

УДК 630*378

С.В. Посыпанов

Северный (Арктический) федеральный университет

Посыпанов Сергей Валентинович родился в 1961 г., окончил в 1983 г. Архангельский лесотехнический институт, кандидат технических наук, доцент кафедры водного транспорта леса и гидравлики Северного (Арктического) федерального университета. Имеет около 30 печатных работ в области лесотранспортного использования малых и средних рек, информационного обеспечения лесопромышленного производства.
Тел.: 8(8182) 21-61-50



КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПАКЕТА КРУГЛЫХ ЛЕСОМАТЕРИАЛОВ, УЛОЖЕННОГО НА ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ОСНОВАНИИ

На основе эластиковой теории получены аналитические зависимости для определения натяжения в обвязках пакета круглых лесоматериалов, уложенного на горизонтальном основании.

Ключевые слова: лесосплав, пакет, пучок, обвязка, эластика.

Для транспортировки древесины по водным путям без потерь, минимизации воздействия на водную среду весьма существенна правильная оценка прочностных характеристик лесотранспортных единиц, в частности пакетов круглых лесоматериалов или лесосплавных пучков. В принятой ныне трактовке под прочностью лесосплавного пучка понимается способность обвязок обеспечивать сохранение его формы под действием сил распора бревен. Она характеризуется прочностью обвязок [4].

Наибольшую нагрузку в состоянии покоя обвязки испытывают, когда пакет лесоматериалов уложен на твердое основание, например на плотбище. Этот случай будем рассматривать как расчетный.

Согласно эластиковой теории [2] совокупность комплектующих пакет бревен уподобляется некой несжимаемой жидкости, а сам пакет – части матерчатой невесомой бесконечно длинной цилиндрической оболочки, наполненной под давлением этой жидкостью.

Поперечный профиль пакета бревен, лежащего на плоской горизонтальной поверхности (рис. 1), в данном случае может быть описан параметрическими уравнениями в осях xOy :

$$x = \frac{1}{4} Hf; \quad (1)$$

$$y = H\Delta, \quad (2)$$

где y – ордината, расстояние по вертикали от любой точки кривой профиля до уровня жидкости в пьезометрической трубке на расчетной схеме;

x – абсцисса;

H – характерная высота.

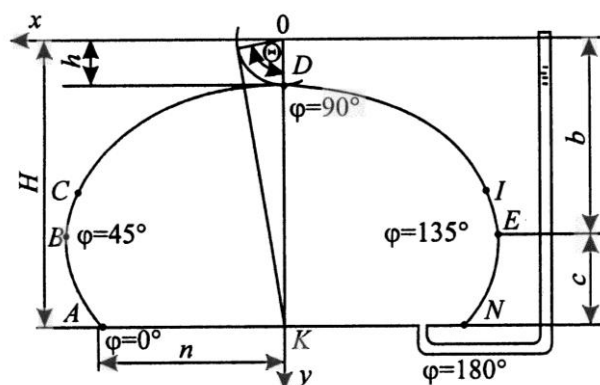


Рис. 1. Расчетная схема пакета бревен, лежащего на плоской горизонтальной поверхности

$$f = f(\Theta, \varphi) = 2 \left\{ (2 - \sin^2 \Theta) [K(\Theta) - F(\Theta, \varphi)] - 2 [E(\Theta) - E(\Theta, \varphi)] \right\}; \quad (3)$$

$$\Delta = \Delta(\Theta, \varphi) = \sqrt{1 - \sin^2 \Theta \sin^2 \varphi}; \quad (4)$$

Θ – модулярный угол;

$K(\Theta), E(\Theta)$ – полные эллиптические интегралы;

$F(\Theta, \varphi), E(\Theta, \varphi)$ – неполные эллиптические интегралы;

φ – угол, изменяющийся вдоль кривой так, как отмечено на рис. 1.

Для заданной кривой, называемой бесперегибной эластикой, характерная высота H и модулярный угол Θ постоянны. Таким образом, в рассматриваемом случае параметром является угол φ .

Из уравнений (1) и (2) можно получить выражения для определения основных геометрических характери-

$$C = \frac{B_{\Pi}}{H_{\Pi}} = \frac{1}{2} \left\{ (2 - \sin^2 \Theta) [K - F(\Theta, 45^\circ)] - 2 [E - E(\Theta, 45^\circ)] \operatorname{cosec}^2 \frac{\Theta}{2} \right\}. \quad (9)$$

Как видно из выражения (9), коэффициент C является только функцией от модулярного угла Θ . Между этими величинами существует однозначная зависимость. Можно также сказать, что угол Θ является функцией от C . Каждая из этих величин однозначно определяет форму эластички, а характерная высота H – размеры кривой.

Недостаток выражений, полученных благодаря эластиковой теории, заключается в том, что они не позво-

стик пакета. Ограничимся лишь теми, которые понадобятся нам в данном случае.

Высота пакета

$$H_{\Pi} = H - h = (1 - \cos \Theta)H = 2H \sin^2 \frac{\Theta}{2}. \quad (5)$$

Ширина пакета

$$B_{\Pi} = 2x_B = \frac{1}{2} H f(\Theta, 45^\circ). \quad (6)$$

Произведение ординаты точки линии (y) и ее кривизны (ρ)

$$y\rho = \frac{1}{4} H^2 \sin^2 \Theta = \text{const}. \quad (7)$$

Площадь поперечного сечения пакета

$$\Omega = H^2 [(2 - \sin^2 \Theta)K - 2E]. \quad (8)$$

На основании формул (5) – (7) запишем коэффициент формы пакета:

можно получить в явном виде зависимость одних общеупотребимых параметров пакета от других. Приходится задаваться различными значениями Θ и φ и находить соответствующие параметры, например высоту и ширину пакета.

В данном случае представляет интерес безразмерная величина

$$h_p = \frac{H}{H_{\Pi}}.$$

В соответствии с выражением (5)

$$h_p = \frac{H}{(1 - \cos \Theta)H} = \frac{1}{1 - \cos \Theta} = \frac{H}{2H \sin^2 \frac{\Theta}{2}} = \frac{1}{2 \sin^2 \frac{\Theta}{2}}. \quad (10)$$

Эта величина показывает относительную высоту или толщину слоя «пучковой жидкости» в пьезометре, во сколько раз она больше высоты пучка. Согласно выражению (10) h_p зависит от модулярного угла Θ или коэффици-

ента формы C , т. е. только от формы пучка.

Для практических целей зависимость h_p от Θ удобнее заменить зависимостью h_p от C , что несложно сделать, имея в виду выражение (9). Зави-

симось $h_p = \gamma(C)$ можно представить в табличном виде (табл. 1).

Таблица 1

| Θ, град | C | h_p | Θ, град | C | h_p |
|---------|------|-------|---------|------|-------|
| 45 | 1,16 | 3,41 | 75 | 1,75 | 1,35 |
| 60 | 1,33 | 2,00 | 80 | 2,04 | 1,21 |
| 65 | 1,43 | 1,73 | 85 | 2,59 | 1,10 |
| 70 | 1,56 | 1,52 | 89 | 4,04 | 1,02 |

Для речных пакетов, т. е. при $C = 2 \dots 3$ величина H превышает высоту пакета H_n не более чем на 21 %. При этом зависимость h_p от C в указанном диапазоне близка к линейной. Для промежуточных C значения h_p можно с достаточной точностью получить в результате интерполяции.

В связи с тем, что при сплотке пучков на берегу зачастую приходится в качестве опоры использовать соседний готовый пучок, интерес могут представлять такие безразмерные величины, как c/H и n/H (рис. 1). Первая из них – это относительная высота наиболее выступающей боковой точки пучка:

$$h_E = \frac{c}{H} = 1 - \sqrt{\frac{2 - \sin^2 \Theta}{2}}, \quad (11)$$

Для речных пучков при $C = 2 \dots 3$ величина h_E меняется очень незначительно. Высота наиболее выступающей боковой точки пучка составляет чуть менее 30 % от H , которая, в свою очередь, в указанном диапазоне C немного превышает высоту самого пучка. Для озерных пучков при $C \leq 1,5$ разброс h_E хотя и несколько больше,

вторая – относительное полуотверстие эластике:

$$b_n = \frac{n}{H} = \frac{1}{2} [(2 - \sin^2 \Theta)K - 2E]. \quad (12)$$

Учитывая, что верхняя часть эластике с обеспечением достаточной точности может быть заменена полуэллипсом, а нижняя двумя четвертями эллипсов [2], можно утверждать, что величины h_E , b_n в совокупности с C дают достаточно полное представление о форме эластике. Размеры ее определяются величиной H .

Для полноты картины рассмотрим еще одну безразмерную величину – относительную площадь поперечного сечения пакета ω_H . С учетом выражения (8)

$$\omega_H = \frac{\Omega}{H^2} = (2 - \sin^2 \Theta)K - 2E. \quad (13)$$

Согласно формулам (11) – (13) рассматриваемые безразмерные величины зависят только от модулярного угла Θ . Для практики лесосплава их лучше заменить зависимостями от коэффициента формы C , как мы это уже делали для h_p . Они представлены в табличной форме (табл. 2).

Таблица 2

| Θ, град | C | h_E | b_n | c/H_n | n/H_n | ω_H |
|---------|------|-------|-------|---------|---------|------------|
| 45 | 1,16 | 0,134 | 0,040 | 0,457 | 0,136 | 0,080 |
| 60 | 1,33 | 0,209 | 0,137 | 0,419 | 0,273 | 0,273 |
| 65 | 1,43 | 0,232 | 0,197 | 0,402 | 0,341 | 0,394 |
| 70 | 1,56 | 0,253 | 0,280 | 0,384 | 0,426 | 0,561 |
| 75 | 1,75 | 0,270 | 0,400 | 0,364 | 0,540 | 0,801 |
| 80 | 2,04 | 0,282 | 0,584 | 0,342 | 0,707 | 1,168 |
| 85 | 2,59 | 0,290 | 0,918 | 0,318 | 1,005 | 1,835 |
| 89 | 4,04 | 0,293 | 1,717 | 0,298 | 1,748 | 3,435 |

но тоже невелик. Здесь H существенно больше высоты пучка. Полагаем, что интерес представляют также отношения c и n к высоте пучка H_n , которые также приведены в табл. 2.

Зависимости относительного полуотверстия эластике от коэффициента формы пакета близки к линейным. Для этого случая мы подобрали

эмпирические выражения (при $C = 1,16...4,04$)

$$b_{\Pi} = 0,586C - 0,630; \quad (14)$$

$$\frac{n}{H_{\Pi}} = 0,550C - 0,446. \quad (15)$$

Зависимость относительной площади от коэффициента формы пакета также близка к линейной. Подобрано эмпирическое выражение (при $C = 1,16...4,04$)

$$\omega_H = 1,172C - 1,261. \quad (16)$$

Геометрические параметры пакетов, получаемые с помощью эластической теории, достаточно точны, чего нельзя сказать о силовых характеристиках [6]. Дело в том, что эластическая теория не учитывает силы внутреннего трения в пакете, трение обвязок о бревна. Кроме того, не следует забывать об уже отмеченных неудобствах, связанных с невозможностью в явном виде выразить одни общеупотребимые параметры пакета через другие. В связи с этим, приняв во внимание полученную зависимость $h_p = \gamma(C)$, рассмотрим силовые характеристики пакета, используя другой подход к решению задачи.

Расчетная схема сил, действующих на пакет, уложенный на горизонтальном основании, представлена на рис. 2.

Совокупность бревен пакета будем считать сыпучей средой, которая сжимается под воздействием сил тяжести (равнодействующая G) и реакции основания (равнодействующая R). В результате вертикального сжатия сыпучей среды возникают горизонтальные распорные усилия. Вертикальное давление p в определенной точке наиболее высокого продольного сечения пучка может быть определено по формуле

$$p = \gamma_d \eta g h_o, \quad (17)$$

где γ_d – объемная масса бревен в пакете;
 η – коэффициент полндревесности пакета;

g – ускорение свободного падения;
 h_o – расстояния по вертикали от точки O (см. рис. 2).

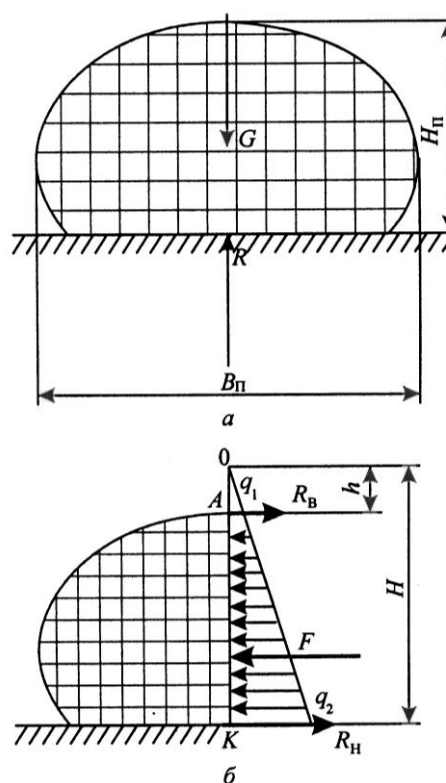


Рис. 2. Расчетная схема сил, действующих на пакет: а, б – схемы соответственно внешних и внутренних сил

Горизонтальное давление q (см. эпюру на рис. 2) пропорционально вертикальному p :

$$q = p \lambda_a, \quad (18)$$

где λ_a – коэффициент активного давления.

Горизонтальное давление в верхней точке пакета

$$q_1 = \gamma_d \eta g \lambda_a (H - H_{\Pi}); \quad (19)$$

в нижней

$$q_2 = \gamma_d \eta g \lambda_a H. \quad (20)$$

Сила горизонтальных давлений для рассматриваемого сечения (равнодействующая распорных усилий)

$$F = 0,5(q_1 + q_2)H_{\Pi}L, \quad (21)$$

где L – длина бревен в пакете.

Это усилие уравнивается реакциями в верхних и нижних ветвях обвязок R_B и R_H .

Сумма моментов относительно точки A :

$$R_H H_{II} - FH_{II} \frac{\frac{1}{3}q_1 + \frac{2}{3}q_2}{q_1 + q_2} = 0; \quad (22)$$

относительно точки K :

$$FH_{II} \frac{\frac{2}{3}q_1 + \frac{1}{3}q_2}{q_1 + q_2} - R_B H_{II} = 0. \quad (23)$$

Выразим R_H и R_B из формул (22), (23), вместо q_1 , q_2 и F подставим правые части выражений (19) – (21) и после преобразований получим

$$R_H = 0,5\gamma_d \eta g \lambda_a L H_{II} (H - \frac{1}{3}H_{II}); \quad (24)$$

$$R_B = 0,5\gamma_d \eta g \lambda_a L H_{II} (H - \frac{2}{3}H_{II}). \quad (25)$$

Измерить высоту H весьма проблематично. Вспомним введенную нами относительную высоту h_p , равную отношению H к H_{II} . С учетом этого отношения после несложных преобразований перепишем выражения (24) и (25):

$$R_H = 0,5\gamma_d \eta g \lambda_a L H_{II}^2 (h_p - \frac{1}{3}); \quad (26)$$

$$R_B = 0,5\gamma_d \eta g \lambda_a L H_{II}^2 (h_p - \frac{2}{3}). \quad (27)$$

Определить величину h_p можно ранее рекомендованным способом.

Коэффициент активного давления для сыпучей среды может быть установлен из выражения

$$\lambda_a = \operatorname{tg}^2 (45^\circ - \frac{\varphi}{2}). \quad (28)$$

Натяжения распределяются на обе обвязки пакета. Подбор сечений обвязок при известном их натяжении отражен в соответствующей нормативно-справочной литературе, не вызывает вопросов и поэтому здесь не рассматривается. Как видно из формул (26), (27), большее натяжение у пакета, лежащего на твердом основании, возникает в нижних ветвях обвязок.

В настоящее время для определения натяжения в обвязках лесосплавного пучка, размещенного на горизонтальном основании, в нормативно-справочной и другой специальной литературе [1, 3, 5, 6] рекомендуется эмпирическая формула

$$R = \frac{0,15}{C - 0,83} mg. \quad (29)$$

В упомянутых литературных источниках не уточняется, для какой части обвязки рекомендуется эта формула.

Для сопоставления эмпирической и аналитических формул преобразуем выражения (26) и (27). Учитывая, что масса пакета может быть определена по формуле

$$m = \frac{\pi}{4} B_{II} H_{II} L \eta \gamma_d,$$

а ширина пакета

$$B_{II} = C H_{II},$$

запишем выражения (26) и (27) в виде

$$R_H = \frac{2\lambda_a (h_p - \frac{1}{3})}{C\pi} mg;$$

$$R_B = \frac{2\lambda_a (h_p - \frac{2}{3})}{C\pi} mg.$$

Теперь эмпирическая и аналитические формулы отличаются выражениями, расположенными перед произведением mg . Назовем их удельными натяжениями обвязок – натяжениями на единицу веса пакета. Сравним эти величины, представив зависимости удельных натяжений обвязок от коэффициента формы пакета в графическом виде (рис. 3).

По графикам видно, что удельные натяжения в нижних ветвях обвязок, полученные аналитическим путем и по эмпирической формуле при $C > 1,25$, достаточно хорошо совпадают. При меньших значениях C результаты отличаются существенно, что говорит об

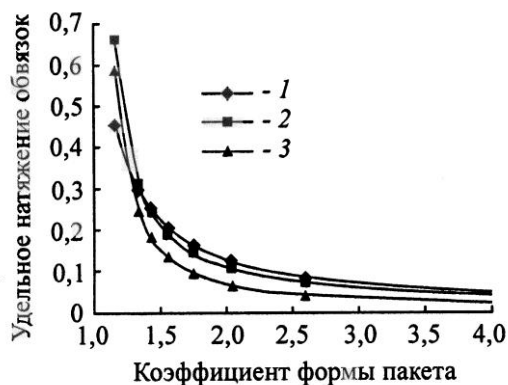


Рис. 3. Графики зависимостей удельного натяжения обвязок от коэффициента формы пакета: 1 – данные, полученные эмпирически; 2, 3 – то же аналитически для нижних и верхних ветвей обвязок

ограниченности применения эмпирической формулы. Эта формула только выглядит более простой, расчеты по ней не проще, так как не только C , но обычно и m устанавливают вычислительным путем. Кроме того, для дальнейшего анализа прочности удержания бревен в пакете необходимо знать натяжение не только в нижних, но и в верхних ветвях обвязок.

Преимущество полученных аналитических формул перед эмпирическими состоит и в том, что они нагляднее отражают физическую сущность явления, показывают зависимость натяжений в обвязках от изначально определяющих их величин. Натяжения в обвязках пропорциональны длине бревен, квадрату высоты пакета, его полнодревесности, объемной массе бревен и ускорению свободного падения. Они уменьшаются с увеличением угла внутреннего трения бревен. Зависимость от коэффициента формы пакета сказывается в выражениях (26) и (27) через относительную высоту h_p .

Для речных пучков с коэффициентом формы 2...3 эта зависимость хотя и довольно значима, но, вероятно, в меньшей степени, чем принято считать. Так, при увеличении коэффициента формы от 2 до 3 при прочих равных условиях натяжение в нижних ветвях обвязок уменьшится на 18, в верхних – на 36 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Водный транспорт леса: справочник / под ред. В.И. Пятякина. М.: Лесн. пром-сть, 1973. 404 с.
2. Воробьев А.Г. О расчете по эластической теории пучковых плотов для случая нахождения их на суше // Лесоинж. дело. 1958. № 3. С. 40. (Науч. докл. высш. шк.).
3. Инструкция по эксплуатации такелажа на лесосплаве. М.: ВНИПИЭИЛеспром, 1980. 134 с.
4. Плоты (конструкция, эксплуатация, технология) / М.Н. Фоминцев [и др.]; под ред. М.Н. Фоминцева. М.: Лесн. пром-сть, 1978. 216 с.
5. Правила (технические условия) сплотки, формирования и оснастки плотов для буксировки в Северодвинском бассейне. Архангельск, 1989. 65 с.
6. Реутов Ю.М. Расчеты пучков (пакетов) круглых лесоматериалов. М.: Лесн. пром-сть, 1975. 152 с.

Поступила 24.03.09

S.V. Posypanov
Northern (Arctic) Federal University

Combined Calculating Method of Round Timber Pile Stacked on Horizontal Foundation

The analytical dependencies are received based on the elastic theory for determination of tension in binding of round timber piles stacked on horizontal foundation.

Keywords: timber rafting, pile, bundle, binding, elastics.