

DOI: 10.15393/j2.art.2023.6623

УДК 630\*378.33

Статья

## Расчёт прочности модернизированной плоской сплottedной единицы

**Васильев Владимир Викторович**

*кандидат технических наук, Филиал АО «УК ЭФКО» в г. Алексеевке  
(Российская Федерация), [vasiliev.vladimir87@mail.ru](mailto:vasiliev.vladimir87@mail.ru)*

**Афоничев Дмитрий Николаевич**

*доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», г. Воронеж (Российская Федерация),  
[dmafonichev@yandex.ru](mailto:dmafonichev@yandex.ru)*

*Получена: 19 ноября 2022 / Принята: 13 января 2023 / Опубликовано: 22 января 2023*

---

**Аннотация:** Возобновление сплава лесоматериалов на малых и средних реках требует совершенствования плоских сплottedных единиц, характеризующихся высокими транспортно-эксплуатационными показателями. Представлена модернизированная плоская сплottedная единица, имеющая высокие транспортно-эксплуатационные показатели и упрощённую конструкцию, которая обеспечивает возможность изготовления данной сплottedной единицы в сплottedной машине. Указанные преимущества плоской сплottedной единицы достигнуты тем, что ряды круглых лесоматериалов укладываются между нижними и верхними поперечными прокладками, где верхние поперечные прокладки, предварительно прижатые по всей длине к круглым лесоматериалам в сплottedной машине, соединены с нижними поперечными прокладками с помощью сплottedного такелажа. Практическая эксплуатация рассмотренной плоской сплottedной единицы на первоначальном сплаве лесоматериалов требует определение её ключевых транспортно-эксплуатационных показателей с акцентом на расчёт прочности сплottedной единицы. Предложена методика расчёта прочности плоской сплottedной единицы, заключающаяся в обосновании геометрических параметров нижних и верхних поперечных прокладок, колец с ребристой внутренней поверхностью, цепей и талрепы. Обоснование геометрических параметров нижних и верхних поперечных прокладок основывалось на учёте всех видов напряжений, возникающих в поперечных прокладках при действии на них

различных внешних и внутренних сил, предельно допускаемого напряжения древесины прокладок и комплекса коэффициентов запаса прочности. При обосновании параметров сплочного такелажа учитывались деформации, возникающие в кольцах с ребристой внутренней поверхностью, цепях и талрепе при действии на них максимальной силы, предельно допускаемое напряжение материала, из которого изготавливается сплочный такелаж, и коэффициент запаса прочности. Получены зависимости для расчёта диаметра в верхнем отрезе нижних и верхних поперечных прокладок. Также получены зависимости для расчёта толщины колец с ребристой внутренней поверхностью и диаметра сварной цепи, определено условие выбора талрепы. Реализация сплава древесины на базе модернизированной плоской сплочной единицы с обязательным расчётом геометрических параметров нижних и верхних поперечных прокладок и сплочного такелажа по представленной методике даст возможность выполнять безаварийный сплав лесоматериалов с высокой экономической эффективностью.

**Ключевые слова:** сплочная единица, такелаж сплочный, прочность

---

DOI: 10.15393/j2.art.2023.6623

Article

## Calculation of the upgraded flat unit strength

**Vladimir Vasiliev**

*Ph. D. in engineering, Branch of JSC «UK EFKO» in Alekseevka (Russian Federation),  
vasiliev.vladimir87@mail.ru.*

**Dmitry Afonichev**

*D. Sc. in engineering, professor, Federal State Budget Education Institution  
of Higher Education «Voronezh State Agrarian University named after  
Emperor Peter the Great», Voronezh (Russian Federation), dmafonichev@yandex.ru*

*Received: 19 November 2022 / Accepted: 13 January 2023 / Published: 22 January 2023*

---

**Abstract:** Timber floating on small and medium-sized rivers requires the improvement of flat-flow units characterized by high transport and performance indices. The authors present a modernized flat-flow unit which has high transport and performance indices. A simplified design of the unit allows its manufacturing in a flat-flow machine. This is achieved when rows of round timber are stacked between the lower and upper transverse stickers, where the upper transverse stickers previously pressed along the entire length to the round timber in the flat machine are connected to the lower transverse stickers with raft cables. The practical operation of the considered flat raft unit for the initial timber floating requires its key transport and performance indices calculation with the focus on the calculation of the raft unit strength. The calculation method substantiates the geometric parameters of the lower and upper transverse stickers, rings with a ribbed inner surface, chains and lanyards. The justification of the geometric parameters of the lower and upper transverse stickers was based on taking into account all types of stresses arising in the transverse stickers subjected to various external and internal forces, the maximum allowable stress of the wood of the stickers and a set of safety factors. To justify the parameters of the raft cables the authors took into account deformations occurring in rings with a ribbed inner surface, chains and lanyards subjected to maximum force, the maximum allowable stress of the raft cables material and the safety factor. Dependency for calculating the diameter in the upper section of the lower and upper transverse stickers is obtained. Dependencies for calculating the thickness of rings with a ribbed inner surface and the diameter of the welded chain are also obtained, the condition for choosing lanyards is determined. Timber floating based on a modernized flat raft unit implementation with the mandatory

calculation of the geometric parameters of the lower and upper transverse stickers and raft cables according to the presented methodology will allow a trouble-free timber floating with high economic efficiency.

**Keywords:** flat raft unit, transverse stickers, raft cables, strength

---

## 1. Введение

Использование существующих водных объектов для сплава древесины в настоящее время осуществляется не равномерно: основная нагрузка ложится на большие и крупные реки, а также озёра и водохранилища. При этом малые и средние реки, к которым примыкают большие запасы высококачественной спелой древесины, в меньшей степени эксплуатируются. Основной причиной низкой степени эксплуатации малых и средних рек является отмена молевого сплава древесины [1—5], который широко применялся на данных водных объектах.

Отмена молевого сплава древесины на водных объектах Российской Федерации послужила развитию новых способов транспортировки лесоматериалов на реках с лимитирующими габаритами сплавного хода. Первый способ включает использование на малых и средних реках микропучков [4], [6—7], объём которых составляет не более  $5,0 \text{ м}^3$ , из которых на больших и крупных реках формируют двухъярусные пакеты для дальнейшей их транспортировки в составе плота. Второй способ заключается в применении на малых и средних реках плоских сплотовых единиц [2—4], [8—11], обладающих малой осадкой и высокой эффективностью использования габаритов сплавного хода. Из плоских сплотовых единиц могут формироваться линейки для буксировки по водным объектам с лимитирующими габаритами сплавного хода, на больших и крупных реках из плоских сплотовых единиц и линеек на их основе создаются магистральные плоты. Наиболее перспективным на сегодняшний день является способ сплава лесоматериалов в плоских сплотовых единицах [4], требующий наличия совершенных конструкций данных сплотовых единиц, которые будут способствовать экономически выгодной реализации транспортно-технологических схем поставки древесины потребителям [12—14].

Известные плоские сплотовые единицы имеют различные конструктивные особенности и применяемые виды сплотового такелажа, при этом они обладают недостатками, главными из которых являются сложность конструкции, высокая трудоёмкость изготовления, низкая прочность при большом расходе сплотового такелажа, отсутствие возможности изготовления в сплотовых машинах [15—26]. Указанные недостатки плоских сплотовых единиц не позволяют полноценно реализовать транспортно-технологические схемы [12—14], а следовательно, довести сплав лесоматериалов по малым и средним рекам до номинальных объёмов. На основании вышесказанного определена цель работы: модернизировать конструкцию плоской сплотовой единицы, обладающей высокой прочностью и возможностью машинной сборки, а также разработать методику расчёта прочности данной сплотовой единицы.

## 2. Материалы и методы

Используя базовый прототип плоской сплочной единицы, выполненной по типу костромской кошмы, была получена модернизированная плоская сплочная единица, которая представлена на рисунке 1. Данная плоская сплочная единица [27] содержит ряды круглых лесоматериалов 1, уложенных на нижние поперечные прокладки 2. Сверху рядов круглых лесоматериалов 1 наложены верхние поперечные прокладки 3. Концы нижних 2 и верхних 3 поперечных прокладок, предварительно прижатых по всей длине к круглым лесоматериалам 1 в сплочной машине, стянуты сплочным такелажем 4. Сплочный такелаж 4 включает два кольца 5 с ребристой внутренней поверхностью для крепления к поперечным прокладкам 2 и 3. Кольца 5 соединены между собой с помощью цепей 6 через талрепу 7, снабжённую контргайками 8.

Рассмотренная конструкция плоской сплочной единицы имеет ряд преимуществ над своим прототипом, где одним из предпочтений является возможность изготовления данной сплочной единицы в сплочной машине с минимальными затратами ручного труда [28]. При этом точечное внедрение данной плоской сплочной единицы на сплав лесоматериалов по малым и средним рекам требует обязательного обоснования основных транспортно-эксплуатационных показателей. В данном случае акцент ставится на обосновании методики расчёта прочности плоской сплочной единицы, т. к. правильный подбор верхних и нижних прокладок, а также сплочного такелажа является залогом безаварийной реализации первоначального и магистрального сплава лесоматериалов.

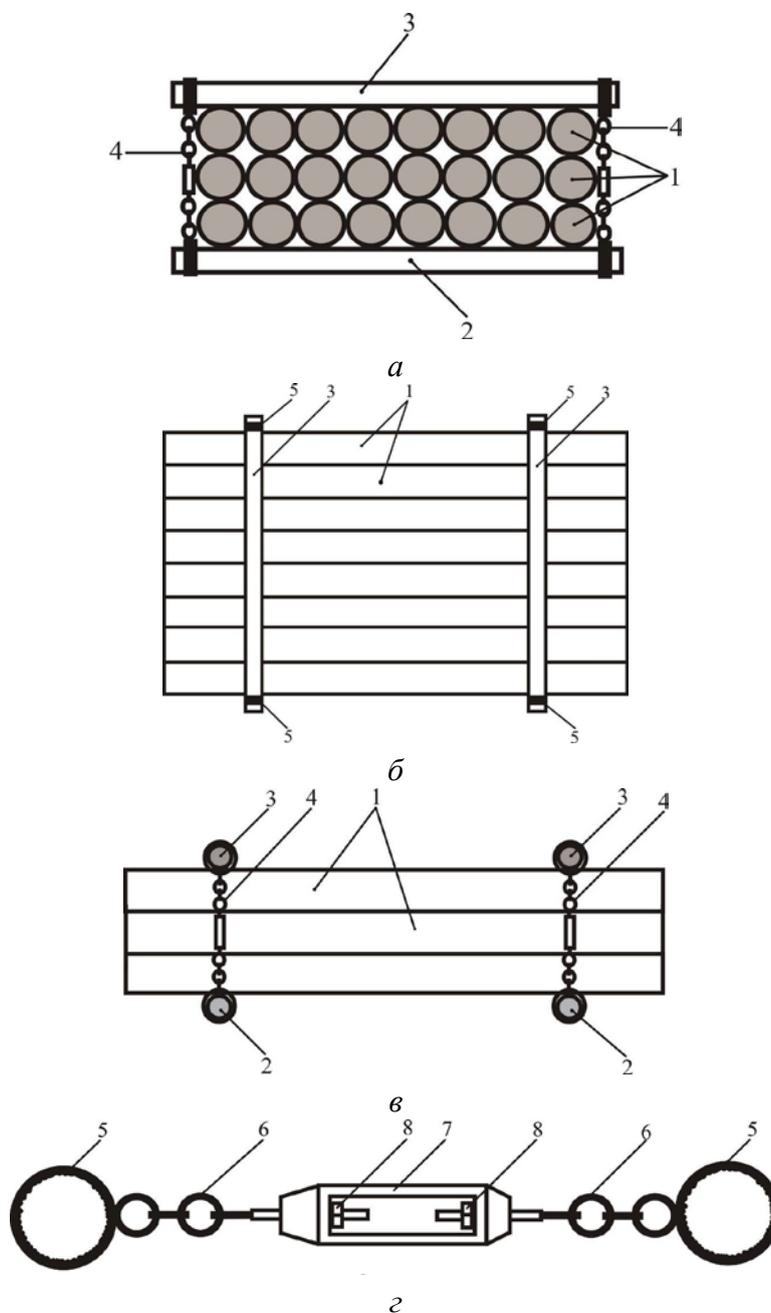
Обоснование методики расчёта прочности модернизированной плоской сплочной единицы основывается на методах теоретического исследования.

## 3. Результаты

Прочность плоской сплочной единицы — способность сплочного такелажа противостоять разрушению от воздействия внутренних сил (сил распора) и внешних сил, где для данной плоской сплочной единицы её прочность обуславливается прочностью нижних и верхних прокладок, колец с ребристой внутренней поверхностью, сварных цепей и талрепы. Расчёт прочности нижних и верхних прокладок сводится к определению их оптимального диаметра в верхнем отрезе, при котором прокладки будут обеспечивать заданную форму плоской сплочной единицы, а расчёт на прочность осуществляется при плоском изгибе.

Во время изготовления сплочной единицы на прокладки действует сила прижатия к рядам круглых лесоматериалов, при транспортировке — сила, возникающая от веса сплочной единицы, если она поднимается за верхние прокладки. При сплаве действуют сила распора, которая возникает из-за увеличения объёма древесины при её водонасыщении, и внешние силы от волн и т. д., при выгрузке сплочных единиц также действует сила, возникающая от веса сплочной единицы. Если рассматривать общий принцип воздействия

возможных сил на верхние прокладки, то можно сделать вывод, что все силы не действуют одновременно, а наиболее опасной при условии осуществления сплава в нормальных условиях является сила, возникающая от веса сплочной единицы, если она поднимается за верхние прокладки или за крайние круглые лесоматериалы верхнего ряда.



**Рисунок 1.** Модернизированная плоская сплочная единица: *a* — вид спереди; *б* — вид сверху; *в* — вид сбоку; *г* — сплочный такелаж

**Figure 1.** Upgraded flat splice unit: (a) front view; (b) top view; (c) side view; (d) raft cables

При поднятии плоской сплottedной единицы за верхние прокладки, например чокерными захватами, они могут располагаться перед кольцами с ребристой внутренней поверхностью сплottedного такелажа (рисунок 2а), т. е. быть отнесёнными к торцевой части прокладки, тогда реакции опор  $R_A$  и  $R_B$  будут возникать в точках  $A$  и  $B$ , в местах обхвата каждой верхней прокладки ребристыми кольцами, а силы сосредоточения  $P_{ПСЕ}$  будут находиться в местах контакта чокерных захватов.

Если поднятие плоской сплottedной единицы осуществляется за верхние прокладки чокерными захватами, которые располагаются после колец с ребристой внутренней поверхностью (рисунок 2б), т. е. между ними и точками касания верхних прокладок с крайними круглыми лесоматериалами верхнего ряда, то реакции опор  $R_A$  и  $R_B$  будут возникать в точках  $A$  и  $B$ , в местах контакта чокерных захватов с верхними прокладками, а силы сосредоточения  $P_{ПСЕ}$  будут находиться в местах обхвата кольцами верхних прокладок. В случае, когда поднятие плоской сплottedной единицы выполняется чокерными захватами за крайние круглые лесоматериалы верхнего ряда (рисунок 2в), реакции опор  $R_A$  и  $R_B$  будут возникать в точках  $A$  и  $B$ , в местах контакта верхних прокладок с крайними круглыми лесоматериалами верхнего ряда, а силы сосредоточения  $P_{ПСЕ}$  будут находиться в местах обхвата кольцами с ребристой внутренней поверхностью верхних прокладок. Таким образом, на каждую верхнюю прокладку будет действовать основная сила сосредоточения, возникающая от веса плоской сплottedной единицы, которая передаётся на них через нижние прокладки и сплottedный такелаж при условии плотного контакта верхних прокладок с крайними круглыми лесоматериалами верхнего ряда, т. е. участок верхних прокладок, который располагается между точками касания каждой прокладки с боковыми круглыми лесоматериалами верхнего ряда, не будет испытывать изгибающий момент или изгибающий момент будет минимальный.

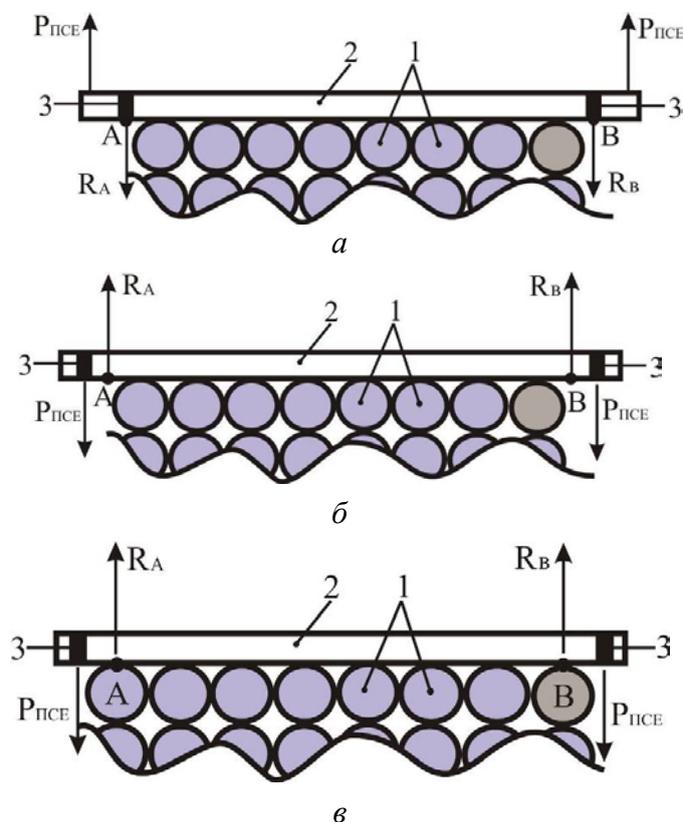
Из рисунка 2, который представляет собой схемы нагрузки верхней прокладки, видно, что верхняя прокладка плотно прилегает к крайним круглым лесоматериалам, а реакции опор  $R_A$  и  $R_B$  возникают в точках  $A$  и  $B$ , которые направлены в противоположную сторону сосредоточенных сил  $P_{ПСЕ}$ , где  $R_A = R_B = P_{ПСЕ}$ . При этом в верхней прокладке при изгибе будут возникать нормальное напряжение  $\sigma_{ВП}$  и касательное напряжение  $\tau_{ВП}$ , которое также учитывается при расчёте оптимального (минимально допустимого) диаметра в верхнем отрезе верхней прокладки.

На основании вышесказанного и закона Гука при изгибе нормальное напряжение  $\sigma_{ВП}$ , возникающее в поперечном сечении верхней прокладки, будет следующим [29—40]:

$$\sigma_{ВП} = \frac{M_{ВП} y}{J_{ВП}} = \frac{M_{ВП}}{W_{ВП}}, \quad (1)$$

где  $M_{ВП}$  — изгибающий момент в поперечном сечении верхней прокладки, Н·м;  $y$  — расстояние от нейтральной оси до крайней точки, м;  $J_{ВП}$  — момент инерции

поперечного сечения верхней прокладки относительно нейтральной оси,  $\text{м}^4$ ;  $W_{BII}$  — осевой момент сопротивления сечения верхней прокладки,  $\text{м}^3$ .



**Рисунок 2.** Схемы распределения нагрузок на верхнюю прокладку: *а* — расположение чокерных захватов перед кольцами; *б* — расположение чокерных захватов после колец; *в* — расположение чокерных захватов на концах крайних круглых лесоматериалов верхнего ряда; 1 — верхний ряд круглых лесоматериалов; 2 — верхняя прокладка; 3 — кольцо с ребристой внутренней поверхностью

**Figure 2.** Load distribution schemes for the upper sticker: **(a)** the location of choker grips in front of the rings; **(b)** the location of choker grips behind the rings; **(c)** the location of choker grips at the ends of the extreme round timber of the upper row; 1 – the upper row of round timber; 2 – the upper sticker; 3 – a ring with a ribbed inner surface

Используя равенство (1), запишем условие прочности верхней прокладки:

$$\sigma_{\max BII} = \frac{M_{\max BII}}{W_{BII}} \leq [\sigma_{II}], \quad (2)$$

где  $\sigma_{\max BII}$  — максимальное напряжение, возникающее в верхней прокладке от действия внешних сил, Па;  $M_{\max BII}$  — максимальный изгибающий момент в поперечном сечении верхней прокладки, Н·м;  $[\sigma_{II}]$  — допускаемое напряжение при изгибе, Па.

Допускаемое напряжение при изгибе  $[\sigma_{II}]$  можно рассчитать по формуле

$$[\sigma_{II}] = \frac{\sigma_{II\text{прд}}}{[k_{зIII}]k_{ВД}}, \quad (3)$$

где  $\sigma_{II\text{прд}}$  — предельно допускаемое напряжение при изгибе, Н/м<sup>2</sup>;  $[k_{зIII}]$  — коэффициент запаса прочности при изгибе для прокладок, учитывающий дополнительные внешние нагрузки, действующие на плоскую сплottedную единицу;  $k_{ВД}$  — коэффициент учёта влажности древесины прокладки.

В формуле (3) коэффициент запаса прочности при изгибе  $[k_{зIII}]$  для прокладок, учитывающий дополнительные внешние нагрузки, действующие на плоскую сплottedную единицу, предусматривает обеспечение дополнительного запаса прочности. Например, при спуске плоской сплottedной единицы на воду, выгрузке её из воды, когда возникает дополнительная сила при отрыве от зеркала воды, а также при транспортировке плоской сплottedной единицы по водным путям, т. к. данный процесс является нестабильным, с постоянно изменяющимися действующими внешними силами на сплottedную единицу. Поэтому  $[k_{зIII}]$  вводится при расчёте предельно допустимого напряжения в прокладках и для данных условий устанавливается экспериментальным путём. Коэффициент учёта влажности древесины прокладки принимается тогда, когда предельно допускаемое напряжение при изгибе берётся при одной влажности, а фактическая влажность верхних прокладок другая. Согласно работе [41], предел прочности при влажности древесины 12 % больше, чем при влажности 30 % и более. Таким образом, коэффициент учёта влажности древесины прокладки принимается равным 1,7—1,8, если значение предельно допускаемого напряжения при изгибе взято для влажности 12 %, а фактическая влажность древесины больше 30 %. В свою очередь, данный коэффициент принимается равным 0,5—0,6, если значение предельно допускаемого напряжения при изгибе взято для влажности больше 30 %, а фактическая влажность древесины составляет 12 %. В том случае, когда предельно допускаемое напряжение при изгибе, например, взято для влажности 12 % и фактическая влажность древесины верхних прокладок составляет 12 %, коэффициент  $k_{ВД} = 1,0$ .

Из условия прочности (2) выразим осевой момент сопротивления сечения верхней прокладки:

$$W_{ВП} = \frac{M_{\max ВП}}{[\sigma_{II}]}. \quad (4)$$

В зависимости (4) максимальный изгибающий момент в поперечном сечении верхней прокладки, с учётом рекомендаций исследований [29], [30], составит:

$$M_{\max ВП} = P_{ПСЕ}l_{ТС} = 0,25G_{ПСЕ}l_{ТС}, \quad (5)$$

где  $P_{ПСЕ}$  — сосредоточенная сила, Н;  $G_{ПСЕ}$  — вес плоской сплottedной единицы, Н;  $l_{ТС}$  — расстояние от реакции опоры до точки приложения сосредоточенной силы, м.

Максимальный изгибающий момент в сечении считается положительным [29], если он вызывает сжатие в верхних волокнах прокладок, а отрицательным, когда он вызывает растяжение в верхних волокнах прокладок, поэтому для удобства расчёта зависимость (5) примет вид:

$$|M_{\max \text{ ВП}}| = |P_{\text{ПСЕ}} l_{\text{ТС}}| = |0,25 G_{\text{ПСЕ}} l_{\text{ТС}}|. \quad (6)$$

Обуславливаемся, что верхняя прокладка имеет круглое поперечное сечение, тогда осевой момент сопротивления сечения  $W_{\text{ВП}}$ , согласно исследованиям [29], [30], будет рассчитываться следующим образом:

$$W_{\text{ВП}} = \frac{\pi d_{\text{ВП}}^3}{32}, \quad (7)$$

где  $\pi$  — число «пи», равное 3,14;  $d_{\text{ВП}}$  — диаметр верхней прокладки в верхнем отрезе, м.

Учитывая зависимости (5)—(7) и подставив их в равенство (4), выразим общую зависимость для определения минимального диаметра  $d_{\sigma \min \text{ ВП}}$  верхней прокладки в верхнем отрезе:

$$d_{\sigma \min \text{ ВП}} = \sqrt[3]{32 \frac{|0,25 G_{\text{ПСЕ}} l_{\text{ТС}}|}{\pi [\sigma_{\text{II}}]}}. \quad (8)$$

Используя зависимость (8), с учётом формулы (3) запишем ключевые равенства расчёта минимального диаметра верхней прокладки для схем распределения нагрузок, представленных на рисунках 2а, 2б и 2в соответственно:

$$d_{\sigma \min \text{ ВП}} = \sqrt[3]{32 [k_{\text{ЗПП}}] k_{\text{ВД}} \frac{|0,25 G_{\text{ПСЕ}} l_{\text{ТС}}|}{\pi \sigma_{\text{IIпрд}}}}; \quad (9)$$

$$d_{\sigma \min \text{ ВП}} = \sqrt[3]{32 [k_{\text{ЗПП}}] k_{\text{ВД}} \frac{|-0,25 G_{\text{ПСЕ}} l_{\text{ТС}}|}{\pi \sigma_{\text{IIпрд}}}}; \quad (10)$$

$$d_{\sigma \min \text{ ВП}} = \sqrt[3]{32 [k_{\text{ЗПП}}] k_{\text{ВД}} \frac{|-0,25 G_{\text{ПСЕ}} l_{\text{ТС}}|}{\pi \sigma_{\text{IIпрд}}}}. \quad (11)$$

Зависимости (9)—(11) являются конечными формулами для расчёта минимально допустимого диаметра в верхнем отрезе верхних прокладок при возникновении в них нормального напряжения. При этом в зависимости от того, как будет подниматься сплottedная единица и в каком месте будут зацепляться чокерные захваты,  $l_{\text{ТС}}$  в равенствах (9)—(11) для каждого варианта устанавливается индивидуально. Если рассматривать практичность зацепления чокерных захватов при поднятии сплottedной единицы, то наиболее целесообразно осуществлять зацепление чокерных захватов после колец. Таким образом,  $l_{\text{ТС}}$

для равенства (9) составит  $l_{зП}$ , а для равенства (10)  $l_{TC}$  равно  $0,5d_{сВП}$ , но в практических условиях  $l_{TC}$  целесообразно определять расчётным путём.

Касательное напряжение  $\tau_{ВП}$ , которое будет возникать в верхней прокладке при действии на неё силы сосредоточения, для представленных схем на рисунке 2, с условием, что сечение прокладки имеет форму в виде круга [29], [30], следует рассчитывать по формуле

$$\tau_{ВП} = \frac{4 Q_{ВП}}{3 F_{ВП}}, \quad (12)$$

где  $Q_{ВП}$  — поперечная сила, возникающая в исследуемом поперечном сечении верхней прокладки, Н;  $F_{ВП}$  — площадь поперечного сечения верхней прокладки, м<sup>2</sup>.

На основании равенства (12) условие прочности примет вид:

$$\tau_{\max ВП} = \frac{4 Q_{ВП}}{3 F_{ВП}} \leq [\tau_{II}], \quad (13)$$

где  $\tau_{\max ВП}$  — максимальное касательное напряжение, возникающее в верхней прокладке, Па;  $[\tau_{II}]$  — допускаемое касательное напряжение при изгибе, Па.

В условии прочности (13)  $[\tau_{II}]$  принимаем  $[\tau_{II}] = 0,6[\sigma_{II}]$  согласно работе [29].

Из условия прочности (13) выразим площадь поперечного сечения верхней прокладки:

$$F_{ВП} = \frac{4 Q_{ВП}}{3 [\tau_{II}]}. \quad (14)$$

Зная, что в зависимости от направления действия силы сосредоточения  $P_{ПCE}$  на верхнюю прокладку поперечная сила, возникающая в исследуемом поперечном сечении, может иметь положительное или отрицательное значение  $Q_{ВП} = \pm P_{ПCE}$ , для удобства расчёта запишем следующее условие:

$$|Q_{ВП}| = |\pm P_{ПCE}| = |\pm 0,25G_{ПCE}|. \quad (15)$$

Преобразуем формулу (14) с учётом формулы (15), в результате получим:

$$\frac{\pi d_{ВП}^2}{4} = \frac{4 |\pm 0,25G_{ПCE}|}{3 [\tau_{II}]}. \quad (16)$$

Учитывая, что  $[\tau_{II}] = 0,6[\sigma_{II}]$ , выразим из равенства (16) минимально допустимый диаметр  $d_{\tau \min ВП}$  верхней прокладки в верхнем отрезе:

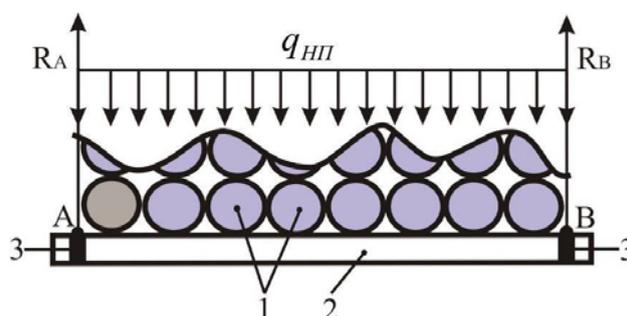
$$d_{\tau \min ВП} = \sqrt{\frac{80 [k_{зПП}] k_{ВД} |\pm 0,25G_{ПCE}|}{9 \pi \sigma_{II \text{пр}0}}}. \quad (17)$$

Зависимость (17) является конечной формулой для расчёта минимально допустимого диаметра в верхнем отрезе верхних прокладок при возникновении в них касательного напряжения. Следует отметить, что расчёт минимально допустимого диаметра  $d_{\tau \min ВП}$

верхних прокладок по зависимости (17) справедлив для всех схем, представленных на рисунке 2. При этом результаты расчёта  $d_{\sigma_{\min BII}}$  по зависимостям (9)—(11) и расчёта  $d_{\tau_{\min BII}}$  по зависимости (17) сравниваются между собой, принимается наибольший диаметр, который округляется в большую сторону. Он и станет определяющим при выборе диаметра в верхнем отрезе верхних прокладок плоской сплочной единицы.

Расчёт прочности нижних прокладок плоской сплочной единицы сводится к определению их минимального диаметра в верхнем отрезе, который будет зависеть от возникающих при изгибе нормального напряжения  $\sigma_{HII}$  и касательного напряжения  $\tau_{HII}$ .

Из схемы распределения нагрузки от веса плоской сплочной единицы на нижнюю прокладку, которая представлена на рисунке 3, видно, что реакции опор  $R_A$  и  $R_B$  возникают в точках  $A$  и  $B$ , т. е. в местах контакта прокладки с кольцами с ребристой внутренней поверхностью. Для удобства расчёта обуславливаемся, что погонная нагрузка  $q_{HII}$ , возникающая от веса плоской сплочной единицы при поднятии её за верхние прокладки, действует на нижнюю прокладку между кольцами по всей длине. При этом реакции опор  $R_A$  и  $R_B$  будут направлены в противоположную сторону действия погонной нагрузки  $q_{HII}$ . На основании вышесказанного расчёт минимально допустимого диаметра в верхнем отрезе нижней прокладки будем осуществлять согласно принятым допущениям, не влияющим на достоверность производимых расчётов.



**Рисунок 3.** Схема распределения нагрузок на нижнюю прокладку: 1 — нижний ряд круглых лесоматериалов; 2 — нижняя прокладка; 3 — кольцо с ребристой внутренней поверхностью

**Figure 3.** The scheme of distribution of loads on the lower sticker: 1 – the lower row of round timber; 2 – the lower sticker; 3 – a ring with a ribbed inner surface

Учитывая равенство (2), при возникновении в поперечном сечении нижней прокладки нормального напряжения  $\sigma_{HII}$  условие прочности нижней прокладки можно записать следующим образом:

$$\sigma_{\max HII} = \frac{M_{\max HII}}{W_{HII}} \leq [\sigma_H], \quad (18)$$

где  $\sigma_{\max НП}$  — максимальное напряжение, возникающее в нижней прокладке от действия погонной нагрузки, Па;  $M_{\max НП}$  — максимальный изгибающий момент в поперечном сечении нижней прокладки, Н·м;  $W_{НП}$  — осевой момент сопротивления сечения нижней прокладки, м<sup>3</sup>.

Из условия прочности нижней прокладки выразим осевой момент сопротивления сечения:

$$W_{НП} = \frac{M_{\max НП}}{[\sigma_{II}]} \quad (19)$$

В формуле (19) осевой момент сопротивления сечения равен [29]:

$$W_{НП} = \frac{\pi d_{НП}^3}{32}, \quad (20)$$

где  $d_{НП}$  — диаметр нижней прокладки в верхнем отрезе, м.

Максимальный изгибающий момент в поперечном сечении нижней прокладки, согласно исследованиям [29], [30], составит:

$$M_{\max НП} = \frac{q_{НП} l_{PK}^2}{8}, \quad (21)$$

где  $q_{НП}$  — погонная нагрузка, Н/м;  $l_{PK}$  — расстояние между кольцами с ребристой внутренней поверхностью, м.

Погонная нагрузка для нижней прокладки равна:

$$q_{НП} = 0,5 \frac{G_{ПСЕ}}{l_{PK}} \quad (22)$$

Подставив выражение (22) в равенство (21), получим зависимость:

$$M_{\max НП} = \frac{G_{ПСЕ} l_{PK}}{16} \quad (23)$$

Учитывая зависимости (20) и (23) и подставив их в условие прочности (19), запишем равенство:

$$\frac{\pi d_{НП}^3}{32} = \frac{G_{ПСЕ} l_{PK}}{16 [\sigma_{II}]} \quad (24)$$

Зная, что  $[\sigma_{II}] = \frac{\sigma_{Ипрд}}{[k_{ЗПП}] k_{ВД}}$ , подставим данную формулу в равенство (24) и выразим минимально допустимый диаметр в верхнем отрезе нижней прокладки  $d_{\sigma \min НП}$ :

$$d_{\sigma \min НП} = \sqrt[3]{[k_{ЗПП}] k_{ВД} \frac{2G_{ПСЕ} l_{PK}}{\pi \sigma_{Ипрд}}} \quad (25)$$

Формула (25) — расчёт минимального диаметра в верхнем отрезе нижних прокладок при возникновении в них нормального напряжения, при этом  $l_{PK} = n_{BP}d_{CBП}$ , где  $n_{BP}$  — количество уложенных круглых лесоматериалов в верхнем или нижнем ряду, шт.;  $d_{CBП}$  — средний диаметр уложенных круглых лесоматериалов в верхнем или нижнем ряду, м.

В нижней прокладке плоской сплочной единицы, как уже отмечалось выше, возникает касательное напряжение  $\tau_{НП}$ , тогда с учётом равенства (13), при условии, что сечение круглое, условие прочности будет выглядеть следующим образом:

$$\tau_{\max НП} = \frac{4}{3} \frac{Q_{НП}}{F_{НП}} \leq [\tau_{II}], \quad (26)$$

где  $\tau_{\max НП}$  — максимальное поперечное напряжение, возникающее в нижней прокладке, Па;  $Q_{НП}$  — поперечная сила, возникающая в исследуемом поперечном сечении нижней прокладки, Н;  $F_{НП}$  — площадь поперечного сечения нижней прокладки, м<sup>2</sup>.

Для рассматриваемого случая поперечная сила  $Q_{НП}$ , возникающая в исследуемом поперечном сечении, определяется по формуле

$$|Q_{НП}| = \left| \pm \frac{q_{НП} l_{PK}}{2} \right|. \quad (27)$$

Из условия прочности (25) выразим площадь поперечного сечения нижней прокладки  $F_{НП}$ :

$$F_{НП} = \frac{4}{3} \frac{Q_{НП}}{[\tau_{II}]}. \quad (28)$$

Учитывая равенства (22) и (27) и условие, что  $[\tau_{II}] = 0,6\sigma_{IIпр0}$  [29], запишем зависимость (28) в развёрнутом виде:

$$\frac{\pi d_{НП}^2}{4} = \frac{4}{3} \frac{|\pm 0,25G_{ПСЕ}|}{0,6[\sigma_{II}]}. \quad (29)$$

Используя равенство (3) и подставив его в выражение (29), выразим минимально допустимый диаметр  $d_{\tau \min НП}$  нижней прокладки в верхнем отрезе:

$$d_{\tau \min НП} = \sqrt{\frac{80 [k_{ЗПП}] k_{ВД} |\pm 0,25G_{ПСЕ}|}{9 \pi \sigma_{IIпр0}}}. \quad (30)$$

Равенство (30) является конечным результатом расчёта минимального диаметра в верхнем отрезе нижних прокладок при возникновении в них касательного напряжения.

При расчёте минимально допустимого диаметра в верхнем отрезе нижних прокладок  $d_{\sigma \min НП}$  и  $d_{\tau \min НП}$  соответственно по формулам (25) и (30) результаты сравниваются между собой и принимается наибольший диаметр из расчётных, который округляется в большую

сторону. Данный диаметр будет определяющим при выборе диаметра в верхнем отрезе нижних прокладок плоской сплочной единицы.

Следует отметить, что минимально допустимый диаметр верхних и нижних прокладок в верхнем отрезе при возникновении в них касательного напряжения определяется по одинаковым формулам. Тогда можно записать следующее равенство:

$$d_{\tau \min ВП} = d_{\tau \min НП} = \sqrt{\frac{80 [k_{зПП}] k_{ВД} [\pm 0, 25 G_{ПСЕ}]}{9 \pi \sigma_{Ипр\delta}}}. \quad (31)$$

Если спуск на воду плоской сплочной единицы, выгрузка её из воды, а также транспортировка не предусматривают поднятие её за верхние прокладки или за крайние круглые лесоматериалы верхнего ряда, то выбор диаметров в верхнем отрезе верхних и нижних прокладок рекомендуется также осуществлять по приведённой методике расчёта и принимать минимально допустимый расчётный диаметр, т. к. во время сплава самосплавом или в составе плота на сплочную единицу могут воздействовать внешние силы, силы распора и т. д., а принцип выбора диаметра по приведённой методике будет обеспечивать гарантированную прочность плоской сплочной единицы.

Расчёт прочности колец с ребристой внутренней поверхностью, сварных цепей и талрепы сводится к определению минимально допустимого поперечного сечения при растяжении составляющих сплочного такелажа. При этом обуславливаемся, что собственный вес сплочного такелажа не учитывается.

Кольца с ребристой внутренней поверхностью, которые находятся на нижних и верхних прокладках, будут испытывать растяжение, возникающее от веса плоской сплочной единицы при поднятии её за верхние прокладки, т. е. в поперечном сечении каждого кольца будет возникать продольная растягивающая сила  $N_{КРП}$ , формирующаяся от нагрузки, которую воспринимает каждое кольцо  $P_{НПСЕ}$  (рисунок 4). Причём всеми изгибающими моментами, возникающими в каждом кольце, пренебрегаем, т. к. при нормальной эксплуатации сплочного такелажа их значения невысокие и их влияние можно учесть через коэффициент. При действии на кольцо с ребристой внутренней поверхностью нагрузки в сечении кольца будет возникать нормальное напряжение, которое для данных условий, с учётом исследований [29—40], [42], следует определять по формуле

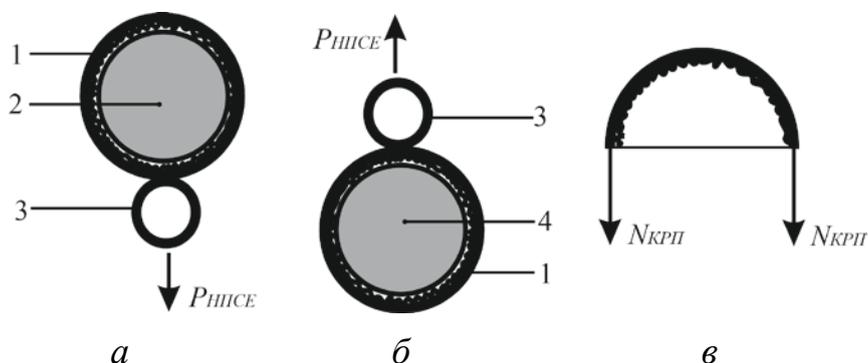
$$\sigma_{КРП} = \frac{N_{КРП}}{F_{КРП}}, \quad (32)$$

где  $N_{КРП}$  — продольная растягивающая сила в поперечном сечении кольца, Н;  $F_{КРП}$  — площадь поперечного сечения кольца, м<sup>2</sup>.

Условие прочности кольца запишется следующим образом:

$$\sigma_{\max КРП} = \frac{N_{\max КРП}}{2F_{КРП}} \leq [\sigma_p], \quad (33)$$

где  $\sigma_{\max КРП}$  — максимальное напряжение, возникающее в поперечном сечении кольца, Па;  
 $N_{\max КРП}$  — максимальная продольная растягивающая сила, возникающая в поперечном сечении кольца, Н;  $[\sigma_p]$  — допускаемое напряжение при растяжении, Па.



**Рисунок 4.** Схема распределения нагрузок на кольцо с ребристой внутренней поверхностью: *а* — расположение нагрузки на кольцо на верхней прокладке; *б* — расположение нагрузки на кольцо на нижней прокладке; *в* — расположение нагрузки на кольцо на нижней прокладке; 1 — кольцо с ребристой внутренней поверхностью; 2 — верхняя прокладка; 3 — цепь; 4 — нижняя прокладка

**Figure 4.** Load distribution scheme for a ring with a ribbed inner surface: (a) the location of the load on the ring on the upper sticker; (b) the location of the load on the ring on the lower sticker; (c) the location of the load on the ring on the lower sticker; 1 – ring with a ribbed inner surface; 2 – upper sticker; 3 – chain; 4 – bottom sticker

В условии прочности кольца (33) максимальная продольная растягивающая сила, возникающая в поперечном сечении кольца  $N_{\max КРП}$ , определяется из выражения

$$N_{\max КРП} = P_{\text{НПСЕ}} = 0,25G_{\text{ПСЕ}}, \quad (34)$$

где  $P_{\text{НПСЕ}}$  — нагрузка, которую воспринимает кольцо от веса плоской сплочной единицы, Н.

Допустимое напряжение при растяжении с учётом ряда коэффициентов [43] рассчитывается по формуле

$$[\sigma_p] = \frac{\sigma_{\text{прд}} k_{\text{ПРН}}}{[k_{\text{ЗПР}}]}, \quad (35)$$

где  $\sigma_{\text{прд}}$  — предельно допускаемое напряжение при растяжении, Па;  $k_{\text{ПРН}}$  — коэффициент понижения расчётного напряжения за счёт явлений изгиба и ослабления сваркой, равный 0,64 [43];  $[k_{\text{ЗПР}}]$  — коэффициент запаса прочности при растяжении.

Коэффициент запаса прочности при растяжении  $[k_{\text{ЗПР}}]$  в источнике [43] для сварных цепей в зависимости от условий работы принимается равным 4—7. Так как кольца с ребристой

внутренней поверхностью, сварные цепи и талрепы будут эксплуатироваться в различных условиях плавания плоских сплочных единиц, для расчёта прочности сплочного такелажа следует принимать данный коэффициент не менее 4.

Из условия прочности кольца выразим площадь его поперечного сечения:

$$F_{KPI} = \frac{N_{\max KPI}}{2[\sigma_P]}. \quad (36)$$

Площадь поперечного сечения кольца представим следующим образом:

$$F_{KPI} = l_{KPI} b_{KPI}, \quad (37)$$

где  $b_{KPI}$  — толщина кольца с ребристой внутренней поверхностью, м;  $l_{KPI}$  — ширина кольца с ребристой внутренней поверхностью, устанавливаемая расчётным путём, м.

Подставим выражения (34), (35) и (37) в равенство (36) и сделаем ряд преобразований, в результате получим минимально допустимую толщину кольца:

$$b_{\min KPI} = \frac{[k_{ZIP}] G_{ПСЕ}}{8k_{ПРН} l_{KPI} \sigma_{Pпрд}}. \quad (38)$$

Следует отметить, что при расчёте прочности колец акцент был поставлен на определение их толщины, т. к. ширина колец для уменьшения длины прокладок всегда будет лимитироваться и устанавливаться перед расчётом на прочность сплочного такелажа. Если кольца с ребристой внутренней поверхностью не имеют сварных швов, то коэффициент  $k_{ПРН}$  необходимо увеличить при соблюдении условия  $k_{ПРН} \leq 1$ .

Расчёт на прочность при растяжении сварных цепей сплочного такелажа, как правило, сводится к определению диаметра звена. При этом для уменьшения количества сварных соединений каждое кольцо может изначально продеваться в звено цепи, а звено цепи свариваться. Таким образом, при поднятии плоской сплочной единицы за верхние прокладки в поперечном сечении цепи, как и в кольцах с ребристой внутренней поверхностью, будет возникать продольная растягивающая сила  $N_{СИ}$ , образующаяся от нагрузки  $P_{НПСЕ}$ , которую воспринимают сварные цепи, а все изгибающие моменты, возникающие в цепи, выразим через коэффициент  $k_{ПРН}$ .

Условие прочности сварной цепи запишется следующим образом:

$$\sigma_{\max СИ} = \frac{N_{\max СИ}}{2F_{3СИ}} \leq [\sigma_P], \quad (39)$$

где  $\sigma_{\max СИ}$  — максимальное напряжение, возникающее в поперечном сечении сварной цепи, Па;  $N_{\max СИ}$  — максимальная продольная растягивающая сила, возникающая в поперечном сечении сварной цепи, Н;  $F_{3СИ}$  — площадь поперечного сечения звена сварной цепи, м<sup>2</sup>.

Из условия прочности сварной цепи (39) выразим площадь поперечного сечения:

$$F_{3Ц} = \frac{N_{\max 3Ц}}{2[\sigma_p]}. \quad (40)$$

Площадь поперечного сечения звена сварной цепи  $F_{3Ц}$  следует рассчитывать по формуле

$$F_{3Ц} = \frac{\pi d_{3Ц}^2}{4}, \quad (41)$$

где  $d_{3Ц}$  — диаметр звена сварной цепи, м.

С учётом того, что  $N_{\max 3Ц} = P_{НПСЕ} = 0,25G_{ПСЕ}$ , подставив зависимости (35) и (41) в равенство (40) и сделав ряд преобразований, определим минимально допустимый диаметр звена сварной цепи:

$$d_{\min 3Ц} = \sqrt{\frac{[k_{3ПР}]G_{ПСЕ}}{2\pi k_{ПРН}\sigma_{Pпрд}}}. \quad (42)$$

Выражение (42) представляет собой формулу для расчёта минимально допустимого диаметра звена сварных цепей сплочного такелажа. В данном случае коэффициент  $k_{ПРН}$  принимается равным 0,64, согласно рекомендациям [43], т. к. в сварной цепи присутствуют сварные швы, а при её растяжении возникают изгибающие моменты.

Талрепа представляет собой штамповую муфту, имеющую корпус с резьбовыми отверстиями, в которые вкручены резьбовые стержни с контргайками. В практических условиях для исключения проведения расчёта талрепы на прочность наиболее целесообразно воспользоваться заданной производителем максимальной нагрузкой, которую может выдержать талрепа на протяжении длительного времени. Каждый вид талрепы имеет свою допустимую нагрузку. Запишем основное условие выбора талрепы:

$$0,25[k_{3ПР}]G_{ПСЕ} \leq P_{ДНТ}, \quad (43)$$

где  $P_{ДНТ}$  — допустимая нагрузка для применяемого вида талрепы, Н.

#### 4. Обсуждение и заключение

Модернизированная плоская сплочная единица имеет ряд преимуществ над известными сплочными единицами: простота конструкции, высокая прочность и возможность машинной сборки. Достижение указанных преимуществ реализовано за счёт укладки рядов круглых лесоматериалов между верхними и нижними прокладками, которые соединяются между собой с помощью сплочного такелажа. Практическое использование данной плоской сплочной единицы на первоначальном сплаве лесоматериалов требует

обоснования основных транспортно-эксплуатационных показателей, но особое внимание необходимо уделить расчёту прочности сплочной единицы.

Для рассматриваемой плоской сплочной единицы обеспечение прочности заключается в правильном обосновании параметров нижних и верхних прокладок, колец с ребристой внутренней поверхностью, сварных цепей и талрепы. Предложена методика расчёта параметров нижних и верхних поперечных прокладок, а также сплочного такелажа, где в обязательном порядке учитывалась максимальная сила, действующая на прокладки и сплочный такелаж, предельно допустимое напряжение материала, из которых они изготавливаются, и комплекс основных коэффициентов запаса прочности. В результате этого для нижних и верхних поперечных прокладок были получены формулы расчёта диаметра в верхнем отрезе, установлены зависимости для расчёта толщины колец с ребристой внутренней поверхностью и диаметра сварной цепи, определено условие выбора талрепы.

Рассмотренная конструкция плоской сплочной единицы может быть использована как на первоначальном сплаве лесоматериалов, так и на магистральном. Условие её использования на первоначальном сплаве лесоматериалов — это сплав вольницей или в составе линейки за тягой буксировщика. На магистральном сплаве лесоматериалов данная плоская сплочная единица транспортируется только в составе плота.

## Список литературы

1. Водный кодекс Российской Федерации: текст с последними изм. и доп. на 2022 г. М.: Эксмо, 2022. 64 с. (Законы и кодексы).
2. Васильев В. В., Афоничев Д. Н. Усовершенствованные системы плотового сплава лесоматериалов: [монография]. Saarbrücken (Германия): Изд-во LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 284 с.
3. Васильев В. В. Модернизированный плот для рек с малыми глубинами // Вестник ПГТУ. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2015. № 1. С. 45—58.
4. Васильев В. В., Афоничев Д. Н. Использование плоских сплочных единиц на первоначальном сплаве лесоматериалов // Известия вузов. Лесной журнал. 2022. № 1. С. 128—142. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-128-142.
5. Perfiliev P., Zadrauskaite N., Rybak G. Study of hydrodynamic resistance of a raft composed of the flat rafting units of various draft // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 18 (1.5). Austria, 2018. P. 765—772.
6. Посыпанов С. В. Определение геометрических параметров плавающего транспортного пакета круглых лесоматериалов численным методом // Известия вузов. Лесной журнал. 2017. № 1. С. 141—153. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.1.141.
7. Посыпанов С. В. Определение геометрических характеристик двухъярусной пакетной сплочной единицы, расположенной на твёрдом основании // Известия вузов. Лесной журнал. 2019. № 5. С. 135—147. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.135.
8. Васильев В. В., Афоничев Д. Н. Обоснование показателя гибкости плота из сплочных единиц // Известия вузов. Лесной журнал. 2022. № 4. С. 146—155. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-4-146-155.

9. *Васильев В. В.* Особенности формирования осадки плоской сплочной единицы // Лесотехнический журнал ВГЛТА. 2014. № 1 (13). С. 79—84.
10. *Васильев В. В., Афоничев Д. Н.* Расчёт прочности гибкого водонепроницаемого материала плоских сплочных единиц со стабилизированным запасом плавучести // Resources and Technology. 2022. Т. 19, № 2. С. 77—102. DOI: 10.15393/j2.art.2022.6203.
11. *Васильев В. В.* Расчёт транспортно-эксплуатационных показателей усовершенствованной плоской сплочной единицы // Resources and Technology. 2022. Т. 19, № 4. С. 1—22. DOI: 10.15393/j2.art.2022.6365.
12. *Васильев В. В.* Обоснование параметров транспортно-технологической схемы поставки древесины в плоских сплочных единицах по принципу плот (линейка) — плот // Resources and Technology. 2021. Т. 18, № 2. С. 48—78. DOI: 10.15393/j2.art.2021.5603.
13. *Васильев В. В.* Транспортно-технологическая схема поставки древесины водным транспортом в плоских сплочных единицах по принципу плоская сплочная единица — плот // Арктика: инновационные технологии, кадры, туризм: Материалы междунар. научно-практич. онлайн-конф.; г. Воронеж, 17—19 ноября 2020 г. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», 2020. С. 335—340.
14. *Васильев В. В., Аксенов И. И.* Транспортно-технологическая схема поставки лесоматериалов потребителям в плоских сплочных единицах по принципу плоская сплочная единица — баржа // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: Материалы междунар. научно-практич. конф. г. Воронеж 24—25 ноября 2020 г. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский ГАУ», 2020. С. 30—33.
15. Патент 2456200 РФ, МПК В63В 35/62. Сплочная единица / В. В. Васильев; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Воронежская государственная лесотехническая академия» (RU). № 2011108194/11; заявл. 02.03.2011; опубл. 20.07.2012, Бюл. № 20. 6 с.
16. Патент 2460679 РФ, МПК В65G 69/20, В65В 27/10. Плоская сплочная единица / В. В. Васильев, Д. Н. Афоничев; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Воронежская государственная лесотехническая академия» (RU). № 2011109353/13; заявл. 11.03.2011; опубл. 10.09.2012, Бюл. № 25. 7 с.
17. Brevet 2882723 FR, Int. Cl.8 В 63 В 35/00, 3/08, 7/02. Embarcation modulaire pour le transport des grumes par voie d'eau / Demandeur Roumengas Jonsa Guy; Mandataire SCHMITT. No. 0502132; la date de la demande 03.03.05; la date de parution 21.10.2005, bulletin 06/36. 14 p.
18. Патент 2477698 РФ, МПК В63В 35/62, В65В 27/10. Плоская сплочная единица / Е. М. Царев, П. Ф. Войтко, С. В. Ерин, А. В. Поляков, Д. В. Самарин; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Марийский государственный технический университет» (RU). № 2011128866/11; заявл. 12.07.2011; опубл. 20.03.2013, Бюл. № 8. 7 с.
19. Brevet 1461583 FR, Int. Cl. В63b, В65g. Remorquage de billes de bois / Société anonyme dite: compagnie maritime des chargeurs réunis résidant en France (Seine). No. 36,157; la date de la demandé 26.10.1965; la date de publié 02.10.1966. 4 p.
20. Brevet 1286734 FR, Int. Cl. В65g. Procédé de flottage des bois en grumes et dispositif d'attache pour la mise en oeuvre de se procédé / M. Roger Jandin résidant en France; la date de la demandé 23.01.1961; la date de publié 29.01.1962. 4 p.

21. Patent 57167892 JP, Int. CI. B63B 35/58, B65G 1/00. Water surface receiving tools for driftwood / Kitai Toshiro; Kitai Tekkoshokk. No. 56053830; date of filing 10.04.1981; date of publication of application 15.10.1982.
22. Patent 3662413 USA, Int. CI.2 B63b 35/00. Metal ring for fastening parts by means of ocean wave force / Toshiro Andoh; Toshiro Andoh. No. 10,354; filed: 13.04.1970; date application 16.05.1972.
23. Patent 5119529 USA, Int. CI.5 B63B 35/62. Cable hook / Wire Rope Industries Ltd., Pointe-Claire, Canada. No. 703,844; filed: 21.05.1991; date application 09.06.1992.
24. Patent 2961671 USA, Int. CI.9-15 B63B 35/62. Bundle raft with quick detachable fitting / William A. Meighan, Portland, Oreg. No. 684,450; filed: 17.09.1957; date application 29.11.1960.
25. Patent 3556319 USA, Int. CI. B63b 27/16. Log-bundling apparatus / M. Ray Holden, P. O. Box 716, Ketchikan, Alaska. No 857,247; filed: 30.06.1969; date application 19.01.1971.
26. Patent 3971309 USA, Int. CI.2 B63B 27/16. Log bundling apparatus and method of bundling logs / Wilfred Spry Brodie, P. O. Box 175, Gibsons, British Columbia, VON 1V0, Canada. No. 566,904; filed: 10.04.1975; date application 27.07.1976.
27. Патент 2777674 РФ, МПК В65В 35/02, В65G 69/20. Плоская сплottedная единица / В. В. Васильев, Д. Н. Афоничев, В. А. Морковин, В. В. Абрамов, Е. В. Поздняков; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова» (RU). № 2021140068; заявл. 30.12.2021; опубл. 08.08.2022, Бюл. № 22. 8 с.
28. Патент 199681 РФ, МПК В65G 69/00, 57/18. Сплottedная машина / В. В. Васильев, Д. Н. Афоничев, В. А. Морковин, Е. В. Поздняков; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова» (RU). № 2020119839; заявл. 08.06.2020; опубл. 14.09.2020, Бюл. № 26. 5 с.
29. Любошиц М. И., Ицкович Г. М. Справочник по сопротивлению материалов. Второе изд., перераб. и доп. Минск: Вышэйшая школа, 1969. 464 с.
30. Биргер И. А. Сопротивление материалов: Учеб. пособие. М.: Наука, 1986. 560 с.
31. Belyaev N. M. Problems in strength of materials. Elsevier, 1966. 539 p.
32. Stephens R. C. Strength of materials. Theory and examples. Edward Arnold, 1970. 314 p.
33. Vitor Dias da Silva. Mechanics and strength of materials. Springer, 2006. 531 p.
34. Patnaik S., Hopkins D. Strength of materials: a new unified theory for the 21st century. Butterworth; Heinemann (Elsevier), 2004. 771 p.
35. Boresi A. P., Schmidt R. J., Sidebottom O. M. Advanced mechanics of materials. Wiley, 1993. 827 p.
36. Strength of Materials and Structures, Fourth Edition / Carl T. F. Ross BSc PhD DSc CEng FRINA, The late John Case, A. Chilver. Arnold, 1999. 719 p.
37. Broutman L. Interfaces in composites. ASTM, 1968. 198 p.
38. Den Hartog J. P. Strength of materials. Dover Publications, 1961. 346 p.
39. Skalmierski B. Mechanics and strength of materials. Academic Press, Elsevier, 1979. 435 p.
40. Komarovskiy A., Astakhov V. Physics of strength and fracture control: adaptation of engineering materials and structures. CRC Press, 2002. 629 p.
41. Перельгин Л. М., Уголев Б. Н. Древесиноведение. М.: Лесн. пром-сть, 1971. 285 с.
42. Michael F. Ashby. Materials selection in mechanical design. Butterworth-Heinemann (Elsevier), 2005. 603 p.

43. Заводчиков Д. А. Грузоподъёмные машины. Второе изд., доп. и перераб. М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1962. 312 с.

## References

1. The Water Code of the Russian Federation: the text with the latest amendments and additions for 2022. Moscow, Eksmo, 2022. 64 p. (Laws and Codes). (In Russ).
2. Vasiliev V. V., Afonichev D. N. *Improved systems of raft timber alloy: [monograph]*. Saarbrucken (Germany), Publishing house LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 284 p. (In Russ).
3. Vasiliev V. V. Modernized raft for rivers with shallow depths. *Vestnik PSTU. Series: Forest Ecology. Environmental management PSTU*, 2015, no. 1, pp. 45—58. (In Russ.).
4. Vasiliev V. V., Afonichev D. N. The use of flat splice units on the initial timber alloy. *Izvestiy vuzov. Lesnoi zhurnal*, 2022, no. 1, pp. 128—142. doi: 10.37482/0536-1036-2022-1-128-142. (In Russ.).
5. Perfiliev P., Zadrauskaite N., Rybak G. Study of hydrodynamic resistance of a raft composed of the flat rafting units of various draft. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 18 (1.5)*. Austria, 2018, pp. 765—772.
6. Posypanov S. V. Determination of geometric parameters of a floating transport package of round timber by numerical method. *Izvestiy vuzov. Lesnoi zhurnal*, 2017, no. 1, pp. 141—153. doi: 10.17238/issn0536-1036.2017.1.141. (In Russ).
7. Posypanov S. V. Determination of geometric characteristics of a two-tier batch unit located on a solid base. *Izvestiy vuzov. Lesnoi zhurnal*, 2019, no. 5, pp. 135—147. doi: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.135. (In Russ).
8. Vasiliev V. V., Afonichev D. N. Substantiation of the indicator of the flexibility of a raft of raft units. *Izvestiy vuzov. Lesnoi zhurnal*, 2022, no. 4, pp. 146—155. doi: 10.37482/0536-1036-2022-4-146-155. (In Russ).
9. Vasiliev V. V. Features of the formation of the precipitation of a flat flat unit. *Forestry journal VGLTA*, 2014, no. 1 (13), pp. 79—84. (In Russ.).
10. Vasiliev V. V., Afonichev D. N. Calculation of the strength of a flexible waterproof material of flat flat units with a stabilized buoyancy reserve. *Resources and Technology*, 2022, vol. 19, no. 2, pp. 77—102. doi: 10.15393/j2.art.2022.6203. (In Russ).
11. Vasiliev V. V. Calculation of transport and operational indicators of an improved flat-flow unit. *Resources and Technology*, 2022, vol. 19, no. 4, pp. 1—22. doi: 10.15393/j2.art.2022.6365. (In Russ.).
12. Vasiliev V. V. Substantiation of the parameters of the transport and technological scheme for the supply of wood in flat raft units according to the raft (ruler) — raft principle. *Resources and Technology*, 2021, vol. 18, no. 2, pp. 48—78. doi: 10.15393/j2.art.2021.5603. (In Russ.).
13. Vasiliev V. V. Transport and technological scheme of wood supply by water transport in flat-flow units according to the principle of flat-flow unit — raft. *Arctic: innovative technologies, personnel, tourism: materials of international scientific practice. Online conferences. Voronezh, November 17—19, 2020*. Voronezh, Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozov, 2020, pp. 335—340. (In Russ.).
14. Vasiliev V. V., Aksenov I. I. Transport and technological scheme of timber supply to consumers in flat-flow units according to the principle of flat-flow unit — barge. *Science and education at the present stage of development: experience, problems and solutions: materials of the*

- international scientific and practical conference. Voronezh 24—25 November 2020. Voronezh, Voronezh State Agrarian University, 2020, pp. 30—33. (In Russ.).*
15. Vasiliev V. V. Patent 2456200 R.F., IPC B63B 35/62. Cohesive unit. Applicant and patent holder State Educational Institution of Higher Professional Education Voronezh State Forestry Academy (RU). No. 2011108194/11; application 02.03.2011; publ. 20.07.2012, Bul. No. 20. 6 p. (In Russ.).
  16. Vasiliev V. V., Afonichev D. N. Patent 2460679 R.F., IPC B65G 69/20, B65B 27/10. Flat splice unit. Applicant and patent holder State Educational Institution of Higher Professional Education Voronezh State Forestry Academy (RU). No. 2011109353/13; application 11.03.2011; publ. 10.09.2012, Bul. No. 25. 7 p. (In Russ.).
  17. Patent 2882723 FR, Int. THIS.8 B63B 35/00, 3/08, 7/02. Modular boat for the transport of logs by water. Applicant Roumengas Jonsa Guy; Agent SCHMITT. No. 0502132; the date of application 03.03.05; the date of publication 21.10.2005, bulletin 06/36. 14 p.
  18. Tsarev E. M., Voitko P. F., Erin S. V., Polyakov A. V., Samarin D. V. Patent 2477698 R.F., IPC B63B 35/62, B65B 27/10. Flat cohesive unit. Applicant and patent holder State Educational Institution of Higher Professional Education Mari State Technical University (RU). No. 2011128866/11; application 12.07.2011; publ. 20.03.2013, Bul. No. 8. 7 p. (In Russ.).
  19. Patent 1461583 FR, Int. THIS. B63b, B65g. Towing of wooden logs. Société anonyme so-called: combined shippers shipping company residing in France (Seine). No. 36,157; the date from the requested 26.10.1965; the date of published 02.10.1966. 4 p.
  20. Mr. Roger Jandin residing in France. Patent 1286734 FR, Int. THIS. B65g. Method of floating wood into logs and device for the implementation of this process; the date from the requested 23.01.1961; the date of published 29.01.1962. 4 p.
  21. Kitai Toshiro; Kitai Tekkoshokk. Patent 57167892 JP, Int. CI. B63B 35/58, B65G 1/00. Water surface receiving tools for driftwood. No. 56053830; date of filing 10.04.1981; date of publication of application 15.10.1982.
  22. Toshiro Andoh; Toshiro Andoh. Patent 3662413 USA, Int. CI.2 B63b 35/00. Metal ring for fastening parts by means of ocean wave force. No. 10,354; filed: 13.04.1970; date application 16.05.1972.
  23. Wire Rope Industries Ltd., Pointe-Claire, Canada. Patent 5119529 USA, Int. CI.5 B63B 35/62. Cable hook. No. 703,844; filed: 21.05.1991; date application 09.06.1992.
  24. William A. Meighan, Portland, Oreg. Patent 2961671 USA, Int. CI.9-15 B63B 35/62. Bundle raft with quick detachable fitting. No. 684,450; filed: 17.09.1957; date application 29.11.1960.
  25. M. Ray Holden, P. O. Box 716, Ketchikan, Alaska. Patent 3556319 USA, Int. CI. B63b 27/16. Log-bundling apparatus. No. 857,247; filed: 30.06.1969; date application 19.01.1971.
  26. Wilfred Spry Brodie, P. O. Box 175, Gibsons, British Columbia, VON 1VO, Canada. Patent 3971309 USA, Int. CI.2 B 63 B 27/16. Log bundling apparatus and method of bundling logs. No. 566,904; filed: 10.04.1975; date application 27.07.1976.
  27. Vasiliev V. V., Afonichev D. N., Morkovin V. A., Abramov V. V., Pozdnyakov E. V. Patent 2777674 RF, IPC B65B 35/02, B65G 69/20. Flat splice unit. Applicant and patent holder Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozov (RU). No. 2021140068; application 30.12.2021; publ. 08.08.2022, Byul. No. 22. 8 p. (In Russ.).
  28. Vasiliev V. V., Afonichev D. N., Morkovin V. A., Pozdnyakov E. V. Patent 199681 R.F., IPC B65G 69/00, 57/18. Splotch machine. Applicant and patent holder Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozov (RU). No. 2020119839; application. 08.06.2020; publ. 14.09.2020, Bul. No. 26. 5 p. (In Russ.).

29. Lyuboshits M. I., Itskovich G. M. *Handbook on the resistance of materials*. Second ed. of overwork. and add. Minsk, Vyshejshaya school, 1969. 464 p. (In Russ.).
30. Birger I. A. *Resistance of materials*. Textbook. Moscow, Nauka, 1986. 560 p. (In Russ.).
31. Belyayev N. M. *Problems in strength of materials*. Elsevier, 1966. 539 p.
32. Stephens R. C. *Strength of materials. Theory and examples*. Edward Arnold, 1970. 314 p.
33. Vitor Dias da Silva. *Mechanics and strength of materials*. Springer, 2006. 531 p.
34. Patnaik S., Hopkins D. *Strength of materials: a new unified theory for the 21st century*. Butterworth; Heinemann (Elsevier), 2004. 771 p.
35. Boresi A. P., Schmidt R. J., Sidebottom O. M. *Advanced mechanics of materials*. Wiley, 1993. 827 p.
36. Carl T. F. Ross BSc PhD DSc CEng FRINA, The late John Case, A. Chilver. *Strength of Materials and Structures, Fourth Edition*. Arnold, 1999. 719 p.
37. Broutman L. *Interfaces in composites*. ASTM, 1968. 198 p.
38. Den Hartog J. P. *Strength of materials*. Dover Publications, 1961. 346 p.
39. Skalmierski B. *Mechanics and strength of materials*. Academic Press, Elsevier, 1979. 435 p.
40. Komarovskiy A., Astakhov V. *Physics of strength and fracture control: adaptation of engineering materials and structures*. CRC Press, 2002. 629 p.
41. Perelygin L. M., Ugolev B. N. *Wood science*. Moscow, Forest industry, 1971. 285 p. (In Russ.).
42. Michael F. Ashby. *Materials selection in mechanical design*. Butterworth-Heinemann (Elsevier), 2005. 603 p.
43. Breeders D. A. *Lifting machines*. The second edition was supplemented and revised. Moscow, State Scientific and technical publishing house machine-building literature, 1962. 312 p. (In Russ.).