

 МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ
И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

Научная статья

УДК 630*311+519.1

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-1-153-171

**Технологический алгоритм производства продукции
из порубочных остатков***А.П. Мохирев¹*, *д-р техн. наук, доц.*; *ResearcherID: [N-9961-2019](https://orcid.org/0000-0002-1692-3323)*,*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1692-3323>**К.П. Рукомойников²*, *д-р техн. наук, доц.*; *ResearcherID: [N-6961-2019](https://orcid.org/0000-0002-9956-5081)*,*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9956-5081>**М.М. Герасимова³*, *канд. техн. наук, доц.*; *ResearcherID: [AAB-6823-2020](https://orcid.org/0000-0003-3544-187X)*,*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3544-187X>**С.О. Медведев³*, *канд. экон. наук, доц.*; *ResearcherID: [N-8240-2016](https://orcid.org/0000-0001-7459-3150)*,*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7459-3150>**М.А. Зырянов³*, *канд. техн. наук, доц.*; *ResearcherID: [N-6950-2016](https://orcid.org/0000-0003-4525-2124)*,*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4525-2124>*¹Сибирский федеральный университет, просп. Свободный, д. 82, г. Красноярск, Красноярский край, Россия, 660041; ale-mokhired@yandex.ru[✉]²Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, Россия, 424000; rukomojnikovkp@volgatech.net³Лесосибирский филиал Сибирского государственного университета им. академика М.Ф. Решетнева, ул. Победы, д. 29, г. Лесосибирск, Красноярский край, Россия, 662543; marina-gerasimov@list.ru, medvedev_so@sibsau.ru, zyrinov_ma@sibsau.ru

Поступила в редакцию 26.12.21 / Одобрена после рецензирования 22.03.22 / Принята к печати 27.03.22

Аннотация. Одной из приоритетных задач лесной промышленности в настоящее время является повышение прибыли, получаемой с 1 га осваиваемого лесного участка. Этот показатель характеризует эффективность лесопользования и влияет на доступность древесных ресурсов. Одно из направлений решения данной задачи – разработка эффективных технологических цепочек производства товарной продукции из порубочных остатков древесины. В настоящее время существуют широкие возможности получения различной продукции из заготавливаемой древесины, в том числе и из отходов от ее заготовки и переработки. Ассортимент выпуска значительно дифференцирован по себестоимости и цене реализации. В российских реалиях одним из важных аспектов выступает спрос на отдельные виды продукции из древесных ресурсов, существенно уступающий в своем объеме зарубежным рынкам. Наиболее весомыми в структуре себестоимости продукции являются затраты, относящиеся к производственному процессу. При этом в зависимости от выбранной технологии, логистики, специфики производственных условий расходы могут существенно варьироваться по источникам образования и удельному весу в общей структуре. Множество факторов, влияющих на выбор вида производимой продукции и в конечном итоге на рациональный портфель товарной продукции, сложно учесть в оптимизационных задачах. Целью настоящего

© Мохирев А.П., Рукомойников К.П., Герасимова М.М., Медведев С.О., Зырянов М.А., 2023

 Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.

исследования стало формирование технологической цепочки процесса переработки порубочных остатков на стадии лесозаготовительного производства с получением эффективного портфеля товарной продукции в динамических природно-производственных условиях. Предлагается применить графоаналитическую модель, в которой вершинами графа являются лесосека, производственные операции и потребитель. Дуги данной модели характеризуются пропускной способностью, ограниченной производительностью или объемом сырья, доступного для выполнения операции, а также трудозатратами и затратами (переменными и постоянными). Следует отметить, что постоянные затраты возникают прежде всего при хранении древесины. Отличительная особенность предлагаемой модели – учет безвозвратных потерь, получаемых на определенных операциях производства и при длительном хранении лесоматериалов, используемых для изготовления товарной продукции, а также затрат на утилизацию остатков. Предложенные графоаналитическая модель и алгоритм решения поставленной задачи позволят определить оптимальные технологические цепочки переработки порубочных остатков древесины с получением портфеля товарной продукции.

Ключевые слова: порубочные остатки, доступность древесных ресурсов, портфель товарной продукции, графоаналитическая модель, технологический процесс, технологическая цепочка, динамические условия, переработка порубочных остатков

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Краевого фонда науки и ООО «Красресурс 24» в рамках научного проекта № 2022052708731.

Для цитирования: Мохирев А.П., Рукомойников К.П., Герасимова М.М., Медведев С.О., Зырянов М.А. Технологический алгоритм производства продукции из порубочных остатков // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 1. С. 153–171. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-153-171>

Original article

Technological Procedure for the Manufacture of Products Using Felling Residues

Aleksandr P. Mokhirev¹✉, Doctor of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [N-9961-2019](https://orcid.org/0000-0002-1692-3323), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1692-3323>

Konstantin P. Rukomojnikov², Doctor of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [N-6961-2019](https://orcid.org/0000-0002-9956-5081), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9956-5081>

Marina M. Gerasimova³, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAB-6823-2020](https://orcid.org/0000-0003-3544-187X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3544-187X>

Sergey O. Medvedev³, Candidate of Economics, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [N-8240-2016](https://orcid.org/0000-0001-7459-3150), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7459-3150>

Mikhail A. Zyryanov³, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [N-6950-2016](https://orcid.org/0000-0003-4525-2124), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4525-2124>

¹Siberian Federal University, prosp. Svobodnyy, 82, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation; ale-mokhirev@yandex.ru✉

²Volga State University of Technology, pl. Lenina, 3, Yoshkar-Ola, Mari El Republic, 424000, Russian Federation; rukomojnikovkp@volgatech.net

³Lesosibirsk Branch of the Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, ul. Pobedy, 29, Lesosibirsk, Krasnoyarsk Krai, 662543, Russian Federation; marina-gerasimov@list.ru, medvedev_so@sibsau.ru, zyryanov_ma@sibsau.ru



Received on December 26, 2021 / Approved after reviewing on March 22, 2022 / Accepted on March 27, 2022

Abstract. Increasing the profit received from 1 hectare of the developed forest area is one of the priority tasks of the forest industry today. This parameter describes the efficiency of forest management and affects the availability of wood resources. One of the possible solutions of this issue is the development of effective technological chains of manufacturing commodity products from wood felling residues. Currently, there are ample opportunities to obtain various products from harvested wood, including wastes from its logging and processing. The product range is significantly differentiated by cost and selling price. In Russia one of the important factors is the demand for certain types of products from wood resources, which is significantly inferior in its volume to foreign markets. Costs related to the manufacturing process are the most significant in the structure of production costs. Meanwhile, expenses may vary dramatically depending on the chosen technology, logistics, and specific production conditions in terms of the formation sources and specific weight in the overall structure. The set of factors that influence the choice of the type of products to be produced and, ultimately, the reasonable portfolio of commodity products, is not easy to consider in the issues of optimization. The study aims at forming a technological chain of processing felling residues at the stage of logging operations with obtaining an effective portfolio of commodity products under dynamic natural and production conditions. We propose to apply a graph-analytical model, in which the peaks of the graph are the cutting area, production operations, and a consumer. The arcs of this model are characterized by the carrying capacity limited by the productivity or volume of raw materials available for the operation, as well as the labor and costs (variable and constant). It should be mentioned that fixed costs arise primarily in the wood storage. A distinctive feature of the proposed model is the accounting of irrecoverable losses resulting from certain production operations and from the long-term storage of timber used for manufacturing commodity products including the costs of their disposal. The proposed graph-analytical model and procedure for solving the problem will allow determining the optimal technological chains of processing of wood felling residues with obtaining a commercial yield portfolio.

Keywords: felling residues, availability of wood resources, commercial yield portfolio, graph-analytical model, technological process, technological chain, dynamic conditions, processing of felling residues

Acknowledgments: The research was financially supported by the Krasnoyarsk Regional Fund of Science and OOO "Krasresurs 24" within the framework of the scientific project No. 2022052708731.

For citation: Mokhirev A.P., Rukomojnikov K.P., Gerasimova M.M., Medvedev S.O., Zyryanov M.A. Technological Procedure for the Manufacture of Products Using Felling Residues. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2023, no. 1, pp. 153–171. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-1-153-171>

Введение

Доступность древесных ресурсов в большей степени определяется эффективностью лесозаготовок. Увеличение объема товарной продукции и, соответственно, прибыли, получаемой с 1 га осваиваемого участка, на сегодняшний день является приоритетной задачей развития лесной промышленности. Наиболее приемлемое направление решения данной задачи – переработка оставляемого на лесосеке в виде лесосечных отходов древесного ресурса. Однако специфичность получаемой товарной продукции, требуемых технологий делает такое производство недоступным.

Задача использования лесосечных отходов всегда привлекала многих исследователей, о чем свидетельствуют публикации [2, 10, 13, 19]. Однако широкого распространения на российских предприятиях предлагаемые технологии не получили. Большинство технологических процессов переработки вторичных древесных ресурсов – это производство топливной щепы [15, 20, 22]. Невысокая ценность данного продукта снижает эффективность его производства и, соответственно, экономическую доступность. При этом из такого сырья возможно производить различную более ценную продукцию: технологическую щепу для плитного и целлюлозно-бумажного производства, медицинские препараты, экстракты, парфюмерию, удобрения, подкормку для животных и др. [14].

Различную древесную товарную продукцию целесообразно производить из разных частей и пород дерева. Для производства подкормки для животных используют преимущественно листовенную древесину с большим количеством коры, а также хвою в качестве витаминов. При производстве удобрений также используют ветки с наличием хвои. Порода древесины играет важную роль при получении эфирных масел, экстрактов, медпрепаратов и т. п. При переработке сырья на технологическую щепу для целлюлозно-бумажного производства практически недопустимо наличие коры (разрешается лишь – 1–3 %) и гнили (1–7 %), а значит, древесину надо либо дополнительно обрабатывать (производить окорку и убирать гниль), либо использовать сырье с наименьшим содержанием нежелательных элементов (например, крупных сосновых сучьев). Можно предположить, что в некоторых случаях порубочные остатки целесообразно сортировать перед переработкой [7].

При формировании портфеля товарной продукции предприятия возникает сложная многовариантная задача: необходимо максимизировать суммарную стоимость продукции с наименьшими затратами на производство, при этом в качестве ограничений выступают объем спроса и объемы (запасы) сырья. Один из путей решения – применение методов экономико-математического моделирования [2, 4, 12].

Выбор рационального технологического процесса переработки порубочных остатков затруднителен в связи большим количеством вариантов последовательности операций. Стоит ли сортировать порубочные остатки, упаковывать их перед транспортировкой? На какой стадии их следует перерабатывать и как утилизировать безвозвратные отходы производства? Все эти вопросы возникают при планировании производственного процесса. В большинстве случаев сложность технологического процесса и риск отсутствия спроса делают переработку порубочных остатков в товарную продукцию непривлекательной для производителей.

Цель исследования – формирование технологической цепочки процесса переработки порубочных остатков на стадии лесозаготовительного производства с получением эффективного портфеля товарной продукции в динамических природно-производственных условиях.

Объекты и методы исследования

Одним из инструментов, используемых в решении поставленной задачи, может являться графоаналитическое моделирование. Методы обоснования нахождения кратчайших путей между вершинами графа описаны в

исследованиях Э.Ф. Мура [25], Р.В. Флойда [19], Э.В. Дейкстры [18], Р.Э. Беллмана [16] и др. Данные методы позволяют осуществить анализ статических элементов работы предприятий и служат базой для реализации стационарно-динамических задач потокового программирования при рационализации потоков в транспортных системах [1, 17, 21, 23]. Перечисленные методики и алгоритмы могут использоваться при рассмотрении операций технологического процесса лесозаготовительных работ в динамике с представлением их в виде растянутых во времени графов.

В предыдущих работах авторов [8, 9, 24] предложены варианты технологических цепочек лесозаготовительных работ в виде динамической модели функционирования предприятия. Данная модель направлена на совершенствование процесса производства круглых лесоматериалов. Граф можно использовать для создания графической модели процесса производства товарной продукции из порубочных остатков древесины.

Предлагаемая в настоящем исследовании модель будет направлена на определение эффективных технологических цепочек переработки порубочных остатков древесины с нахождением оптимального портфеля товарной продукции. В качестве объекта труда в модели рассматриваются порубочные остатки древесины как вторичные ресурсы. Основные задачи создаваемой модели и методики решения:

- определение эффективного варианта портфеля товарной продукции из вторичных древесных ресурсов;

- формирование технологической цепочки производства товарной продукции из лесосечных отходов в различные периоды года;

- определение эффективного распределения машинного ресурса при переработке лесосечных отходов;

- установление суммарных безвозвратных потерь при реализации различных вариантов технологических цепочек переработки лесосечных отходов;

- выявление суммарных затрат на утилизацию отходов, образующихся в процессе переработки вторичных древесных ресурсов;

- выявление суммарных затрат на производство товарной продукции из лесосечных отходов в различные периоды года;

- определение прибыли от продаж товарной продукции, производимой из лесосечных отходов в различные периоды года.

Методика учитывает следующие особенности производственно-экономических условий:

- максимальную возможность определенного потребителя в приобретении определенного вида товара в определенный период года;

- стоимость товарной продукции для определенного потребителя в определенный период года;

- затраты на выполнение технологических операций при производстве товарной продукции из лесосечных отходов в различные периоды года;

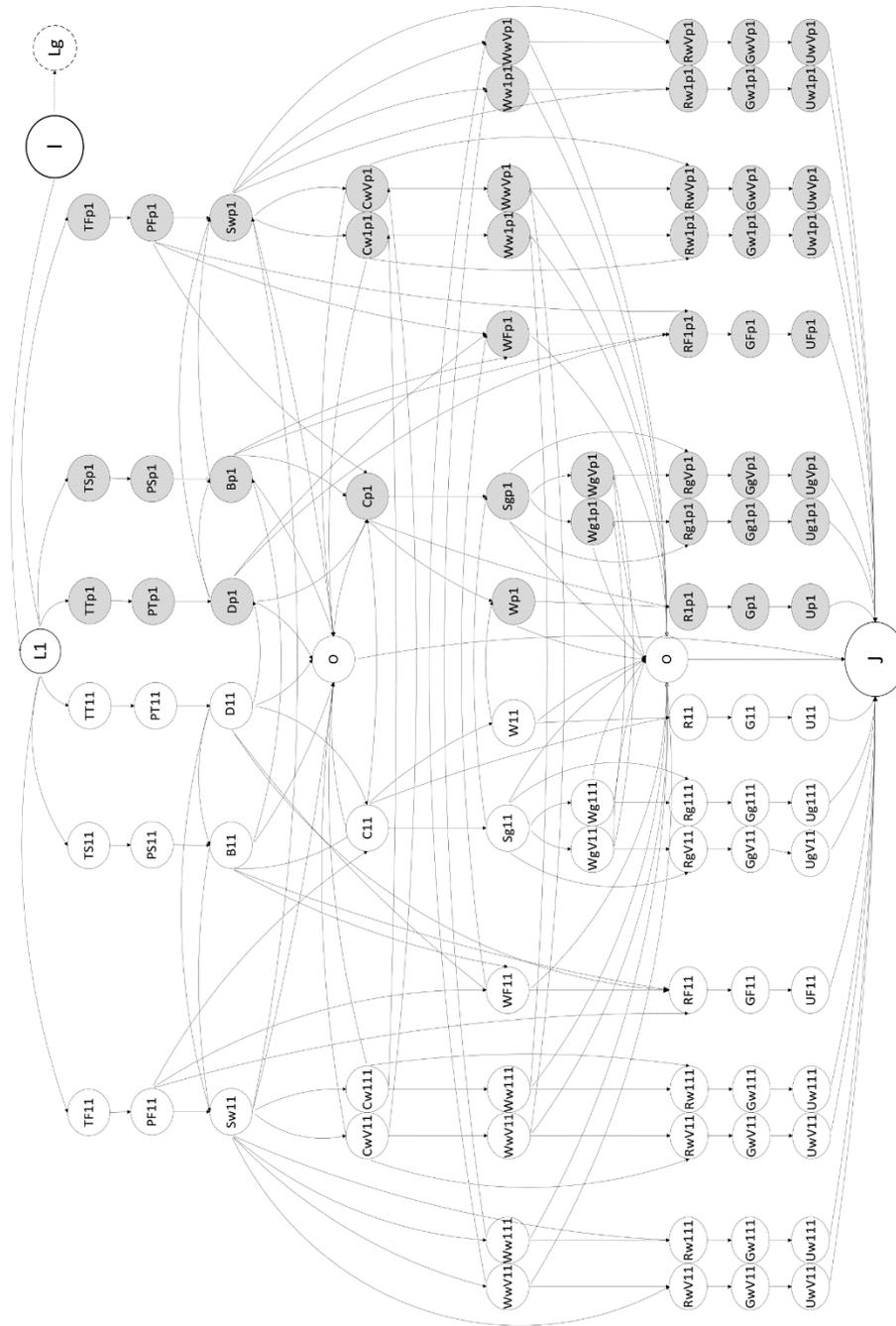
- выход товарной продукции с безвозвратными потерями при переработке лесосечных отходов и их хранении между выполнением технологических операций в различные периоды года;

- ресурсный потенциал лесосек при определении целесообразности и очередности переработки на них лесосечных отходов.

Создаваемый для решения задачи граф включает несколько копий каждой рассматриваемой вершины в каждом анализируемом временном

периоде $\theta \in P$. Число периодов может быть различным и зависит от объема и качества исходной информации и необходимой точности получаемых результатов. Множество вершин X_p графа G_p представлено в виде $X_p = \{(x_i, \theta) : (x_i, \theta) \in X \times P\}$. Множество дуг A_p задается дугами, ведущими из каждой пары «вершина–время» $(x_i, \theta) \in X_p$ в каждую пару «вершина–время» (x_j, θ) и $(x_j, \theta + \tau_{ij}(\theta))$, $\tau_{ij}(\theta)$ – продолжительность выполнения операции, соответствующей дуге (x_i, x_j) , в периоде θ . Учитывается, что $x_j \in \Gamma(x_i)$, $\Gamma(x_i)$ – множество вершин, в которые направлены дуги из вершины x_i , а $\theta + \tau_{ij}(\theta) \leq p$. Пропускные способности $V(x_i, x_j, \theta, \theta + \tau_{ij}(\theta))$ для пар «вершина–время» (x_i, θ) и $(x_j, \theta + \tau_{ij}(\theta))$ составляют ∞ , а пропускные способности $V(x_i, x_j, \theta, \theta)$ для пар «вершина–время» (x_i, θ) и $(x_j, \theta) - V_{ij}(\theta)$ могут быть определены в результате анализа трудозатрат $f_{ij}(\theta)$ на выполнение различных видов работ технологического процесса. Кроме того, в процессе сортировочных или обрабатывающих операций объем, входящий в вершину и выходящий из нее, будет изменен за счет разделения продукции или образования отходов.

На рис. 1 представлен граф, показывающий варианты технологических процессов переработки порубочных остатков древесины. Вершина I представляет собой фиктивный источник, вершина J – фиктивный сток. С фиктивного истока дуги поступают в вершины L_N , обозначающие лесосеки. Данные дуги характеризуют пропускную способность потока и определяются объемом вывозки древесины с соответствующей лесосеки V_N . Вся технологическая цепочка представлена на графе промежуточными вершинами, расположенными между вершинами, обозначающими лесосеки L и потребителей U . С вершин L_N дуги поступают в вершины $M\theta N$ (M – наименование объекта труда при выполнении операции (T – деревья, S – хлысты, F – порубочные остатки) θ – номер периода; N – номер лесосеки). Например, вершины $T11, \dots, Tr1$ характеризуют операции транспортировки деревьев, выполняемые в каждом из p периодов для 1-й анализируемой лесосеки. После операций обрезки сучьев и раскряжевки объектом труда являются только порубочные остатки. Дуги, входящие в вершину, определяют собой операцию погрузки, выходящие из вершины – транспортировку древесины. Кроме операций погрузки и транспортировки в модель включены операции по переработке и сортировке древесины, пакетированию. Первые буквенные характеристики вершин обозначают вид технологической операции: TT – транспортировка деревьев; TS – транспортировка хлыстов; TF – транспортировка лесосечных отходов; PT – разгрузка деревьев; PS – разгрузка хлыстов; PF – разгрузка лесосечных отходов; D – обрезка сучьев; B – раскряжевка; Sw – сортировка непереработанных лесосечных отходов; Sg – сортировка переработанных отходов; Cw – переработка сортированных отходов; Ww – упаковка продукции, полученной из необработанных отходов; Rg – погрузка продукции, полученной из несортированных лесосечных отходов; G – транспортировка готовой продукции.



Графическая модель производства продукции из порубочных остатков древесины
Graphical model of product manufacturing using wood felling residues

Операции по сортировке, переработке и пакетированию могут осуществляться в последующие периоды года. При этом при хранении часть древесных ресурсов нередко приходит в негодность. Объем невозвратных потерь поступает в вершину *O*.

Дуги характеризуются пропускной способностью, ограниченной производительностью Π или объемом сырья V_{XH} , доступного для выполнения операции H после операции X . Также дуги характеризуются трудозатратами f ,

переменными C и постоянными Z затратами. Постоянные затраты учитываются при хранении древесины между периодами. В дугах, выходящих из фиктивной вершины I в дуги, характеризующие лесосеки, $V_{M\theta N}$ обозначает объем анализируемого предмета труда в определенный период θ , перемещаемый с лесосеки N . В дугах, входящих в фиктивную вершину J из вершин потребителей, присутствует характеристика Q_{UM} , т. е. максимальный объем продукции M , возможный для приобретения потребителем U . Также данная дуга характеризует доход от реализуемой продукции C , получаемый от потребителя. Вследствие фиксации затрат на прочих дугах в виде положительных величин, данный показатель, являясь противоположностью затратам, указывается на графе с отрицательным знаком.

Результаты исследования и их обсуждение

Математические зависимости для обоснования максимального потока минимальной стоимости в графоаналитической модели операционной сети технологического процесса обработки и переработки лесосечных отходов при их доставке с лесосек до потребителей с ограниченной потребностью и фиксированной ценой реализации продукции могут быть представлены в следующем виде.

Необходимо определить рациональный маршрут перемещения заданного объема лесоматериалов по дугам динамической операционной сети в анализируемых на графе периодах:

$$-\sum_{\theta=1}^p \sum_{(x_i, x_j) \in A} (C_{ij} \xi_{ij}(\theta) + Z_{ij} \min\{1; \xi_{ij}(\theta)\}) \rightarrow \max,$$

где ξ – величина потока.

Максимальный объем потока v за p периодов равен потоку, выходящему из источника за p периодов:

$$\sum_{\theta=1}^p \sum_{x_j \in X} [\xi_{ij}(\theta) - \xi_{ji}(\theta - \tau_{ji}(\theta))] - v(p) = 0.$$

Объем потока ξ_{ji} , вошедшего в вершину x_i в момент времени $(\theta - \tau_{ji})$, равен числу единиц потока ξ_{ij} , выходящему из вершины x_i в момент θ :

$$\sum_{x_j \in X} [\xi_{ij}(\theta) - \xi_{ji}(\theta - \tau_{ji}(\theta))] = 0, x_i \neq I, J; \theta \in P.$$

Эта зависимость должна соблюдаться для всех вершин x_i без учета фиктивного источника и стока.

Максимальный объем потока v , перемещенного по дугам графа за p периодов, равен потоку, входящему в фиктивный сток за тот же период:

$$\sum_{\theta=1}^p \sum_{x_j \in X} [\xi_{ij}(\theta) - \xi_{ji}(\theta - \tau_{ji}(\theta))] - v(p) = 0.$$

Итоговые трудовые затраты на реализацию одноименных операций технологической цепочки каждого (θ) периода не могут превышать максимальной продолжительности (m) периода, ч. Следовательно, объем потока $(\xi_{(i=b)j}^X(\theta))$,

протекающего по дуге $(x_{i=b}, x_j)$ в рассматриваемом периоде (θ) , должен удовлетворять следующему неравенству:

$$0 \leq \xi_{(i=b)j}^X(\theta) \leq \frac{m(\theta) - \sum_{i \in [1;b) \cup (b;g]} \sum_{x_j \in X} f_{ij}^X(\theta) \cdot \xi_{ij}^X(\theta)}{f_{(i=b)j}^X(\theta)},$$

где b – порядковый номер анализируемой дуги ($1 \leq b \leq g$); $f_{ij}^X(\theta)$ – трудозатраты на обработку или перемещение единицы лесоматериалов при осуществлении X -й технологической операции на протяжении θ -го периода, ч/м³; $\xi_{ij}^X(\theta)$ – величина материального потока, перемещаемого с вершины i в θ -й период при осуществлении X -й операции, м³.

Эта зависимость должна соблюдаться для всех периодов и вершин графа, кроме фиктивного источника и дуг, соединяющих между собой периоды:

$$\forall (x_i, x_j) \in A(\theta); \theta \in P; x_i \neq I; (x_i, x_j) \neq (x_{X_h \theta}; x_{X_h l(\theta+1)}),$$

где h – этап транспортировки; l – выполняемая операция.

Одним из основных параметров, ограничивающих максимальную пропускную способность исследуемых дуг, является производительность $\Pi(\theta)$. В данном случае этот показатель характеризует объем работ, который возможно выполнить до завершения анализируемого периода. По мере расчета в результате движения по исследуемым дугам графа определенного материального потока будет происходить уменьшение времени $m^*(\theta)$, оставшегося до завершения этапа:

$$m^*(\theta) = m(\theta) - \sum_{i=1}^g \sum_{x_j \in X} f_{ij}^X(\theta) \cdot \xi_{ij}^X(\theta).$$

При этом трудозатраты на выполнение той или иной операции технологического процесса лесозаготовительных работ и производительность машин и механизмов связаны друг с другом следующей математической зависимостью:

$$\Pi_{ij}^X(\theta) = \frac{m^*(\theta)}{f_{ij}^X(\theta)},$$

и наоборот

$$f_{ij}^X(\theta) = \frac{m^*(\theta)}{\Pi_{ij}^X(\theta)}.$$

При обосновании величины потока, протекающего по дугам графа, следует учитывать, что сумма объемов всех видов транспортируемой древесины, вывезенных с лесосеки L_N за все время ее освоения, не должна превышать максимального объема V_N заготовленной на ней древесины:

$$V_N \geq V_{wN} + V_{IN} + V_{JN}.$$

Таким образом, величина потока $(\xi_{L_N(j=b)}(\theta))$, протекающего по дуге $(L_N, x_{j=b})$ от вершины L_N в анализируемом периоде (θ) , должна соответствовать следующему неравенству:

$$0 \leq \xi_{L_N(j=b)}(\theta) \leq V_N - \sum_{\theta=1}^p \left(\sum_{j \in [1;b) \cup (b;g]} \xi_{L_N j}(\theta) - \xi_{L_N b}(\theta - \tau(\theta)) - \xi_{L_N b}(\theta + \tau(\theta)) \right).$$

При обосновании величины потока, протекающего по дугам графа, следует учитывать, что сумма объема всего сортируемого, обрабатываемого или упаковываемого в текущем периоде l сырья $\left(\sum_{\theta=1}^l V_H(\theta) \right)$ должна быть равна сумме объемов k видов получаемой в результате выполнения операции H продукции $\left(\sum_{j=1}^k V_{Hj} \right)$, объема древесного сырья, оставляемого на хранение до последующих p периодов для выполнения операции H $\left(\sum_{\theta=l+1}^p V_H(\theta) \right)$, и безвозвратных потерь древесины за счет проведения операции или длительного хранения (V_{HO}):

$$\sum_{\theta=1}^l V_H(\theta) = \sum_{j=1}^k V_{Hj} + \sum_{\theta=l+1}^p V_H(\theta) + V_{HO}.$$

Таким образом, величина потока $\left(\xi_{H(j=b)}(\theta) \right)$, протекающего по дуге $(H, x_{j=b})$ от вершины H в анализируемом периоде (l), должна соответствовать ограничению:

$$0 \leq \xi_{H(j=b)}(l) = \sum_{\theta=1}^l V_H(\theta) - \sum_{\theta=1}^p \left(\sum_{j \in [1;b) \cup (b;k]} \xi_{Hj}(\theta) + \xi_{HO} - \xi_{Hb}(\theta - \tau(\theta)) - \xi_{Hb}(\theta + \tau(\theta)) \right).$$

Величина потока $\left(\xi_{HO} \right)$, протекающего по дуге (H, O) в анализируемом периоде (l), должна соответствовать следующему ограничению:

$$0 \leq \xi_{HO} = \sum_{\theta=1}^l V_H(\theta) - \sum_{\theta=1}^p \left(\sum_{x_j \in X} \xi_{Hj}(\theta) - \xi_{Hj}(\theta - \tau(\theta)) - \xi_{Hj}(\theta + \tau(\theta)) \right).$$

Сумма объемов каждого вида реализованной потребителю (U) древесины за все периоды освоения лесосек не должна превышать максимально желаемого этим потребителем объема данного вида приобретаемой продукции. Таким образом, величина потока $\left(\xi_{(i=b)(j=U)}^y(\theta) \right)$ реализуемой потребителю продукции y , протекающего по дуге $(x_{(i=b)}, x_{j=U})$ от вершины $(i=b)$ в анализируемом периоде (θ), должна соответствовать следующему неравенству:

$$0 \leq \xi_{(i=b)(j=U)}^y(\theta) \leq Q_U^y - \sum_{\theta=1}^p \left(\sum_{i \in [1;b) \cup (b;g]} \xi_{iU}^y(\theta) - \xi_{bU}^y(\theta - \tau(\theta)) - \xi_{bU}^y(\theta + \tau(\theta)) \right).$$

Предложенная динамически изменяемая модель призвана реализовать графоаналитический подход обоснования: порядка действий при транспортировке (перемещении) древесины и древесных ресурсов с различных лесосек (лесной территории), необходимости и количества лесных складов (например, промежуточных), использования речной транспортировки и рейдов как объектов инфраструктуры, внедрения отдельных характеристик погрузочно-разгрузочных работ, сортировочных, упаковочных и иных обрабатывающих и перерабатывающих операций, выбора наиболее эффективного транспорта (водный, сухопутный), а также при определении конечного потребителя и востребованной на рынке товарной продукции, полученной из лесосечных отходов. При этом последние получают в условиях динамически изменяющейся природно-производственной среды. Характерной особенностью данной модели является учет безвозвратных потерь при определенных операциях производства и длительном хранении лесоматериалов, затрат на их утилизацию. Модель позволяет учесть и такие цепочки технологических операций по переработке древесных отходов, при которых отсутствуют безвозвратные потери и длительное хранение древесины. Например, при переработке отходов в технологическую щепу, ее дальнейшем сжигании и переводе тепловой энергии в электрическую.

Алгоритм решения поставленной задачи состоит из следующих этапов.

1. Берутся для расчета вершины и дуги графа от первого периода технологического процесса $\theta = 1$, с использованием варианта растянутого во времени графа G_p , относящегося к той или иной ситуации технологического процесса вывозки древесины с лесозаготовительных участков.

2. С учетом величины потоков $\xi(x_i, x_j, \theta, \theta + \tau_{ij}(\theta))$ и $\xi(x_i, x_j, \theta, \theta)$, перемещаемых по дугам графа G_p , строится остаточная (μ) сеть $G_p^\mu = (X_p^\mu; A_p^\mu)$. При этом каждая дуга новой сети, соединяющая пару «вершина–время» (x_i, θ) с парой «вершина–время» (x_j, θ) , по которой на первом этапе расчета пущен поток какой-либо величины, имеет обратную дугу, соединяющую (x_j, θ) с (x_i, θ) , с остаточной пропускной способностью $V^\mu(x_j, x_i, \theta, \theta) = \xi(x_i, x_j, \theta, \theta)$ и стоимостью $C^\mu(x_j, x_i, \theta, \theta) = -C(x_i, x_j, \theta, \theta)$. Если величина перемещаемого потока $\xi(x_i, x_j, \theta, \theta)$ равна пропускной способности дуги, то $C^\mu(x_j, x_i, \theta, \theta) = \infty$. Если поток $\xi(x_i, x_j, \theta, \theta)$ или $\xi(x_i, x_j, \theta, \theta + \tau_{ij}(\theta))$ перемещается по дуге, которой соответствуют постоянные затраты $Z_{ij} \neq 0$ и при этом $\theta \neq 1$, то постоянные затраты, соответствующие одноименным операциям технологического процесса, принимаются равными 0. Движение обратного потока по любой из обратных дуг остаточной сети приводит к возможности увеличения пропускной

способности любой из дуг, характеризующих одноименную операцию технологического процесса в анализируемом интервале времени, на:

$$V_{N_n(i=b)j}^N(\theta) \leq \frac{\sum_{i \in [1;b) \cup (b;g]} \sum_{x_j \in X} f_{ij}^N(\theta) \cdot \xi_{ij}^N(\theta)}{f_{(i=b)j}^N(\theta)}.$$

Каждая дуга, соединяющая пару «вершина–время» (x_i, θ) с парой «вершина–время» $(x_j, \theta + \tau_{ij}(\theta))$, имеет остаточную пропускную способность

$$V^u(x_i, x_j, \theta, \theta + \tau_{ij}(\theta)) = V(x_i, x_j, \theta, \theta + \tau_{ij}(\theta)) - \xi(x_i, x_j, \theta, \theta + \tau_{ij}(\theta)) = \infty$$

и обратную дугу с остаточной пропускной способностью

$$V^u(x_j, x_i, \theta + \tau_{ij}(\theta), \theta) = \xi(x_i, x_j, \theta, \theta + \tau_{ij}(\theta))$$

и стоимостью

$$Z^u(x_j, x_i, \theta + \tau_{ij}(\theta), \theta) = -Z(x_i, x_j, \theta, \theta + \tau_{ij}(\theta)).$$

Остаточная сеть изначально совпадает с исходным графом.

Определяется путь P_p^u минимальной стоимости в построенной остаточной сети при $C_{HO}^X(\theta) = \infty$ с использованием алгоритма Беллмана–Форда.

В случае если такого пути нет и выполнен анализ всех анализируемых p периодов, то логичным выводом будет соответствие ранее найденного варианта пути оптимальному варианту перемещения заданного потока и переход к этапу 10.

В случае если такого пути нет лишь в рамках подвергаемых анализу периодов (в момент времени (θ)) и есть возможность осуществить переход к следующему периоду $(\theta + \tau_{js}(\theta))$, то следует добавить к графу вершины и дуги следующего периода. Так как пропускные способности дуг каждого из периодов на участках, связанных с фиктивным источником и фиктивным стоком, зависят от потока, пущенного по аналогичным дугам прошлых периодов, то осуществляется расчет пропускных способностей его дуг, соединяющих пару «вершина–время» $(x_j, \theta + \tau_{ij}(\theta))$ с парой «вершина–время» $(x_j^u, \theta + \tau_{ij}(\theta))$ и пару «вершина–время» $(x_i^u, \theta + \tau_{ij}(\theta))$ с парой «вершина–время» $(x_j, \theta + \tau_{ij}(\theta))$, по формулам:

$$V_{L_N}(\theta + \tau_{ij}(\theta)) = V_N - \sum_{\theta=1}^{\theta=p} \xi_{L_N}(\theta);$$

$$V^y(\theta + \tau_{ij}(\theta)) = Q_U^y - \sum_{\theta=1}^{\theta=p} \xi^y(\theta).$$

Если путь найден, то осуществляется переход к следующему этапу.

3. Определяется максимальная пропускная способность выявленного пути минимальной стоимости в остаточной динамической сети:

$$\delta_p^\mu = \min \left\{ \begin{array}{l} \left(V^\mu(x_I, x_J^h), \right); \\ \text{где } (x_I, x_J^h) \in P_{p(I \rightarrow J)}^\mu \end{array} \right\};$$

$$\min \left(\begin{array}{l} V^\mu(x_I, x_i^h, \theta, \theta) + \frac{1}{f^*} \cdot V^\mu(x_i^h, x_J, \theta, \theta), \\ \text{где } (x_I, x_i^h) \in P_{p(I \rightarrow J)}^\mu \quad \text{И} \quad (x_i^h, x_J) \in P_{p(J \rightarrow I)}^\mu \\ \theta \in [0, p] \end{array} \right);$$

$$\min \left(\begin{array}{l} V^\mu(x_i^h, x_J^h, \theta, \theta + \tau_{ij}(\theta)), \\ \text{где } (x_i^h, x_J^h) \in P_{p(I \rightarrow J)}^\mu \\ \theta \in [0, p] \end{array} \right);$$

$$\min \left(\begin{array}{l} V^\mu(x_i^h, x_j^{(h+1)}, \theta, \theta) + \frac{1}{f^*} \cdot V^\mu(x_j^{(h+1)}, x_i^h, \theta, \theta), \\ \text{где } (x_i^h, x_j^{(h+1)}) \in P_{p(I \rightarrow J)}^\mu \quad \text{И} \quad (x_j^{(h+1)}, x_i^h) \in P_{p(J \rightarrow I)}^\mu \\ \theta \in [0, p] \end{array} \right);$$

$$\min \left(\begin{array}{l} \frac{1}{f^*} \cdot V^\mu(x_i^h, x_j^{(h+1)}, \theta + \tau_{ij}(\theta), \theta + \theta_{ij}(\theta)), \\ \text{где } (x_i^h, x_j^{(h+1)}) \in P_{p(J \rightarrow I)}^\mu \\ \theta \in [0, p] \end{array} \right);$$

$$\min \left(\begin{array}{l} \frac{1}{f^*} \cdot V^\mu(x_j^h, x_i^h, \theta + \tau_{ij}(\theta), \theta); \\ \frac{1}{f^*} \cdot V^\mu(x_i^h, x_j^h, \theta, \theta + \tau_{ij}(\theta)), \\ \text{где } (x_i^h, x_j^h) \in P_{p(J \rightarrow I)}^\mu \\ \theta \in [0, p] \end{array} \right);$$

$$\left(\begin{array}{l} V^\mu(x_i^h, x_J), \\ \text{где } (x_i^h, x_J) \in P_{p(I \rightarrow J)}^\mu \end{array} \right);$$

$$\min \left(\begin{array}{l} V^\mu(x_i^h, x_J, \theta, \theta) + \frac{1}{f^*} \cdot V^\mu(x_J, x_i^h, \theta, \theta), \\ \text{где } (x_i^h, x_J) \in P_{p(I \rightarrow J)}^\mu \quad \text{И} \quad (x_J, x_i^h) \in P_{p(I \rightarrow J)}^\mu \\ \theta \in [0, p] \end{array} \right);$$

$$f^* = \frac{f_{h,h+1}^*}{f_{h+1,h}^*},$$

где $f_{h,h+1}^*$ – трудозатраты, характеризующие анализируемую насыщенную дугу узкого производственного участка в составе выбранного пути, направленную в момент времени θ к фиктивному стоку, машино-смен; $f_{h+1,h}^*$ – трудозатраты, характеризующие ответную анализируемой насыщенной дуге узкого производственного участка обратную дугу в момент времени θ машино-смен.

4. Осуществляется обновление значений потоков по дугам графа G_p :

а) для дуг, соединяющих в графе G_p^u пары «вершина–время» $(x_i^u, \theta + \tau_{ij}(\theta))$ и (x_j^u, θ) , со стоимостью $C(x_i, x_j, \theta, \theta + \tau_{ij}(\theta)) \leq 0$ поток $\xi(x_j, x_i, \theta, \theta + \tau_{ij}(\theta))$ по аналогичным дугам графа G_p , направленным из (x_j, θ) в $(x_i, \theta + \tau_{ij}(\theta))$, заменяется на $\xi(x_j, x_i, \theta, \theta + \tau_{ij}(\theta)) - \delta_p^u$;

б) для дуг, соединяющих в графе G_p^u пары «вершина–время» (x_i^u, θ) и (x_j^u, θ) , со стоимостью $C(x_i, x_j, \theta, \theta) \leq 0$ поток $\xi(x_j, x_i, \theta, \theta)$ по аналогичным дугам графа G_p , направленным из (x_j, θ) в (x_i, θ) , заменяется на $\xi(x_j, x_i, \theta, \theta) - \delta_p^u$;

в) для дуг, соединяющих в графе G_p^u пары «вершина–время» (x_i^u, θ) и $(x_j^u, \theta + \tau_{ij}(\theta))$, со стоимостью $C(x_i, x_j, \theta, \theta + \tau_{ij}(\theta)) \geq 0$ поток $\xi(x_i, x_j, \theta, \theta + \tau_{ij}(\theta))$ по аналогичным дугам графа G_p , направленным из (x_i, θ) в $(x_j, \theta + \tau_{ij}(\theta))$, заменяется на $\xi(x_i, x_j, \theta, \theta + \tau_{ij}(\theta)) + \delta_p^u$;

г) для дуг, соединяющих в графе G_p^u пары «вершина–время» (x_i^u, θ) и (x_j^u, θ) , со стоимостью $C(x_i, x_j, \theta, \theta) \geq 0$ поток $\xi(x_i, x_j, \theta, \theta)$ по аналогичным дугам графа G_p , направленным из (x_i, θ) в (x_j, θ) , заменяется на $\xi(x_i, x_j, \theta, \theta) + \delta_p^u$;

д) производится обновление значений потоков по дугам, соединяющим:

пару «вершина–время» (x_j^u, θ) с парой «вершина–время» (x_i, θ) , на величину с $\xi(x_j, x_i, \theta, \theta)$ на $\xi(x_j, x_i, \theta, \theta) - \delta_p^u$;

пару «вершина–время» (x_j, θ) с парой «вершина–время» (x_i^u, θ) , на величину с $\xi(x_j, x_i, \theta, \theta)$ на $\xi(x_j, x_i, \theta, \theta) - \delta_p^u$.

5. Определяется стоимость принятого пути

$$\Sigma C = \sum_{(x_i, x_j) \in P_{p(I \rightarrow J)}^u} C_{(x_i, x_j)} + \left(\sum_{(x_j, x_i) \in P_{p(I \rightarrow J)}^u} C_{(x_j, x_i)} + \sum_{(x_i, x_j) \in P_{p(J \rightarrow J)}^u} C_{(x_i, x_j)} \right) \cdot f^*,$$

где $P_{p(I \rightarrow J)}^u$ – участок пути, состоящий из прямых дуг, идущих в направлении от фиктивного источника до фиктивного стока; $P_{p(J \rightarrow J)}^u$ – участок пути, включающий прямые и обратные дуги, направленный от фиктивного стока и возвращающийся обратно, создавая цикл; $\sum_{(x_i, x_j) \in P_{p(I \rightarrow J)}^u} C_{(x_i, x_j)}$ – суммарные

переменные затраты на участке пути от фиктивного источника до фиктивного стока по прямым дугам, д.е.; $\sum_{(x_j, x_i) \in P_{p(J \rightarrow I)}^{\mu}} C_{(x_j, x_i)}$ – суммарные переменные

затраты на циклическом участке пути по обратным дугам, д.е.; $\sum_{(x_i, x_j) \in P_{p(J \rightarrow I)}^{\mu}} C_{(x_i, x_j)}$ – суммарные переменные затраты на циклическом участке пути по прямым дугам, д.е.

6. Если поток по дуге (x_H, x_j) – объем продукции, получаемой при выполнении операции H , – увеличился на величину δ_p^{μ} , то поток по дуге (x_H, x_O) увеличивается на величину $q \delta_p^{\mu}$, где q – доля безвозвратных потерь при выполнении операции H или длительном хранении, соответствующем ей. При этом q может равняться 0, если при выполнении операции H отсутствуют безвозвратные потери или длительное хранение древесины.

7. Выполняется расчет времени $m^*(\theta)$, оставшегося до конца периода.

8. Осуществляется замена пропускных способностей и веса дуг, соединяющих:

пару «вершина–время» (x_i, θ) с парой «вершина–время» (x_j^{μ}, θ) , на величину с $V_{L_n}(x_i, x_j, \theta, \theta)$ на $V_{L_n}(x_i, x_j, \theta, \theta) - \delta_p^{\mu}$;

пару «вершина–время» (x_i^{μ}, θ) с парой «вершина–время» (x_j, θ) , на величину с $V^y(x_i, x_j, \theta, \theta)$ на $V^y(x_i, x_j, \theta, \theta) - \delta_p^{\mu}$.

Весовые характеристики обратных дуг, полученных при прохождении потока по дугам графа, равны $C_{ji}^X = -C_{ij}^X$.

Выполняется замена производительностей по дугам, соответствующим одноименным технологическим операциям:

$$\Pi_{ij}^X(\theta) = \frac{m^*(\theta)}{f_{ij}^X(\theta)}.$$

Осуществляется замена объемов по дугам, соответствующим m различным вариантам использования j -й продукции, полученной в результате сортировки, при условии, что по одному из вариантов продукция используется:

$$V_n(x_{S_w}, x_j, \theta, \theta) = V_n(x_{S_w}, x_j, \theta, \theta) - \delta_p^{\mu};$$

$$V_n(x_{S_g}, x_j, \theta, \theta) = V_n(x_{S_g}, x_j, \theta, \theta) - \delta_p^{\mu}.$$

9. Строится остаточная сеть. Осуществляется переход к этапу 2.

10. Выполняется переход к первоначальному динамическому графу путем отбрасывания фиктивных вершин I и J .

Такой подход к решению задачи наряду с анализом экономичности производства товарной продукции отличается возможностью учета безвозвратных потерь, получаемых при определенных операциях производства и длительного хранения лесоматериалов при изготовлении различной товарной продукции, а также затрат на утилизацию остатков. Полученные результаты согласуются с известными представлениями [3, 5, 6, 11] об

эффективности освоения древесных ресурсов и повышении доступности лесных ресурсов за счет увеличения товарной продукции с 1 га лесной площади. Для широкого внедрения результатов исследования в производство целесообразна разработка программного обеспечения к решению задачи, которая позволит повысить степень автоматизации анализа ситуации на лесопромышленных предприятиях РФ.

Заключение

Предложенные графоаналитическая модель и алгоритм решения поставленной задачи позволят определить оптимальные технологические цепочки переработки порубочных остатков древесины с получением портфеля товарной продукции. Отличительной особенностью данной модели является учет безвозвратных потерь, получаемых при определенных операциях производства и длительного хранения лесоматериалов при изготовлении различной товарной продукции, а также затрат на утилизацию остатков.

Производство из порубочных остатков ценных товаров позволит увеличить прибыль, получаемую с 1 га осваиваемого лесного участка. Это положительно скажется на доступности не только деловой древесины, но и вторичных древесных ресурсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Беляков С.Л., Белякова М.Л., Боженьюк А.В., Савельева М.Н. Оптимизация потоков в транспортных системах // Изв. ЮФУ. Техн. науки. 2014. № 5(154). С. 161–167.
Belyakov S.L., Belyakova M.L., Bozhenyuk A.V., Savelyeva M.N. Optimization of Flows in Transport Systems. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2014, no. 5(154), pp. 161–167. (In Russ.).
2. Бурмистрова О.Н., Пильник Ю.Н., Мотрюк Е.Н. Математическая модель оптимального использования древесных отходов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 2-1(13-1). С. 179–182.
Burmistrova O.N., Pil'nik Yu.N., Motryuk E.N. Mathematical Model of Optimum Use of Wood Waste. *Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice*, 2015, vol. 3, no. 2-1(13-1), pp. 179–182. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/10112>
3. Каракчиева И.В., Чумаченко С.И. Система оценки экономической доходности древесных ресурсов леса и экономической доступности лесных участков // Фундаментальные исследования. 2016. № 7-2. С. 372–377.
Karakchieva I.V., Chumachenko S.I. System of the Assessment of Economic Profitability of Wood Resources of the Wood and Economic Availability of the Timberland. *Fundamental Research*, 2016, no. 7-2, pp. 372–377. (In Russ.).
4. Кириллов Ю.В. Многокритериальное моделирование как основа информационных технологий поддержки принятия решений // Фундаментальные исследования. 2004. № 6. С. 114–116.
Kirillov Yu.V. Multicriteria Modeling as the Basis of Information Technology for Decision Support. *Fundamental Research*, 2004, no. 6, pp. 114–116. (In Russ.).

5. Куницкая О.А., Григорьев И.В. Перспективы увеличения объемов лесозэксплуатации за счет низкотоварной древесины // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. № 3-2(8-2). С. 104–107.

Kunitskaya O.A., Grigorev I.V. Prospects for Increasing the Volume of Forest Exploitation due to Low Commodity Wood. *Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice*, 2014, no. 3-2(8-2), pp. 104–107. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/3933>

6. Лукаш А.А., Матрос В.А., Шитикова А.С., Черенкова М.С. Повышение эффективности организации за счет производства экологически безопасных видов строительных материалов из древесины // Экономика и эффективность организации производства. 2016. № 24. С. 120–124.

Lukash A.A., Matros V.A., Shitikova A.S., Cherenkova M.S. Improving the Efficiency of the Organization Through the Production of Environmentally Safety Kinds of Building Materials Made Wood. *Ekonomika i effektivnost' organizatsii proizvodstva*, 2016, no. 24, pp. 120–124. (In Russ.).

7. Мохирев А.П. Моделирование процесса работы машины для сортировки и транспортировки порубочных остатков на лесосеке // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 1(29). С. 89–94.

Mokhirev A.P. Process Modeling for the Machine for Sorting and Transporting Felling Residues on the Cutting Area. *Systems. Methods. Technologies*, 2016, no. 1(29), pp. 89–94. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2016-1-89-94>

8. Мохирев А.П., Рукомойников К.П. Моделирование структуры лесотранспортных потоков: моногр. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2022. 396 с.

Mokhirev A.P., Rukomojnikov K.P. *Modeling the Structure of Forest Transport Flows: Monograph*. Yoshkar-Ola, VSUT Publ., 2022. 396 p. (In Russ.).

9. Рукомойников К.П., Мохирев А.П. Обоснование технологической схемы лесозаготовительных работ путем создания динамической модели функционирования предприятия // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 4. С. 94–107.

Rukomojnikov K.P., Mokhirev A.P. Validation of the Logging Operations Scheme Through the Creation of Dynamical Model of the Enterprise Functioning. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2019, no. 4, pp. 94–107. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.4.94>

10. Суханов Ю.В., Герасимов Ю.Ю., Селиверстов А.А., Соколов А.П. Технологические цепочки и системы машин для сбора и переработки древесной биомассы в топливную щепу при сплошнолесосечной заготовке в сортиментах // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 4. С. 101–107.

Sukhanov Yu.V., Gerasimov Yu.Yu., Seliverstov A.A., Sokolov A.P. Technological Chains and Machines Systems for Collecting and Processing Woody Biomass into Fuel Chips in Clear-Cutting Harvesting by Cut-to-Lengths. *Systems. Methods. Technologies*, 2011, no. 4, pp. 101–107. (In Russ.).

11. Третьяков А.Г. Экономическая доступность лесных ресурсов: факторы, ее определяющие, и достоверность оценки // Лесотехн. журн. 2015. № 1(17). С. 274–287.

Tretyakov A.G. Economic Accessibility of Forest Resources: Its Determining Factors and the Accuracy of the Estimates. *Forestry Engineering Journal*, 2015, no. 1(17), pp. 274–287. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/11285>

12. *Тринеева Л.Т., Камнева В.А.* Формирование сбытовой политики предприятия на основе экономико-математических методов // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2015. № 2(6). С. 83–88.
- Trineeva L.T., Kamneva V.A. Formation of Marketing Policy of the Enterprise on the Basis of Economic and Mathematical Methods. *Tekhnologii pishchevoy i pererabatyvayushchey promyshlennosti APK – produkty zdorovogo pitaniya*, 2015, no. 2(6), pp. 83–88. (In Russ.).
13. *Шегельман И.Р.* Обоснование технологических и технических решений для перспективных технологических процессов подготовки биомассы дерева к переработке на щепу: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 1997. 36 с.
- Shegelman I.R. *Substantiation of Technological and Technical Solutions for Promising Technological Processes of Preparing Wood Biomass for Processing to Wood Chips*: Dr. Eng. Sci. Abs. Saint Petersburg, 1997. 36 p. (In Russ.).
14. *Шегельман И.Р., Рудаков М.Н.* Рациональное природопользование в свете ресурсной концепции стратегического менеджмента // Север и рынок: формирование экономического порядка. 2014. № 3(40). С. 214–216.
- Shegelman I.R., Rudakov M.N. Sustainable Nature Management in the Context of the Resource Concept of Strategic Management. *Sever i rynek: formirovanie ekonomicheskogo poriyadka*, 2014, no. 3(40), pp. 214–216. (In Russ.).
15. *Щукин П.О., Демчук А.В., Будник П.В.* Повышение эффективности переработки вторичных ресурсов лесозаготовок на топливную щепу // Инж. вестн. Дона. 2012. № 3. С. 395–398.
- Shchukin P.O., Demchuk A.V., Budnik P.V. Improving the Efficiency of Processing Secondary Logging Resources for Fuel Chips. *Engineering Journal of Don*, 2012, no. 3, pp. 395–398. (In Russ.).
16. Bellman R. On a Routing Problem. *Quarterly of Applied Mathematics*, 1958, no. 16, pp. 87–90. <https://doi.org/10.1090/qam/102435>
17. Bozhenyuk A., Gerasimenko E., Rozenberg I. The Methods of Maximum Flow and Minimum Cost Flow Finding in Fuzzy Network. *Proceedings of the CDUD 2012 – Concept Discovery in Unstructured Data*. Leuven, Belgium, 2012, pp. 1–12.
18. Dijkstra E.W. A Note on Two Problem in Connection with Graphs. *Numerische Mathematik*, 1959, vol. 1, pp. 269–271. <https://doi.org/10.1007/BF01386390>
19. Floyd R.W. Algorithm 97 – Shortest Path. *Communications of the ACM*, 1962, vol. 5, iss. 6, pp. 344–348. <https://doi.org/10.1145/367766.368168>
20. Gerasimov Yu., Senko S., Karjalainen T. Nordic Forest Energy Solutions in the Republic of Karelia. *Forests*, 2013, vol. 4, iss. 4, pp. 945–967. <https://doi.org/10.3390/f4040945>
21. Jourgholami M., Abdi E., Chung W. Decision Making in Forest Road Planning Considering Both Skidding and Road Costs: A Case Study in the Hyrcanian Forest in Iran. *iForest – Biogeosciences and Forestry*, 2013, vol. 6, iss. 2, pp. 59–64. <https://doi.org/10.3832/ifor0640-006>
22. Karjalainen T., Asikainen A., Ilavsky J., Zamboni R., Hotari K.-E., Röser D. Estimation of Energy Wood Potential in Europe. *Working Papers of the Finnish Forest Research Institute*. Helsinki, METLA, 2004. 43 p. Available at: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2004/mwp006.htm>

23. Mokhirev A., Gerasimova M., Pozdnyakova M. Finding the optimal route of wood transportation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 226, art. 012053. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/226/1/012053>

24. Mokhirev A., Rukomojnikov K. Graphic-Analytical Modelling of Technological Chain of Logging Operations in Dynamic Natural and Production Conditions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 316, art. 012039. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/316/1/012039>

25. Moore E.F. The Shortest Path through a Maze. *Proceedings of the International Symposium on Theory of Switching*. Cambridge, MA, Harvard University Press, 1957, pp. 285–292.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest