11. Мерки Д.Р. К вопросу об определении натяжения в обвязке и формы пучка // Труды Лесотехнической академии им. С.М. Кирова. 1961. № 96. С. 67-70.
12. Реутов Ю.М. Расчеты пучков (пакетов) круглых лесоматериалов. М.: Лесная промышленность, 1975. 152 с.
13. Борисов М.В. К вопросу определения усилий торцевания пачек (пакетов) бревен //

- Труды ВКНИИВОЛТ. 1971. Вып. X. С. 13-19.
14. *Войтко П.Ф.* Математические модели формирования лесных грузов гравитационными торцевыравнивателями // Лесной журнал. 2003. № 4. С. 56-65.
15. *Войтко П.Ф.* Методика и результаты производственных испытаний передвижных и переносных торцевыравнивателей на рейдах приплава лесопромышленных предприятий // Лесной журнал. 2004. № 5. С. 45-50.
16. *Whittaker E.T., Watso G.N.* A Course in Modern Analysis; 4th ed. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2009. 620 p.
17. *Craig R.F.* Soil Mechanics; 6nd ed. London, New York: E & FN Spon, 1997. 485 p.
18. *Посыпанов С.В.* Комбинированный метод расчета пакета круглых лесоматериалов, уложенного на горизонтальном основании // Лесной журнал. 2011. № 1. С. 47-52.
19. *Byrd P.F., Friedman M.D.* Handbook of Elliptic Integrals for Engineers and Scientist; 2nd ed. New York, Heidelberg, Berlin: Springer-Verlag, 1971. Vol. 67. 360 p.

Статья поступила в редакцию 10.02.16.

Информация об авторе

ПОСЫПАНОВ Сергей Валентинович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии лесозаготовительных и деревообрабатывающих производств, Лесотехнический институт, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова. Область научных интересов – экологически безопасное лесотранспортное использование средних и малых рек; информационное обеспечение лесопромышленного производства. Автор 71 публикации.

UDC 630*378

DOI: 10.15350/2306-2827.2016.2.61

INVESTIGATION OF THE LENGTHWISE DURABILITY OF A PACKAGED BILEVEL RAFTING UNIT

S. V. Posypanov

Forestry Engineering Institute, Northern (Arctic) Federal University
named after M.V. Lomonosov,

17, Naberezhnaya Severnoy Dviny, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation

E-mail: s.posypanov@narfu.ru

Key words: timber rafting; water; round wood; package; bundle; rafting unit; strapping; durability; elastics; granular medium.

ABSTRACT

Introduction. Usage of bi-level packaged rafting units offers sufficient advantages in round wood transportation along small and medium size rivers, due to decrease of logistic costs for small logging enterprises. **The aim** of the present work is to obtain information necessary for evaluation and securement of lengthwise durability of involved rafting units. **Materials and methods.** The study is based on the approved theoretical technique, tested and validated by the authors when solving other similar tasks. **Results.** It was determined that the mean force of lengthwise log translocation resistance in a package of a rafting unit depends on the factors: height, length, filling and form coefficients of packages, average log diameter, wood density, friction coefficient, angle of interior friction. The value of the above mentioned force was introduced as a criterion for integrated assessment of lengthwise durability of a package. This value was suggested as the lengthwise durability criterion of the package. The criterion allows the complex evaluation of the lengthwise durability. The equations and graphic charts for criterion relevant to packages in upper and lower levels are developed. The criterion value for a rafting unit as a whole to be determined as a mean number among all packages. It was found out that the lengthwise durability criterion of a package increases linearly depending on the factors: length, height, filling coefficient, log diameter, friction coefficient. Relation to angle of interior friction: inverse, close to linear. The package lengthwise durability decreases depending on wood density and coefficient of package form increase. Equations for determination of force counteracting to relative lengthwise slippage of packages in a rafting unit were developed. It was noted that counteracting force increases linearly depending on increase of coefficient of friction, volume of logs in a package and decrease of wood density. As a rule, counteracting force for a package is significantly higher than average value for single log. **Conclusion.** It was found out, that lengthwise durability of packages in an upper layer of a rafting unit is significantly higher than the same for the lower level. It is recommended to place packages of small diameter coniferous logs and deciduous species in the upper layer of a rafting unit.

REFERENCES

1. Posypanov S.V. *Ekologicheskiye i ekonomicheskiye aspekty transporta drevesiny iz udalennykh lesnykh massivov* [Ecological and economic aspects of forest products transportation from the remote woodlands]. *Ekologo- i resursosberegayushchie tekhnologii i sistemy v lesnom i sel'skom khozyaystve: sborn. nauchn. tr. po material. mezhdunarod. zaoch. nauch.-prakt. konf.* [Ecological and resource-saving technologies and systems in forestry and agriculture: Proc. International Open Scient.-Pract. Conf.]. Issue 3, part 4 (8-4). Voronezh: VGLTA, 2014. Pp.135-139.
2. Kharitonov V.Ya., Posypanov S.V. *Resursy otдалennykh lesnykh massivov i vozmozhnost ikh osvoiniya splavom* [Resources of the remote forest stands and feasibility of their utilization via rafting]. *Lesnoy zhurnal* [Forest journal]. 2008. No 2. Pp. 30-36.
3. Kharitonov V.Ya., Posypanov S.V. *Opyt vnedreniya yedinogo transportnogo paketa vmesto molevogo lesosplava* [Implementation experience of unified transport package as an alternative to loose timber floating]. *Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal* [Izvestiya of higher education institutions. Forest journal]. 2007. No 1. Pp. 45-52.
4. Posypanov S.V. *Aprobatsiya v proizvodstvennykh usloviyakh konstruktivnykh plotov zimney splotki iz dvukhyarushnykh splotochnykh yedinit* [Practical approval of rafts composed of bi-level rafting units in winter conditions]. *Aktualnye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika: sb. nauchn. tr. po material. mezhdunarod. zaoch. nauch.-prakt. konf.* [Actual research trends of the XXI century: theory and practice: Proc. International Open Scient.-Pract. Conf.]. Issue 5, part 4 (10-4). Voronezh: VGLTA, 2014. pp.240-244.
5. Posypanov S.V. *Issledovanie usiliy v take-lazhnoy osnastke plavayuschey dvukhyarusnoy paketnoy splotochnoy edinitcy* [Study of the forces in the rigging of a floaty bi-level rafting unit]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopolzovanie.* [Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management]. 2015. No 3 (27). Pp. 55-65.
6. Vakhrushev M.M. *Raschet paketa lesomaterialov v gibkoy obvyazke, lezhashchego na ploskosti* [Computation of a log package in the elastic strapping placed on flat surface]. *Lesnoy zhurnal* [Forest journal]. 1965. No 5. Pp. 18-21.
7. Volodenkov F.I. *Opreделение usiliy v obvyazkakh puchkov iz breven* [Determination of tensions in log bundles strappings]. *Sbornik nauchnykh trudov po lesosplavu* [Collection of papers on timber rafting]. 1965. No 5. Pp. 64-96.
8. Vorobjov A.G. *O raschete po elastikovoy teorii puchkovykh plotov dlya sluchaya nakhozhdeniya ikh na sushi* [Application of the elastics theory for design of log bundle rafts placed ashore]. *Lesoinzhenernoye delo: nauchnye doklady Vysshey shkoly* [Forest engineering: Scientific reports of the Highest School]. 1958. Iss. 3. Pp.40-45.
9. Donskoy I.P. *Opreделение natyazheniya v obvyazke puchka plavayushchego po spokojnoy vode i lezhashchego na sushe* [Determination of tension in strapping of a log bundle floating on calm water surface and laying aground]. Leningrad: LTA, 1960. 38 p.
10. Kalikhevich I.N. *Voprosy teoreticheskogo izucheniya rascheta puchkovykh plotov* [Matters of theoretical investigation of computation of log bundles rafts]. *Trudy Lesotekhnicheskoy akademii im. S.M.Kirova* [Writings of the Forestry Academy named after S.M. Kirov]. 1938. No 63. Pp. 65-68.
11. Merkin D.R. *K voprosu ob opredelenii natyazheniya v obvyazke i formy puchka* [Regarding determination of tension in strappings and shape of a bundle]. *Trudy Lesotekhnicheskoy akademii im. S.M.Kirova* [Writings of the Forestry Academy named after S.M. Kirov]. 1961. No 96. Pp. 67-70.
12. Reutov Yu.M. *Raschety puchkov (pakeyov) kruglykh lesomaterialov* [Computation of the bundles/packages of roundwood]. Moscow: Lesnaya promyshlennost, 1975. 152 p.
13. Borisov M.V. *K voprosu opredeleniya usiliy tortsevaniya pachek (paketov) breven* [On the question of determination of the forces of log bundle trimming]. *Writings of the VKNIIVOLT.* 1971. Iss. 10. Pp.13-19.
14. Voitko P.F. *Matematicheskiye modeli formirovaniya lesnykh gruzov gravitatsionnymi tortsevyravnivatelyami* [Mathematic model of forming timber cargoes by the means of the gravity end aligners]. *Lesnoy zhurnal* [Forest journal]. 2003. No 4. Pp.56-65.
15. Voitko P.F. *Metodika i rezultaty proizvodstvennykh ispytaniy perevichnykh i perenosnykh tortsevyravnivateley na reyдах priplava lesopromyshlennykh predpriyatiy* [Techniques and results of the field tests of the mobile and portable end aligners at the waterborne storage areas of the timber enterprises]. *Lesnoy zhurnal* [Forest journal]. 2004. No 5. Pp.45-50.
16. Whittaker E.T., Watson G.N. *A Course in Modern Analysis*, 4nd ed. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2009. 620 p.
17. Craig R.F. *Soil Mechanics*, 6th ed. London, New York: E & FN Spon, 1997. 485 p.
18. Posypanov S.V. *Kombinirovannyj metod rascheta paketa kruglykh lesomaterialov, ulozhennogo*

na gorizontaln timer osnovanii [Multi-level design method of a log package placed on a horizontal basement]. *Lesnoy zhurnal* [Forest journal]. 2011. No 1. Pp. 47-52.

19. Byrd P.F., Friedman M.D. Handbook of Elliptic Integrals for Engineers and Scientist, 2nd ed. New York, Heidelberg, Berlin: Springer-Verlag, 1971. Vol. 67. 360 p.

The article was received 10.02.16.

Citation for an article: Posypanov S. V. Investigation of the Lengthwise Durability of a Packaged Bi-level Rafting Unit. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management.* 2016. No 2(30). Pp. 61-73. DOI: 10.15350/2306-2827.2016.2.61

Information about the author

POSYPANOV Sergey Valentinovich – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor at the Department of Logging and Wood Processing Manufactures Technology, Forestry Engineering Institute, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. Research interests – environmentally safe use of transport timber for medium and small rivers; information support of timber production. Author of 71 publications.