

Оптимизационная модель процесса транспортировки древесного сырья в смешанном сообщении

Р.Н. Ковалев^{1а}, И.М. Еналеева-Бандура^{2б}, А.Н. Баранов^{2с}, И.В. Григорьев^{3д},
С.А. Бровкин^{2е}, С.Н. Мартыновская^{2ф}

¹ Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский Тракт, 37, Екатеринбург, Россия

² Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнёва,
пр. «Красноярский рабочий», 31, Красноярск, Россия

³ Арктический государственный агротехнологический университет,
Сергеляхское шоссе, 3, Якутск, Республика Саха (Якутия)

^а kir9624@yandex.ru, ^б melnikov1978@inbox.ru, ^с aleksandr-baranov-55@mail.ru, ^д silver73@inbox.ru,
^е worb1@mail.ru, ^ф svatlanamart@yandex.ru

^а <https://orcid.org/0000-0001-8928-8765>; ^б <https://orcid.org/0000-0001-7032-9512>, ^с <https://orcid.org/0000-0003-1333-6285>,

^д <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>, ^е <https://orcid.org/0000-0001-6745-4523>; ^ф <https://orcid.org/0009-0003-5236-6848>

Статья поступила 01.09.2023, принята 15.09.2023

В современных условиях ведения хозяйственной деятельности в лесном секторе экономики существует практическая необходимость выработки новых подходов к планированию и организации поставок древесного сырья в целях повышения эффективности процесса транспортировки. В основном для реализации процесса транспортировки грузов предприятий лесной отрасли совместно используются различные виды лесотранспорта. Учитывая отмеченное обстоятельство, поиск новых решений посредством выработки удовлетворяющих реалиям производственной среды математических моделей планирования транспортировки в смешанном сообщении представляет острый научный интерес. В этой связи в статье обоснована потребность в повышении эффективности процесса транспортировки древесного сырья в условиях смешанных перевозок; произведен сравнительный анализ наиболее часто встречающихся в научной литературе оптимизационных математических моделей, призванных повысить эффективность поставок древесного сырья в смешанном сообщении; посредством анализа выявлены недостатки и преимущества рассматриваемых моделей. На основе произведенного анализа, опираясь на выявленные учеными-исследователями отношения и зависимости, авторами создана и представлена в данной статье оптимизационная модель процесса транспортировки древесного сырья в смешанном сообщении. Разработанная модель базируется на системном подходе к объекту оптимизации; модель обладает комплексной критериальной направленностью, т. е. в базисе предлагаемой модели лежит поиск компромиссного оптимума между временем доставки и стоимостью транспортировки. Предлагаемая авторами математическая модель является модификацией динамической транспортной задачи с задержками, имеет многопродуктовый характер и многоиндексную постановку. Разработанная модель создана на основе экономико-математического моделирования, динамического и линейного программирования. Модель представлена аналитическим описанием целевой функции и системы ее ограничений; сформулированы дополнительные ограничения, связанные с невыполнением условия динамического баланса спроса, предложения и пропускной способности лесных складов в текущий временной период. Также в статье обозначены преимущества выработанной модели и отмечена область применения предлагаемой методологической разработки.

Ключевые слова: процесс транспортировки; древесное сырье; оптимизация; транспорт леса; смешанная перевозка; математическая модель.

Optimization model of the process of transporting wood raw materials in mixed traffic

R.N. Kovalev^{1а}, I.M. Enaleeva-Bandura^{2б}, A.N. Baranov^{2с}, I.V. Grigoriev^{3д},
S.A. Brovkin^{2е}, S.N. Martynovskaya^{2ф}

¹ Ural State Forestry Engineering University; 37, Siberian Tract St., Ekaterinburg, Russia

² Reshetnev Siberian State University of Science and Technology; 31, Krasnoyarskii Rabochii Prospect, Krasnoyarsk, Russia

³ Arctic State Agrotechnological University; 3 km, 3, Sergelyakhskoe Shosse, Yakutsk, Republic of Sakha

^а kir9624@yandex.ru, ^б melnikov1978@inbox.ru, ^с aleksandr-baranov-55@mail.ru, ^д silver73@inbox.ru,

^е worb1@mail.ru, ^ф svatlanamart@yandex.ru

^а <https://orcid.org/0000-0001-8928-8765>; ^б <https://orcid.org/0000-0001-7032-9512>, ^с <https://orcid.org/0000-0003-1333-6285>,

^д <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>, ^е <https://orcid.org/0000-0001-6745-4523>; ^ф <https://orcid.org/0009-0003-5236-6848>

Received 01.09.2023, accepted 15.09.2023

In modern conditions of economic activity in the forest sector of the economy, there is a practical need to develop new approaches to planning and organizing the supply of wood raw materials in order to increase the efficiency of the transportation process. Basically, to

implement the process of transporting goods of forest industry enterprises, various types of timber transport are used together. Considering this circumstance, the search for new solutions through the development of mathematical models for intermodal transportation planning that meet the realities of the production environment is of keen scientific interest. In this regard, the article substantiates the need to increase the efficiency of the process of transporting wood raw materials in multimodal transport; a comparative analysis of the most frequently used optimization mathematical models in the scientific literature is carried out, designed to increase the efficiency of the supply of wood raw materials in mixed traffic. As a result of the analysis the disadvantages and advantages of the models under consideration are identified. Based on the analysis performed, relying on the relationships and dependencies identified by research scientists, an optimization model for the process of transporting wood raw materials in mixed traffic is created and presented. The developed model is based on a systematic approach to the optimization object. The model has a complex criterion orientation, that is, the basis of the proposed model is the search for a compromise optimum between delivery time and transportation cost. The mathematical model proposed is a modification of the dynamic transport problem with delays, multi-product nature and multi-index formulation. The developed model is created on the basis of economic and mathematical modeling, dynamic and linear programming. The model is represented by an analytical description of the objective function and the system of its restrictions; additional restrictions are formulated related to the failure to meet the conditions of a dynamic balance of demand, supply and throughput of timber warehouses in the current time period. The article also outlines the advantages of the developed model and notes the scope of application of the proposed methodological scheme.

Key words: transportation process; timber raw materials; optimization; timber transport; multimodal transportation; mathematical model.

Введение. Общеизвестно, что древесное сырье является одним из основных ресурсов, обладающих высокой потребностью в современных условиях функционирования общественной деятельности. В этой связи очевидно, что вопросы повышения эффективности процесса поставки древесины от мест заготовки до потребителей вызывают повышенный как научный, так и практический интерес. Сложность поиска путей повышения отмеченной эффективности в большей степени обуславливается многовариантностью процесса поставки древесины. Одним из ключевых факторов данной многовариантности является использование в перевозочном процессе различных видов транспорта леса. Подобную транспортировку лесных грузов в научной литературе [1–9] принято определять как смешанную. Смешанные перевозки в лесной отрасли, согласно [2], составляют более 80 % от общего количества перевозок древесного сырья. Учитывая отмеченное обстоятельство, можно утверждать, что возможность достижения роста эффективности процесса транспортировки древесины от поставщиков до потребителей заключается в рациональности использования различных видов лесотранспорта и их оптимальном взаимодействии в процессе доставки лесных грузов в системе «поставщик – транспорт – лесной склад – транспорт – потребитель». Реализация указанных рычагов повышения эффективности процесса поставки лесных грузов, согласно источникам [1–9], возможна в результате выработки оптимизационной модели, посредством которой будет осуществляться управление транспортировкой древесного сырья в целях сокращения сроков доставки и снижения транспортных издержек. Надо учитывать, что вывозимым из леса продуктом могут быть не только круглые лесоматериалы [10; 11]. Также следует учитывать, что вывозка заготовленной древесины с лесосек всегда осуществляется автомобильным транспортом по дорогам различных конструкций и категорий, что накладывает свои ограничения по сезонной проходимости [12–15] и безопасности движения [16–24]. Учитывая вышеизложенное, данная статья посвящена разработке подобной модели, призванной оптимизировать транспортно-технологический процесс поставки древесного сырья в условиях смешанных перевозок.

Цель работы. Сделана попытка модификации динамической транспортной задачи с задержками, критерием оптимальности которой будет являться снижение временных и финансовых затрат при осуществлении перевозок древесного сырья в смешанном грузовом потоке.

Материалы и методы исследования. В основном в научной литературе [1–9 и др.] существуют два вида моделей, оптимизирующих процесс поставки грузов в смешанном сообщении. Различием отмеченных видов моделирования можно считать направленность критерия оптимальности. Критериальная направленность моделей первого вида обуславливается достижением минимума транспортных издержек при поставке грузов по всем видам используемого в перевозочном процессе транспорта. Критерием оптимальности оптимизационных моделей второго вида является достижение минимума временных затрат.

В целях данного исследования рассмотрим наиболее часто встречающиеся в специализированной литературе [1–6 и др.] модели, оптимизирующие процесс поставки грузов в смешанном сообщении, с учетом их видовой принадлежности более детально. Данное рассмотрение позволит произвести сравнительный анализ отмеченных моделей для выявления их недостатков и преимуществ, что будет способствовать выработке наиболее эффективной модели процесса поставки грузов в условиях смешанных перевозок с учетом специфики отрасли.

Итак, модели, представленные в источниках [5; 6], позволяют определить потребное количество подвижного состава, необходимое для транспортировки планируемого объема груза, с минимальными транспортными затратами. Достоинством данных моделей можно считать положенный в их основу системный подход к планированию перевозочного процесса в смешанном сообщении. Существенным недостатком рассматриваемых моделей является отсутствие учета: многоассортиментности перевозимой продукции; затрат, связанных с хранением запасов, а также расходов, связанных с корректированием производственных программ производителей и потребителей. Данное обстоятельство является важным упущением, поскольку не учит, в рамках оптимизации функционирования транспортно-технологического процесса, издержек на хранение древесного сырья

и ущерба от его недопоставки может существенно искажать резульативные данные при планировании перевозочного процесса, что, в свою очередь, может катастрофически сказаться на финансовом положении предприятий, осуществляющих хозяйственную деятельность в моделируемой цепи поставок.

Оптимизационная модель, приведенная в источнике [9], позволяет произвести расчет рационального использования подвижного состава в аспекте решения задачи полной загрузки транспортных средств. Отмеченная модель ограничена территориальными рамками, т. е. может быть использована в пределах эффективного плеча вывозки грузов автомобильным транспортом. Использование данной модели в лесной отрасли возможно при применении многоступенчатой технологии вывозки древесного сырья либо при моделировании части процесса поставки лесных грузов в смешанном сообщении. Соответственно, относительно второго варианта моделирования перевозочного процесса в смешанном сообщении существует необходимость комбинирования рассматриваемой оптимизационной модели с другим методологическим аппаратом, обладающим большим набором инструментов, в целях полного охвата объекта исследования в аспекте его оптимизации. Особый интерес вызывают модели, приведенные в [2]. Они описывают транспортно-технологический процесс поставки грузов с учетом его системных свойств, динамического характера и отраслевой специфики. Недостатком данной модели, по нашему мнению, является отсутствие учета многоассортиментности лесопродукции и возможности применения оптимизационной модели на предприятиях с невысокой производственной мощностью. Данное обстоятельство определяет низкую масштабность рассматриваемой модели и исключает возможность ее применения для оптимизации цепи поставок, в которой существует множество поставщиков и потребителей, множество транспортных связей и видов перевозимой продукции.

Также следует обратить внимание на модель, представленную в источнике [1]. Она, несомненно, обладает рядом достаточно весомых преимуществ, которые заключаются в простоте применения методологического аппарата; универсальности модели; учете временного фактора. В качестве основных недостатков модели можно указать отсутствие критерия выбора приоритетного вида транспорта, осуществляющего поставку, а также не ясен механизм построения опорного плана перевозок по приоритетному виду транспорта. Обозначенные недостатки могут привносить существенную погрешность в экспериментальные данные.

Далее приведем сравнительный анализ моделей с критериальной направленностью на достижение минимума временных затрат. Модель, представленная в источнике [6], дает возможность осуществить поиск кратчайших расстояний транспортировки от пункта производства в пункт потребления. Авторы утверждают, что данную модель можно использовать при определении кратчайшего пути при перевозках грузов, но существенным недостатком данной модели, согласно мнению [2], является отсутствие системного подхода при планировании перевозочного процесса в смешанном сообщении.

Основой модели, приведенной в источнике [8], является логистический подход. Критерий оптимальности в

рассматриваемой модели направлен на достижение минимума временных затрат при доставке грузов. Автор утверждает, что при использовании данной математической модели при планировании перевозки грузов обозначается возможность увеличить ритмичность и надежность поставок, улучшить финансовые и качественные показатели функционирования перевозочного процесса в смешанном сообщении. Основным недостатком данной модели является отсутствие учета временных затрат на хранение запасов и корректировку производственных программ поставщиков и потребителей.

Следует отметить, что в научной литературе существует модель системы доставки грузов в смешанном сообщении на основе комплексного критерия оптимальности. В данный критерий включаются как достижение минимума временных затрат, так и сокращение транспортных издержек. Отмеченная модель основана на инструментарию системотехники, научном направлении, охватывающем проектирование, создание, испытание и эксплуатацию больших сложных систем. Однако автором не рассматриваются аспекты, ограничивающие функционирование моделируемой системы.

Подводя итоги произведенного сравнительного анализа, несложно заключить, что наиболее практически востребованные существующие методологические аппараты, оптимизирующие транспортно-технологический процесс, обладают различными достоинствами. Основными из данных достоинств, опираясь на мнение экспертов отрасли [1–9 и др.], можно обозначить системный подход к объекту моделирования и комплексную направленность критерия оптимизации. Также следует отметить и особо существенные недостатки рассматриваемых методологических разработок. К данным недостаткам следует отнести отсутствие учета: многовариантности перевозимой продукции; многообразия транспортных связей между поставщиками, лесными складами и потребителями, а также отсутствие научного обоснования в аспекте выбора приоритетного транспорта.

Таким образом, существует практическая необходимость в выработке универсальной, надежной и достаточно простой в применении методологической разработки, обладающей отмеченными преимуществами и не имеющей указанных недостатков с учетом специфики отрасли.

Исходя из результатов анализа научной литературы по обозначенной проблематике [1–6] и используя в целях учета специфики отрасли системное описание процесса транспортировки древесного сырья от поставщиков до потребителей, разработанного в [2], нами предложена математическая модель, адекватная технологическим отношениям и производственным связям в системе «поставщик – транспорт – лесной склад – транспорт – потребитель».

Предлагаемая математическая модель генерирует в себе 4 составляющие, которые являются вариациями возможной транспортировки лесных грузов в смешанном сообщении (эти составляющие рассмотрены ниже). Соответственно, составляющие представляют собой подсистемы, входящие в целостную систему «поставщик – транспорт – лесной склад – транспорт – потребитель». Следует отметить, что транспортировка лесных грузов может осуществляться в различных вариациях

комбинирования указанных подсистем (т. е. предприятие в своей хозяйственной деятельности может использовать как один вариант транспортировки древесного сырья, так и все существующие варианты перевозочного процесса).

Далее приводится разработанная нами оптимизационная модель процесса транспортировки древесного сырья, при выработке которой были использованы инструменты системного подхода:

1. *Первая подсистема* представляет собой реализацию процесса транспортировки древесного сырья от верхнего склада до потребителя.

В данном случае, соответственно, процесс транспортировки древесного сырья представляет собой прямую вывозку. Аналитическая формализация технологических отношений в данной подсистеме определяется выражением (1). Критерием оптимальности рассматриваемой подсистемы является минимизация суммарных затрат, связанных с транспортировкой древесного сырья от верхнего склада до потребителя:

$$F_1 = Z_1^{P1} + Z_2^{P1} + Z_3^{P1} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где F_1 — суммарные затраты, связанные с транспортировкой древесного сырья от верхнего склада до потребителя, p ; Z_1^{P1} — затраты потребителей на приобретение древесного сырья у поставщиков, включая расходы на транспортировку лесного продукта от мест хранения до мест переработки, p ; Z_2^{P1} — затраты, связанные с хранением объема нереализованного (либо реализованного не в нормативное время) потребителю лесного продукта, включая потери прибыли поставщика в результате не реализации, p ; Z_3^{P1} — затраты, связанные со сбоем в производственной программе у потребителя в результате недопоставки (либо поставки не в нормативное время) древесного сырья, p .

Следует отметить, что, если на верхнем складе отсутствует сортировка по видам древесного сырья, то к расчету затрат на приобретение лесного продукта потребителями принимается средневзвешенная цена данного продукта.

Затраты потребителей на приобретение древесного сырья у поставщиков, включая расходы на транспортировку лесного продукта от мест хранения до мест переработки, определяются выражением (2):

$$Z_1^{P1} = \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{a=1}^A [\Pi_i(t) + C_{ij}^{TP}(t) + C_{ij}^{Tex}(t)] \cdot X_{ij}(t), \quad (2)$$

где Π_i — закупочная цена за единицу лесного продукта у поставщика, p ; C_{ij}^{TP} — расходы, связанные с транспортировкой на единицу лесного продукта, p ; C_{ij}^{Tex} — расходы, связанные с применяемой производственной технологией на верхнем складе, на единицу лесного продукта, p ; t — временной интервал, $t \in \{0, \dots, T\}$; i — поставщик, $i \in \{1, \dots, m\}$; j — потребитель $j \in \{1, \dots, n\}$; a — применяемый на вывозке вид лесотранспорта, $a \in \{1, \dots, A\}$; X_{ij} — объем древесного сырья, транспортируемый от i -го поставщика j -му потребителю, m^3 .

Затраты, связанные с хранением объема нереализованного (либо реализованного не в нормативное время)

потребителю лесного продукта, включая потери прибыли поставщика в результате не реализации, определяются выражением (3):

$$Z_2^{P1} = \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [C_i^*(t) + \Pi_i \cdot \Delta t(t)] \cdot U_i(t), \quad (3)$$

где C_i^* — затраты, связанные с хранением древесного сырья у i -го поставщика, $p./m^3$; Π_i — потери прибыли поставщика в результате не реализации, $p./m^3$; Δt — временной интервал хранения, *дней*; U_i — количество древесного сырья (запас) у i -го поставщика, m^3 .

Затраты, связанные со сбоем в производственной программе у потребителя в результате недопоставки (либо поставки не в нормативное время) древесного сырья, определяются выражением (4):

$$Z_3^{P1} = \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{a=1}^A C_j^{**}(t) \cdot X_{ij}^*(t) \cdot \Delta t^*(t), \quad (4)$$

где C_j^{**} — потери, связанные со сбоем в производственной программе у j -го потребителя в результате недопоставки (либо поставки не в нормативное время) древесного сырья, p ; X_{ij}^* — объем недопоставки древесного сырья, m^3 , по видам лесотранспорта; Δt^* — временной интервал недопоставки древесного сырья j -му потребителю по видам лесотранспорта, *дни*.

2. *Вторая подсистема* представляет собой реализацию процесса транспортировки древесного сырья от верхнего склада на нижние склады предприятия, транспортировка лесного продукта потребителю осуществляется непосредственно с нижних складов.

Аналитическая формализация технологических отношений в данной подсистеме определяется выражением (5). Критерием оптимальности рассматриваемой подсистемы является минимизация суммарных затрат, связанных с транспортировкой древесного сырья как от верхнего склада до нижнего лесного склада, так и от нижнего склада потребителю:

$$F_2 = Z_1^{P2} + Z_2^{P2} + Z_3^{P2} + Z_4^{P2} \rightarrow \min, \quad (5)$$

где F_2 — суммарные затраты, связанные с транспортировкой древесного сырья как от верхнего склада на нижние склады предприятия, так и от нижних складов до потребителя, p ; Z_1^{P2} — затраты, связанные с транспортировкой древесного сырья с верхнего склада на нижний склад, p ; Z_2^{P2} — затраты, связанные с транспортировкой древесного сырья с нижнего склада до потребителя, p ; Z_3^{P2} — затраты, связанные с хранением объема нереализованного (либо реализованного не в нормативное время) потребителю лесного продукта, включая потери прибыли поставщика в результате не реализации, p ; Z_4^{P2} — затраты, связанные со сбоем в производственной программе у потребителя в результате недопоставки (либо поставки не в нормативное время) древесного сырья, p .

Следует отметить, что на нижнем складе присутствует сортировка по видам древесного сырья, поэтому требуется произвести учет многоассортиментности потока лесного продукта.

Затраты, связанные с транспортировкой древесного сырья с верхнего склада на нижний склад, рассчитываются согласно выражению (6):

$$Z_1^{P2} = \sum_{t=0}^T \sum_{n=1}^m \sum_{l=1}^n \sum_{a=1}^A [\Pi_l(t) + C_{лн}^{TP}(t) + C_{лн}^{Tex}(t) + C_l^*(t) + \Pi_l \cdot \Delta t(t)] \cdot X_{лн}(t), \quad (6)$$

где Π_l — закупочная цена за единицу лесного продукта, транспортируемого с l -го верхнего склада, $p.$; $C_{лн}^{TP}$ — расходы, связанные с транспортировкой на единицу лесного продукта, $p.$; $C_{лн}^{Tex}$ — расходы, связанные с применяемой производственной технологией на верхнем складе, на единицу лесного продукта, $p.$; $X_{лн}$ — объем древесного сырья, транспортируемый с l -го верхнего склада i -му нижнему складу, m^3 ; C_l^* — затраты, связанные с хранением древесного сырья на l -м верхнем складе, $p.$; Π_l — потери прибыли поставщика в результате не реализации, $p./m^3$; Δt — временной интервал хранения, *дней*.

Затраты, связанные с транспортировкой древесного сырья с нижнего склада до потребителя, рассчитываются согласно выражению (7):

$$Z_2^{P2} = \sum_{t=0}^T \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{a=1}^A \sum_{d=1}^D [\Pi_{ij}^{HK}(t) + C_{ij}^{TPHK}(t) + C_{ij}^{TexHK}(t)] \cdot X_{ij}^{HK}(t), \quad (7)$$

где Π_{ij}^{HK} — закупочная цена за единицу d -го вида лесного продукта, транспортируемого с i -го нижнего склада, $p.$; C_{ij}^{TPHK} — расходы, связанные с транспортировкой на единицу d -го вида лесного продукта с i -го нижнего склада, $p.$; C_{ij}^{TexHK} — расходы, связанные с применяемой производственной технологией на нижнем складе, на единицу d -го вида лесного продукта, $p.$; k — вид транспорта, в зависимости от технологической схемы вывозки, $k \in \{1, \dots, K\}$; d — вид лесного продукта, $d \in \{1, \dots, D\}$; X_{ij}^{HK} — объем древесного сырья, транспортируемый с i -го нижнего склада j -му потребителю, m^3 .

Затраты, связанные с хранением объема нереализованного (либо реализованного не в нормативное время) потребителю лесного продукта, рассчитываются согласно выражению (8):

$$Z_3^{P2} = \sum_{t=0}^T \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [C_i^{*K}(t) + \Pi_i^K \cdot \Delta t^K(t)] \cdot U_i^K(t), \quad (8)$$

где C_i^{*K} — затраты, связанные с хранением d -го вида древесного сырья на i -м нижнем складе, $p./m^3$; Π_i^K — потери прибыли i -го поставщика в результате нереализации d -го вида лесного продукта, $p./m^3$; Δt^K — временной интервал хранения d -го вида лесного продукта, *дней*; U_i^K — количество d -го вида древесного сырья (запас) у i -го поставщика, m^3 .

Затраты, связанные со сбоем в производственной программе у потребителя в результате недопоставки (либо поставки не в нормативное время) древесного сырья, определяются выражением (9):

$$Z_4^{P2} = \sum_{t=0}^T \sum_{k=1}^K \sum_{a=1}^A \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_j^{*dka}(t) \cdot X_{ij}^{*dka}(t) \cdot \Delta t^{*dka}(t), \quad (9)$$

где C_j^{*dka} — потери, связанные со сбоем в производственной программе у j -го потребителя в результате недопоставки (либо поставки не в нормативное время) d -

го вида древесного сырья, $p.$; X_{ij}^{*dka} — объем недопоставки d -го вида древесного сырья по видам лесотранспорта, m^3 ; Δt^{*dka} — временной интервал недопоставки d -го вида древесного сырья j -му потребителю по видам лесотранспорта, *дни*.

3. *Третья подсистема* представляет собой реализацию процесса транспортировки древесного сырья от верхнего склада на промежуточные (сезонные) склады предприятия. Транспортировка лесного продукта потребителю осуществляется непосредственно с промежуточных складов.

Аналитическая формализация технологических отношений в данной подсистеме определяется выражением (10). Критерием оптимальности рассматриваемой подсистемы является минимизация суммарных затрат, связанных с транспортировкой древесного сырья как от верхнего склада до промежуточного лесного склада, так и от промежуточного склада потребителю:

$$F_3 = Z_1^{P3} + Z_2^{P3} + Z_3^{P3} + Z_4^{P3} \rightarrow \min, \quad (10)$$

где F_3 — суммарные затраты, связанные с транспортировкой древесного сырья как от верхнего склада на промежуточные склады предприятия, так и от промежуточных складов до потребителя, $p.$; Z_1^{P3} — затраты, связанные с транспортировкой древесного сырья с верхнего склада на промежуточный склад, $p.$; Z_2^{P3} — затраты, связанные с транспортировкой древесного сырья с промежуточного склада до потребителя, $p.$; Z_3^{P3} — затраты, связанные с хранением объема нереализованного (либо реализованного не в нормативное время) потребителю лесного продукта, включая потери прибыли поставщика в результате не реализации, $p.$; Z_4^{P3} — затраты, связанные со сбоем в производственной программе у потребителя в результате недопоставки (либо поставки не в нормативное время) древесного сырья, $p.$

Следует отметить, что на промежуточном складе присутствует сортировка по видам древесного сырья, поэтому требуется произвести учет многоассортиментности потока лесного продукта.

Формула определения затрат, связанных с транспортировкой древесного сырья с верхнего склада на промежуточный склад, имеет следующий вид:

$$Z_1^{P3} = \sum_{t=0}^T \sum_{n=1}^m \sum_{l=1}^n \sum_{a=1}^A [\Pi_l(t) + C_{лп}^{TP}(t) + C_{лп}^{Tex}(t) + C_l^*(t) + \Pi_l \cdot \Delta t(t)] \cdot X_{лп}(t), \quad (11)$$

где Π_l — закупочная цена за единицу d -го вида лесного продукта, транспортируемого с i -го промежуточного склада, $p.$; $C_{лп}^{TP}$ — расходы, связанные с транспортировкой на единицу d -го вида лесного продукта с i -го промежуточного склада, $p.$; $C_{лп}^{Tex}$ — расходы, связанные с применяемой производственной технологией на промежуточном складе, на единицу d -го вида лесного продукта, $p.$; $X_{лп}$ — объем древесного сырья, транспортируемый с i -го промежуточного склада j -му потребителю, m^3 .

Затраты, связанные с транспортировкой древесного сырья с промежуточного склада до потребителя, рассчитываются согласно выражению (12):

$$Z_2^{P3} = \sum_{t=0}^T \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{a=1}^A \sum_{d=1}^D [\Pi_{ij}^{HK}(t) + C_{ij}^{TPHK}(t) + C_{ij}^{TexHK}(t)] \cdot X_{ij}^{HK}(t), \quad (12)$$

где $C_i^{пк}$ — закупочная цена за единицу d -го вида лесного продукта, транспортируемого с i -го промежуточного склада, p .; $C_{ij}^{тпк}$ — расходы, связанные с транспортировкой на единицу d -го вида лесного продукта с i -го промежуточного склада, p .; $C_{ij}^{тек}$ — расходы, связанные с применяемой производственной технологией на i -м промежуточном складе, на единицу d -го вида лесного продукта, p .; $X_{ij}^{пк}$ — объем древесного сырья, транспортируемый с i -го промежуточного склада j -му потребителю, m^3 .

Затраты, связанные с хранением объема нереализованного (либо реализованного не в нормативное время) потребителю лесного продукта, рассчитываются согласно выражению (13):

$$Z_3^{p3} = \sum_{t=0}^T \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [C_i^{**k}(t) + \Pi_i^{*k} \cdot \Delta t^{*k}(t)] \cdot U_i^{*k}(t), \quad (13)$$

где C_i^{**k} — затраты, связанные с хранением d -го вида древесного сырья на i -м промежуточном складе, $p./m^3$; Π_i^{*k} — потери прибыли i -го поставщика в результате не реализации d -го вида лесного продукта, $p./m^3$; Δt^{*k} — временной интервал хранения d -го вида лесного продукта, *дней*; U_i^{*k} — количество d -го вида древесного сырья (запас) у i -го поставщика, m^3 .

Затраты, связанные со сбоем в производственной программе у потребителя в результате недопоставки (либо поставки не в нормативное время) древесного сырья, определяются выражением (14):

$$Z_4^{p3} = \sum_{t=0}^T \sum_{k=1}^K \sum_{a=1}^A \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_j^{**dka}(t) \cdot X_{ij}^{**dka}(t) \cdot \Delta t^{**dka}(t), \quad (14)$$

где C_j^{**dka} — потери, связанные со сбоем в производственной программе у j -го потребителя в результате недопоставки (либо поставки не в нормативное время) d -го вида древесного сырья, p .; X_{ij}^{**dka} — объем недопоставки d -го вида древесного сырья по видам лесотранспорта, m^3 ; Δt^{**dka} — временной интервал недопоставки d -го вида древесного сырья j -му потребителю по видам лесотранспорта, *дни*.

3. *Четвертая подсистема* представляет собой реализацию процесса транспортировки древесного сырья от верхнего склада на промежуточные (сезонные) склады, затем на нижние склады предприятия. Транспортировка лесного продукта потребителю осуществляется непосредственно с нижних складов.

Аналитическая формализация технологических отношений в данной подсистеме определяется выражением (15). Критерием оптимальности рассматриваемой подсистемы является минимизация суммарных затрат, связанных с транспортировкой древесного сырья по схеме доставки «верхний склад — промежуточный (сезонный) склад — нижний склад — потребитель»:

$$F_4 = Z_1^{p2} + Z_2^{p4} + Z_3^{p4} + Z_4^{p4} + Z_2^{p3} + Z_3^{p3} + Z_4^{p3} \rightarrow \min, \quad (15)$$

где F_4 — суммарные затраты, связанные с транспортировкой древесного сырья по схеме доставки «верхний склад — промежуточный (сезонный) склад — нижний склад — потребитель», p .; Z_2^{p4} — затраты, связанные с

транспортировкой d -х видов древесного сырья с нижнего склада до промежуточного (сезонного) склада; Z_3^{p4} — затраты, связанные с хранением объема нереализованного (либо реализованного не в нормативное время) потребителю лесного продукта, включая потери прибыли поставщика в результате не реализации по d -м видам лесного продукта; Z_4^{p4} — затраты, связанные со сбоем в производственной программе у потребителя в результате недопоставки (либо поставки не в нормативное время) d -х видов древесного сырья, p . Отмеченные показатели, соответственно, рассчитываются аналогично выражениям (8) – (9), с той разницей, что к расчету принимается время хранения и запаздывания при доставке на промежуточный склад.

В общем виде авторскую оптимизационную модель процесса транспортировки древесного сырья в смешанном сообщении можно представить выражением (16):

$$\begin{aligned} F_{\text{общ}} = & \\ F_1 = & Z_1^{p1} + Z_2^{p1} + Z_3^{p1} \\ F_2 = & Z_1^{p2} + Z_2^{p2} + Z_3^{p2} + Z_4^{p2} \\ F_3 = & Z_1^{p3} + Z_2^{p3} + Z_3^{p3} + Z_4^{p3} \\ \left(F_4 = & Z_1^{p4} + Z_2^{p4} + Z_3^{p4} + Z_4^{p4} + Z_2^{p3} + Z_3^{p3} + Z_4^{p3} \right) \rightarrow \min \end{aligned} \quad (16)$$

Предлагаемая оптимизационная модель реализуется при перечисленных ниже ограничениях:

1. Статического баланса между покупательской способностью потребителей и производственными мощностями поставщиков с учетом складирования:

$$\sum_{t=0}^T \sum_{k=1}^K \sum_{a=1}^A \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^m \sum_{l=1}^L a_{ildka}(t) = \sum_{t=0}^T \sum_{j=1}^n \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^m d_{jida}(t) \quad (17)$$

где a_{ildka} — объем поставки d -го вида продукции с l -й лесосеки i -го поставщика на r -й склад k -м видом, a -м типом транспорта, в период времени t , m^3 ; $b_{jakra}(t)$ — объем потребления d -го вида продукции у j -го потребителя при доставке на склад k -м видом, a -м типом транспорта с r -го склада, в период времени t , m^3 ; $d_{jidr}(t)$ — объем переработки запаса по D видам продукции (емкость) r -го склада в период времени t , m^3 .

2. Динамической связи поставщиков, складов и потребителей:

$$\begin{aligned} X'_{idkal}(t) &= X''_{idr}(t + t_{ir}) = X'''_{ijdr}((t + t_{ir}) + t_{ijr}) \\ &= X''''_{jakra}(((t + t_{ir}) + t_{ijr}) + t_{jkr}) \\ i &= 1, \dots, m; j = 1, \dots, n; t = 0, \dots, T; r = \\ &1, \dots, R; k = 1, \dots, K; \\ a &= 1, \dots, A; d = 1, \dots, D; l = 1, \dots, L. \end{aligned} \quad (18)$$

где X'_{idkal} — объем d -го вида продукции, отправленный на склад в период времени t , m^3 ; X''_{idr} — объем d -го вида продукции, прибывший на склад в период времени $(t + t_{ir})$, m^3 ; X'''_{ijdr} — объем d -го вида продукции, переработанный складом в период времени $((t + t_{ir}) + t_{ijr})$, m^3 ; X''''_{jakra} — объем d -го вида продукции, прибывший потребителю с лесного склада в период времени $((t + t_{ir}) + t_{ijr}) + t_{jkr}$, m^3 ; t_{ir} — нормативное время доставки на

лесной склад, *дней*; t_{ijr} — нормативное время складской обработки, *дней*; t_{jkr} — нормативное время транспортировки лесного продукта до потребителя, *дней*.

3. Динамической взаимозависимости между запасами потребителей и поставщиков:

$$U_i(t+1) = U_i(t) + \sum_{k=1}^K \sum_{a=1}^A \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^m \sum_{l=1}^L X_{ildka}(t) - \sum_{k=1}^K \sum_{a=1}^A \sum_{d=1}^D \sum_{j=1}^n \sum_{r=1}^R b_{jdark}(t), \quad (19)$$

где U_i — общий объем по D видам продукции поставщика, *производственная возможность*; X_{ildka} — объем d -го вида продукции, прибывающего от поставщика на лесной склад, m^3 .

4. Динамического баланса между покупательской способностью потребителей и производственными мощностями поставщиков с учетом складирования:

$$\sum_{t=0}^t \sum_{k=1}^K \sum_{a=1}^A \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^m \sum_{l=1}^L a_{ildka}(t) = \sum_{t=0}^{((t+t_{ir})+t_{ijr})} \sum_{j=1}^n \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^m \sum_{r=1}^R d_{jidr}(t) = \sum_{t=0}^{(((t+t_{ir})+t_{ijr})+t_{jkr})} \sum_{k=1}^K \sum_{a=1}^A \sum_{d=1}^D \sum_{j=1}^n \sum_{r=1}^R b_{jdark}(t). \quad (20)$$

5. Необходимости принятия не отрицательности величин грузопотоков и запасов:

$$\begin{aligned} X_{ildka}(t) &\geq 0; X'_{idkat}(t) \geq 0 \\ X''_{idr}(t+t_{ir}) &\geq 0 \\ X'''_{ijdr}((t+t_{ir})+t_{ijr}) &\geq 0 \\ X''''_{jdark}(((t+t_{ir})+t_{ijr})+t_{jkr}) &\geq 0 \\ U_i(t) &\geq 0; i \geq 0; t \geq 0; j \geq 0; l \geq 0; r \geq 0; d \geq 0; k \geq 0; a \geq 0 \end{aligned} \quad (21)$$

6. Ограничения транспортных мощностей:

$$\sum_{t=0}^T \sum_{k=1}^K \sum_{a=1}^A \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^m \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^n \sum_{r=1}^R X_{ijtrdka}(t) \geq P_{ka}(t), \quad (22)$$

где $P_{ka}(t)$ — мощность вида и типа лесотранспорта.

При ограничении транспортных мощностей вид приоритетного транспорта леса определяется посредством коэффициента, согласно выражению (23):

$$k_{\text{приор}} = \frac{k_{\text{ср}}}{k_{\text{max}}} \cdot \frac{Q_{\text{ср}}}{Q_{\text{max}}}, \quad (23)$$

где $k_{\text{ср}}$ — средняя цена транспортировки единицы древесного сырья k -м видом лесотранспорта, p ; k_{max} — максимальная цена транспортировки единицы древесного сырья k -м видом лесотранспорта, p ; $Q_{\text{ср}}$ — средний объем древесного сырья, транспортируемый k -м видом лесотранспорта, m^3 ; Q_{max} — максимальный объем древесного сырья, транспортируемый k -м видом лесотранспорта.

7. Эффективного плеча вывозки древесного сырья:

$$L_{ij} \leq L_{\text{дост}}, \quad (24)$$

где L_{ij} — расстояние между l -й лесосекой, i -м поставщиком, r -м лесным складом и j -м потребителем, $км$. Также данное ограничение можно обозначить как учет в предлагаемой модели уровня развития лесотранспортной сети, посредством которого обеспечивается транспортная доступность мест заготовки древесного сырья.

Реализация оптимизационных расчетов посредством разработанной оптимизационной модели производится в два этапа. На первом этапе определяется приоритетный вид лесотранспорта и осуществляется планирование процесса транспортировки при использовании отмеченного транспорта леса. Второй этап реализации оптимизационных расчетов заключается в составлении опорных планов транспортировки древесного сырья при использовании других видов подвижного состава.

Следует отметить, что в практике решения подобных производственных задач равенство спроса, предложения и пропускной способности лесных складов в текущий временной период встречается крайне редко. В этой связи разработанная оптимизационная модель имеет ряд дополнительных ограничений, связанных с невыполнением условия динамического баланса (20):

1. Условие, при котором спрос на древесное сырье превышает предложение при равенстве предложению пропускной способности склада (дефицит):

$$\sum_{t=0}^t \sum_{k=1}^K \sum_{a=1}^A \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^m \sum_{l=1}^L a_{ildka}(t) = \sum_{t=0}^{((t+t_{ir})+t_{ijr})} \sum_{j=1}^n \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^m \sum_{r=1}^R d_{jidr}(t) \leq \sum_{t=0}^{(((t+t_{ir})+t_{ijr})+t_{jkr})} \sum_{k=1}^K \sum_{a=1}^A \sum_{d=1}^D \sum_{j=1}^n \sum_{r=1}^R b_{jdark}(t). \quad (25)$$

В данном случае обозначается необходимость наращивания производственных мощностей и емкости лесных складов.

2. Условие, при котором предложение на древесное сырье превышает спрос (профицит), а также предложение превышает пропускную способность лесных складов (пропускная способность складов равна спросу):

$$\sum_{t=0}^t \sum_{k=1}^K \sum_{a=1}^A \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^m \sum_{l=1}^L a_{ildka}(t) \geq \sum_{t=0}^{((t+t_{ir})+t_{ijr})} \sum_{j=1}^n \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^m \sum_{r=1}^R d_{jidr}(t) = \sum_{t=0}^{(((t+t_{ir})+t_{ijr})+t_{jkr})} \sum_{k=1}^K \sum_{a=1}^A \sum_{d=1}^D \sum_{j=1}^n \sum_{r=1}^R b_{jdark}(t). \quad (26)$$

В данном случае обозначается необходимость либо поиска дополнительного рынка сбыта лесопroduкции, либо сокращения производственных мощностей.

3. Условие превышения пропускной способности складов над предложением:

$$\sum_{t=0}^t \sum_{k=1}^K \sum_{a=1}^A \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^m \sum_{l=1}^L a_{ildka}(t) \leq \sum_{t=0}^{((t+t_{ir})+t_{ijr})} \sum_{j=1}^n \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^m \sum_{r=1}^R d_{jidr}(t) = \sum_{t=0}^{(((t+t_{ir})+t_{ijr})+t_{jkr})} \sum_{k=1}^K \sum_{a=1}^A \sum_{d=1}^D \sum_{j=1}^n \sum_{r=1}^R b_{jdark}(t). \quad (27)$$

В данном случае обозначается необходимость сокращения емкости лесных складов, если спрос равен предложению. Если же спрос превышает предложение, то существует потребность в наращивании производственных мощностей.

4. Условие превышения пропускной способности складов над спросом:

$$\sum_{t=0}^t \sum_{k=1}^K \sum_{a=1}^A \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^m \sum_{l=1}^L a_{ildka}(t) = \sum_{t=0}^{((t+t_{ir})+t_{ijr})} \sum_{j=1}^n \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^m \sum_{r=1}^R d_{jidr}(t) \geq$$

$$\sum_{t=0}^{((t+t_{ir})+t_{ijr})+t_{jkr}} \sum_{k=1}^K \sum_{a=1}^A \sum_{d=1}^D \sum_{j=1}^n \sum_{r=1}^R b_{jdkar}(t). \quad (28)$$

В данном случае обозначается необходимость поиска дополнительного рынка сбыта лесного продукта либо сокращения производства и емкости лесных складов.

5. Условие превышения пропускной способности складов над спросом и превышения предложения над данной способностью (условия глобального перепроизводства):

$$\begin{aligned} \sum_{t=0}^t \sum_{k=1}^K \sum_{a=1}^A \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^m \sum_{l=1}^L a_{ildka}(t) &\geq \\ \sum_{t=0}^{((t+t_{ir})+t_{ijr})} \sum_{j=1}^n \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^m \sum_{r=1}^R d_{jidr}(t) &\geq \\ \sum_{t=0}^{((t+t_{ir})+t_{ijr})+t_{jkr}} \sum_{k=1}^K \sum_{a=1}^A \sum_{d=1}^D \sum_{j=1}^n \sum_{r=1}^R b_{jdkar}(t). &\quad (29) \end{aligned}$$

В данном случае обозначается необходимость принятия инженерно-управленческих решений, аналогичная выражению (29).

6. Условие превышения спроса над пропускной способностью складов и превышения данной способности над предложением (условие глобального дефицита):

$$\begin{aligned} \sum_{t=0}^t \sum_{k=1}^K \sum_{a=1}^A \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^m \sum_{l=1}^L a_{ildka}(t) &\leq \\ \sum_{t=0}^{((t+t_{ir})+t_{ijr})} \sum_{j=1}^n \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^m \sum_{r=1}^R d_{jidr}(t) &\leq \\ \sum_{t=0}^{((t+t_{ir})+t_{ijr})+t_{jkr}} \sum_{k=1}^K \sum_{a=1}^A \sum_{d=1}^D \sum_{j=1}^n \sum_{r=1}^R b_{jdkar}(t). &\quad (30) \end{aligned}$$

В данном случае обозначается необходимость принятия инженерно-управленческих решений, аналогичная выражению (28).

7. Условие превышения пропускной способности складов над спросом и предложением:

$$\begin{aligned} \sum_{t=0}^t \sum_{k=1}^K \sum_{a=1}^A \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^m \sum_{l=1}^L a_{ildka}(t) &\leq \\ \sum_{t=0}^{((t+t_{ir})+t_{ijr})} \sum_{j=1}^n \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^m \sum_{r=1}^R d_{jidr}(t) &\geq \\ \sum_{t=0}^{((t+t_{ir})+t_{ijr})+t_{jkr}} \sum_{k=1}^K \sum_{a=1}^A \sum_{d=1}^D \sum_{j=1}^n \sum_{r=1}^R b_{jdkar}(t). &\quad (34) \end{aligned}$$

Определяется потребность в снижении емкости лесных складов.

Литература

- Иванов С.В., Никитин С.И. Двухкомпонентная логистическая модель интегральной транспортной задачи // Техника - технологические проблемы сервиса. 2010. № 2 (12). С. 66-76.
- Стороженко С.С. Повышение эффективности транспортно-технологического процесса лесопромышленных предприятий на базе логистико - математических моделей: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2003. 210 с.
- Гнедаш М.А. Выбор рациональных способов перевозки бытовой техники железнодорожным транспортом: дис. ... канд. техн. наук. Липецк, 2006. 275 с.
- Воронина Е.А. Экономическая оценка условий вертикальной интеграции лесозаготовок с лесопилением (на примере Красноярского края): дис. ... канд. экон. наук. Красноярск, 2002. 170 с.
- Винокурова О.А. Совершенствование организации перевозок и работы судов смешанного «река-море» плавания: дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2007. 137 с.

8. Условие превышения спроса и предложения над пропускной способностью складов:

$$\begin{aligned} \sum_{t=0}^t \sum_{k=1}^K \sum_{a=1}^A \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^m \sum_{l=1}^L a_{ildka}(t) &\geq \\ \sum_{t=0}^{((t+t_{ir})+t_{ijr})} \sum_{j=1}^n \sum_{d=1}^D \sum_{i=1}^m \sum_{r=1}^R d_{jidr}(t) &\leq \\ \sum_{t=0}^{((t+t_{ir})+t_{ijr})+t_{jkr}} \sum_{k=1}^K \sum_{a=1}^A \sum_{d=1}^D \sum_{j=1}^n \sum_{r=1}^R b_{jdkar}(t). &\quad (31) \end{aligned}$$

Определяется потребность в повышении емкости лесных складов.

Разработанная модель является модификацией динамической транспортной задачи с задержками, критерием оптимальности которой является снижение временных и финансовых затрат при осуществлении перевозок древесного сырья в смешанном сообщении.

Выводы.

1. Преимущества предлагаемой авторами оптимизационной математической модели заключаются в возможности применения модели при поквартальном и помесячном планировании поставок древесного сырья в смешанном сообщении; в универсальности, гибкости и доступности получения экспериментальных данных; в учете издержек, связанных с перегрузкой древесины с одного вида транспорта на другой и хранением древесины на лесных складах. Модель также обеспечивает учет ущерба от недопоставки древесного сырья по предприятиям-потребителям и потери дохода предприятий-поставщиков в результате не реализации древесины потребителю в отчетный временной интервал.

2. Предлагаемая оптимизационная модель позволяет реализовать выбор рационального маршрута поставки древесины; определить оптимальные объемы поставки в отчетный временной интервал; осуществить выбор лесосечного фонда и потребителей. Отмеченные возможности предлагаемой модели обеспечивают снижение транспортных издержек и позволяют определить оптимальный план поставок древесного сырья с учетом использования преимуществ различных видов транспорта леса.

Часть материалов исследования получена за счет гранта Российского научного фонда № 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

- Клепиков В.П. Методология комплексного развития транспортных систем в проектах взаимодействия железнодорожного и морского транспорта: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2007. 352 с.
- Григорьева О.И. Эффективность транспортно-технологических систем для лесного хозяйства // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Международ. науч.-технической конф. (19 апр. 2018 г.). Тюмень, 2018. С. 79-83.
- Егоров А.Б. Инновационные подходы к оптимизации перевозки нефти нефтепродуктов в смешанном сообщении: дис. ... канд. техн. наук. М., 2005. 160 с.
- Горяинов А.Н., Несмеянов К.В. Транспортное обслуживание логистической системы города с использованием трамвайно-автомобильного сообщения // Cyberleninka.ru. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/transportnoe-obsluzhivanie-logisticheskoy-sistemy-goroda-s-ispolzovaniem-tramvayno-avtomobilnogo-soobshcheniya/viewer> (дата обращения: 16.09.2023).

10. Куницкая О.А., Давтян А.Б., Помигуев А.В. Транспортно-технологические комплексы для производства топливной щепы // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Междунар. науч.-технической конф. (15 апр. 2021 г.). Тюмень, 2021. С. 141-144.
11. Куницкая О.А., Степанова Д.И., Григорьев М.Ф. Транспортно-технологические системы для сбора и переработки пищевой продукции леса // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: материалы междунар. науч.-практической конф. (6-7 июня 2018 г.). Воронеж, 2018. С. 102-108.
12. Зорин М.В., Куницкая О.А. Типы современных пластиковых плит для строительства временных лесных дорог и технологических коридоров // Деревянное домостроение Севера: традиции и инновации: сб. ст. по материалам Всерос. науч.-практической конф. (14-15 февр. 2023 г.). Петрозаводск, 2023. С. 28-30.
13. Зорин М.В., Куницкая О.А. Инновационные методы строительства лесных дорог // Инновации в химико-лесном комплексе: тенденции и перспективы развития: материалы Всерос. науч.-практической конф. (6-7 июня 2022 г.). Красноярск, 2022. С. 84-87.
14. Зорин М.В., Куницкая О.А. Современные сборно-разборные покрытия для строительства временных лесных дорог и технологических коридоров // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: материалы 86-й науч.-технической конф. проф. - препод. состава, науч. сотрудников и аспирантов (31 янв. - 12 февр. 2022 г.). Минск, 2022. С. 54-57.
15. Куницкая О.А., Рудов С.Е., Зорин М.В. Перспективы использования пластиковых плит строительства временных транспортных путей // Машиностроение: новые концепции и технологии: материалы Всерос. науч.-практической конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (23 окт. 2020 г.). Красноярск, 2020. С. 98-103.
16. Злобина Н.И., Зеликов В.А., Зорин М.В., Григорьева О.И., Гурьев А.Ю. Обоснование экономической эффективности безопасности дорожного движения на лесовозных автомобильных дорогах // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2023. № 1. С. 44-51.
17. Злобина Н.И., Зеликов В.А., Григорьева О.И., Новгородов Д.В. Экспериментальное обоснование выбора скорости движения по лесовозной дороге в качестве показателя безопасности дорожного движения // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2022. № 6. С. 27-42.
18. Злобина Н.И., Зеликов В.А., Григорьева О.И., Гурьев А.Ю. Определение пропускной способности лесовозных автомобильных дорог эмпирическим путем с учетом безопасности дорожного движения // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2022. № 5. С. 38-65.
19. Злобина Н.И., Зеликов В.А., Григорьева О.И., Новгородов Д.В. Обоснование пропускной способности по критерию безопасности дорожного движения на лесовозных автомобильных дорогах // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах. 2022. № 4. С. 19-35.
20. Skrypnikov A.V., Dorokhin S.V., Kozlov V.G., Chernyshova E.V. Mathematical model of statistical identification of car transport informational provision // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. V. 12. № 2. P. 511-515.
21. Nikitin V.V., Skrypnikov A.V., Bryukhovetsky A.N., Vysotskaya I.A., Sapelkin R.S., Kozlov V.G., Manukovsky A.Yu. A linear model of the forest transport network and an algorithm for assessing the influence of the density of points and the length of links in developing multi-forested areas // International Journal of Engineering Trends and Technology. 2021. V. 69. № 12. P. 175-178.
22. Ryabova O.V., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Tikhomirov P.V. Studying a geographical environment for road design // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2021. № 1 (49). P. 66-78.
23. Borovlev A.O., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Teterevleva E.V., Burmistrov V.A., Mikheevskaya M.A., Chemshikova Y.M. Algorithm for determining the curvature of the project line of a truck haul road and the rate of change in its curvature // Civil Engineering and Architecture. 2021. V. 9. № 5. P. 1582-1589.
24. Skrypnikov A.V., Mogutnov R.V., Kozlov V.G., Zelikov V.A., Tikhomirov P.V., Levushkin D.M., Nikitin V.V., Sokol P.A. Feasibility study of geometrical parameters of wood transportation roads including prediction of optimum terms of construction and retrofitting sequence // Civil Engineering and Architecture. 2021. V. 9. № 6. P. 2077-2083.

References

1. Ivanov S.V., Nikitin S.I. Two-component logistic model of an integral transport problem // Tekhniko - tekhnologicheskie problemy servisa. 2010. № 2 (12). P. 66-76.
2. Storozhenko S.S. Improving the efficiency of the transport and technological process of timber enterprises on the basis of logistics-thematic models: dis. ... kand. tekhn. nauk. SPb., 2003. 210 p.
3. Gnedash M.A. The choice of rational ways of transporting household appliances by rail transport: dis. ... kand. tekhn. nauk. Lipeck, 2006. 275 p.
4. Voronina E.A. Economic assessment of the conditions of vertical integration of logging with logging (on the example of the Krasnoyarsk Territory): dis. ... kand. ekon. nauk. Krasnoyarsk, 2002. 170 p.
5. Vinokurova O.A. Improving the organization of transportation and operation of vessels of mixed "river-sea" navigation: dis. ... kand. tekhn. nauk. Novosibirsk, 2007. 137 p.
6. Klepikov V.P. Methodology of complex development of transport systems in projects of interaction of railway and sea transport: dis. ... d-ra tekhn. nauk. M., 2007. 352 p.
7. Grigor'eva O.I. Efficiency of transport-technological systems for forestry // Transportnye i transportno-tekhnologicheskie sistemy: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoy konf. (19 apr. 2018 g.). Tyumen', 2018. P. 79-83.
8. Egorov A.B. Innovative approaches to optimization of oil transportation of petroleum products in mixed communication: dis. ... kand. tekhn. nauk. M., 2005. 160 p.
9. Goryainov A.N., Nesmeyanov K.V. Transport service of the logistics system of the city with the use of tram-automobile communication [Electronic resource] // Syberleninka.ru. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/transportnoe-obszluzhivanie-logisticheskoy-sistemy-goroda-s-ispolzovaniem-tramvayno-avtomobilnogo-soobscheniya/viewer> (data obrashcheniya: 16.09.2023).
10. Kunickaya O.A., Davtyan A.B., Pomiguyev A.V. Transport-technological complexes for the production of fuel chips // Transportnye i transportno-tekhnologicheskie sistemy: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoy konf. (15 apr. 2021 g.). Tyumen', 2021. P. 141-144.
11. Kunickaya O.A., Stepanova D.I., Grigor'ev M.F. Transport and technological systems for the collection and processing of forest food products // Energoeffektivnost' i energosberezhenie v sovremennom proizvodstve i obshchestve: materialy mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. (6-7 iyunya 2018 g.). Voronezh, 2018. P. 102-108.
12. Zorin M.V., Kunickaya O.A. Types of modern plastic plates for the construction of temporary forest roads and technological corridors // Derevyannoe domostroenie Severa: tradicii i innovacii: sb. st. po materialam vseros. nauch.-prakticheskoy konf. (14-15 февр. 2023 г.). Petrozavodsk, 2023. P. 28-30.

13. Zorin M.V., Kunickaya O.A. Innovative methods of construction of forest roads // *Innovacii v himiko-lesnom komplekse: tendencii i perspektivy razvitiya: materialy Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. (6-7 iyunya 2022 g.)*. Krasnoyarsk, 2022. P. 84-87.
14. Zorin M.V., Kunickaya O.A. Modern collapsible coatings for the construction of temporary forest roads and technological corridors // *Lesnaya inzheneriya, materialovedenie i dizajn: materialy 86-j nauch.-tekhnicheskoy konf. prof. - prepod. sostava, nauch. sotrudnikov i aspirantov (31 yanv. - 12 fevr. 2022 g.)*. Minsk, 2022. P. 54-57.
15. Kunickaya O.A., Rudov S.E., Zorin M.V. Prospects for the use of plastic plates for the construction of temporary transport routes: *novye koncepcii i tekhnologii: materialy Vseros. nauch.-prakticheskaya konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenyh (23 okt. 2020 g.)*. Krasnoyarsk, 2020. P. 98-103.
16. Zlobina N.I., Zelikov V.A., Zorin M.V., Grigor'eva O.I., Gur'ev A.YU. Justification of the economic efficiency of road safety on logging highways // *Safety and labor protection in logging and woodworking industries*. 2023. № 1. P. 44-51.
17. Zlobina N.I., Zelikov V.A., Grigor'eva O.I., Novgorodov D.V. Experimental substantiation of the choice of speed on a logging road as an indicator of road safety // *Safety and labor protection in logging and woodworking industries*. 2022. № 6. P. 27-42.
18. Zlobina N.I., Zelikov V.A., Grigor'eva O.I., Gur'ev A.YU. Determination of the capacity of logging roads empirically taking into account road safety // *Safety and labor protection in logging and woodworking industries*. 2022. № 5. P. 38-65.
19. Zlobina N.I., Zelikov V.A., Grigor'eva O.I., Novgorodov D.V. Justification of throughput capacity according to the criterion of road traffic safety on logging highways // *Safety and labor protection in logging and woodworking industries*. 2022. № 4. P. 19-35.
20. Skrypnikov A.V., Dorokhin S.V., Kozlov V.G., Chernyshova E.V. Mathematical model of statistical identification of car transport informational provision // *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017. V. 12. № 2. P. 511-515.
21. Nikitin V.V., Skrypnikov A.V., Bryukhovetsky A.N., Vysotskaya I.A., Sapelkin R.S., Kozlov V.G., Manukovsky A.Yu. A linear model of the forest transport network and an algorithm for assessing the influence of the density of points and the length of links in developing multi-forested areas // *International Journal of Engineering Trends and Technology*. 2021. V. 69. № 12. P. 175-178.
22. Ryabova O.V., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Tikhomirov P.V. Studying a geographical environment for road design // *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2021. № 1 (49). P. 66-78.
23. Borovlev A.O., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Terevleva E.V., Burmistrov V.A., Mikheevskaya M.A., Chemshikova Y.M. Algorithm for determining the curvature of the project line of a truck haul road and the rate of change in its curvature // *Civil Engineering and Architecture*. 2021. V. 9. № 5. P. 1582-1589.
24. Skrypnikov A.V., Mogutnov R.V., Kozlov V.G., Zelikov V.A., Tikhomirov P.V., Levushkin D.M., Nikitin V.V., Sokol P.A. Feasibility study of geometrical parameters of wood transportation roads including prediction of optimum terms of construction and retrofitting sequence // *Civil Engineering and Architecture*. 2021. V. 9. № 6. P. 2077-2083.