

АГРОИНЖЕНЕРИЯ

4.3.4. Технологии, машины и оборудование
для лесного хозяйства и переработки древесины

Научная статья
УДК 630.8
doi: 10.28983/asj.y2024i8pp122-129

**Моделирование технологии формирования комбинированных пучков
с лесосечными отходами для лесосплава**

Сергей Петрович Карпачев¹, Сергей Валентинович Посыпанов²

¹Мытищинский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Мытищи, Россия

²Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова, г. Архангельск, Россия
e-mail: karpachevs@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена проблема доставки всей заготовленной древесины, включая лесосечные отходы, с лесосеки плотным лесосплавом. На основе запатентованных автором устройств представлена конструкция комбинированного пучка, состоящего из деловых сортиментов и пакетов из уплотненных лесосечных отходов. Предложена технология формирования комбинированного пучка на складе, примыкающем к лесосеке, в съемной формирующей площадке с последующей транспортировкой площадки с пучком автосортиментовозом на береговой склад и укладкой пучка транспортным агрегатом в плот на затопляемом плотбище. По технологии автосортиментовоз работает с системой «мультилифт». Для широкого диапазона варьирования природно-производственных факторов разработана математическая модель технологического процесса. Проведены имитационные эксперименты на математических моделях технологического процесса, в котором варьирующими факторами выступали расстояние до берегового склада, число съемных площадок и количество автосортиментовозов. При этом в качестве постоянных факторов принимали объем деловой древесины на лесосеке и объем лесосечных отходов, а также число погрузчиков и транспортных агрегатов. В результате имитационных экспериментов выявлено, что производительность системы машин при уменьшении расстояния транспортирования от 100 км до 25 км возрастает до 3 раз. Увеличение количества съемных площадок приводит к росту производительности до 10 %. При увеличении количества автосортиментовозов производительность возрастает в 1,52 раза.

Ключевые слова: биотопливо; лесосечные отходы; комбинированный пучок; математическая модель; имитационное моделирование

Для цитирования: Карпачев С. П., Посыпанов С. В. Моделирование технологии формирования комбинированных пучков с лесосечными отходами для лесосплава // Аграрный научный журнал. 2024. № 8. С. 122–129. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2024i8pp122-129>.

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

**Modeling the technology for forming combined bundles
with logging waste for timber rafting**

Sergey P. Karpachev¹, Sergey V. Posypanov²

¹Mytishi Branch of Bauman Moscow State Technical University, Mytishi, Russia

²Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia
e-mail: karpachevs@mail.ru

Abstract. The problem of delivering all harvested wood, including logging waste, from the cutting site by timber rafts is considered. Based on devices patented by the author, a design of a combined bundle consisting of commercial assortments and packages of compacted logging waste has been presented. A technology has been proposed for the formation of a combined bundle in a deck adjacent to the cutting area, in a removable forming platform, followed by transportation of the platform with the bundle by a log truck to a coastal deck and laying the bundle by a transport unit into a raft at a log storage and bundling area. According to this technology, the log



truck operates with a multilift system. A mathematical model of the production process has been developed for a wide range of variations in natural production factors. Simulation experiments were carried out on mathematical models of the production process, in which the varying factors were the distance to the coastal deck, the number of removable forming platforms and the number of log trucks. At the same time, the constant factors were the volume of commercial timber at the cutting site and the volume of logging waste, as well as the number of loaders and transport units. As a result of simulation experiments, it was revealed that the productivity of the machine system increases up to 3 times when the transportation distance decreases from 100 km to 25 km. Increasing the number of removable platforms leads to an increase in productivity of up to 10 %. With the increase in log trucks, productivity increases by 1.52 times.

Keywords: biofuel; logging waste; combined bundle; mathematical model; simulation modeling

For citation: Karpachev S. P., Posypanov S. P. Modeling the technology for forming combined bundles with logging waste for timber rafting. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal*. 2024;(8):122–129. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2024i8pp122-129>.

Введение. Для лесных и сельскохозяйственных предприятий альтернативой традиционным ископаемым видам энергоносителей все чаще становятся возобновляемые источники энергии, такие как тонкомерная древесина, быстрорастущая ива, древесина естественного отпада и лесосечные отходы [4, 12, 16–19]. Вся эта «энергетическая» древесина может быть переработана на топливную щепу и использоваться как энергоноситель, например, для котельных.

Одной из проблем использования «энергетической» древесины из леса является доставка ее потребителям. В настоящей статье рассматриваются некоторые вопросы технологии доставки древесины лесосечных отходов лесосплавом. На данный момент основным видом лесосплава является плотовой лесосплав [2, 3, 5]. Плоты формируют на береговых складах из пучков. Пучок имеет цилиндрическую форму и состоит из деловых сортиментов, соединенных между собой обвязками. Лесосечные отходы не относятся к деловой древесине и поэтому не вывозятся на береговые склады. Объемы лесосечных отходов, которые остаются на лесосеке, составляют 20–25 % от заготовленной древесины [7, 20].

Для организации доставки потребителям лесосечных отходов с помощью плотового сплава необходимо решить вопросы доставки такой древесины от лесосеки до берегового склада и формирования из нее сплоченных единиц, пригодных для плотового лесосплава.

Проблема транспортировки лесосечных отходов заключается в том, что эта древесина имеет низкий коэффициент полндревесности (менее 0,12). Вывозка такой древесины с лесосеки на береговой склад технически затруднительна и экономически невыгодна.

Лесосечные отходы состоят из вершинок, сучьев и веток с небольшим запасом плавучести, что препятствует формированию из этой древесины транспортных единиц для лесосплава. На рисунке 1 показаны зависимости допустимых сроков сплава бревен диаметром 20 см и 5 см. Эти зависимости получены авторами статьи на основе уравнения А. Ю. Мануковского [10]. Если принять средний диаметр лесосечных отходов равным 5 см, то из рисунка 1 следует, что при начальной плотности 800–850 кг/м³ древесина достигнет критической плотности уже через 15–20 дней. Реально, с учетом колебания размеров лесосечных отходов, срок достижения критической плотности будет значительно меньше. Отметим, что деловые сосновые бревна диаметром 20 см при начальной плотности 800–850 кг/м³ имеют запас плавучести, достаточный на весь срок сплава.

Цель исследования – разработать конструкцию комбинированного лесосплавного пучка из деловых сортиментов и лесосечных отходов и выполнить исследования эффективности их формирования и доставки на плотбище берегового склада.

Материалы и методы. Для решения проблемы доставки лесосечных отходов от лесосеки до берегового склада и далее плотовым лесосплавом предлагается формировать комбинированные пучки на складе, примыкающем к лесосеке. Способ формирования подобных комбинированных пучков защищен автором статьи патентами [9, 14, 15]. Конструкция комбинированного пучка (далее – пучок) представлена на рисунке 2. Пучок состоит из круглых деловых сортиментов, в срединной части которого размещают пакет из лесосечных отходов (далее – пакет).

Для размещения пакета в пучке лесосечные отходы должны быть предварительно уплотнены. Современные технологии пакетирования позволяют уменьшить геометрический объем лесосечных отходов на 80 % [8, 11].



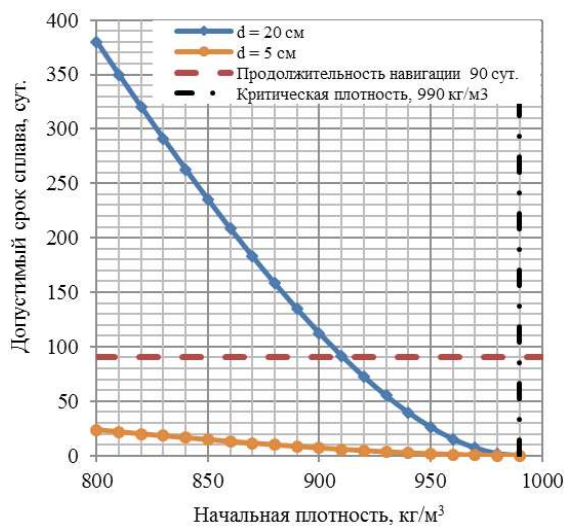


Рисунок 1 – Допустимые сроки сплава древесины диаметром 5 и 20 см

Figure 1 – Acceptable periods for rafting wood with a diameter of 5 and 20 cm

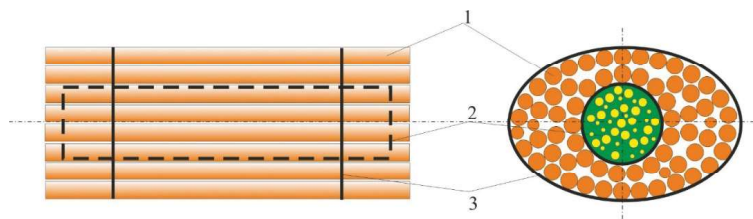


Рисунок 2 – Комбинированный лесосплавной пучок с пакетом из лесосечных отходов:

1 – деловые сортименты; 2 – пакет из лесосечных отходов; 3 – пучковые обвязки

Figure 2 – Combined timber rafting bundle with a package of logging waste:
1 – commercial assortments; 2 – a package of logging waste; 3 – bundle bindings

В исследовании предлагается формировать пучки на складе, примыкающем к лесосеке (далее – верхний склад) в съемной формирующей площадке (далее – СФП) [1], которая перевозится автосортиментовозами (далее – АСВ), оснащенными системой «мультилифт». Система «мультилифт» – это автомобильное крюковое захватное устройство, которое позволяет загружать, перевозить и сбрасывать СФП.

Выход хвойной деловой древесины на лесосеке принят 160–170 м³/га [8]. Объем лесосечных отходов, пригодных для переработки на щепу, определен в размере 20 % от деловой древесины. Тогда объем лесосечных отходов составит 3234 м³/га.

Площадь поперечного сечения СФП, м², в размерах коников рассчитывают по формуле

$$S_{\text{площадки}} = 2,45 \cdot 2,45 = 6, \quad (1)$$

При равной длине сортиментов и пакетов площадь поперечного сечения, занимаемая пачкой сортиментов в СФП без учета площади пакета, рассчитывают по формуле

$$S_{\text{пач}} = \frac{6 \cdot k_{\text{пак}} \cdot k_{\text{пач}}}{k_{\text{пак}} + 0,2 \cdot k_{\text{пач}}}, \quad (2)$$

где $k_{\text{пак}}$ – коэффициент полндревесности древесины пакета; $k_{\text{пач}}$ – коэффициент полндревесности пачки сортиментов.

Объем пачки сортиментов и древесины пакетов в СФП определяют из условия, что все лесосечные отходы будут вывезены с лесосеки. Из формулы (2) следует:

$$V_{\text{пач}} \cong 16,8 \text{ м}^3, V_{\text{пак}} \cong 3,4 \text{ м}^3.$$

Общий объем древесины в пучке составит:

$$V_{\text{пуч}} \cong 16,8 + 3,4 = 20,2 \text{ м}^3.$$



Для данного соотношения объемов сортиментов и древесины пакетов установим плотность пучка на срок сплава 90 сут. Примем конечную плотность древесины пакетов 1200 кг/м^3 . Плотность древесины сортиментов определим из рисунка 1 для начальной плотности, равной 800 кг/м^3 . Через 90 сут. сплава эта плотность будет равна 900 кг/м^3 . Тогда плотность пучка в целом через 90 сут. сплава составит 950 кг/м^3 , что меньше критической плотности, равной 990 кг/м^3 . Пучок останется на плаву. Предложенное соотношение сортиментов и древесины пакетов в пучке позволяет вывезти всю заготовленную древесину, включая лесосечные отходы.

Пучок из сортиментов и пакетов формируют на верхнем складе в СФП в четыре этапа: I – накопление сортиментов до половинного объема пучка; II – размещение пакетов в пучке; III – дозагрузка пучка сортиментами до полного объема; IV – наложение и утяжка обвязок пучка.

Рассмотрим технологический процесс, начиная с формирования пучка на верхнем складе до укладки готового пучка в плот на плотбище (рисунок 3). В начале работы все АСВ и порожние СФП находятся на верхнем складе. С началом работы погрузчик 3 загружает порожние СФП 4. Как только пучок сформирован, свободный АСВ 5, оснащенный системой «мультилифт», берет на себя загруженную СФП и доставляет ее на береговой склад. На береговом складе у СФП открывают боковые коники, пучок принимает транспортный агрегат (далее – ТА). ТА 6 доставляет пучок на затопляемое плотбище, где укладывает его в плот 7. После разгрузки АСВ 8 с порожней СФП возвращается на верхний склад.

В системе машин (рисунок 3) приняты один погрузчик и один ТА. В качестве ТА рассматривается ЛР-166. Этот агрегат способен захватывать и транспортировать пучки объемом $20\text{--}25 \text{ м}^3$ [13]. АСВ может быть несколько m . При недостаточном количестве АСВ возможны простои погрузчика и ТА. При избыточном количестве АСВ возможно образование очередей СФП с пучками к погрузчику и ТА. Для сокращения времени простоя машин при работе АСВ с системой «мультилифт» количество СФП n должно быть больше количества АСВ.

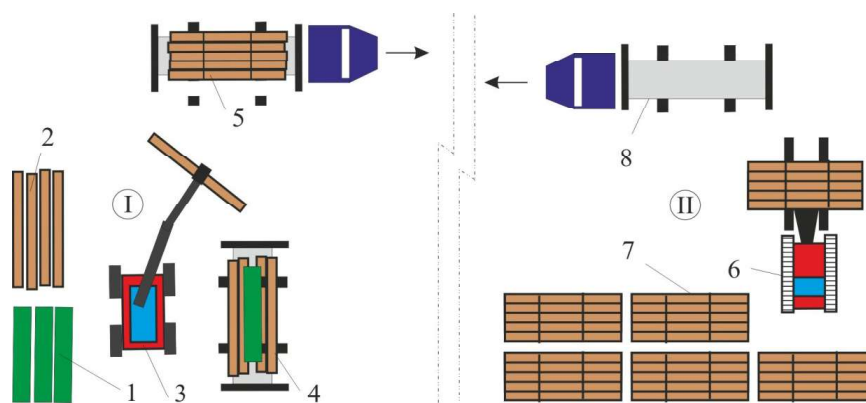


Рисунок 3 – Общая схема технологического процесса

Figure 3 – General layout of the production process

На рисунке 3 цифрами обозначено: I – верхний склад; II – береговой склад; 1 – штабель пакетов из лесосечных отходов; 2 – штабель сортиментов; 3 – погрузчик с манипулятором; 4 – формируемый в СФП пучок на верхнем складе; 5 – АСВ на транспортировке СФП с пучком на береговой склад; 6 – АСВ на транспортировке порожней СФП на верхний склад; 7 – ТА с пучком; 8 – плот на затопляемом плотбище.

Исследуем эффективность работы системы машин погрузчик – АСВ – ТА (рисунок 3). За показатель эффективности примем производительность в час. Исследования проводятся методами имитационного моделирования на математических моделях [6]. Технологический процесс работы системы машин сформулирован в терминах системы массового обслуживания и схематично представлен на рисунке 4.

В начале моделирования из источника в систему поступает n СФП. Блок Split генерирует число сортиментов в пучке, а блок Assemble имитирует накопление сортиментов в СФП. Сортименты и пакеты представляют собой заявки на обслуживание первого уровня. Работа погрузчика реализована в модели двумя одноканальными приборами K11 и K12. Канал K11 имитирует время задержки на захват и укладку сортиментов в СФП. Канал K12 имитирует задержку времени на укладку пакета и наложения обвязок на пучок. Время захвата и укладки сортиментов в СФП моделировалось как случайное число, распределенное по экспоненциальному закону в зависимости от объема сортиментов в пучке. При этом объем



сортиментов в пачке определялся также как случайное число, распределенное по нормальному закону со средним значением, равным $16,8 \text{ м}^3$ и стандартным отклонением, равным $0,3 \text{ м}^3$. Сформированные пучки в СФП – это заявки второго уровня. Эти заявки становятся в очередь Q1 к АСВ. В общем случае в системе могут циркулировать m АСВ. Их работа по перевозке СФП с пучками и обратно реализуется в модели многоканальным прибором с m каналами $K21, K22, \dots, K2m$. Канал $K2$ имитирует время сброса грузовой АСВ и захват порожней СФП на береговом складе. Если на береговом складе порожние СФП отсутствуют, а ТА занят на транспортировании пучка на плотбище, то АСВ с грузовой СФП становится в очередь Q2. Канал $K3$ имитирует работу ТА. Блок Split делит заявку второго уровня на две: пучок и порожнюю СФП. Порожнюю СФП транспортирует АСВ, а пучок – ТА.

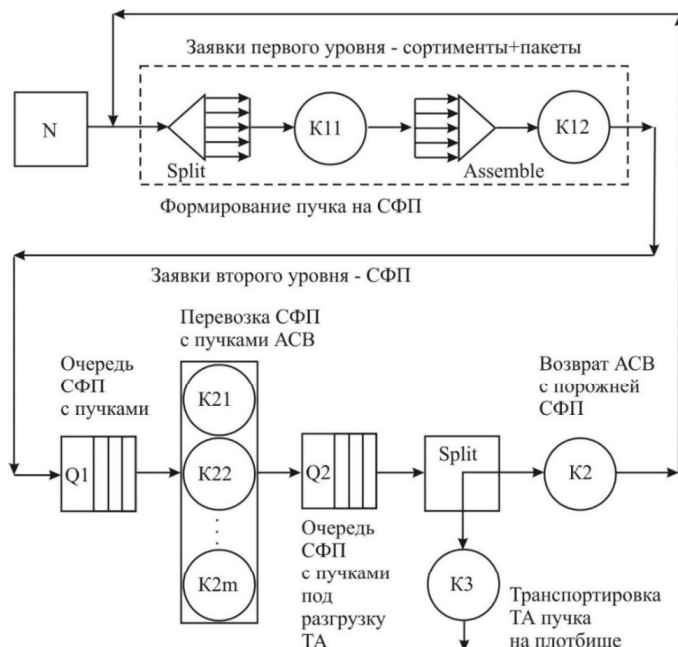


Рисунок 4 – Схема технологического процесса работы системы машин

Figure 4 – Layout of the production process of the machine system

В модели время движения АСВ определялось как случайное число, распределенное по экспоненциальному закону. При этом среднее время движения АСВ с грузовой T_{gp} и с порожней СФП T_{np} определяли по формулам

$$T_{gp} = \frac{L}{v_{gp}}; T_{np} = \frac{L}{v_{np}}, \quad (3)$$

где L – расстояние от верхнего склада до берегового, м; v_{gp} – скорость АСВ с грузовой СФП, м/с; v_{np} – скорость АСВ с порожней СФП, м/с.

Время цикла работы ТА моделировали как случайное число, распределенное по экспоненциальному закону. При этом среднее время одного цикла работы ТА ($T_{ТА}$) рассчитывали по формуле

$$T_{ТА} = t_1 + \frac{L_{пл}}{v_{gp}} + t_2 + \frac{L_{пл}}{v_{xx}}, \quad (4)$$

где t_1 – время на захват пучка из СФП, с; $L_{пл}$ – расстояние до плотбища, м; v_{gp} – скорость движения ТА с пучком, м/с; t_2 – время на укладку пучка в плот, с; v_{xx} – скорость порожнего ТА, м/с.

В работе расстояние транспортирования ТА до плотбища принято равным 800 м. Часовую производительность системы машин в модели, $\text{м}^3/\text{ч}$, определяли как объем пучков (сортименты + пакет), уложенных на плотбище в плот за 1 ч:

$$P_{сист} = \frac{3600 \cdot \sum_{i=1}^k V_{пучка_i}}{T_{мод}}, \quad (5)$$

где k – количество всех пучков, уложенных в плот за время моделирования; $V_{пучка_i}$ – сумма объемов всех k пучков, уложенных в плот, м^3 ; $T_{мод}$ – время моделирования в каждом опыте, ч.



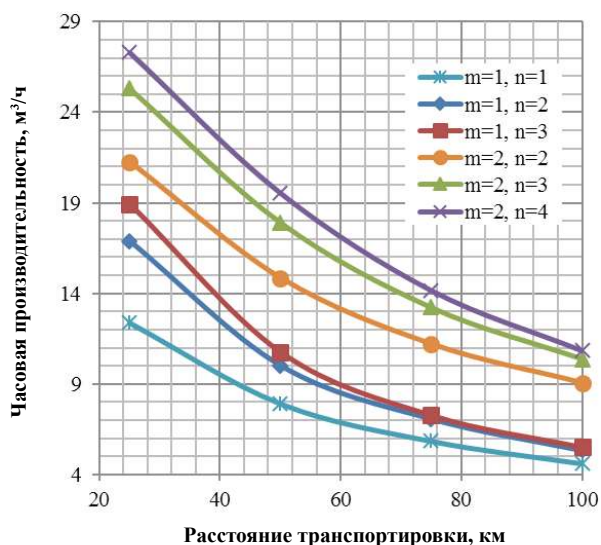


Рисунок 5 – Производительность системы машин

Figure 5 – Machine system performance

16,9 м³/ч, т.е. производительность увеличилась более чем в 3 раза. Заметно растет производительность с увеличением числа АСВ. Так, например, при одном дополнительном СФП и расстоянии транспортировки 100 км производительность системы машин с одним АСВ составила 5,3 м³/ч, а с двумя АСВ – 10,4 м³/ч, т.е. производительность увеличилась почти в 2 раза. При 25 км, соответственно, 16,9 и 25,3 м³/ч, т.е. производительность увеличилась в 1,5 раза.

Привлечение дополнительных СФП повышает производительность незначительно. Так, например, для двух АСВ при расстоянии транспортировки 100 км и СФП ($n = 2, n = 3$ и $n = 4$) производительность составила 9,1; 10,4 и 10,8 м³/ч соответственно.

Следует отметить, что количество дополнительных СФП влияет не только на производительность, но и на длину очереди груженых СФП на верхнем складе. На рисунке 6 представлен график зависимости длины очереди груженых СФП на верхнем складе при работе с одним АСВ ($m = 1$) и двумя АСВ ($m = 2$), при разном количестве дополнительных СФП (0–2) и в зависимости от расстояния до берегового склада.

Очевидно, что при работе без дополнительных СФП ($m = 1, n = 1$) и ($m = 2, n = 2$) длина очереди груженых СФП равна 0. Однако введение дополнительных СФП приводит к

резкому увеличению длины очереди груженых СФП на верхнем складе (рисунок 6). Так, например, увеличение числа СФП с $n = 2$ до $n = 3$ для одного АСВ при расстоянии транспортировки 25 км привело к росту средней длины очереди на верхнем складе с 0,41 до 0,99 груженых СФП, а при расстоянии транспортировки 100 км с 0,81 до 1,77 соответственно. Для двух АСВ увеличение СФП с $n = 3$ до $n = 4$ при тех же расстояниях увеличило длину очереди с 0,13 до 0,29 и с 0,64 до 1,50 соответственно. Длина очереди больше 1 означает, что одна загруженная СФП будет всегда находиться на верхнем складе.

Для принятых условий работы ТА расстояние транспортировки от верхнего до берегового склада, число АСВ и СФП незначительно влияют на длину очереди груженых СФП. В экспериментах длина очереди СФП на береговом складе не превысила 0,05.

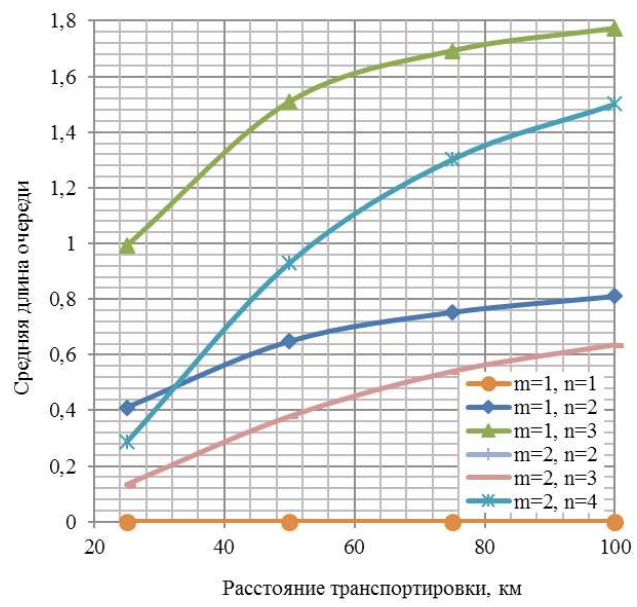


Рисунок 6 – Средняя длина очереди груженых СФП

Figure 6 – Average queue length of loaded removable forming platforms

Заключение. Разработана конструкция комбинированного пучка из деловых сортиментов и пакетов лесосечных отходов для их лесосплава в составе плотов. Расчетами установлено, что комбинированный пучок обладает достаточным запасом плавучести, что позволяет вывезти с лесосеки всю заготовленную древесину, включая лесосечные отходы.

Предложена технология формирования пучка на верхнем складе в СФП с последующей ее транспортировкой АСВ с системой «мультилифт» на береговой склад и укладкой пучка в плот на затопляемом плотбище с помощью ТА.

Разработана математическая модель технологического процесса, позволяющая выполнять исследования эффективности работы системы машин в широком диапазоне варьирования природно-производственных факторов.

В настоящей статье приводятся результаты исследований, выполненные для выхода хвойной деловой древесины на лесосеке 160–170 м³/га и объема лесосечных отходов 32–34 м³/га. Система машин включала один погрузчик и один ТА. Исследования проводили для одного и двух АСВ. Число СФП варьировало от 0 до 4. Расстояние от верхнего до берегового склада изменялось от 25 км до 100 км.

Результаты исследований позволили сделать следующие обобщенные выводы:

производительность системы машин с уменьшением расстояния транспортирования от верхнего до берегового склада от 100 км до 25 км выросла в 3 раза;

при увеличении АСВ с одного до двух производительность увеличилась в 1,52 раза;

увеличение количества дополнительных СФП больше одного приводит к незначительному росту производительности, но ведет к резкому росту длины очереди загруженных СФП на верхнем складе.

Полученные результаты исследований позволяют рекомендовать количество СФП на одну больше, чем количество АСВ. Для достижения максимальной производительности количество АСВ должно быть предельным с учетом рациональной загрузки погрузчика и ТА, а также длины очереди груженых СФП на верхнем и нижнем складах.

Разработанная математическая модель, реализованная в виде пакета компьютерных программ, позволяет проводить имитационные эксперименты с различным набором машин и широким диапазоном варьирования природно-производственных характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автосортиментовоз со съемной площадкой. Режим доступа: <https://ppt-online.org/418593> (дата обращения: 15.03.2024).
2. Войтко П. Ф., Гайсин И. Г. Первоначальный лесосплав по малым рекам. Йошкар-Ола, 2016. 436 с.
3. Войтко П. Ф., Гайсин И. Г. Повышение производительности труда на выгрузке ПСЕ с воды на лесопромышленных предприятиях. М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. 180 с.
4. Ильюшенко Д. А., Бирман А.Р., Локштанов Б. М., Орлов В. В., Гусева Т. А., Иванов В. А., Никифорова В. А. Технологии производства топливной щепы из лесосечных отходов при заготовке древесины 250–300 тыс. пл. м³ в год. Режим доступа: <https://lpk-sibiri.ru/tag/zhurnal-lpk-sibiri-17-2021/> (дата обращения: 15.03.2024)
5. Камусин А. А., Суров Г. Я., Войтко П. Ф. Транспорт лесных грузов по внутренним водным путям. Йошкар-Ола, 2017. 476 с.
6. Карпачев С. П. Логистика. Моделирование технологических процессов береговых лесоскладов: учеб. пособие для студентов специальностей 260100 и 170400 / Моск. гос. ун-т леса. М., 2005. 131 с.
7. Карпачев С. П., Щербаков Е. Н. Количественная оценка ветровально-буреломной древесины // Лесопромышленник. 2010. № 3(55). С. 8–11.
8. Лесное хозяйство. Справочные сведения. Режим доступа: <https://nationalatlas.ru/tom3/354-355.html> (дата обращения: 15.03.2024)
9. Лесозаготовительная машина: Пат. 187236 / С. П. Карпачев, М. А. Быковский, И. П. Карпачева. № 2018141968; заявл. 28.11.2018; опубл. 25.02.2019.
10. Мануковский А. Ю. Обоснование технологии водного транспорта леса минимизацией воздействия на экосистемы водоемов, Автореф. дис. ... д-ра техн. наук, Воронеж, 2005. 30 с.
11. Матросов А. В., Быковский М. А., Лаптев А. В., Щербаков Е. Н., Карпачев С. П. Технологические процессы и оборудование производства древесного биотоплива: учеб. пособие / ФГБОУ ВПО МГУЛ. М., 2015. 295 с.
12. Орлов В. В. Повышение эксплуатационных свойств топливной щепы из лесосечных отходов путем ее обезвоживания: автореф. дис. ... канд. техн. наук, СПб., 2016. 20 с. Режим доступа: https://spbftu.ru/uploads/dissertations/86_Orlov%20Vitalij%20Vladimirovich/Avtoreferat.pdf (дата обращения: 15.03.2024).
13. Суров Г. Я., Зунин Л. Н. Организация береговой сплотки: учеб. пособие. Режим доступа: <https://studylib.ru/doc/2620405/organizaciya-beregovoj-splotki> (дата обращения: 15.03.2024).



14. Устройство для формирования лесосплавного пучка: Пат. 189344 / С. П. Карпачев, М. А. Быковский, И. П. Карпачева. № 2018141967; заявл. 28.11.2018; опубл. 21.05.2019.
15. Устройство для формирования лесосплавного пучка: Пат. 2736605 / С. П. Карпачев, И. П. Карпачева. № 2020110598; заявл. 07.08.2019; опубл. 19.11.2020.
16. Шварц Н. KOHLBACH: древесные отходы – в тепло и энергию // ЛПК Сибири. 2021. №17. Режим доступа: <https://lpk-sibiri.ru/tag/zhurnal-lpk-sibiri-17-2021>. (дата обращения: 15.03.2024).
17. Щербakov Е. Н., Карпачев С. П., Комяков А. Н., Слинченков А. Н. Проблемы развития биоэнергетики на основе древесного сырья в России // Вестник Московского государственного университета леса. Лесной вестник. 2010. № 4. С. 70–73.
18. Эффективная работа котла на влажной щепе // ЛПК Сибири. 2021. №17. Режим доступа: <https://lpk-sibiri.ru/tag/zhurnal-lpk-sibiri-17-2021/> (дата обращения: 15.03.2024)
19. Karpachev S. P. Simulation of salix harvesting and processing technology using soft containers. //E3S Web of Conferences. International Conference on Efficient Production and Processing, ICEPP 2020. С. 01047. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016101047>.
20. Karpachev S. P., Zaprudnov V. I., Bykovskiy M. A., Karpacheva I. P. Simulation studies on line intersect sampling of residues left after cut-to-length logging // Croatian Journal of Forest Engineering. 2020. 41(1). P. 95–107. DOI: 10.5552/crojfe.2020.531.

REFERENCES

1. Log truck with a removable platform. Available at: <https://ppt-online.org/418593>. Date of reference: 15.03.2024. (In Russ).
2. Voitko P. F., Gaisin I. G. Initial log rafting along small rivers. Yoshkar-Ola, 2016. 436 p. (In Russ).
3. Voitko P. F., Gaisin I. G. Increasing labor productivity during unloading from water at timber enterprises. Moscow; Vologda: Infra-Engineering, 2023. 180 p. (In Russ).
4. Ilyushenko D. A., Birman A.R., Lokshantov B. M., Orlov V. V., Guseva T. A., Ivanov V. A., Nikiforova V. A. Technologies for the production of fuel chips from logging waste during wood harvesting 250–300 thousand sq. m³ per year. Available at: <https://lpk-sibiri.ru/tag/zhurnal-lpk-sibiri-17-2021>. Date of reference: 03/15/2024. (In Russ).
5. Kamusin A. A., Surov G. Ya., Voitko P. F. Transport of forest goods by inland waterways. Yoshkar-Ola, 2017. 476 p. (In Russ).
6. Karpachev S. P. Logistics. Modeling of technological processes of coastal forests. Moscow, 2005. 131 p. (In Russ).
7. Karpachev S. P., Shcherbakov E. N. Quantitative assessment of windfall trees. *Timber Industry*. 2010;3(55):811. (In Russ).
8. Forestry. Reference information. Available at: <https://nationalatlas.ru/tom3/354-355.html>. Date of reference: 15.03.2024. (In Russ).
9. Tree harvesting machine: Pat. 187236 / S. P. Karpachev, M. A. Bykovsky, I. P. Karpacheva. No. 2018141968; appl. 11/28/2018; publ. 02/25/2019. (In Russ).
10. Manukovsky A. Yu. Feasibility of method of logging transportation by water by minimizing the impact on the eco-systems of reservoirs. Voronezh, 2005. 30 p. (In Russ).
11. Matrosov A. V., Bykovsky M. A., Laptev A. V., Shcherbakov E. N., Karpachev S. P. Production processes and equipment for the production of wood biofuels. Moscow, 2015. 295 p. (In Russ).
12. Orlov V. V. Improving the operational properties of fuel chips from logging waste by dewatering it. Saint Petersburg, 2016. 20 p. Available at: https://spbftu.ru/uploads/disser/dissertations/86_Orlov%20Vitalij%20Vladimirovich/Avtoreferat.pdf. Date of reference: 15.03.2024. (In Russ).
13. Surov G. Ya., Zunin L. N. Organization of the coastal raft. Available at: <https://studylib.ru/doc/2620405/organizaciya-beregovoj-splotki>. Date of reference: 15.03.2024. (In Russ).
14. Device for forming a logging bundle: Pat. 189344 / S. P. Karpachev, M. A. Bykovsky, I. P. Karpacheva. No. 2018141967; appl. 11/28/2018; publ. 05/21/2019. (In Russ).
15. Device for forming a logging bundle: Pat. 2736605 / S. P. Karpachev, I. P. Karpacheva. No. 2020110598; appl. 08/07/2019; publ. 11/19/2020. (In Russ).
16. Schwartz N. KOHLBACH: wood waste – into heat and energy. *Forest Industry complex of Siberia*. 2021;(17). Available at: <https://lpk-sibiri.ru/tag/zhurnal-lpk-sibiri-17-2021>. Date of reference: 15.03.2024. (In Russ).
17. Shcherbakov E. N., Karpachev S. P., Komyakov A. N., Slinchenkov A. N. Problems of development of bioenergy based on wood raw materials in Russia. *Bulletin of the Moscow State University of the Forest. Forest Bulletin*. 2010;(4): 70–73. (In Russ).
18. Efficient operation of the boiler on wet wood chips. *Forest Industry complex of Siberia*. 2021;(17). Available at: <https://lpk-sibiri.ru/tag/zhurnal-lpk-sibiri-17-2021/> Date of reference: 15.03.2024. (In Russ).
19. Karpachev S. P. Simulation of salix harvesting and processing technology using soft containers. *E3S Web of Conferences. International Conference on Efficient Production and Processing*, ICEPP 2020. С. 01047. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016101047>.
20. Karpachev S. P., Zaprudnov V. I., Bykovskiy M. A., Karpacheva I. P. Simulation studies on line intersect sampling of residues left after cut-to-length logging. *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2020;41(1). P. 95–107. DOI: 10.5552/crojfe.2020.531.

Статья поступила в редакцию 05.02.2024; одобрена после рецензирования 08.04.2024; принята к публикации 12.04.2024.
The article was submitted 05.02.2024; approved after reviewing 08.04.2024; accepted for publication 12.04.2024.

