

DOI: 10.15393/j2.art.2024.8163

УДК 630*378.33

Статья

Планирование поставки лесоматериалов потребителям по транспортно-технологической схеме плот (линейка) — плот

Васильев Владимир Викторович

*кандидат технических наук, доцент, Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I (Российская Федерация),
vasiliev.vladimir87@mail.ru*

Афоничев Дмитрий Николаевич

*доктор технических наук, профессор, Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I (Российская Федерация),
dmafonichev@yandex.ru*

Получена: 11 ноября 2024 / Принята: 28 ноября 2024 / Опубликовано: 2 декабря 2024

Аннотация: Практическая реализация транспортно-технологической схемы, функционирующей по принципу плот (линейка) — плот, на базе усовершенствованной плоской сплottedной единицы требует планирования поставки лесоматериалов потребителям. Для качественного планирования сплава лесоматериалов возникает необходимость обоснования габаритных размеров плоской сплottedной единицы и плотов различного назначения, в конструкцию которых заложена данная сплottedная единица. Предложена методика расчёта габаритных размеров плоской сплottedной единицы, плота (линейки) для первоначального сплава древесины и плота для магистрального сплава древесины. При обосновании габаритов данной сплottedной единицы и плотов различного назначения выполняется расчёт их фактической длины, ширины, высоты, первоначальной осадки и объёма содержания древесины. На основании предложенной методики было выполнено планирование поставки лесоматериалов потребителям с учётом использования оптимального периода первоначального плотового сплава лесоматериалов в рамках одной навигации и рациональной расстановки буксирных судов, задействованных на буксировке плотов. При объёме плота (линейки) $171,26 \text{ м}^3$, когда годовой объём оборота древесины на береговом складе составляет $9,0 \text{ тыс. м}^3$, а оптимальный период первоначального плотового сплава лесоматериалов равен 160 дней, применяется

одно буксирное судно, имеющее срок оборачиваемости три дня. Если годовой объём оборота древесины на береговом складе равен 20,0 тыс. м³, а оптимальный период первоначального плотового сплава лесоматериалов составляет 120 дней, то используются два буксирных судна, имеющих срок оборачиваемости два дня, при условии, что объём плота (линейки) составляет 171,26 м³. В том случае, когда годовой объём оборота древесины на береговом складе равен 30,0 тыс. м³, а оптимальный период первоначального плотового сплава лесоматериалов составляет 180 дней, следует привлекать три буксирных судна со сроком оборачиваемости три дня, если объём плота (линейки) составляет 171,26 м³. На магистральном плотовом сплаве лесоматериалов при среднем объёме древесины в плоту 3425,27 м³ необходимо использовать один буксировщик и, в зависимости от транспортных условий, вспомогательные буксирные суда или специальные средства управления плотами.

Ключевые слова: буксирное судно; лесоматериалы; плоская сплоточная единица; первоначальная осадка; коэффициент полнодревесности

DOI: 10.15393/j2.art.2024.8163

Article

Planning timber delivery to consumers according to the transport and technological scheme of raft (section lines) — raft

Vladimir Vasiliev

Ph. D. in engineering, associate professor, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great (Russian Federation), vasiliev.vladimir87@mail.ru

Dmitry Afonichev

D. Sc. in engineering, professor, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great (Russian Federation), dmafonichev@yandex.ru

Received: 11 November 2024 / Accepted: 28 November 2024 / Published: 2 December 2024

Abstract: The practical implementation of a transport and technological scheme operating on the raft section lines — raft principle on the basis of an improved flat — flow unit requires planning the delivery of timber to consumers. For high-quality planning of timber rafting, it becomes necessary to justify the overall dimensions of a flat raft unit and rafts for various purposes, the design of which is based on this raft unit. A method to calculate the overall dimensions of a flat raft unit, a raft (section lines) for the initial wood floating and a raft for the main wood floating is proposed. When justifying the dimensions of this raft unit and rafts for various purposes, their actual length, width, height, initial draft and volume of wood content are calculated. Based on the proposed methodology, planning timber delivery to consumers was performed taking into account time-optimal span of the initial timber raft floating during one navigation and the rational arrangement of towboats. Provided the volume of the raft (section line) is 171.26 m³ with the annual wood turnover in the onshore warehouse of 9.0 thousand m³ and the time-optimal span of the initial raft of timber floating of 160 days, then one towboat is used with the turnover time of three days. If the annual wood turnover in the onshore warehouse is 20.0 thousand m³ and the time-optimal span for the initial timber raft floating is 120 days, then two towboats with a turnover period of two days are used, provided that the volume of the raft (section line) is 171.26 m³. In the event that the annual turnover of wood in the onshore warehouse is 30.0 thousand m³, and the time-optimal span for the initial timber raft floating is 180 days, then three towboats with a turnover period of three days should be used if the volume of the raft (section line) is 171.26 m³. On the main raft timber floating with an average volume of

wood in a raft of 3425.27 m³, it is necessary to use one towboat and, depending on the transport conditions, auxiliary towboats or special raft control tools.

Keywords: towboat; timber; flat raft unit; initial draft; coefficient of raft-section density

1. Введение

Заготавливаемые лесоматериалы в эксплуатационных лесах, достигших экономического и технического возраста спелости, имеют наибольшую ценность [1—6], а следовательно, своевременно должны транспортироваться от мест заготовок к пунктам потребления с использованием экономически выгодного вида транспорта. В условиях Российской Федерации данные лесоматериалы могут транспортироваться по водным путям, например, сплавом в сплottedных единицах и плотах.

Сплав лесоматериалов реализуется по транспортно-технологическим схемам, представленным в работах [7—11]. Каждая из этих схем учитывает особенности всех видов водного транспорта древесины [7—16], но они не принимают в расчёт развивающееся направление сплава лесоматериалов в современных плоских сплottedных единицах, что не позволяет использовать распространённые транспортно-технологические схемы при планировании сплава лесоматериалов в плоских сплottedных единицах. Для устранения выявленных проблем разработана транспортно-технологическая схема, функционирующая на базе плоских сплottedных единиц по принципу плот (линейка) — плот [17], [18]. Для практической реализации разработанная схема требует выполнения определённого комплекса мероприятий, а именно предварительных работ, связанных с подготовкой к сплаву древесины, основных и заключительных работ [19], [20]. Изначально должны осуществляться подготовительные работы, которые заключаются в анализе водных путей, разработке и подписании соответствующих документов для проведения сплавных работ, а также в планировании сплава древесины. Особое внимание следует уделить планированию сплава древесины, которое должно учитывать конструктивные особенности используемых плоских сплottedных единиц, линеек, сформированных из них, и плотов, образованных из линеек, применяемых на первоначальном сплаве лесоматериалов.

Для реализации предложенной транспортно-технологической схемы усовершенствована конструкция плоской сплottedной единицы [21—23] и создан плот на её основе [24], [25]. Плоская сплottedная единица и плот предназначены для выполнения как первоначального плотового сплава лесоматериалов, так и магистрального. Несмотря на это, на сегодняшний день оценить рентабельность применения разработанной транспортно-технологической схемы, функционирующей на базе усовершенствованной плоской сплottedной единицы и плота на её основе, невозможно, т. к. отсутствует методика планирования сплава лесоматериалов для транспортно-технологической схемы, функционирующей по принципу плот (линейка) — плот.

Цель работы — разработать методику планирования поставки лесоматериалов потребителям по транспортно-технологической схеме плот (линейка) — плот, функционирующей на базе усовершенствованной плоской сплottedной единицы и плота на её основе.

2. Материалы и методы

Планирование поставки лесоматериалов водным транспортом в усовершенствованной плоской сплочной единице [21—23] по разработанной транспортно-технологической схеме, функционирующей по принципу плот (линейка) — плот, требует, во-первых, обоснования оптимальных параметров береговых складов, переформировочных рейдов, пункта (отстойника) для кратковременной или длительной передержки плотов, плотостоянок, рейда приплава [19], [20], а во-вторых, установления габаритных размеров усовершенствованной плоской сплочной единицы, первоначальных и магистральных плотов, формирующихся из данной сплочной единицы [19], [20]. В данном случае обоснование оптимальных параметров береговых складов, переформировочных рейдов, пункта (отстойника) для кратковременной или длительной передержки плотов, плотостоянок, рейда приплава будет осуществляться на основании ряда факторов, одним из которых является максимальный годовой навигационный объём оборота древесины через них, который зависит от объёма сплава древесины в плоских сплочных единицах и плотях на их основе. При этом формирование объёма сплава лесоматериалов в усовершенствованной сплочной единице, а также в первоначальных и магистральных плотях осуществляется за счёт габаритных размеров эксплуатируемых водных объектов и годового объёма заготовки древесины на лесосеках, т. е. габаритные размеры сплавного хода определяют параметры используемых транспортных единиц, а следовательно, и содержание в них определённого объёма древесины. Отсюда следует, что необходимо первоначально проработать методику расчёта габаритных размеров плотов (линеек) для первоначального плотового сплава и плотов для магистрального плотового сплава с учётом особенностей формирования габаритов усовершенствованной сплочной единицы.

Обоснование габаритных размеров плотов (линеек) для первоначального и магистрального плотового сплава лесоматериалов реализуется в три этапа. Первый этап — обоснование габаритных размеров усовершенствованной плоской сплочной единицы с учётом габаритных размеров сплавного хода. Второй этап — обоснование габаритных размеров плота (линейки), сформированного из усовершенствованной плоской сплочной единицы, предназначенной для первоначального плотового сплава. Третий этап — обоснование габаритных размеров плота, предназначенного для магистрального плотового сплава.

При расчёте габаритных размеров плотов (линеек) для первоначального и магистрального плотового сплава лесоматериалов используются следующие входные данные: $b_{\min.LX}$ — минимальная ширина сплавного хода на первоначальном плотовом сплаве древесины, м; B_{PLCE} — проектная максимальная ширина плоской сплочной единицы, м; $r_{ПДП}$ — процентное содержание в плоской сплочной единице древесины повышенной плавучести; $r_{ПДП}$ — процентное содержание в плоской сплочной единице древесины ограниченной плавучести; $h_{\min.LX}$ — минимальная глубина сплавного хода, м;

ρ_B — плотность воды, кг/м³; ρ_{III} — плотность древесины повышенной плавучести, кг/м³; ρ_{OII} — плотность древесины ограниченной плавучести, кг/м³; d_{135BO} — диаметр круглых лесоматериалов в верхнем отрезе, уложенных в первом (нижнем), третьем, пятом и т. д. рядах, см; S_{135C} — средняя сбежистость круглых лесоматериалов, уложенных в первом (нижнем), третьем, пятом и т. д. рядах, см/м; d_{246BO} — диаметр круглых лесоматериалов в верхнем отрезе, уложенных во втором, четвертом, шестом и т. д. рядах, см; S_{246C} — средняя сбежистость круглых лесоматериалов, уложенных во втором, четвертом, шестом и т. д. рядах, см/м; $K_{ПЦЕ}$ — коэффициент полндревесности плоской сплottedной единицы; g — ускорение свободного падения, м/с²; m_{CT} — масса сплottedного такелажа (скобы), кг; $z_{III C}$ — число проволоки в гибкой связи; π — число «пи», постоянное, приблизительно равное 3,14; σ_{Pnpd} — предельно допускаемое напряжение при растяжении, Па; $\rho_{III C}$ — плотность материала проволоки гибкой связи, кг/м³; $\rho_{ГС}$ — плотность материала гибкой связи, кг/м³; $r_{\min.LX}$ — минимальный радиус поворота сплавного хода на первоначальном плотовом сплаве древесины, м; $b_{\min.LXM}$ — минимальная ширина сплавного хода на магистральном плотовом сплаве древесины, м; B_{BC} — ширина встречного каравана, м; $r_{\min.LXM}$ — минимальный радиус поворота сплавного хода на магистральном плотовом сплаве древесины, м; i_{III} — установленный интервал между линейками (секциями) в магистральном плоту, м.

2.1. Обоснование габаритов усовершенствованной плоской сплottedной единицы

При обосновании габаритов усовершенствованной плоской сплottedной единицы акцент ставится на определение её фактической длины, ширины, высоты, первоначальной осадки и объёма содержания древесины. Также интерес представляет определение общего количества круглых лесоматериалов, находящихся в одной плоской сплottedной единице.

Фактическая длина плоской сплottedной единицы $L_{ПЦЕ}$ (м) зависит от длины круглых лесоматериалов $L_{135КЛ}$ (м), уложенных в первом (нижнем), третьем, пятом и т. д. рядах, т. е.

$$L_{ПЦЕ} = L_{135КЛ} \cdot \quad (1)$$

Фактическая ширина плоской сплottedной единицы напрямую зависит от проектной максимальной ширины сплottedной единицы и диаметра круглых лесоматериалов в верхнем отрезе, укладываемых в первый (нижний) ряд. На основании сказанного диаметр круглых лесоматериалов в нижнем отрезе d_{135HO} (м), которые укладываются в первом (нижнем), третьем, пятом и т. д. рядах, рассчитывается следующим образом:

$$d_{135HO} = \frac{d_{135BO}}{100} + L_{135КЛ} \frac{S_{135C}}{100}. \quad (2)$$

Средний диаметр круглого лесоматериала, уложенного в первом (нижнем), третьем, пятом и т. д. рядах, равен:

$$d_{135HCp} = \frac{d_{135BO} + d_{135HO}}{2}. \quad (3)$$

Количество круглых лесоматериалов, укладываемых в каждом ряду — первом (нижнем), третьем, пятом и т. д., составит:

$$n_{135} = \frac{B_{PICE}}{d_{135HCp}}. \quad (4)$$

Показатель, рассчитанный по формуле (4), округляется до целого значения в меньшую сторону и принимается как рекомендуемое количество укладки круглых лесоматериалов в каждом соответствующем ряду плоской сплочной единицы. При этом проектная максимальная ширина плоской сплочной единицы должна удовлетворять условию

$$B_{PICE} \leq \frac{b_{\min.LX}}{k_{PLX}}, \quad (5)$$

где k_{PLX} — коэффициент учёта радиуса поворота сплавного хода.

В формуле (5) коэффициент k_{PLX} изменяется в диапазоне 1,5...2,0. Нижний порог принимается на реках, характеризующихся большим радиусом поворота сплавного хода и прямолинейностью транспортного пути, верхний порог применяется на реках, имеющих малый радиус поворота сплавного хода [8], [9].

Учитывая равенства (4) и (5), определяем фактическую ширину плоской сплочной единицы, которая составит:

$$B_{PICE} = d_{135HCp} n_{135}. \quad (6)$$

Фактическая высота плоской сплочной единицы зависит от плотности древесины повышенной и ограниченной плавучести, диаметра круглых лесоматериалов в верхнем отрезе, а также от проектной осадки данной сплочной единицы. Максимально допустимая проектная осадка плоской сплочной единицы равна:

$$T_{PICE} = h_{\min.LX} - Z_D, \quad (7)$$

где Z_D — донный запас, равный 0,2...0,3 м [8], [9], [16].

Доля содержания в плоской сплочной единице древесины повышенной и ограниченной плавучести рассчитывается соответственно по формулам

$$R_{III} = \frac{r_{III}}{100}; \quad (8)$$

$$R_{OII} = \frac{r_{OII}}{100}. \quad (9)$$

Проектную высоту плоской сплочной единицы H_{PICE} (м), с учётом рекомендаций работы [26], следует определять по формуле

$$H_{\text{ПИСЕ}} = \frac{T_{\text{ПИСЕ}} \rho_B}{\rho_{\text{ПШ}} R_{\text{ПШ}} + \rho_{\text{ОП}} R_{\text{ОП}}}. \quad (10)$$

Длина круглых лесоматериалов, укладываемых во втором, четвёртом, шестом и т. д. рядах, будет равна фактической ширине плоской сплочной единицы, т. е. $L_{246\text{КЛ}} = B_{\text{ПИСЕ}}$.

Диаметр круглых лесоматериалов в нижнем отрезе $d_{246\text{НО}}$ (м), которые укладываются во втором, четвёртом, шестом рядах и т. д., рассчитывается по формуле

$$d_{246\text{НО}} = \frac{d_{246\text{ВО}}}{100} + L_{246\text{КЛ}} \frac{S_{246\text{С}}}{100}. \quad (11)$$

Средний диаметр круглого лесоматериала, уложенного во втором, четвёртом, шестом рядах и т. д., рассчитывается следующим образом:

$$d_{246\text{Ср}} = \frac{d_{246\text{ВО}} + d_{246\text{НО}}}{2}. \quad (12)$$

Количество круглых лесоматериалов, укладываемых в каждом ряду (втором, четвёртом, шестом и т. д.), составит:

$$n_{246} = \frac{L_{\text{ПИСЕ}}}{d_{246\text{Ср}}}. \quad (13)$$

Значение, полученное расчётным путём по формуле (13), округляется до целого в меньшую сторону и принимается как рекомендуемое количество укладки круглых лесоматериалов в каждом соответствующем ряду плоской сплочной единицы.

Максимально возможное количество укладки рядов круглых лесоматериалов в плоской сплочной единице равно:

$$n_{\text{ПИСЕ}} = \frac{2H_{\text{ПИСЕ}}}{(d_{135\text{НО}} + d_{246\text{НО}})}. \quad (14)$$

Расчётное значение, полученное из формулы (14), округляется до целого значения в меньшую сторону, т. к. высота плоской сплочной единицы регламентируется глубиной сплавного хода.

Фактическая высота плоской сплочной единицы рассчитывается в зависимости от полученного округлённого значения $n_{\text{ПИСЕ}}$. Если полученное значение $n_{\text{ПИСЕ}}$ нечётное, то фактическая высота рассчитывается по формуле

$$H_{\text{ПИСЕ}} = d_{135\text{НО}} \left(\frac{n_{\text{ПИСЕ}}}{2} + 0,5 \right) + d_{246\text{НО}} \left(\frac{n_{\text{ПИСЕ}}}{2} - 0,5 \right). \quad (15)$$

В случае, когда значение $n_{\text{ПИСЕ}}$ чётное, фактическую высоту плоской сплочной единицы следует определять по выражению

$$H_{\text{ФПСЕ}} = d_{135\text{НО}} \frac{n_{\text{РПСЕ}}}{2} + d_{246\text{НО}} \frac{n_{\text{РПСЕ}}}{2}. \quad (16)$$

Количество нечётных рядов — первый (нижний), третий, пятый и т. д., находящихся в плоской сплочной единице, определяется согласно полученному расчётному значению $n_{\text{РПСЕ}}$. В случае, когда $n_{\text{РПСЕ}}$ нечётное, количество нечётных рядов определяется по формуле

$$n_{\text{Р135}} = \frac{n_{\text{РПСЕ}}}{2} + 0,5. \quad (17)$$

Если расчётный параметр $n_{\text{РПСЕ}}$ чётный, то количество нечётных рядов — первый (нижний), третий, пятый и т. д., находящихся в плоской сплочной единице, будет равно:

$$n_{\text{Р135}} = \frac{n_{\text{РПСЕ}}}{2}. \quad (18)$$

В практических условиях количество чётных рядов (второй, четвёртый, шестой и т. д.), находящихся в плоской сплочной единице, зависит от расчётного показателя $n_{\text{РПСЕ}}$. При условии, что $n_{\text{РПСЕ}}$ нечётное, количество чётных рядов равно:

$$n_{\text{Р246}} = \frac{n_{\text{РПСЕ}}}{2} - 0,5. \quad (19)$$

В свою очередь, когда $n_{\text{РПСЕ}}$ чётное, количество чётных рядов (второй, четвёртый, шестой и т. д.), находящихся в плоской сплочной единице, составит:

$$n_{\text{Р246}} = \frac{n_{\text{РПСЕ}}}{2}. \quad (20)$$

Общее количество круглых лесоматериалов длиной $L_{135\text{КЛ}}$ (м), находящихся во всех нечётных рядах — первый (нижний), третий, пятый и т. д. плоской сплочной единицы, определяется по формуле

$$n_{\text{ОЛ135}} = n_{\text{Р135}} n_{135}. \quad (21)$$

При этом общее количество круглых лесоматериалов длиной $L_{246\text{КЛ}}$ (м), размещённых во всех чётных рядах (второй, четвёртый, шестой и т. д.) плоской сплочной единицы, следует рассчитывать по формуле

$$n_{\text{ОЛ246}} = n_{\text{Р246}} n_{246}. \quad (22)$$

Общий объём содержания древесины в плоской сплочной единице зависит от её геометрического объёма и коэффициента полндревесности.

Геометрический объём плоской сплочной единицы рассчитывается по формуле

$$V_{\text{ГПСЕ}} = H_{\text{ФПСЕ}} B_{\text{ФПСЕ}} L_{\text{ФПСЕ}}. \quad (23)$$

На основании геометрического объёма плоской сплочной единицы рассчитывается содержание в ней древесины:

$$V_{ДПСЕ} = V_{ГПСЕ} K_{ПСЕ}. \quad (24)$$

Первоначальная осадка плоской сплочной единицы формируется на основании объёма содержания в ней древесины с различной плотностью, массы сплочного такелажа, коэффициента полнодревесности, а также с учётом фактической длины и ширины сплочной единицы.

Вес плоской сплочной единицы рассчитывается по формуле

$$G_{ПСЕ} = g(V_{ДПСЕ} \rho_{ПП} R_{ПП} + V_{ДПСЕ} \rho_{ОП} R_{ОП} + m_{СТ}). \quad (25)$$

Гибкие связи плоской сплочной единицы могут представлять собой трос единой структуры, т. е. трос из одной проволоки, или из нескольких проволок, т. е. проволочной скрутки, а значит, расчёт необходимого диаметра гибкой связи должен выполняться с учётом общего количества проволоки, содержащейся в ней. На основании вышесказанного, используя при этом ключевые условия прочности материала [27—33] и основные формулы расчёта диаметра гибких связей [23], получим зависимость для расчёта диаметра одной проволоки, находящейся в гибкой связи, выполненной в виде проволочной скрутки. Данная формула имеет следующий вид:

$$d_{\min ПГС} = \sqrt{\frac{2[k_{ЗПР}] k_{ПГС} G_{ПСЕ}}{\pi z_{ПГС} \sigma_{Прод}}}. \quad (26)$$

где $[k_{ЗПР}]$ — коэффициент запаса прочности при растяжении; $k_{ПГС}$ — понижающий коэффициент для гибкой связи.

Коэффициент запаса прочности $[k_{ЗПР}]$ для проволоки следует принимать 3 [23], [34]. Понижающий коэффициент $k_{ПГС}$ для гибкой связи данной плоской сплочной единицы устанавливается 1,5...2,0.

Расстояние между первым (нижним) и последним нечётным рядом h_{135} (м) зависит от общего количества рядов в плоской сплочной единице $n_{ПСЕ}$. Если $n_{ПСЕ}$ чётное значение, то h_{135} (м) рассчитывается следующим образом:

$$h_{135} = \frac{n_{ПСЕ}}{2} d_{135НО} + \left(\frac{n_{ПСЕ}}{2} - 1 \right) d_{246НО}. \quad (27)$$

При условии, когда $n_{ПСЕ}$ нечётное, расстояние между первым (нижним) и последним нечётным рядом необходимо рассчитывать по формуле

$$h_{135} = \left(\frac{n_{ПСЕ}}{2} + 0,5 \right) d_{135НО} + \left(\frac{n_{ПСЕ}}{2} - 0,5 \right) d_{246НО}. \quad (28)$$

Длина одной проволоки, входящей в состав гибкой связи, соединяющей между собой первый (нижний), третий, пятый и т. д. ряды, равна:

$$L_{П135} = (2B_{ФПСЕ} + 2h_{135})1,1. \quad (29)$$

Расстояние между вторым и последним чётным рядом h_{246} (м) зависит от показателя $n_{РПСЕ}$. Когда $n_{РПСЕ}$ чётное значение, формула для расчёта h_{246} (м) имеет вид:

$$h_{246} = \left(\frac{n_{РПСЕ}}{2} - 1 \right) d_{135НО} + \frac{n_{РПСЕ}}{2} d_{246НО}. \quad (30)$$

В том случае, если $n_{РПСЕ}$ нечётное, то расстояние между вторым и последним чётным рядом определяется из выражения

$$h_{135} = \left(\frac{n_{РПСЕ}}{2} - 1,5 \right) d_{135НО} + \left(\frac{n_{РПСЕ}}{2} - 0,5 \right) d_{246НО}. \quad (31)$$

Длина одной проволоки, входящей в состав гибкой связи, соединяющей между собой второй, четвёртый, шестой ряды и т. д., равна:

$$L_{П246} = (2L_{ФПСЕ} + 2h_{246})1,1. \quad (32)$$

Объём материала гибких связей, состоящих из определённого количества проволоки и соединяющих между собой первый (нижний), третий, пятый ряды и т. д., рассчитывается по формуле

$$V_{П135} = 2z_{ПГС} \left(\frac{\pi d_{\min ПГС}^2 L_{П135}}{4} \right). \quad (33)$$

В свою очередь, объём материала гибких связей, состоящих из определённого количества проволоки и соединяющих между собой второй, четвёртый, шестой ряды и т. д., будет равен:

$$V_{П246} = 2z_{ПГС} \left(\frac{\pi d_{\min ПГС}^2 L_{П246}}{4} \right). \quad (34)$$

Общая масса гибких связей, с учётом формул (33) и (34), определится из выражения

$$m_{ПГС} = \rho_{ПГС} (V_{П135} + V_{П246}). \quad (35)$$

Первоначальная осадка усовершенствованной плоской сплочной единицы, с учётом того, что гибкая связь представляет собой проволочную скрутку, будет рассчитываться по формуле

$$T_{ФПСЕ} = \frac{V_{ДПСЕ} \rho_{ПП} R_{ПП} + V_{ДПСЕ} \rho_{ОП} R_{ОП} + m_{СТ} + m_{ПГС}}{B_{ФПСЕ} L_{ФПСЕ} \rho_{В} K_{ПСЕ}}. \quad (36)$$

В практических условиях, когда гибкие связи плоской сплочной единицы представляют собой трос единой структуры, т. е. трос из одной проволоки, с учётом ключевых условий прочности материала [27—33] и основных формул расчёта диаметра гибких связей [23],

получим зависимость для определения минимального диаметра гибкой связи, которая имеет следующий вид:

$$d_{\min GC} = \sqrt{\frac{2[k_{ЗПР}]k_{ПГС}G_{ПСЕ}}{\pi\sigma_{Ппрд}}}. \quad (37)$$

На основании формул (27), (28) и (29), с учётом зависимости (33), объём материала гибких связей, состоящих из троса в виде одной проволоки, т. е. троса единой структуры, которые соединяют между собой первый (нижний), третий, пятый ряды и т. д., будет рассчитываться по следующей зависимости:

$$V_{GC135} = 2 \left(\frac{\pi d_{\min GC}^2 L_{П135}}{4} \right). \quad (38)$$

Учитывая формулы (30), (31), (32), при этом преобразовав равенство (34), получили зависимость для расчёта объёма материала гибких связей, представляющих трос, состоящий из одной проволоки, которые соединяют между собой второй, четвёртый, шестой ряды и т. д. Данная зависимость имеет вид:

$$V_{GC246} = 2 \left(\frac{\pi d_{\min GC}^2 L_{П246}}{4} \right). \quad (39)$$

Используя равенства (38) и (39), определяем общую массу гибких связей, представляющих собой трос в виде одной проволоки:

$$m_{GC} = \rho_{GC} (V_{GC135} + V_{GC246}). \quad (40)$$

Первоначальная осадка усовершенствованной плоской сплottedной единицы, с учётом того, что гибкая связь представляет собой трос в виде одной проволоки, будет рассчитываться по формуле

$$T_{ФПСЕ} = \frac{V_{ДПСЕ}\rho_{ПП}R_{ПП} + V_{ДПСЕ}\rho_{ОП}R_{ОП} + m_{СТ} + m_{GC}}{B_{ФПСЕ}L_{ФПСЕ}\rho_B K_{ПСЕ}}. \quad (41)$$

Представленная методика обоснования габаритов усовершенствованной плоской сплottedной единицы учитывает все её конструктивные особенности, а отдельные элементы данной методики будут использоваться в дальнейшем для расчёта габаритов плотов различного назначения.

2.2. Обоснование габаритов плота (линейки) для первоначального сплава древесины

Обоснование габаритов плота (линейки) заключается в установлении его фактической ширины, высоты, длины, первоначальной осадки, а также в расчёте объёма содержания древесины в плоту (линейке), его коэффициента полндревесности и количественного показателя плоских сплottedных единиц в одном плоту (линейке).

Проектная ширина плота (линейки), используемого на первоначальном плотовом сплаве древесины по малым и средним рекам, когда преимущественно присутствует одностороннее движение, рассчитывается по формуле

$$B_{PPL} = \frac{b_{\min.LX}}{k_{PLX}}. \quad (42)$$

Максимальное количество устанавливаемых плоских сплочных единиц по ширине линейки рассчитывается следующим образом:

$$n_{\PhiШПСЕ} = \frac{B_{PPL}}{B_{FPCE}}. \quad (43)$$

Полученный результат $n_{\PhiШПСЕ}$ округляется до целого числа в меньшую сторону, т. к. количество устанавливаемых сплочных единиц по ширине линейки регламентируется шириной сплавного хода.

На основании зависимости (43) фактическая ширина плота (линейки) будет равна:

$$B_{FPPL} = B_{FPCE} n_{\PhiШПСЕ}. \quad (44)$$

Так как плот (линейка) формируется из усовершенствованной плоской сплочной единицы, то справедливо считать, что проектная высота плота (линейки) H_{PPL} (м) будет равна проектной высоте плоской сплочной единицы H_{FPCE} (м), т. е. $H_{PPL} = H_{FPCE}$. Отсюда следует, что фактическая высота плота (линейки) H_{FPPL} (м) будет равна фактической высоте плоской сплочной единицы H_{FPCE} (м), а значит, справедливо равенство $H_{FPPL} = H_{FPCE}$. В свою очередь, проектная осадка плота (линейки) T_{PPL} (м) соответствует проектной осадке плоской сплочной единицы T_{FPCE} (м). На основании сказанного можно записать следующие равенства:

$$T_{FPPL} = T_{FPCE}; \quad (45)$$

$$T_{FPPL} = T_{FPCE}. \quad (46)$$

Фактическая длина плота (линейки) зависит от проектной длины линейки, т. е. от максимально допустимой длины плота (линейки), где проектная длина линейки учитывает габариты используемых плоских сплочных единиц и габариты сплавного хода. Таким образом, проектная длина плота (линейки), при условии, что его буксировка будет реализовываться по малым и средним рекам, характеризующимся лимитирующими габаритами сплавного хода, рекомендуется определять следующим образом [10]:

$$L_{PPL} = \sqrt{0,0025r_{\min.LX} + 4,4r_{\min.LX}b_{\min.LX} + 7,78b_{\min.LX}^2 + 3,42\frac{b_{\min.LX}^3}{r_{\min.LX}}}. \quad (47)$$

Угол поворота одной плоской сплottedной единицы составит [35]:

$$\beta_{ПСЕ} = 2 \arctan \frac{L_{ФПСЕ}}{2r_{\min ЛХ} - B_{ФПЛ}}. \quad (48)$$

Максимальное количество круговой установки плоских сплottedных единиц в плоту (линейке) зависит от угла поворота одной сплottedной единицы, рассчитанного по формуле (48). Следовательно, максимальное количество круговой установки плоских сплottedных единиц в линейке можно определить по формуле [35]:

$$n_{ПЛПСЕ} = \frac{360}{\beta_{ПСЕ}}. \quad (49)$$

Полученное по формуле (49) расчётное значение округляется в меньшую сторону, т. к. количество установки плоских сплottedных единиц регламентируется длиной окружности с радиусом $r_{\min ЛХ}$.

Так как установка в плоту плоских сплottedных единиц должна осуществляться с интервалами между ними, то сумма интервалов, согласно работе [35], определяется следующим образом:

$$\sum i_{ПСЕ} = 2\pi B_{ФПЛ}. \quad (50)$$

При этом интервал между двумя плоскими сплottedными единицами составит:

$$i_{ПСЕ} = \frac{\sum i_{ПСЕ}}{n_{ПЛПСЕ}}. \quad (51)$$

На основании формул (47) и (51) максимальное количество установки плоских сплottedных единиц по длине плота (линейки) будет равно:

$$n_{ФДПСЕ} = \frac{L_{ФПЛ}}{L_{ФПСЕ} + i_{ПСЕ}}. \quad (52)$$

Полученное значение $n_{ФДПСЕ}$ округляется до целого в меньшую сторону, т. к. максимальное количество устанавливаемых плоских сплottedных единиц по длине плота (линейки) ограничивается проектной длиной линейки.

Учитывая равенства (51) и (52), запишем конечную формулу для расчёта фактической длины плота (линейки):

$$L_{ФПЛ} = L_{ФПСЕ} n_{ФДПСЕ} + (n_{ФДПСЕ} - 1) i_{ПСЕ}. \quad (53)$$

Общее количество сплottedных единиц, содержащихся в одном плоте (линейке), рассчитывается следующим образом:

$$n_{ФПЛПСЕ} = n_{ФДПСЕ} n_{ФШПСЕ}. \quad (54)$$

Расчётное содержание определённого объёма древесины в одном плоту (линейке), с учётом формул (24) и (54), составит:

$$V_{ДПЛ} = V_{ДПСЕ} n_{ФППСЕ}. \quad (55)$$

В соответствии с полученными данными о расчётном содержании древесины в одном плоту (линейке) и о его фактических габаритах рассчитывается коэффициент полндревесности:

$$K_{ПЛ} = \frac{V_{ДПЛ}}{B_{ФПЛ} H_{ФПЛ} L_{ФПЛ}}. \quad (56)$$

Приведённая методика обоснования габаритов плота (линейки) на базе усовершенствованной плоской сплоточной единицы необходима для планирования транспортировки древесины на первоначальном плотовом сплаве. При этом расчётные показатели линейки (плота) будут использоваться в дальнейшем для планирования транспортировки древесины в магистральных плотах.

2.3. Обоснование габаритов плота для магистрального сплава древесины

Проектное обоснование габаритов плота, который предназначен для магистрального плотового сплава древесины, направлено на определение следующих фактических транспортно-эксплуатационных показателей плота: ширина; высота; длина; количество линеек в плоту; расчётный объём древесины; коэффициент полндревесности.

Для магистрального плота расчёт максимально допустимой ширины, т. е. проектной ширины, следует выполнять по формуле [8—11]

$$B_{РП} = \frac{b_{\min.ЛХМ} - B_{ВС}}{2,6}. \quad (57)$$

Максимальное количество установки плотов (линеек) по ширине магистрального плота определяется следующим образом:

$$n_{ФШПЛ} = \frac{B_{РП}}{B_{ФПЛ}}. \quad (58)$$

Расчётный показатель $n_{ФШПЛ}$ округляется до целого числа в меньшую сторону, т. к. количество устанавливаемых плотов (линеек) по ширине магистрального плота регламентируется шириной сплавного хода на больших и крупных реках.

На основании формул (44) и (58) фактическая ширина плота будет рассчитываться по формуле

$$B_{ФП} = B_{ФПЛ} n_{ФШПЛ}. \quad (59)$$

Проектная высота и фактическая высота плота будут соответствовать проектной высоте и фактической высоте плота (линейки), предназначенного для первоначального плотового сплава древесины. В данном случае справедливо записать следующие равенства:

$$H_{PI} = H_{PIL}. \quad (60)$$

$$H_{FI} = H_{FIL}. \quad (61)$$

Фактическая длина магистрального плота зависит от многих факторов, и при этом рассчитывается от проектной длины данного плота. Таким образом, изначально устанавливается проектная длина плота, а затем рассчитывается фактическая длина плота в зависимости от максимально возможного количества установки в плоту линейек, которые использовались на первоначальном плотовом сплаве древесины.

Проектная длина плота, с учётом зависимости (47), рассчитывается по формуле [10]

$$L_{PI} = \sqrt{0,0025r_{\min JXM} + 4,4r_{\min JXM}b_{\min JXM} + 7,78b_{\min JXM}^2 + 3,42\frac{b_{\min JXM}^3}{r_{\min JXM}}}. \quad (62)$$

Максимально возможное количество установки плотов (линеек), используемых на первоначальном плотовом сплаве древесины, по длине магистрального плота будет равно:

$$n_{\Phi PIL} = \frac{L_{PI}}{L_{FIL} + i_{PI}}. \quad (63)$$

Расчётный показатель $n_{\Phi PIL}$ округляется до целого в меньшую сторону, т. к. максимальное количество устанавливаемых плотов (линеек), используемых на первоначальном сплаве древесины, по длине магистрального плота ограничивается проектной длиной указанного плота.

На основании равенства (63), с учётом зависимости (53), запишем формулу расчёта фактической длины плота:

$$L_{FI} = L_{FIL}n_{\Phi PIL} + (n_{\Phi PIL} - 1)i_{PI}. \quad (64)$$

Общее количество плотов (линеек), используемых на первоначальном плотовом сплаве древесины, которые содержатся в магистральном плоту, рассчитывается по формуле

$$n_{FPIL} = n_{\Phi PIL}n_{\Phi PPL}. \quad (65)$$

Общий объём древесины, который содержится в одном магистральном плоту, определяется на основании расчётного содержания объёма древесины в одном плоту (линейке) V_{DPI} (м³) и общего количества плотов (линеек), содержащихся в магистральном плоту, n_{FPIL} . На основании сказанного общий объём древесины, который содержится в одном магистральном плоту, равен:

$$V_{DI} = V_{DPI}n_{FPIL}. \quad (66)$$

Коэффициент полндревесности магистрального плота рассчитывается с учётом его габаритов, определяемых по формулам (59), (61), (64), и фактического содержания в нём древесины $V_{ДП}$ (м^3), т. е. формула расчёта коэффициента полндревесности плота имеет следующий вид:

$$K_{II} = \frac{V_{ДП}}{B_{ФП} H_{ФП} L_{ФП}}. \quad (67)$$

3. Результаты

Планирование поставки лесоматериалов потребителям в усовершенствованной плоской сплотовой единице и плоте на её основе по транспортно-технологической схеме плот (линейка) — плот осуществляется для следующих условий: $b_{\min.ЛХ} = 10,0$ м; $b_{\min.ЛХМ} = 50,0$ м; $B_{BC} = 10,0$ м; $r_{\min.ЛХ} = 90,0$ м; $r_{\min.ЛХМ} = 500,0$ м; $\rho_{ПГС} = \rho_{ГС} = 7800$ кг/м³; $\sigma_{Pnpd} = 5 \cdot 10^8$ Па; $z_{ПГС} = 15$; $\rho_B = 1000$ кг/м³; $g = 9,8$ м/с²; $K_{ПСЕ} = 0,70$; $r_{ПДП} = r_{ПДОП} = 50$ %; $\rho_{ПД} = \rho_{ОП} = 750$ кг/м³; $d_{135BO} = d_{246BO} = 20$ см; $S_{135C} = S_{246C} = 1,0$ см; $B_{ПСЕ} = 3,0$ м; $h_{\min.ЛХ} = 1,4$ м; $L_{135КЛ} = 6,0$ м; $Z_D = 0,3$; $k_{PЛХ} = 2,0$.

По приведённой выше методике, с учётом публикаций [23], [36], изначально был выполнен расчёт транспортно-эксплуатационных показателей усовершенствованной плоской сплотовой единицы, плота (линейки), предназначенного для первоначального плотового сплава древесины, а также плота, сформированного из плотов (линеек), используемых на первоначальном сплаве. В результате этого были получены следующие ключевые показатели: $m_{CT} = 50,0$ кг; $V_{ДПСЕ} = 15,5694$ м³; $T_{ФПСЕ} = 0,9547$ м; $i_{ПД} = 0,2042$ м; $V_{ДПД} = 171,2634$ м³; $K_{ПД} = 0,679$; $V_{ДП} = 3425,268$ м³; $K_{II} = 0,6435$. Представленные расчёты демонстрируют, какой объём древесины будет транспортироваться тягой одного буксирного судна на первоначальном и магистральном плотовом сплаве лесоматериалов.

На основании полученных данных расчёта транспортно-эксплуатационных показателей транспортных единиц определили фактический объём древесины, который можно транспортировать за одну навигацию. При условии, что оптимальный период первоначального плотового сплава лесоматериалов в рамках одной навигации составляет, например, 150 дней, где на данном виде сплава лесоматериалов задействован один буксировщик, а период его оборачиваемости составляет три дня, то за указанный период будет отбуксировано 50 плотов (линеек), сформированных из усовершенствованной плоской сплотовой единицы. Следовательно, общий объём сплава древесины на первоначальном плотовом сплаве составит: $V_D = 171,2634 \times 50 = 8563,17$ м³. На магистральном плотовом сплаве древесины, при условии, что на переформировочный рейд поступают плоты (линейки) только с одного берегового склада, общий объём сплава лесоматериалов будет равен объёму первоначального плотового сплава. Таким образом, максимальный объём поставки лесоматериалов потребителям в усовершенствованной плоской сплотовой

единице по транспортно-технологической схеме плот (линейка) — плот за одну навигацию составит 8563,17 м³.

Подробно рассматривая расчёт максимального объёма поставки лесоматериалов потребителям за одну навигацию, можно сделать вывод, что на данный показатель влияют факторы, связанные со свойствами и параметрами сплавляемых круглых лесоматериалов, с условиями проведения сплавных работ, транспортно-эксплуатационными показателями усовершенствованной плоской сплотовой единицы, оптимальным периодом первоначального плотового сплава лесоматериалов в рамках одной навигации, периодом оборачиваемости буксирного судна и количеством применяемых буксировщиков. При этом на оптимальный период первоначального плотового сплава лесоматериалов в рамках одной навигации, как правило, влияют габариты сплавного хода, продолжительность навигации и количество атмосферных осадков. Период оборачиваемости буксирного судна зависит от расстояния первоначального плотового сплава древесины. Количество применяемых буксировщиков обусловлено транспортными условиями и материальными ресурсами сплавных предприятий.

Для увеличения объёма поставки лесоматериалов потребителям в плоских сплотовых единицах по транспортно-технологической схеме плот (линейка) — плот необходимо увеличить объём первоначального плотового сплава древесины, что достигается не только разработкой плоских сплотовых единиц с высокими транспортно-эксплуатационными показателями [21], но и подготовкой лесоматериалов и сплавных путей к выполнению сплава древесины, использованием оптимального периода первоначального плотового сплава лесоматериалов в рамках одной навигации и рациональной расстановкой буксирных судов, задействованных на буксировке плотов (линеек).

В практических условиях не всегда есть возможность должным образом подготовить лесоматериалы и транспортные пути к сплаву древесины, а именно изменить свойства и параметры лесоматериалов и расширить габариты сплавного пути. Тогда возникает необходимость в рациональном использовании оптимального периода первоначального плотового сплава лесоматериалов в рамках одной навигации и рентабельной расстановки буксирных судов. Причём оптимальный период первоначального плотового сплава лесоматериалов в рамках одной навигации для каждого года имеет различные показатели, а расстановка буксирных судов обуславливается периодом их оборачиваемости и количеством задействованных буксировщиков на одном транспортном пути.

Для дальнейшего анализа влияния рационального использования оптимального периода первоначального плотового сплава лесоматериалов в рамках одной навигации и рентабельной расстановки буксирных судов устанавливаем, что на первоначальном плотовом сплаве лесоматериалов задействован один буксировщик. При этом на переформировочный рейд плоты (линейки) доставляются с одного берегового склада, т. е. плотовой сплав лесоматериалов производится по одному транспортному пути. Следовательно, объёмы первоначального и магистрального плотового сплава

лесоматериалов равны. Также обуславливаемся, что навигационный период составляет 200 дней и уменьшается с шагом 10 дней до 100 дней, а период оборачиваемости буксирного судна составляет один день и увеличивается с шагом в одни сутки до 10 дней. Все результаты расчёта для одного транспортного пути представлены в таблице 1.

Приведённые расчётные данные в таблице 1 показывают, что с увеличением периода оборачиваемости буксирного судна и уменьшением оптимального периода первоначального плотового сплава лесоматериалов в рамках одной навигации объём поставки лесоматериалов потребителям уменьшается.

Таблица 1. Объём поставки лесоматериалов потребителям при использовании одного буксирного судна, тыс. м³

Table 1. The volume of timber delivery to consumers using one towboat, thousand m³

Наименование		Период оборачиваемости буксирного судна, дней									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Оптимальный период первоначального плотового сплава лесоматериалов в рамках одной навигации, дней	200	34,25	17,13	11,30	8,56	6,85	5,65	4,80	4,28	3,77	3,43
	190	32,54	16,27	10,79	8,05	6,51	5,31	4,62	3,94	3,60	3,25
	180	30,83	15,41	10,28	7,71	6,17	5,14	4,28	3,77	3,43	3,08
	170	29,11	14,56	9,59	7,19	5,82	4,80	4,11	3,60	3,08	2,91
	160	27,40	13,70	9,13	6,85	5,48	4,45	3,77	3,43	2,91	2,74
	150	25,69	12,84	8,56	6,34	5,14	4,28	3,60	3,08	2,74	2,57
	140	23,98	11,99	7,99	5,99	4,80	3,94	3,43	2,91	2,57	2,40
	130	22,26	11,13	7,36	5,48	4,45	3,60	3,08	2,74	2,40	2,23
	120	20,55	10,28	6,85	5,14	4,11	3,43	2,91	2,57	2,23	2,06
	110	18,84	9,41	6,17	4,62	3,77	3,08	2,57	2,23	2,06	1,88
	100	17,13	8,56	5,65	4,28	3,43	2,74	2,40	2,06	1,88	1,71

Учитывая приведённые расчётные данные в таблице 1 и первоначальные установленные условия ($b_{\min.LX} = 10,0$ м; $b_{\min.LXM} = 50,0$ м; $B_{BC} = 10,0$ м; $r_{\min.LX} = 90,0$ м; $r_{\min.LXM} = 500,0$ м; $\rho_{ПГС} = \rho_{ГС} = 7800$ кг/м³; $\sigma_{Pnpd} = 5 \cdot 10^8$ Па; $z_{ПГС} = 15$; $\rho_B = 1000$ кг/м³; $g = 9,8$ м/с²; $K_{ПСЕ} = 0,70$; $r_{ПДП} = r_{ПДОП} = 50$ %; $\rho_{П} = \rho_{ОП} = 750$ кг/м³; $d_{135BO} = d_{246BO} = 20$ см; $S_{135C} = S_{246C} = 1,0$ см; $B_{PПCE} = 3,0$ м; $h_{\min.LX} = 1,4$ м; $L_{135KL} = 6,0$ м; $Z_D = 0,3$; $k_{PLX} = 2,0$), выполним планирование поставки лесоматериалов потребителям в усовершенствованной плоской сплочной единице по транспортно-технологической схеме плот (линейка) — плот для одного транспортного пути с использованием одного буксирного судна на первоначальном плотовом сплаве древесины. Например, при годовом обороте древесины на береговом складе, равном 9,0 тыс. м³, где оптимальный период первоначального плотового сплава лесоматериалов в рамках одной навигации оставляет 160 дней, необходимо обеспечить

период оборачиваемости буксирного судна трёхдневным сроком. Таким образом, для заданных условий за 160 дней навигации для буксировки 9,0 тыс. м³ лесоматериалов на первоначальном плотовом сплаве древесины следует применять одно буксирное судно, имеющее срок оборачиваемости три дня, которое должно отбуксировать 53 плота (линейки) с объёмом древесины $V_{ДПЛ} = 171,26 \text{ м}^3$ от берегового склада до формировочного рейда. В свою очередь, при магистральном плотовом сплаве древесины, который может быть реализован на протяжении всей навигации, необходимо отбуксировать три плота с формировочного рейда на рейды приплава. Для буксировки трёх плотов, имеющих средний объём древесины $V_{ДП} = 3425,27 \text{ м}^3$, должны быть задействованы один буксировщик и, в зависимости от транспортных условий, вспомогательные буксирные суда или специальные средства управления плотами.

Период оборачиваемости буксирного судна не всегда можно варьировать, например, он может регламентироваться транспортными условиями, работой переформировочного рейда, а также нормируемым рабочим днём. Таким образом, период оборачиваемости буксировщика устанавливается для конкретного транспортного пути на постоянной основе. При этом может варьироваться количество задействованных буксировщиков на одном транспортном пути. На основании сказанного, для дальнейшего анализа влияния рационального использования оптимального периода первоначального плотового сплава лесоматериалов в рамках одной навигации и рентабельной расстановки буксирных судов, устанавливаем, что на первоначальном плотовом сплаве лесоматериалов в первом случае период оборачиваемости буксирного судна составляет два дня, а во втором случае — три дня. Для двух случаев на переформировочный рейд плоты (линейки) доставляются с одного берегового склада, т. е. плотовой сплав лесоматериалов производится по одному транспортному пути, а значит, объёмы первоначального и магистрального плотового сплава лесоматериалов равны. Обуславливаемся, что навигационный период составляет 200 дней и уменьшается с шагом 10 дней до 100 дней, а количество буксирных судов равно одному и увеличивается с шагом в одно судно до шести единиц. Результаты расчёта для одного транспортного пути при периоде оборачиваемости буксирного судна в два и три дня соответственно указаны в таблицах 2 и 3.

Анализируя расчётные данные, представленные в таблицах 2 и 3, можно сделать вывод, что независимо от периода оборота буксирного судна при увеличении количества буксировщиков, задействованных на первоначальном плотовом сплаве древесины, объём поставки лесоматериалов потребителям увеличивается.

Для периода оборачиваемости буксирного судна в два дня на первоначальном плотовом сплаве древесины, с учётом первоначальных установленных условий ($b_{\min.ЛХ} = 10,0 \text{ м}$; $b_{\min.ЛХМ} = 50,0 \text{ м}$; $B_{BC} = 10,0 \text{ м}$; $r_{\min.ЛХ} = 90,0 \text{ м}$; $r_{\min.ЛХМ} = 500,0 \text{ м}$; $\rho_{ПГС} = \rho_{ГС} = 7800 \text{ кг/м}^3$; $\sigma_{Ппрд} = 5 \cdot 10^8 \text{ Па}$; $z_{ПГС} = 15$; $\rho_B = 1000 \text{ кг/м}^3$; $g = 9,8 \text{ м/с}^2$; $K_{ПСЕ} = 0,70$;

$r_{\text{ПДП}} = r_{\text{ПДОП}} = 50\%$; $\rho_{\text{ПП}} = \rho_{\text{ОП}} = 750 \text{ кг/м}^3$; $d_{135\text{ВО}} = d_{246\text{ВО}} = 20 \text{ см}$; $S_{135\text{С}} = S_{246\text{С}} = 1,0 \text{ см}$; $B_{\text{РПСЕ}} = 3,0 \text{ м}$; $h_{\text{min,ЛХ}} = 1,4 \text{ м}$; $L_{135\text{КЛ}} = 6,0 \text{ м}$; $Z_{\text{Д}} = 0,3$; $k_{\text{РЛХ}} = 2,0$), выполним планирование

Таблица 2. Объём поставки лесоматериалов потребителям при периоде оборачиваемости буксирного судна в два дня, тыс. м³

Table 2. The volume of timber delivery to consumers with a two-day turnover period of a towboat, thousand m³

Наименование		Количество задействованных буксирных судов, шт.					
		1	2	3	4	5	6
Оптимальный период первоначального плотового сплава лесоматериалов в рамках одной навигации, дней	200	17,13	34,25	51,38	68,51	85,63	102,76
	190	16,27	32,54	48,81	65,08	81,35	97,62
	180	15,41	30,83	46,24	61,65	77,07	92,48
	170	14,56	29,11	43,67	58,23	72,79	87,34
	160	13,70	27,40	41,10	54,80	68,51	82,21
	150	12,84	25,69	38,53	51,38	64,22	77,07
	140	11,99	23,98	35,97	47,95	59,94	71,93
	130	11,13	22,26	33,40	44,53	55,66	66,79
	120	10,28	20,55	30,84	41,10	51,38	61,65
	110	9,41	18,84	28,26	37,68	47,10	56,52
	100	8,56	17,13	25,69	34,25	42,82	51,38

Таблица 3. Объём поставки лесоматериалов потребителям при периоде оборачиваемости буксирного судна в три дня, тыс. м³

Table 3. Volume of timber delivery to consumers with a towboat turnover period of three days, thousand m³

Наименование		Количество задействованных буксирных судов, шт.					
		1	2	3	4	5	6
Оптимальный период первоначального плотового сплава лесоматериалов в рамках одной навигации, дней	200	11,30	22,61	33,91	45,21	56,52	67,82
	190	10,79	21,58	32,54	43,16	53,95	64,74
	180	10,28	20,55	30,83	41,10	51,38	61,65
	170	9,59	19,18	29,11	38,36	47,95	57,54
	160	9,13	18,15	27,40	36,31	45,38	54,46
	150	8,56	17,13	25,69	34,25	42,82	51,38
	140	7,99	15,76	23,98	31,51	39,39	47,27
	130	7,36	14,73	22,26	29,46	36,82	44,19
	120	6,85	13,70	20,55	27,40	34,25	41,10
	110	6,17	12,33	18,84	24,66	30,83	36,99
	100	5,65	11,30	17,13	22,61	28,26	33,91

поставки лесоматериалов потребителям в усовершенствованной плоской сплочной единице по транспортно-технологической схеме плот (линейка) — плот для одного транспортного пути. Устанавливаем, что годовой оборот древесины на береговом складе равен 20,0 тыс. м³, где оптимальный период первоначального плотового сплава лесоматериалов в рамках одной навигации оставляет 120 дней, где на основании таблицы 2 необходимо задействовать на буксировку плотов (линеек) два буксирных судна. Таким образом, при заданных условиях за 120 дней навигации для буксировки 20,0 тыс. м³ лесоматериалов на первоначальном плотовом сплаве древесины следует применять два буксирных судна, имеющих срок оборачиваемости два дня. В совокупности два буксирных судна обязаны отбуксировать 117 плотов (линеек) с берегового склада на переформировочный рейд, где объём древесины в каждом плоту составляет 171,26 м³. При этом на магистральном плотовом сплаве древесины, который может быть реализован на протяжении всей навигации, следует отбуксировать шесть плотов. Для буксировки шести плотов с формировочного рейда на рейды приплава, которые имеют средний объём древесины $V_{ДП} = 3425,27 \text{ м}^3$, должны быть задействованы один буксировщик и, в зависимости от транспортных условий, вспомогательные буксирные суда или специальные средства управления плотами.

В свою очередь, для периода оборачиваемости буксирного судна в три дня на первоначальном плотовом сплаве древесины, с учётом первоначальных установленных условий ($b_{\min.LX} = 10,0 \text{ м}$; $b_{\min.LXM} = 50,0 \text{ м}$; $B_{BC} = 10,0 \text{ м}$; $r_{\min.LX} = 90,0 \text{ м}$; $r_{\min.LXM} = 500,0 \text{ м}$; $\rho_{ПГС} = \rho_{ГС} = 7800 \text{ кг/м}^3$; $\sigma_{Ппрд} = 5 \cdot 10^8 \text{ Па}$; $z_{ПГС} = 15$; $\rho_B = 1000 \text{ кг/м}^3$; $g = 9,8 \text{ м/с}^2$; $K_{ПСЕ} = 0,70$; $r_{ПДП} = r_{ПДОП} = 50 \%$; $\rho_{ПШ} = \rho_{ОП} = 750 \text{ кг/м}^3$; $d_{135BO} = d_{246BO} = 20 \text{ см}$; $S_{135C} = S_{246C} = 1,0 \text{ см}$; $B_{ППСЕ} = 3,0 \text{ м}$; $h_{\min.LX} = 1,4 \text{ м}$; $L_{135КЛ} = 6,0 \text{ м}$; $Z_D = 0,3$; $k_{ПЛХ} = 2,0$), выполним планирование поставки лесоматериалов потребителям в усовершенствованной плоской сплочной единице по транспортно-технологической схеме плот (линейка) — плот для одного транспортного пути. Для дальнейшего планирования принимаем: годовой оборот древесины на береговом складе равен 30,0 тыс. м³, где оптимальный период первоначального плотового сплава лесоматериалов в рамках одной навигации оставляет 180 дней. Согласно таблице 3, необходимо задействовать на буксировку плотов (линеек) три буксирных судна. При заданных условиях за 180 дней навигации для буксировки 30,0 тыс. м³ лесоматериалов на первоначальном плотовом сплаве древесины следует применять три буксирных судна, имеющих срок оборачиваемости три дня. Отсюда следует, что три буксирных судна обязаны отбуксировать 176 плотов (линеек) с объёмом древесины $V_{ДП} = 171,26 \text{ м}^3$ с берегового склада на переформировочный рейд. Причём на магистральном плотовом сплаве древесины, который может быть реализован на протяжении всей навигации, следует отбуксировать девять плотов. Для буксировки девяти плотов с формировочного рейда на рейды приплава, которые имеют средний объём древесины $V_{ДП} = 3425,27 \text{ м}^3$, должны быть задействованы один буксировщик и, в зависимости от транспортных условий, вспомогательные буксирные суда или специальные средства управления плотами.

4. Обсуждение и заключение

Организация поставки лесоматериалов потребителям по транспортно-технологической схеме, функционирующей по принципу плота (линейка) — плот, требует не только разработки новых конструкций линеек и плотов, изготавливаемых на базе плоской сплочной единицы, но и планирование поставки лесоматериалов для данной транспортно-технологической схемы. При планировании поставки лесоматериалов особое внимание необходимо уделять обоснованию габаритных размеров усовершенствованной плоской сплочной единицы, а также расчёту габаритов плотов, формирующихся из данной сплочной единицы.

В концепцию обоснования габаритов плоской сплочной единицы и плотов различного назначения заложен расчёт их фактической длины, ширины, высоты, первоначальной осадки, максимального объёма содержания древесины, коэффициента полндревесности и количественного показателя транспортных единиц, находящихся в одном плоту. Весь процесс обоснования габаритных размеров плоской сплочной единицы и плотов на её основе строится с учётом установленных габаритов сплавного хода, первоначальной плотности сплаваемой древесины, диаметра круглых лесоматериалов, укладываемых в ряды сплочной единицы, и других показателей.

Выполнено предметное планирование поставки лесоматериалов потребителям в усовершенствованной плоской сплочной единице по транспортно-технологической схеме, функционирующей по принципу плота (линейка) — плот. При планировании поставки лесоматериалов потребителям учитывались не только габариты сплавного хода, геометрические параметры и физические свойства сплаваемых лесоматериалов, но и максимальное использование оптимального периода первоначального плотового сплава лесоматериалов в рамках одной навигации и рациональная расстановка буксирных судов, задействованных на буксировке плотов (линеек).

При объёме плота (линейки) $171,26 \text{ м}^3$, когда годовой объём оборота древесины на береговом складе составляет $9,0 \text{ тыс. м}^3$, а оптимальный период первоначального плотового сплава лесоматериалов равен 160 дням, применяется одно буксирное судно, имеющее срок оборачиваемости три дня. Если годовой объём оборота древесины на береговом складе равен $20,0 \text{ тыс. м}^3$, а оптимальный период первоначального плотового сплава лесоматериалов — 120 дням, то используются два буксирных судна, имеющие срок оборачиваемости два дня, при условии, что объём плота (линейки) составляет $171,26 \text{ м}^3$. В том случае, когда годовой объём оборота древесины на береговом складе равен $30,0 \text{ тыс. м}^3$, а оптимальный период первоначального плотового сплава лесоматериалов составляет 180 дней, следует привлекать три буксирных судна со сроком оборачиваемости три дня, если объём плота (линейки) составляет $171,26 \text{ м}^3$. На магистральном плотовом сплаве лесоматериалов при среднем объёме древесины в плоту $3425,27 \text{ м}^3$ необходимо

использовать один буксировщик и, в зависимости от транспортных условий, вспомогательные буксирные суда или специальные средства управления плотами.

Установлено, что для увеличения объёма сплава лесоматериалов на первоначальном плотовом сплаве древесины, а следовательно, и на магистральном плотовом сплаве следует эффективно использовать оптимальный период первоначального плотового сплава лесоматериалов с привлечением достаточного количества буксирных судов с минимальным периодом их оборачиваемости.

Список литературы

1. *Сухих В. И.* Лесоустройство: Учебник. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2014. 400 с.
2. Лесоустройство / О. А. Неволин [и др.]. Архангельск: Правда Севера, 2003. 583 с.
3. *Grossberg S. P.* Forest management. Nova Science Publishers, 2009. 329 p.
4. *StAAF K. A. G., Wiksten N. A.* Tree harvesting techniques. Springer Netherlands, 1984. 359 p.
5. Continuous cover forestry: assessment, analysis, scenarios / S. Magnussen [et al.]. Springer Netherlands, 2002. 348 p.
6. The sustainable forestry handbook / S. Higman, J. Mayers, S. Bass [et al.]. VIVA BOOKS PVT.LTD, 2004. 350 p.
7. *Васильев В. В.* Анализ распространённых транспортно-технологических схем водного транспорта лесоматериалов // Научный журнал молодых учёных ФГБОУ ВО «Орловский ГАУ». 2019. № 4 (17). С. 48—52.
8. Справочник по водному транспорту леса / Под общ. ред. В. А. Щербакова. М.: Лесн. пром-сть, 1986. 384 с.
9. *Патякин В. И., Дмитриев Ю. Я., Зайцев А. А.* Водный транспорт леса: Учебник для вузов. М.: Лесн. пром-сть, 1985. 336 с.
10. *Лебедев Н. И., Поминова Г. И.* Водный транспорт леса. Изд. 2-е, перераб. М.: Лесн. пром-сть, 1974. 304 с.
11. Водный транспорт леса: Справочник / Е. Н. Гаврилова [и др.]. М.: Гослесбумиздат, 1963. 560 с.
12. *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.
13. Brevet 2882723 FR, Int. Cl.8 B63B 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 03.03.2005; la date de parution 21.10.2005, bulletin 06/36. 14 p.
14. *Васильев В. В., Афоничев Д. Н.* Усовершенствованные системы плотового сплава лесоматериалов. Saarbrucken (Германия): Изд-во LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 284 с.
15. Patent 5119529 USA, Int. Cl.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.
16. *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.

17. *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.
18. *Васильев В. В.* Усовершенствованная транспортно-технологическая схема поставки древесины водным транспортом в плоских сплочных единицах по принципу плот (линейка) — плот // *Арктика: инновационные технологии, кадры, туризм: Материалы междунар. научно-практич. онлайн-конф.; г. Воронеж, 17—19 нояб. 2020 г.* Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», 2020. С. 341—346.
19. *Васильев В. В.* Планирование сплава древесины в плоских сплочных единицах // *Инновационные технологии и технические средства для АПК: Материалы междунар. научно-практич. конф. молодых учёных и специалистов; Воронеж, 11—12 нояб. 2021 г.* Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский ГАУ», 2021. С. 214—216.
20. *Васильев В. В.* Организация плотового сплава древесины на базе плоских сплочных единиц // *Современные ресурсосберегающие технологии и технические средства лесного комплекса: Материалы Всерос. научно-практич. конф., Воронеж, 25—26 нояб. 2021 г.* Воронеж: ФГБОУ ВО «ВГЛТУ», 2021. С. 7—10. URL: <https://vgltu.ru/nauka/konferencii-/2021/srsts/>. Текст: электронный.
21. Патент № 210485 Р. Ф., МПК В63В 35/62. Плоская сплочная 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). № 2021125409; заявл. 19.10.2020; опубл. 18.04.2022, Бюл. № 11. 5 с.
22. *Васильев В. В., Афоничев Д. Н.* Требования к диаметрам круглых лесоматериалов для обеспечения жёсткости плоской сплочной единицы // *Resources and Technology*. 2024. Т. 21, № 3. С. 39—56. DOI: 10.15393/j2.art.2024.7483.
23. *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.
24. Патент № 2811178 Р.Ф., МПК В63В 35/62. Плот / 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). № 2023121796; заявл. 21.08.2023; опубл. 11.01.2024, Бюл. № 2. 9 с.
25. *Васильев В. В.* Модернизированный плот на базе современной плоской сплочной единицы // *Актуальные проблемы энергетики АПК в современной реальности: Материалы междунар. научно-практич. конф., посвящённой основателю факультета энергетики и электрификации Валентину Васильевичу Фокину; г. Ижевск, 15 мая 2024 г.* Ижевск: ФГБОУ ВО «Удмуртский ГАУ», 2024. С. 90—95. URL: <https://udsau.ru/news/-novosti/17699-aktualnye-problemy-energetiki-apk-v-sovremennoj-realnosti.html>. Текст: электронный.
26. *Лебедев А. Н.* Водный транспорт леса. Л.: Гослестехиздат, 1939. 464 с.
27. *Belyayev N. M.* Problems in strength of materials. Elsevier, 1966. 539 p.
28. *Stephens R. C.* Strength of materials. Theory and examples. Edward Arnold, 1970. 314 p.
29. *Patnaik S., Hopkins D.* Strength of aterials: a new unified theory for the 21st century. Butterworth; Heinemann (Elsevier), 2004. 771 p.

30. Boresi A. P., Schmidt R. J., Sidebottom O. M. *Advanced mechanics of materials*. Wiley, 1993. 827 p.
31. Broutman L. *Interfaces in composites*. ASTM, 1968. 198 p.
32. Skalmierski B. *Mechanics and strength of materials*. Academic Press, Elsevier, 1979. 435 p.
33. Komarovskiy A. A., Astakhov V. P. *Physics of strength and fracture control: adaptation of engineering materials and structures*. CRC Press, 2002. 629 p.
34. Донской И. П. *Водный транспорт леса*. М.: Гослесбумиздат, 1955. 332 с.
35. Васильев В. В., Афоничев Д. Н. Обоснование показателя гибкости плота из сплоточных единиц // *Известия вузов. Лесной журнал*. 2022. № 4. С. 146—155. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-4-146-155.
36. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022660776. Программа для планирования сплава древесины в плотках на базе плоских сплоточных единиц / В. В. Васильев, Д. Н. Афоничев, В. А. Морковин, Е. В. Поздняков; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова» (RU). Заявл. 08.06.2022, зарегистрировано 08.06.2022.

References

1. Sukhikh V. I. *Forest inventory: Textbook*. Yoshkar-Ola, PSTU, 2014. 400 p. (In Russ.)
2. Nevolin O. A. [et al.]. *Forest inventory*. Arkhangelsk, Pravda Severa, 2003. 583 p. (In Russ.)
3. Grossberg S. P. *Forest management*. Nova Science Publishers, 2009. 329 p.
4. Staaf K. A. G., Wiksten N. A. *Tree harvesting techniques*. Springer Netherlands, 1984. 359 p.
5. Magnussen S. [et al.]. *Continuous cover forestry: assessment, analysis, scenarios*. Springer Netherlands, 2002. 348 p.
6. Higman S., Mayers J., Bass S., Judd N. *The sustainable forestry handbook*. VIVA BOOKS PVT.LTD, 2004. 350 p.
7. Vasiliev V. V. Analysis of common transport and technological schemes of water transport of timber. *Scientific Journal of young Scientists of the Oryol State Agrarian University*, 2019, no. 4 (17), pp. 48—52. (In Russ.)
8. *Handbook on water transport of forests*. Under the General editorship of V. A. Shcherbakov. Moscow, Forest industry, 1986. 384 p. (In Russ.)
9. Patyakin V. I., Dmitriev Yu. Ya., Zaitsev A. A. *Water transport of timber: textbook for universities*. Moscow, Lesnaya Promyshlennost, 1985. 336 p. (In Russ.)
10. Lebedev N. I., Pominova G. I. *Water transport of the forest*. Ed. 2-e pererabot. Moscow, Forest industry, 1974. 304 p. (In Russ.)
11. Gavrilova E. N. [et al.]. *Water transport of forests: handbook*. Moscow, Goslesbumizdat, 1963. 560 p. (In Russ.)
12. 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.
13. Brevet 2882723 FR, Int. Cl.8 B63B 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 03.03.2005; la date de parution 21.10.2005, bulletin 06/36. 14 p.

14. Vasiliev V. V., Afonichev D. N. *Improved systems of raft timber alloy*. Saarbrucken (Germany), Publishing house LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 284 p. (In Russ.)
15. Patent 5119529 USA, Int. Cl.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.
16. 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.)
17. 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.)
18. Vasiliev V. V. Improved transport and technological scheme for the supply of wood by water transport in flat-flow units on the principle of raft (ruler) — 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. 341—346. (In Russ.)
19. Vasiliev V. V. Timber rafting planning in flat rafting units. *Innovative technologies and technical means for the agro-industrial complex: Materials of the international. scientific and practical. Conference of young scientists and specialists; Voronezh, November 11—12, 2021*. Voronezh, FGBOU VO «Voronezh SAU», 2021, pp. 214—216. (In Russ.)
20. Vasiliev V. V. Organization of timber rafting based on flat rafting units. *Modern resource-saving technologies and technical means of the forest complex: Materials All-Russian Scientific and Practical Conference, Voronezh, November 25—26, 2021*. Voronezh, FGBOU VO «VGLTU», 2021, pp. 7—10. Available at: <https://vgltu.ru/nauka/konferencii/2021/srtrtsl/>. Text. Image: electronic. (In Russ.)
21. Vasiliev V. V., Afonichev D. N., Morkovin V. A., Abramov V. V., Pozdnyakov E. V. Patent 210485 R. F., IPC B63B 35/62. 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. 2021125409; application 19.10.2020; publ. 18.04.2022, Byul. no. 11. 5 p. (In Russ.)
22. Vasiliev V. V., Afonichev D. N. Requirements for the diameters of round timber to ensure the rigidity of a flat rafting unit. *Resources and Technology*, 2024, vol. 21, no. 3, pp. 39—56. doi: 10.15393/j2.art.2024.7483. (In Russ.)
23. 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.)
24. Vasiliev V. V., Afonichev D. N., Morkovin V. A., Abramov V. V., Pozdnyakov E. V. Patent 2811178 R. F., IPC B63B 35/62. Raft. Applicant and patent holder Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozov» (RU), no. 202312179; application 21.08.2023; publ. 11.01.2024, Byul. no. 2. 9 p. (In Russ.)
25. Vasiliev V. V. Modernized raft based on a modern flat rafting unit. *Actual problems of agro-industrial complex energy in modern reality: Materials International Scientific and Practical conference dedicated to the founder of the Faculty of Energy and Electrification Valentin Vasilyevich Fokin; Izhevsk, May 15, 2024*. Izhevsk, Udmurt State University, 2024, pp. 90—95. Available at: <https://udsau.ru/news/novosti/17699-aktualnye-problemy-energetiki-apk-v-sovremennoj-realnosti.html>. Text. Image: electronic. (In Russ.)
26. Lebedev A. N. *Water transport of the forest*. Leningrad, Goslestehizdat, 1939. 464 p. (In Russ.)
27. Belyayev N. M. *Problems in strength of materials*. Elsevier, 1966. 539 p.

28. Stephens R. C. *Strength of materials. Theory and examples*. Edward Arnold, 1970. 314 p.
29. Patnaik S., Hopkins D. *Strength of materials: a new unified theory for the 21st century*. Butterworth; Heinemann (Elsevier), 2004. 771 p.
30. Boresi A. P., Schmidt R. J., Sidebottom O. M. *Advanced mechanics of materials*. Wiley, 1993. 827 p.
31. Broutman L. *Interfaces in composites*. ASTM, 1968. 198 p.
32. Skalmierski B. *Mechanics and strength of materials*. Academic Press, Elsevier, 1979. 435 p.
33. Komarovskiy A. A., Astakhov V. P. *Physics of strength and fracture control: adaptation of engineering materials and structures*. CRC Press, 2002. 629 p.
34. Donskoy I. P. *Water transport of the forest*. Moscow, Goslesbumizdat, 1955. 332 p. (In Russ.)
35. 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.)
36. Vasiliev V. V., Afonichev D. N., Morkovin V. A., Pozdnyakov E. V. Certificate of state registration of the computer program 2022660776. The program for planning wood alloy in rafts based on flat raft units; applicant and copyright holder of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozov» (RU). Claimed on 08.06.2022, registered on 08.06.2022. (In Russ.).