

— «При перевозке лесных грузов и погрузке их на палубу выше планширя фальшборта для возможности формирования каравана и последующего крепления груза должны быть установлены стойки достаточной прочности, однако не превышающие прочности фальшборта... Расстояние между стойками должно соответствовать длине и роду перевозимых лесоматериалов, однако не превышать трех метров».

Из сравнения этих документов, которые в настоящее время являются главными регламентирующими порядок погрузки, крепления, перевозки лесных грузов документами, видно, что нет единого мнения о стеньговых стойках. При перевозке пакетированных пиломатериалов этот вопрос вообще недостаточно изучен. Практика перевозки пиломатериалов в пакетах, погруженных на палубу поперечно-продольным методом, позволяет исключить стеньговые стойки. Анализ приведенных выше документов показывает, что есть настоятельная необходимость выработать новые технические условия погрузки, крепления, перевозки пиломатериалов в пакетах с учетом условий имеющегося и проектируемого флота, предназначенного для транспортировки подобных грузов.

Е. Б. Карпович

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ШТАБЕЛЯ ТРУБ

Экспериментальные исследования и опыт морской перевозки показывают, что штабель труб, сформированный путем их естественной укладки (без применения стеньгов), подвержен трем видам разрушения в результате:

1) раскатывания труб нижнего ряда по опорной поверхности (палубе или крышке люка) под действием давления вышележащих труб;

2) выкатывания труб вышележащих рядов (при закрепленном нижнем ряде);

3) сдвига всего штабеля по опорной поверхности при ее наклоне.

Соответственно этому необходимость обеспечения несмещаемости труб на палубе выдвигает три задачи. При их теоретическом решении в качестве модели принимались абсолютно твердые трубы одинакового диаметра, соприкасающиеся по всей длине линий контактов, с постоянным коэффициентом трения по всей поверхности труб. При этих допущениях условия взаимодействия труб не зависят от их длины и задача может быть сведена к рассмотрению плоского поперечного сечения штабеля.

ЭЛЕМЕНТАРНЫЙ ШТАБЕЛЬ

Элементарный штабель представляет собой три трубы, уложенные в два слоя на горизонтальной плоскости (рис. 1, а). Рассмотрим условия равновесия такого штабеля.

Труба 1 покоится между двумя точками опоры. Центральный угол между радиусами, проведенными в эти точки, составляет

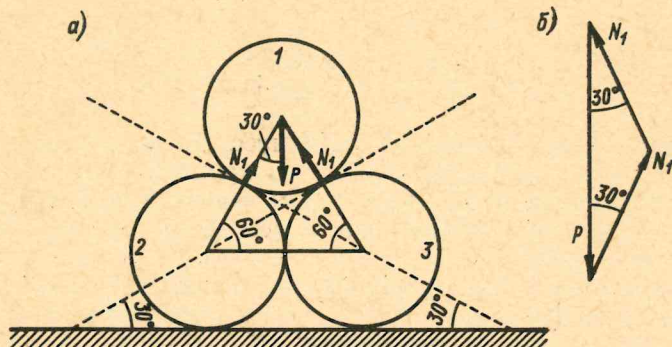


Рис. 1

60°. Верхняя труба 1 находится в равновесии под действием силы веса P и двух реакций опор N_1 , направленных по радиусам из точек касания верхней трубой двух нижних. Построив силовой треугольник (рис. 1, б), находим:

$$N_1 = \frac{P}{2 \cos 30^\circ}. \quad (1)$$

Элементарный штабель не будет раскатываться при условии (рис. 2), если сила давления N_1 трубы 1, сила трения $F_{тр} = fN_1$ между трубами 1 и 2, вес P трубы 2 и реакция опоры N в сумме дадут момент, равный нулю относительно точки опоры A , т. е. $\sum M_A = 0$. Вес P и реакция опоры N момента относительно точки A не создают и на рис. 2 не показаны.

Плечо a силы N_1 определяется по формуле:

$$a = R \sin 30^\circ, \quad (2)$$

а плечо b силы трения $F_{тр}$ — по выражению:

$$b = R + R \cos 30^\circ = R(1 + \cos 30^\circ), \quad (3)$$

где R — наружный радиус трубы.

Запишем условие равновесия трубы 2:

$$\sum M_A = N_1 a - F_{тр} b = 0; \quad (4)$$

$$N_1 a - f N_1 b = 0,$$

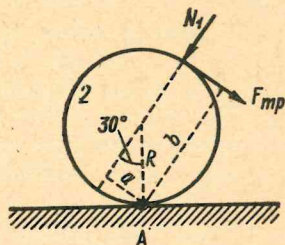


Рис. 2

отсюда

$$f = \frac{a}{b}.$$

С учетом формул (2) и (3)

$$f = \frac{R \sin 30^\circ}{R (1 + \cos 30^\circ)}$$

или

$$f = \frac{\sin 30^\circ}{1 + \cos 30^\circ} = \frac{0,288}{1,077} ; f = 0,267. \quad (5)$$

0,158

Таким образом, исходя из теоретического рассмотрения условий равновесия можно отметить, что наименьший коэффициент трения материала труб, при котором элементарный штабель не раскатывается на горизонтальном основании, должен быть не менее *0,267; 0,158*.

Лабораторные эксперименты показали, что элементарный штабель из оцинкованных труб ($f=0,364$) сохраняет свою форму, а штабель из гладких стеклянных труб ($f=0,21$) разрушается в результате самопроизвольного раскатывания труб.

Считаем нижние трубы условно закрепленными в точках касания основания и рассмотрим поведение трубы 1 в процессе статического наклонения (см. рис. 1, а). Труба 1 будет сохранять свое положение в штабеле до угла наклона в 30° . При этом угле вектор силы веса P будет проходить через точку опоры, и труба 1 придет в состояние неустойчивого равновесия.

Для изучения поведения элементарного штабеля в условиях динамического наклонения (качки) положение верхней трубы в штабеле можно представить как нахождение на двух пересекающихся наклонных плоскостях, установленных под углом 30° к горизонту (см. рис. 1, а).

Тогда можно приравнять силу, необходимую для удержания трубы на наклонной плоскости, силе инерции, возникающей на качке и стремящейся выкатить трубу из ее места в штабеле.

С увеличением амплитуды качки угол α наклона плоскости к горизонту уменьшается, т. е.

$$\alpha = 30^\circ - \theta_m. \quad (6)$$

Сила, необходимая для удержания трубы на наклонной плоскости, будет:

$$F^1 = mg \sin (30^\circ - \theta_m). \quad (7)$$

Составляющая силы инерции, стремящаяся поднять трубу по наклонной плоскости,

$$F_n = ml\sigma^2 \theta_m \cos \beta. \quad (8)$$

В формулах (7) и (8): m — масса трубы, кг; $g=9,81$ м/с²; θ_m — амплитуда качки, рад; l — расстояние от центра тяжести

трубы до оси вращения судна при бортовой качке, m ; σ — круговая частота качки $\bar{\sigma}$, $\sigma = \frac{2\pi}{T}$; T — период бортовой качки; β — угол между линией действия силы инерции и наклонной плоскостью (зависит от расположения трубы относительно оси вращения).

Предельным условием сохранения верхней трубой своего места в элементарном штабеле будет:

$$F^I = F_{и\sigma} \quad (9)$$

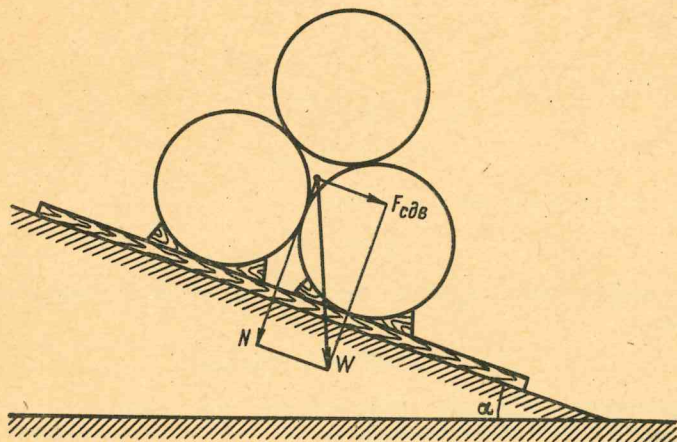


Рис. 3

Решая уравнение (9) относительно θ_m , получаем:

$$\frac{\theta_m}{\sin(30^\circ - \theta_m)} = \frac{g}{l\sigma^2 \cos \beta}.$$

Подставляя $\sigma = \frac{2\pi}{T}$, получим:

$$\frac{\theta_m}{\sin(30^\circ - \theta_m)} = \frac{T^2 g}{4\pi^2 l \cos \beta}. \quad (10)$$

Уравнение (10) может быть решено графически относительно θ_m , т. е. из него можно определить то значение амплитуды бортовой качки, при котором произойдет разрушение элементарного штабеля. К тому же надо иметь в виду, что $\theta_m \leq 30^\circ$, так как при больших углах штабель раскатывается при статическом наклонении.

Угол β имеет минимальное значение в 30° для трубы, ось которой лежит в диаметральной плоскости судна (в одной вертикальной плоскости с осью вращения).

Максимальное значение угла β составляет 90° , т. е. при этом значении сила инерции не дает составляющей, стремящейся выкатить трубу из штабеля:

$$30^\circ \leq \beta \leq 90^\circ.$$

Сдвиг элементарного штабеля по опорной поверхности при ее наклоне рассматривается в простейшем случае, когда штабель труб заменяется монолитом эквивалентного веса W , уложенным на наклонную плоскость (рис. 3).

Тогда условие неподвижности штабеля на наклонной плоскости

$$F_{\text{тр}} \geq F_{\text{сдв}}, \quad (11)$$

а с учетом того, что

$$F_{\text{тр}} = f N = f W \cos \alpha; \quad (12)$$

$$F_{\text{сдв}} = W \sin \alpha, \quad (13)$$

условие (11) можно записать так

$$f \geq \operatorname{tg} \alpha, \quad (14)$$

где f — коэффициент трения между опорной поверхностью и штабелем.

ПРОИЗВОЛЬНЫЙ ШТАБЕЛЬ

Рассмотрим условия равновесия произвольного штабеля (с числом слоев труб более двух).

Исследования показали, что произвольный штабель, в отличие от элементарного, разрушается в результате самопроизвольного раскатывания труб независимо от материала, из которого они изготовлены.

Процесс разрушения рассмотрим на примере штабеля, состоящего из трех слоев труб (рис. 4). Разрушение происходит путем раскатывания труб в следующем порядке:

1) труба 1 катится под действием момента $2N_1 a$ по опорной поверхности и отходит от трубы 6;

2) вращение трубы 1 вследствие трения скольжения передается трубе 2, которая катится по поверхности трубы 1 и теряет контакт с трубами 4 и 6; так как давление в точках касания трубой 2 труб 1 и 6 разное, то и сила трения в точке

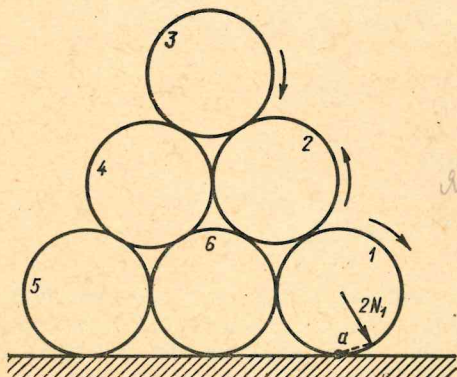


Рис. 4

касания трубой 2 труб 1 и 6 разное, то и сила трения в точке

контакта труб 2 и 6 меньше, чем в точке контакта труб 2 и 1, вследствие этого происходит первоначальное незначительное проскальзывание трубы 2 по трубе 6, после чего контакт вообще теряется;

3) труба 3 катится по поверхности трубы 2 и одновременно по поверхности трубы 4, опускаясь в пространство, освобождаемое трубой 2;

4) в некоторый момент времени составляющая веса превышает силы трения в местах контакта трубы 2 с трубами 1 и 3,

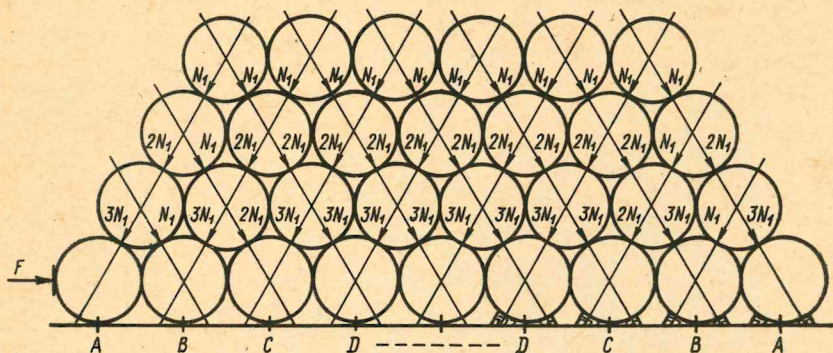


Рис. 5

и труба 2, срываясь, падает в образовавшийся промежуток между трубами 1 и 6, и штабель окончательно разрушается.

На примере штабеля, изображенного на рис. 5, рассмотрим силы, вызывающие его раскатывание по горизонтальной плоскости.

Определим моменты, катящие трубы относительно точек опоры A, B, C, D...

$$\left. \begin{aligned} M_{\text{рас}A} &= 3N_1a; \\ M_{\text{рас}B} &= 3N_1a - N_1a = (3-1)N_1a; \\ M_{\text{рас}C} &= 3N_1a - 2N_1a = (3-2)N_1a; \\ M_{\text{рас}D} &= 3N_1a - 3N_1a = (3-3)N_1a = 0; \\ \Sigma M &= M_{\text{рас}A} + M_{\text{рас}B} + M_{\text{рас}C} + M_{\text{рас}D}, \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

где N_1 определяется по формуле (1).

$$\Sigma M = 3N_1a + 2N_1a + N_1a + 0 = N_1a(3+2+1) = N_1aS_{(n-1)}$$

$$\Sigma M = \frac{P}{2 \cos 30^\circ} R \sin 30^\circ (n-1) = \frac{\text{tg } 30^\circ}{2} pRS_{(n-1)} \quad (16)$$

$$\Sigma M = 0,289pRS_{(n-1)}, \quad (17)$$

где n — число слоев по высоте штабеля; S_{n-1} — сумма чисел натурального ряда от 1 до $n-1$.

Сила, достаточная для предотвращения раскатывания штабеля

$$F = \frac{\sum M}{R} = \frac{0,289 p R (n-1)}{R} = 0,289 p S_{(n-1)} \quad (18)$$

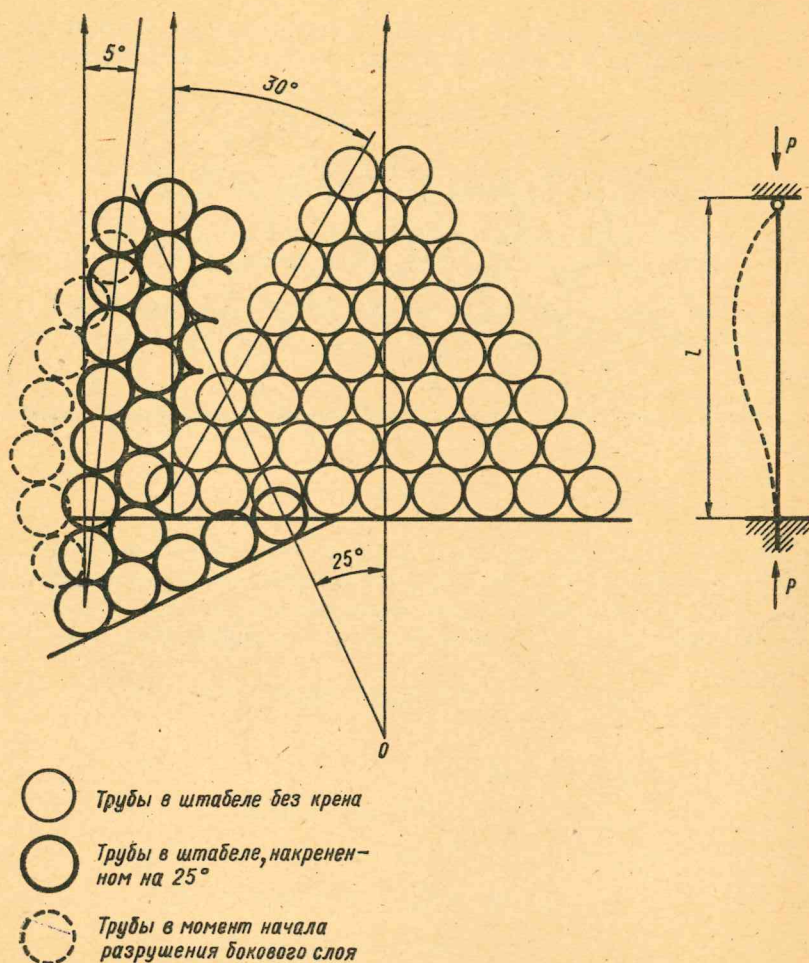


Рис. 6

Формула (18) может служить для расчета ограждающих устройств, предназначенных предотвращать раскатывание труб при их штабелировании в статических условиях, например, в портах.

Характер разрушения произвольного штабеля на горизонтальной плоскости показывает, что раскатывание происходит

под действием момента составляющей силы веса труб относительно точки опоры нижней трубы. Следовательно, для предотвращения раскатывания штабеля нужно подвести опору на линию действия раскатывающей силы. Роль такой опоры на практике могут играть деревянные клинья соответствующих размеров, подводимые с боков под трубы нижнего слоя.

Изучение поведения произвольного штабеля в условиях динамического наклонения (качки) показало, что до того, как произойдет выкатывание крайней трубы верхнего ряда под действием сил инерции, происходит потеря «устойчивости формы» боковым слоем труб. Это позволило в качестве модели явления принять потерю устойчивости стержня при продольном сжатии, как это показано на рис. 6. Для расчета устойчивости воспользуемся формулой Эйлера¹.

$$P_k = \pi^2 \frac{EJ_{\min}}{[\mu l]^2}, \quad (19)$$

где $EJ_{\min}$ — жесткость стержня; μl — приведенная длина стержня.

Возвращаясь к штабелю труб, видим, что случай, изображенный на рис. 6, соответствует случаю, при котором нижний конец стержня зашкелен, а верхний укреплен на шарнире. Тогда:

$$\mu \approx \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0,7.$$



Рис. 7

Подвариантом задачи будет случай, когда на штабель, сформированный путем естественной укладки труб, наложены гибкие связи (найтовы).

Экспериментальные исследования на стенде показали, что наложение гибких связей приводит как бы к зашкелению и верхнего конца стержня. Тогда аналогией бокового слоя труб будет стержень, изображенный на рис. 7. Такому зашкелению концов стержня соответствует коэффициент $\mu = 1/2$.

Стержень с зашкеленными концами обладает в два раза большей устойчивостью, чем стержень с одним зашкеленным и другим шарнирно закрепленным концами.

Сдвиг произвольного штабеля по наклонной плоскости рассматривается и решается аналогично сдвигу элементарного штабеля.

¹ Рудицын М. Н., Артемов П. Я., Любошиц М. И. Справочное пособие по сопротивлению материалов. Под общей ред. Рудицына М. Н. Минск, Госиздат БССР, 1958.