

УДК 634.0.378

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ В ГИБКИХ СВЯЗЯХ ПАКЕТНОГО ЛЕСОСПЛАВНОГО ПУЧКА, НАХОДЯЩЕГОСЯ НА СУШЕ© *С.В. Посыпанов, канд. техн. наук, доц.*

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

Разработанные при активном участии автора статьи конструкция и технология сплотки пакетных лесосплавных пучков дают возможность формировать плоты зимней сплотки даже мелким лесозаготовителям, позволяя существенно снизить транспортные затраты без значительных капиталовложений. Для исключения потерь древесины, соблюдения экологических требований следует обеспечить достаточную прочность новых сплоточных единиц, что предполагает определение усилий в их гибких связях. Для решения этой задачи нами предложен комбинированный метод, основанный на комплексном использовании эластиковой теории и теории сыпучей среды. Известно, что наибольшие усилия в гибких связях сплоточной единицы возникают при нахождении ее на суше. Это было принято за расчетный случай. Совокупность лесоматериалов пучка считаем сыпучей средой, сжимаемой силой тяжести. Для нахождения вертикальных давлений в этой среде необходимо знать характерную высоту, определяющую положение пьезометрической плоскости. Используя эластиковую теорию, устанавливаем зависимости между характерной высотой, высотой пакета и коэффициентом его формы, включающие не определяемый на практике модулярный угол. Вводим понятие относительной характерной высоты и, избавившись от модулярного угла, представляем графики для ее определения. Вертикальное сжатие сыпучей среды обуславливает возникновение горизонтальных распорных усилий, уравниваемых в расчетном случае только реакциями в обвязках пакетов. Получены формулы для определения равнодействующих этих усилий для верхнего и нижнего пакетов и реакций в верхних и нижних ветвях обвязок обоих пакетов. С введением понятия коэффициента натяжения формулы для определения искомых усилий стали иметь простой вид. Получены графики для определения коэффициентов натяжения. Доказано, что пучковые обвязки следует рассчитывать по внешним усилиям, прикладываемым к ним при утяжке. Представленные в статье разработки позволяют определять не только усилия в сплоточном такелаже находящегося на суше пакетного пучка, но их можно использовать также для оценки связей его параметров с способностью противодействовать продольному смещению составляющих пучок лесоматериалов и обвязок при транспортировке по воде.

Ключевые слова: лесосплав, пакет, пучок, обвязка, прочность, эластика, сыпучая среда.

Сотрудниками кафедры водного транспорта леса и гидравлики Северного (Арктического) Федерального университета имени М.В. Ломоносова предложены конструкция и технология сплотки пакетных лесосплавных пучков. Эти разработки позволяют воспользоваться экономическими преимуществами водного транспорта леса даже мелким лесозаготовителям, так как обеспечивают возможность формировать плоты зимней сплотки без применения сравнительно

дорогой и узкопрофильной техники – сплотно-транспортных агрегатов, приобретение которых для них экономически неоправданно в связи с относительно небольшими объемами работ. Предлагаемые нами решения позволяют сплачивать на плотбищах пучки нужных габаритов с помощью челюстных погрузчиков, имеющих практически у всех лесозаготовителей. В отличие от сплотно-транспортных агрегатов эти погрузчики после завершения сплотки могут быть использованы на других видах работ.

Судя по фактическим данным, увеличение расхода сплотно-транспортного такелажа, которое в стоимостном выражении относительно невелико, в данном случае с лихвой компенсируется достоинствами пакетной сплотки. К этим достоинствам относятся повышенная надежность сплотно-транспортных единиц, технологичность их выгрузки у потребителей, исключение потерь лесоматериалов при этом, снижение таких потерь в аварийных ситуациях, уменьшение их вероятности, возможность транспортировки по воде лиственных и тонкомерных сортиментов [8]. Перспективность предлагаемых разработок подтверждена их практической реализацией.

Стремление к исключению потерь древесины, повышение экологических требований поднимают значимость вопроса о прочности лесотранспортных единиц, в том числе и пакетных пучков. Обеспечение прочности предполагает определение усилий, возникающих в гибких связях сплотно-транспортной единицы. Для этого применим комбинированный метод, впервые предложенный нами при рассмотрении подобной задачи с отдельным пакетом круглых лесоматериалов [5]. Этот метод предполагает совместное использование эластиковой теории [2, 6] и положений теории сыпучей среды [1, 9]. Первая позволяет достаточно точно определять геометрические параметры пакета круглых лесоматериалов, чего нельзя сказать о его силовых характеристиках в связи с тем, что игнорируются силы внутреннего трения в нем. Отдельное использование второй теории в данном случае не позволяет получить решение из-за невозможности определения так называемой характерной высоты. Более подробно метод описан в работе [5]. Заметим, что результаты расчетов по полученным в ней формулам хорошо совпадают с результатами экспериментальных исследований, т. е. метод можно считать апробированным.

Обратимся к расчетной схеме, приведенной на рис. 1.

В связи с тем, что наибольшие усилия в гибких связях сплотно-транспортной единицы возни-

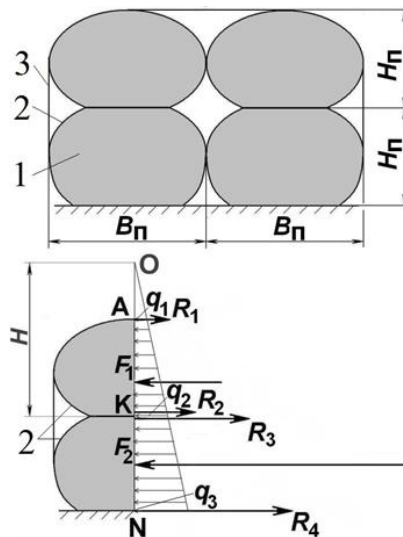


Рис. 1. Расчетная схема пакетного пучка, находящегося на суше: 1 – пакет; 2 – обвязка пакетная; 3 – обвязка пучковая

кают при нахождении ее на суше, рассмотрим ее в этих условиях. Совокупность лесоматериалов пучка считаем сыпучей средой. Находясь на горизонтальном основании, эта среда сжимается под действием сил тяжести. Максимальное сжатие происходит на линии наибольшего вертикального размера пучка. Вертикальные давления на этой линии определим по формуле

$$p = \rho_n g \eta h_o, \quad (1)$$

где ρ_n – плотность лесоматериалов;

g – ускорение свободного падения;

η – коэффициент полнодревесности пакетов;

h_o – расстояние по вертикали от точки O на пьезометрической плоскости до рассматриваемой точки.

Чтобы определиться с положением точки O , представим два выражения из приведенных нами в работе [5]:

$$H_n = 2H \sin^2 \frac{\Theta}{2}; \quad (2)$$

$$C = \frac{B_n}{H_n} = \frac{1}{2} \left((2 - \sin^2 \Theta) \left(K - F(\Theta, 45^\circ) \right) - 2 \left(E - E(\Theta, 45^\circ) \right) \operatorname{cosec}^2 \frac{\Theta}{2} \right), \quad (3)$$

где

H_n – высота пакета;

H – характерная высота, определяющая положение точки O ;

Θ – модулярный угол;

C, B_n – коэффициент формы и ширина пакета;

K, E – эллиптические интегралы полные;

$F(\Theta, 45^\circ), E(\Theta, 45^\circ)$ – эллиптические интегралы неполные [7, 10] при значении угла, изменяющегося вдоль элаستيки и равного 45° , что соответствует самой левой точке поперечного сечения пакета.

Из формулы (3) следует, что коэффициент C является функцией только от модулярного угла Θ . Любая из этих величин однозначно задает форму элаستيки. Выражение (2) связывает через модулярный угол Θ указанную форму, характерную высоту H и высоту пакета H_n . Для уменьшения количества определяющих факторов вводим понятие относительной характерной высоты:

$$h_p = \frac{H}{H_n}.$$

Тогда из выражения (2) имеем:

$$h_p = \frac{H}{2H \sin^2 \frac{\Theta}{2}} = \frac{1}{2 \sin^2 \frac{\Theta}{2}}. \quad (4)$$

Как видно из формулы (4), относительная характерная высота h_p зависит только от формы поперечного сечения пакета, которая может быть задана не только модулярным углом Θ , но и коэффициентом формы пакета C . На прак-

тике замерить угол Θ весьма проблематично, поэтому зависимость $h_p = f(\Theta)$ заменим зависимостью от широко используемого фактора $h_p = F(C)$. Однако для эластической теории характерен такой недостаток, как невозможность выразить одни используемые на практике геометрические характеристики пакетов через другие. Определив по формулам (3) и (4) значения C и h_p для одной и той же совокупности величин модулярного угла Θ , построим график зависимости $h_p = F(C)$ (рис. 2), по которому в практических расчетах и предлагаем определять h_p .

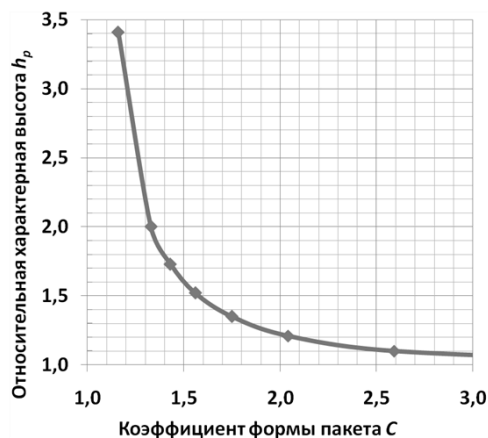


Рис. 2. График зависимости относительной характерной высоты h_p от коэффициента формы пакета C

Необходимо отметить, что вертикальное сжатие сыпучей среды в плотной единице обуславливает возникновение горизонтальных распорных усилий (см. рис. 1). В общем случае эти усилия уравниваются реакциями в обвязках пакетов и пучка. При отсутствии обвязок на пучке, например в процессе его формирования или при ослаблении обвязок по тем или иным причинам, вся распорная нагрузка будет восприниматься гибкими связями пакетов. Рассмотрим именно этот случай.

Для определения горизонтального давления используем выражение

$$q = p\lambda_a, \quad (5)$$

где λ_a – коэффициент активного давления сыпучей среды,

$$\lambda_a = \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\varphi_{\text{тр}}}{2}\right). \quad (6)$$

Здесь $\varphi_{\text{тр}}$ – угол внутреннего трения круглых лесоматериалов в пакете.

Равнодействующие распорных усилий в рассматриваемом сечении (рис. 1) для верхнего и нижнего пакетов соответственно могут быть определены по следующим формулам:

$$F_1 = 0,5(q_1 + q_2)H_n L; \quad (7)$$

$$F_2 = 0,5(q_2 + q_3)H_n L, \quad (8)$$

где L – длина круглых лесоматериалов в пучке.

Для горизонтальных давлений на уровнях верха пучка, границы между верхним и нижним пакетами, низа пучка:

$$q_1 = \rho_n g \eta \lambda_a (H - H_n); \quad (9)$$

$$q_2 = \rho_n g \eta \lambda_a H; \quad (10)$$

$$q_3 = \rho_n g \eta \lambda_a (H + H_n). \quad (11)$$

Равнодействующая F_1 уравнивается реакциями R_1 и R_2 соответственно в верхних и нижних точках гибких связей верхнего пакета. Подобным образом равнодействующая F_2 уравнивается реакциями R_3 и R_4 соответственно в верхних и нижних точках гибких связей нижнего пакета.

Запишем уравнения сумм моментов:

для верхнего пакета относительно точек К и А:

$$F_1 \frac{H_n \left(\frac{2}{3} q_1 + \frac{1}{3} q_2 \right)}{q_1 + q_2} - R_1 H_n = 0; \quad (12)$$

$$R_2 H_n - F_1 \frac{H_n \left(\frac{2}{3} q_2 + \frac{1}{3} q_1 \right)}{q_1 + q_2} = 0; \quad (13)$$

для нижнего пакета относительно точек N и К:

$$F_2 \frac{H_n \left(\frac{2}{3} q_2 + \frac{1}{3} q_3 \right)}{q_2 + q_3} - R_3 H_n = 0; \quad (14)$$

$$R_4 H_n - F_2 \frac{H_n \left(\frac{2}{3} q_3 + \frac{1}{3} q_2 \right)}{q_2 + q_3} = 0. \quad (15)$$

Выразим из уравнений (12)–(15) реакции R_1 , R_2 , R_3 и R_4 , вместо F_1 , F_2 , q_1 , q_2 и q_3 подставим соответствующие правые части выражений (7)–(11) и после преобразований получим:

$$R_1 = 0,5 \rho_n g \eta \lambda_a L H_n \left(H - \frac{2}{3} H_n \right); \quad (16)$$

$$R_2 = 0,5 \rho_n g \eta \lambda_a L H_n \left(H - \frac{1}{3} H_n \right); \quad (17)$$

$$R_3 = 0,5 \rho_n g \eta \lambda_a L H_n \left(H + \frac{1}{3} H_n \right); \quad (18)$$

$$R_4 = 0,5 \rho_n g \eta \lambda_a L H_n \left(H + \frac{2}{3} H_n \right). \quad (19)$$

После вынесения H_n за скобки и с учетом того, что $H/H_n = h_p$, получим:

$$R_1 = 0,5 \rho_n g \eta \lambda_a L H_n^2 \left(h_p - \frac{2}{3} \right); \quad (20)$$

$$R_2 = 0,5\rho_n g \eta \lambda_a L H_n^2 (h_p - \frac{1}{3}); \quad (21)$$

$$R_3 = 0,5\rho_n g \eta \lambda_a L H_n^2 (h_p + \frac{1}{3}); \quad (22)$$

$$R_4 = 0,5\rho_n g \eta \lambda_a L H_n^2 (h_p + \frac{2}{3}). \quad (23)$$

Для выполнения практических расчетов данные формулы приведем к более простому виду:

$$R_i = K_i \rho_n \eta L H_n^2. \quad (24)$$

Величина K_i (м/с^2 или Н/кг) – это натяжение, приходящееся на единицу условной массы пакета, или удельное натяжение:

$$K_1 = 0,5g\lambda_a(h_p - \frac{2}{3}); \quad (25)$$

$$K_2 = 0,5g\lambda_a(h_p - \frac{1}{3}); \quad (26)$$

$$K_3 = 0,5g\lambda_a(h_p + \frac{1}{3}); \quad (27)$$

$$K_4 = 0,5g\lambda_a(h_p + \frac{2}{3}). \quad (28)$$

Первичными факторами, определяющими данные удельные натяжения, являются угол внутреннего трения круглых лесоматериалов в пакете $\varphi_{\text{тр}}$ и коэффициент формы пакета C . Для сортиментов, доставляемых сплавом, справочные значения $\varphi_{\text{тр}}$ варьируются в довольно узком диапазоне. C достаточной для практики точностью можно считать $\varphi_{\text{тр}}$ постоянной величиной, равной 27° [6]. Сделав расчеты по формулам (25)–(28), построим графики зависимости K_i от C (рис. 3). Они будут полезными при выполнении практических расчетов по формуле (24).

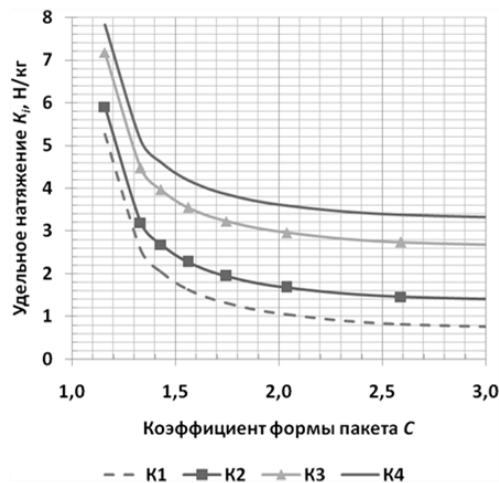


Рис. 3. Графики зависимости удельных натяжений K_i от коэффициента формы пакета C

Методика подбора сплottedного такелажа при известном натяжении знакома специалистам [3, 4], потому в данной статье не рассматривается.

После наложения и утяжки пучковых обвязок часть распорных усилий передается на них. Но натяжения, которые при этом возникают в обвязках, существенно меньше внешних усилий, прикладываемых к ним при утяжке. Это объясняется тем, что утяжке препятствуют силы пассивного отпора совокупности лесоматериалов, а после замыкания эти обвязки воспринимают силы активного распора. Первые значительно больше вторых. Кроме того, силы трения обвязок по лесоматериалам препятствуют утяжке, а после замыкания обвязок эти силы уменьшают растягивающие усилия в них, т. е. расчетным в данном случае является усилие утяжки, которое задают в технических условиях. Практика показывает, что для обвязок пакетного пучка это усилие целесообразно задавать более 10 кН.

Выполнение нами разработки позволяют определять усилия в сплottedном такелаже находящегося на суше пакетного пучка. Их использование предполагается также для оценки связей его параметров с способностью противодействовать продольному смещению составляющих пучок лесоматериалов и обвязок при транспортировке по воде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абуханов А.З.* Механика грунтов: учеб. пособие. Ростов н/Д.: Феникс, 2006. 352 с.
2. *Воробьев А.Г.* О расчете по эластической теории пучковых плотов для случая нахождения их на суше // Лесоинженерное дело: науч. докл. высш. шк. 1958. Вып № 3. С. 40.
3. Инструкция по эксплуатации такелажа на лесосплаве. М.: ВНИПИЭИЛеспром, 1980. 134 с.
4. *Камусин А.А., Дмитриев Ю.Я., Минаев А.Н., Овчинников М.М., Пятакин В.И., Пименов А.Н., Полищук В.П.* Водный транспорт леса: учеб. для вузов. 2-е изд. М.: Изд-во МГУЛ, 2000. 432 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. *Реутов Ю.М.* Расчеты пучков (пакетов) круглых лесоматериалов. М.: Лесн. пром-сть, 1975. 152 с.
7. *Фихтенгольц Г.М.* Курс дифференциального и интегрального исчисления: учеб. для вузов. 9-е изд. Т.2. СПб: Лань, 2009. 799 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. *Craig R.F.* Soil Mechanics. 6th ed. London, New York: E & FN Spon, 1997. 485 p.
10. *Whittaker E.T., Watson G.N.* A Course in Modern Analysis. 4th ed. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2009. 620 p.

Поступила 19.03.2015

UDC 634.0.378

Strains Determination in the Flexible Tie of a Packaged Log Rafting Overland Bundle

S.V. Posypanov, Candidate of Engineering, Associate Professor

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russia; e-mail: s.posypanov@narfu.ru

Developed construction and technology of raft assembly of packaged log rafting bundles make possible to form the rafts in the winter season by small logging enterprises, allowing to decrease the transportation costs avoiding sufficient investments. Taking into consideration significant increase of the requirements for ecological safety of the timber floating and elimination of wood substance losses during its waterborne transport, the correct evaluation of the forces in the flexible ties of a packaged log bundle is becoming more important. This problem is solved on the base of combined method based on theories of elastics and free-flowing medium. The highest strains in the flexible ties arise while it is on overland. This case was taken as a calculation. An assembly of bundle logs is considered as a free-flowing medium affected by gravity forces. For finding of vertical pressures in this medium it is requires to know a characteristic height, which determines the position of piezometric surface. Based on elastics theory, the dependencies between characteristic height, vertical dimension of a bundle and its shape coefficient, including a modular angle, which cannot be measured in practical conditions, were found out. In order to eliminate a modular angle, a term of relative characteristic height and the graphic charts for its evaluation were introduced. A vertical compression of a free-flowing medium causes horizontal pull out forces balanced with reactions in the strappings of the bundles. Equations for evaluation of equivalent forces in upper and lower packages were developed. Reactions in the upper and lower strappings of both packages were derived from the momental equations. The graphic charts for determination of tensioning coefficients (introduced term) were worked out. It was proved, that the bundle strappings ought to be computed upon the external forces applied during packaging. The results presented in the article allow to determinate the raft gearing tensions for a packaged log overland bundle. Besides that, the data obtained could be applied for assessment of relationship between parameters of a package and longitude stability of a log bundle during water transportation.

Keywords: timber rafting, package, bundle, strapping, durability, elastics, free-flowing medium

REFERENCES

1. Abukhanov A.Z. *Mekhanika gruntov* [Soil Mechanics]. Rostov-na-Donu, 2006. 352 p.
2. Vorob'ev A.G. O raschete po elastikovoy teorii puchkovykh plotov dlya sluchaya nakhozheniya ikh na sushe [Application of the Elastics Theory for Design of Log Bundle Rafts Placed Overland]. *Lesoinzhenernoe delo*, 1958, Iss. 3. p. 40.
3. *Instruktsiya po ekspluatatsii takelazha na lesosplave* [Rules for Usage of Rigging at TIMBER floating]. Moscow, 1980. 134 p.

4. Kamusin A.A., Dmitriev Yu.Ya., Minaev A.N., Ovchinnikov M.M., Patyakin V.I., Pimenov A.N., Polishchuk V.P. *Vodnyy transport lesa* [Water Timber Transport]. Moscow, 2000. 432 p.
5. Posypanov S.V. Kombinirovannyi metod rascheta paketa kruglykh lesomaterialov, ulozhennogo na gorizonta'l'nom osnovanii [Combined Calculating Method of Round Timber Pile Stacked on Horizontal Foundation]. *Lesnoy zhurnal*, 2011, no. 1, pp. 47–52.
6. Reutov Yu.M. *Raschety puchkov (paketov) kruglykh lesomaterialov* [Design of the Bundles/Packages of Roundwood]. Moscow, 1975. 152 p.
7. Fikhtengol'ts G.M. *Kurs differentsial'nogo i integral'nogo ischisleniya* [Course of Differential and Integral Calculation]. St-Petersburg, 2009, vol. 2. 799 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. Craig R.F. *Soil Mechanics*, 6th ed. London, New York: E & FN Spon, 1997. 485 p.
10. Whittaker E.T., Watson G.N. *A Course in Modern Analysis*, 4th ed. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2009. 620 p.

Received on March 19, 2015