



ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

УДК 630*311+519.1

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.94

**ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ
ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ РАБОТ
ПУТЕМ СОЗДАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ**

*К.П. Рукомойников¹, д-р техн. наук, доц.; ResearcherID: N-6961-2019,
ORCID: 0000-0002-9956-5081*

*А.П. Мохирев², канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: N-9961-2019,
ORCID: 0000-0002-1692-3323*

¹Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, Россия, 424000; e-mail: rukomojnikovkp@volgatech.net

²Лесосибирский филиал Сибирского государственного университета им. академика М.Ф. Решетнева, ул. Победы, д. 29, г. Лесосибирск, Красноярский край, Россия, 662543; e-mail: ale-mokhirev@yandex.ru

В ходе лесозаготовительного процесса технологическую схему возможно выстроить, используя разные варианты. При транспортировке древесины с лесосеки на разных этапах применяется водный или сухопутный транспорт в разное время года. Наличие лесных складов и обработка на них древесины также увеличивают многовариантность технологического процесса. Выполнение операций в различных природно-производственных условиях отличается производительностью и материальными затратами. Эффективность производства зависит от эффективного обоснования технологии реализации лесозаготовительных операций с учетом динамических природно-производственных условий функционирования предприятия. Цель исследования – совершенствование технологической схемы транспортных, погрузочно-разгрузочных и обрабатывающих операций лесозаготовительного процесса в динамических природно-производственных условиях. Решение поставленной задачи предложено выполнить с использованием графоаналитического моделирования. Переменные и постоянные материальные затраты на выполнение отдельных операций технологического процесса являются определяющими факторами при выборе технологической цепочки в динамических природно-производственных условиях. Разработаны подробные графические модели транспортировки древесины от лесосеки до потребителя, погрузочно-разгрузочных и обрабатывающих операций, проходящих на промежуточном и нижнем лесных складах. Показаны возможные варианты технологической цепочки лесозаготовительного процесса. В качестве одного из видов ограничений, накладываемых на поток, протекающий по дугам графа, используются возможные объемы заготовки древесины на лесосеках и реализации продукции потребителям. Предложены математические зависимости, позволяющие осуществить поиск максимального потока минимальной стоимости в динамической структуре технологического процесса выполнения работ на предприятии. Они определяют условия решения поставленной задачи. Предложенная графоаналитическая модель даст возможность осуществить аналитический подход к обоснованию: последовательности транспортировки древесины с лесосек; использования в лесозаготовительном процессе лесных складов, рейдов; применения погрузочно-разгрузочных работ, обрабатывающих операций, вида транспорта; выбора потребителя и вида конечной товарной продукции в динамических природно-производственных условиях работы предприятия. Отличи-

тельной характеристикой модели является ее функционирование на основе учета производительности и трудозатрат, предложенных в качестве пропускных способностей дуг графа.

Для цитирования: Рукомойников К.П., Мохирев А.П. Обоснование технологической схемы лесозаготовительных работ путем создания динамической модели функционирования предприятия // Лесн. журн. 2019. № 4. С. 94–107. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.94

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта «Исследование и моделирование процессов развития экономики лесной промышленности региона в контексте природно-климатических условий и ресурсного потенциала», № 18-410-240003.

Ключевые слова: транспортировка древесины, графоаналитическая модель, технологический процесс, технологическая схема, динамические условия, сезон транспортировки древесины.

Введение

В последние годы вывозка древесины с лесосек до потребителя отличается многовариантностью технологического процесса с применением лесных складов. Большая их часть используется для хранения древесины между транспортными сезонами [23].

Перевалочные лесные склады организуются на границах между более дешевым и дорогим видом транспорта, промежуточные – на границах между временными и круглогодичными лесовозными дорогами для повышения пропускной способности дорог сезонного действия и круглогодичного использования имеющегося лесовозного автопарка. Для перевалки с автомобильного сухопутного транспорта на водный или железнодорожный организуют нижние береговые или прирельсовые лесные склады, которые при применении на складах операций по обработке древесины являются перевалочно-разделочными. На них доставляется древесина в виде деревьев или хлыстов, обрезка сучьев и раскряжевка производятся на складе.

От наличия и местоположения транспортно-складских и обрабатывающих операций зависят структура технологической схемы, система машин и оборудования [10], а значит и техническая, технологическая и транспортная доступность лесных ресурсов [20].

Для обеспечения возможности эффективного использования временных лесовозных дорог небольшой пропускной способности следует взвешенно подходить к выбору технологической схемы лесозаготовительных работ [5, 6, 14, 22].

Из вышесказанного можно сделать вывод, что при организации транспортировки древесины от лесосеки до потребителя возникают инженерные задачи с разными вариантами их решения: очередности вывозки древесины с различных лесосек; применения или не применения складов; выбора вида транспорта (автомобильный, водный, железнодорожный); выбора технологической схемы транспортно-складских и обрабатывающих операций; выбора времени года для выполнения определенных технологических операций; выбора товарной продукции для реализации потребителю; выбора потребителя.

Существуют исследования по обоснованию сквозных потоков заготовки, транспортировки и переработки древесины на основе математических моделей, выполненные И.Р. Шегельманом [9, 11]. Использование графоаналитических моделей, предусматривающих построение связей между операциями, позволяет воспринимать технологическую схему отдельных видов работ в

виде логической последовательности, исключает дублирование отдельных технологических элементов, дает возможность оценивать различные системы машин и структуру потоков производства в разнообразных технологических процессах лесных работ [8].

Однако эти исследования не предусматривают возможности их использования для моделирования технологической схемы в динамических условиях, отличающихся необходимостью учета природно-производственных особенностей при транспортировке древесины с лесосеки потребителю.

Методы обоснования нахождения кратчайших путей между вершинами графа описаны в исследованиях Мура [21], Флойда [16], Дейкстры [15], Беллмана [12] и др. Они позволяют осуществить анализ статических элементов работы предприятий и служат базой для реализации стационарно-динамических задач потокового программирования при рационализации потоков в транспортных системах [1–4, 19]. Для решения подобных задач может быть использован симплекс-метод линейного программирования [18].

Перечисленные выше методики и алгоритмы могут применяться в процессе рассмотрения операций технологического процесса лесозаготовительных работ в динамике при представлении их в виде «растянутых во времени графов». Данные исследования достаточно подробно демонстрируют принципиальные схемы и возможности анализа операционной сети. Однако они характеризуют возможность прохождения по дугам каждого временного интервала лишь одного варианта потока и не учитывают специфику лесозаготовительной отрасли, предусматривающую при обосновании графика технологического процесса лесозаготовительных работ необходимость комплексного решения задач разработки нескольких лесосек в течение одного временного диапазона. Ввиду этого они не всегда могут быть использованы при решении вопросов обоснования технологической цепочки ведения работ на лесопромышленных предприятиях.

В условиях необходимости реализации подобного комплексного анализа становится очевидным, что задействование машин и механизмов при выполнении работ на одном из участков лесозаготовительного предприятия сокращает ресурсы их возможного применения в ходе выполнения одноименных операций на территории другого участка в принятом для анализа временном интервале. Отмеченные исследования, предусматривающие теоретическую возможность прохождения нескольких потоков по одноименным операциям технологического процесса каждого анализируемого периода, предоставляют ученому возможность анализа лишь графов с независимыми друг от друга пропускными способностями отдельных параллельных дуг анализируемых временных интервалов.

Цель исследования – совершенствование технологической схемы транспортных, погрузочно-разгрузочных и обрабатывающих операций лесозаготовительного процесса в динамических природно-производственных условиях с использованием разрабатываемой графоаналитической модели.

Объекты и методы исследования

С учетом разнообразия существующих вариантов технологического процесса транспортно-складских работ возможно их представление в виде графа. На рис. 1 предложен граф, характеризующий технологический процесс транспортировки древесины от лесосеки до потребителя(ей) с выполнением всех погрузочно-разгрузочных, сплочных работ.

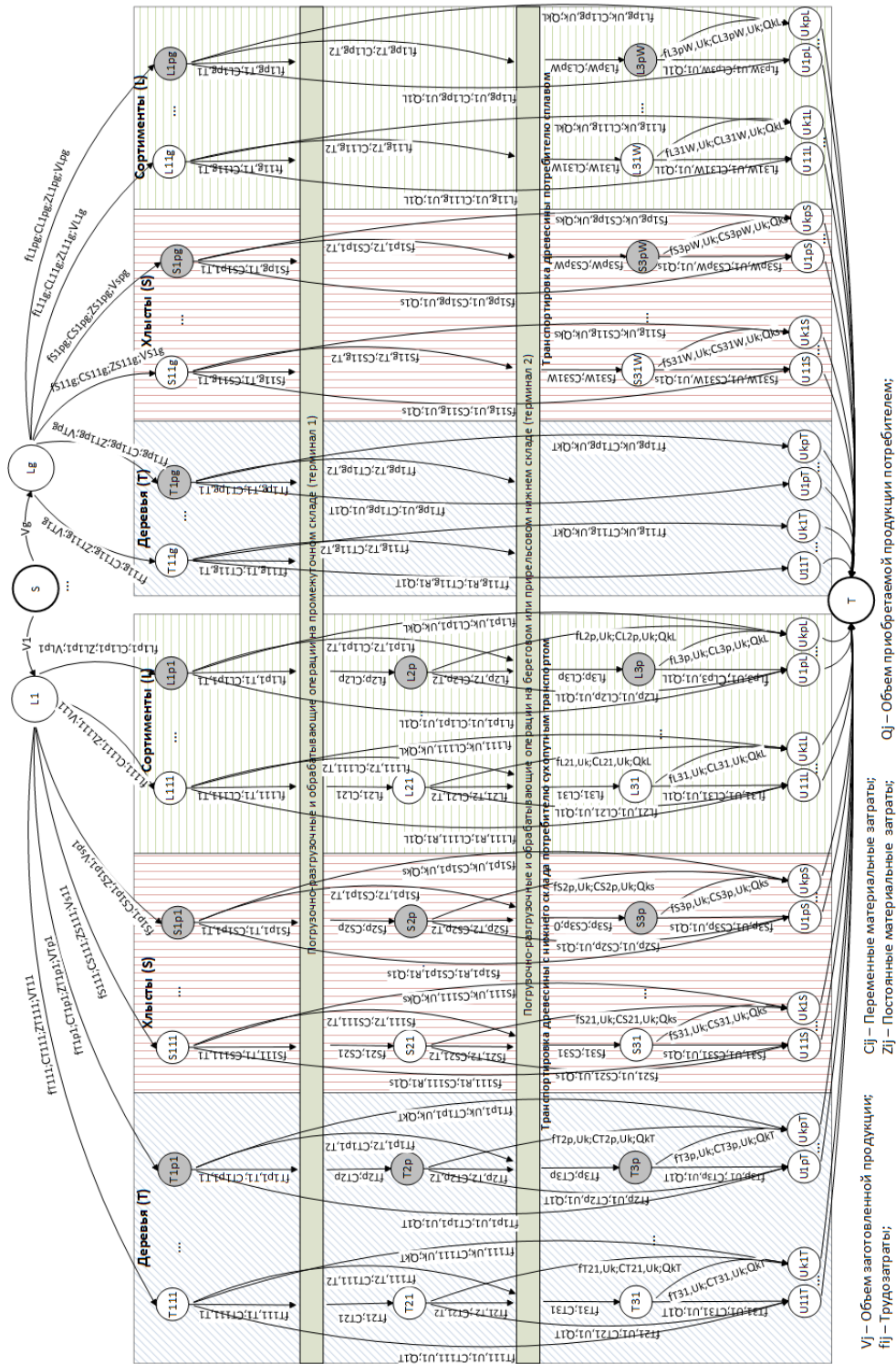


Рис. 1. Графическая модель транспортировки древесины от лесосеки до потребителя
 Fig. 1. Graphic model of wood transportation from cutting area to consumer

Данная графическая модель представляет собой растянутый во времени динамический граф и позволяет осуществить графоаналитический подход к обоснованию технологической схемы лесозаготовительного процесса, использованию лесных складов, рейдов погрузочно-разгрузочных работ, обрабатываемых операций, видов транспорта (водный, сухопутный), выбору потребителя и вида конечной товарной продукции в динамических природно-производственных условиях окружающей среды.

Граф включает несколько копий каждой рассматриваемой вершины в каждом анализируемом периоде $\theta \in T$. 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 $X_p = \{(x_i, \theta): (x_i, \theta) \in X \times T\}$. Множество дуг \tilde{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 $(x_j, \theta + \tau_{ij}(\theta))$. Учитывается, что $x_j \in \Gamma(x_i)$, а $\theta + \tau_{ij}(\theta) \leq p$. Пропускные способности $\tilde{V}(x_i, x_j, \theta, \theta + \tau_{ij}(\theta))$ для пар «вершина–время» (x_i, θ) и $(x_j, \theta + \tau_{ij}(\theta))$ составляют ∞ , а пропускные способности $\tilde{V}(x_i, x_j, \theta, \theta)$ для пар «вершина–время» (x_i, θ) и $(x_j, \theta) - \tilde{V}_{ij}(\theta)$ могут быть определены в результате анализа трудозатрат $\tilde{f}_{ij}(\theta)$ на выполнение различных видов работ технологического процесса.

Вершина S (рис. 1) представляет собой фиктивный источник, вершина T – фиктивный исток. С фиктивного истока дуги поступают в графы 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 $Mh\theta N$ (M – наименование объекта труда при выполнении операции (деревья – T , хлысты – S , сортименты – L); h – этап транспортировки; θ – номер периода; N – номер лесосеки). Например, вершины $T11, \dots, T1p1$ характеризуют операции транспортировки деревьев, выполняемые на первом этапе в каждом из p периодов для 1-й анализируемой лесосеки. На последующих этапах транспортировки номер лесосеки в обозначении вершины не указывается, так как не влияет на характеристику операции. Например, вершины $T21, \dots, T2p$ характеризуют операцию транспортировки сортиментов на втором этапе (после промежуточного склада) в каждом из p периодов. На третьем этапе, после нижнего склада, в характеристике вершин может появляться обозначение W , что символизирует транспортировку водным или железнодорожным транспортом. Дуги, входящие в вершину, определяют собой операцию погрузки, выходящие из вершины – операцию транспортировки древесины. Дуги характеризуются пропускной способностью, ограниченной трудозатратами f . Также дуги характеризуются переменными (C) и постоянными (Z) затратами. Постоянные затраты учитываются при хранении древесины между периодами. В дугах, выходящих из вершин, характеризующих лесосеки, $V_{M\theta N}$ обозначает объем анализируемого предмета труда в определенный период θ , перемещаемый с лесосеки N . В дугах, входящих в вершины потребителей, присутствует характеристика Q_{AM} , символизирующая максимальный объем продукции M , возможный для приобретения потребите-

лем A . Примеры обозначения дуг: дуга, находящаяся между вершиной L_g и вершиной $T11g$, $fT11g$; $CT11g$; $ZT11g$ символизирует поток с лесосеки g с трудозатратами, переменными и постоянными материальными затратами по погрузке деревьев на g -й лесосеке в первый период для транспортировки на первом этапе; $fS31W$, Uk ; $CS31W$, Uk ; Qks характеризует поток с трудозатратами и переменными затратами на транспортировку сортиментов на третьем этапе (после нижнего склада) в первый период водным (железнодорожным) транспортом k -му потребителю с ограниченным объемом приобретения древесины в виде сортиментов.

Фон на графах ограничивает область операций с определенным предметом труда: диагональная штриховка – операции с деревьями, вертикальная – с хлыстами, горизонтальная – с сортиментами.

Операции по разгрузке, погрузке и обработке древесины на лесных складах или рейдах приведены на рис. 2, 3.

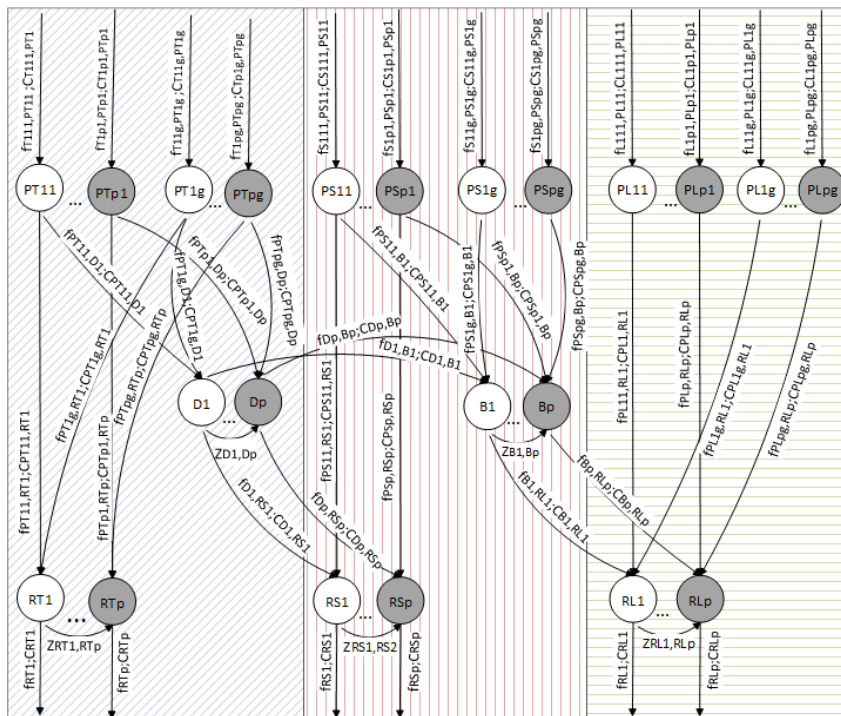


Рис. 2. Графическая модель погрузочно-разгрузочных и обрабатывающих операций на промежуточном лесном складе (терминал 1)

Fig. 2. Graphic model of handling and processing operations at the intermediate wood depot (terminal 1)

На графе (рис. 2) представлены вершины, характеризующие четыре вида операций: разгрузку древесины (P), обрезку сучьев (D), раскряжевку (B) и погрузку в автолесовозы (R). Входящие на промежуточный склад дуги символизируют транспортировку древесины с определенными трудозатратами и переменными затратами с различных лесосек. Дуги поступают в вершины $XM\theta N$. Здесь X описывает вид анализируемой операции. Вершины, характеризующие обрабатывающие операции (обрезка сучьев и раскряжевка) обозначаются двумя

символами $X\theta$, а вершины, характеризующие операцию погрузки, – тремя символами $XM\theta$. Обозначения дуг на данном графе аналогичны обозначениям на графе транспортировки древесины от лесосеки до потребителя.

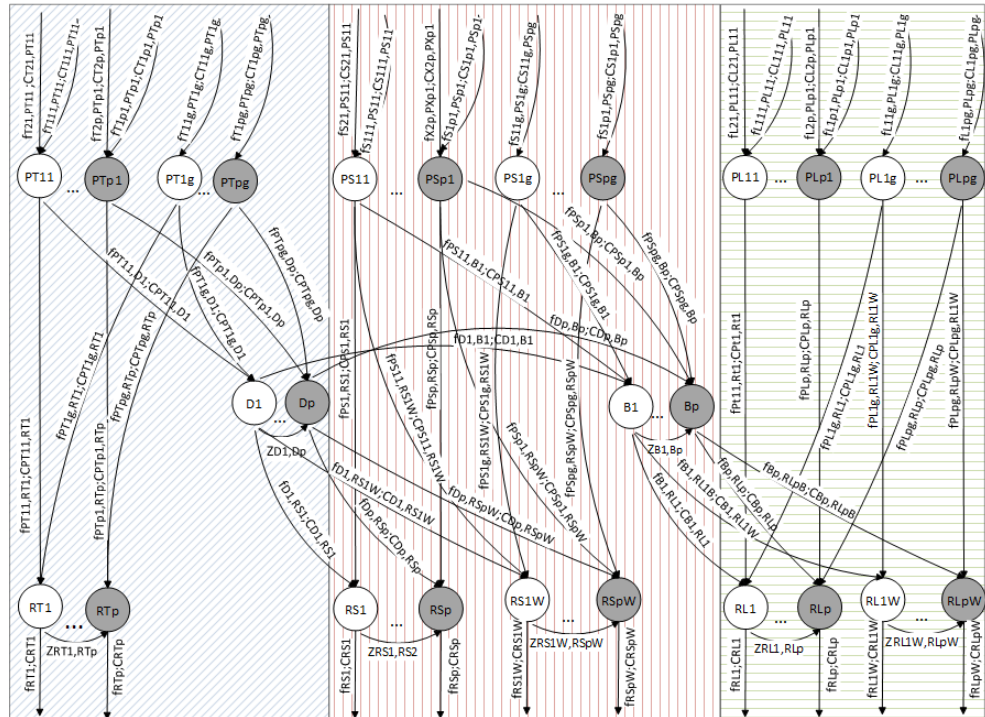


Рис. 3. Графическая модель погрузочно-разгрузочных и обрабатывающих операций на береговом или прирельсовом складе (терминал 2)

Fig. 3. Graphic model of handling and processing operations at the coastal or railway depot (terminal 2)

На представленном графе (рис. 3) обозначение вершин графов и дуг, соединяющих их, аналогично графу погрузочно-разгрузочных и обрабатывающих операций промежуточного склада. Входящие в граф потоки поступают как с лесосек, так и промежуточного склада (терминал 1). На нижнем складе также присутствуют дополнительные вершины по отгрузке на альтернативный вид транспорта: водный или железнодорожный. Вершины и дуги таких операций обозначаются дополнительной буквой W .

Производительность машин и оборудования находится в прямой зависимости от трудозатрат (f) на выполнение каждой операции, которые указываются на дугах графа. Кроме того, на дугах приведены переменные материальные затраты. К ним можно отнести затраты на топливо и горюче-смазочные материалы, сдельную оплату труда и др. Стоимость перемещения единицы потока по дугам графа $C(x_i, x_j, \theta, \theta)$, соединяющим пару «вершина–время» (x_i, θ) и (x_j, θ) , равны $C_{ij}(\theta)$.

Дуги между вершинами, описывающими одноименные операции различных периодов, характеризуют запасы лесоматериалов, не прошедшие следующую стадию технологической схемы в предыдущем периоде и требующие

обработки в последующих периодах. На таких участках графа при переходе потока между периодами учитываются постоянные затраты (Z). Здесь можно принять во внимание амортизационные отчисления, плановые затраты на техническое обслуживание и ремонт техники, повременную оплату труда, арендную плату за площади, используемые под размещение площадок лесных складов и др. Стоимость перемещения $Z(x_i, x_j, \theta, \theta + \tau_{ij}(\theta))$ единицы потока по дугам графа между парами «вершина–время» (x_i, θ) и $(x_j, \theta + \tau_{ij}(\theta))$ равна $Z_{ij}(\theta)$. При таком построении графа появляется возможность принимать во внимание постоянные и переменные затраты на реализацию всех учитываемых в графоаналитической модели операций технологической схемы лесозаготовительных работ.

Результаты исследования и их обсуждение

Математические зависимости для обоснования максимального потока минимальной стоимости [1, 7, 13, 17] в графоаналитической модели операционной сети технологического процесса обработки лесоматериалов при их доставке с лесосек до потребителей могут быть представлены в следующем виде:

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

$$\theta = 1p \sum_{(x_i, x_j) \in \bar{A}} (\tilde{C}_{ij} \tilde{\xi}_{ij}(\theta) + Z_{ij} \min\{1; \tilde{\xi}_{ij}(\theta)\}) \rightarrow \min. \quad (1)$$

2. Максимальный объем потока \tilde{v} за p периодов равен потоку, выходящему из источника за p периодов:

$$\sum_{\theta=1}^p \sum_{x_j \in X} [\tilde{\xi}_{sj}(\theta) - \tilde{\xi}_{js}(\theta - \tau_{js}(\theta))] - \tilde{v}(p) = \tilde{0}. \quad (2)$$

3. Объем потока $\tilde{\xi}_{ji}$, вошедшего в вершину x_i в момент времени $(\theta - \tau_{ji})$, равен числу единиц потока $\tilde{\xi}_{ij}$, выходящего из вершины x_i в момент θ :

$$\sum_{x_j \in X} [\tilde{\xi}_{ij}(\theta) - \tilde{\xi}_{ji}(\theta - \tau_{ji}(\theta))] = \tilde{0}, \quad x_i \neq s, t; \quad \theta \in T. \quad (3)$$

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

4. Максимальный объем потока \tilde{v} , перемещенного по дугам графа за p периодов, равен потоку, входящему в фиктивный сток за тот же период:

$$\sum_{\theta=1}^p \sum_{x_j \in X} [\tilde{\xi}_{tj}(\theta) - \tilde{\xi}_{jt}(\theta - \tau_{jt}(\theta))] - \tilde{v}(p) = \tilde{0}. \quad (4)$$

5. Итоговые трудозатраты на реализацию одноименных операций технологической цепочки каждого (θ) периода не могут превышать максимальной продолжительности (m) периода. Следовательно, объем потока $(\tilde{\xi}_{(i=b)j}^X(\theta))$, протекающего по дуге $(x_{i=b}, x_j)$ в рассматриваемом периоде (θ), должен соответствовать следующему неравенству:

$$\tilde{\theta} \leq \tilde{\xi}_{(i=b)j}^X(\theta) \leq \frac{m(\theta) - \sum_{i \in [1;b) \cup (b;g]} \sum_{x_j \in X} \tilde{f}_{ij}^X(\theta) \tilde{\xi}_{ij}^X(\theta)}{\tilde{f}_{(i=b)j}^X(\theta)}, \quad (5)$$

где b – порядковый номер анализируемой дуги ($1 \leq b \leq g$); m – максимальная продолжительность рабочего времени в периоде, ч; $\tilde{f}_{ij}^X(\theta)$ – трудозатраты на обработку или перемещение единицы лесоматериалов при выполнении X -й операции технологического процесса на протяжении θ -го периода, ч/м³; $\tilde{\xi}_{ij}^X(\theta)$ – величина потока, перемещаемого с вершины i в θ -й период при выполнении X -й операции технологического процесса, м³.

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

$$\forall (x_i, x_j) \in \tilde{A}(\theta); \theta \in T; x_i \neq s; (x_i, x_j) \neq (x_{x_h \ell \theta}; x_{x_h \ell (\theta+1)}). \quad (6)$$

Одним из основных параметров, ограничивающих пропускную способность дуг, является производительность $P(\theta)$. В данном случае под этим показателем понимается объем работы, который может быть выполнен до завершения анализируемого периода. По мере расчета, в результате перемещения по дугам графа того или иного грузопотока, происходит уменьшение времени $m^*(\theta)$, оставшегося до завершения этапа:

$$m^*(\theta) = m(\theta) - \sum_{i=1}^g \sum_{x_j \in X} \tilde{f}_{ij}^X(\theta) \tilde{\xi}_{ij}^X(\theta). \quad (7)$$

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:

$$P_{ij}^X(\theta) = \frac{m^*(\theta)}{f_{ij}^X(\theta)}, \quad (8)$$

и наоборот

$$f_{ij}^X(\theta) = \frac{m^*(\theta)}{P_{ij}^X(\theta)}. \quad (9)$$

6. 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:

$$V_N \geq V_{wN} + V_{sN} + V_{tN}. \quad (10)$$

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

$$\tilde{\theta} \leq \tilde{\xi}_{L_N(j=b)}(\theta) \leq V_N - \sum_{\theta=1}^p \left(\sum_{j \in [1;b) \cup (b;g]} \tilde{\xi}_{L_N j}(\theta) - \tilde{\xi}_{L_N b}(\theta - \tau_{L_N b}(\theta)) - \tilde{\xi}_{L_N b}(\theta + \tau_{L_N b}(\theta)) \right). \quad (11)$$

7. 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 ($\tilde{\xi}_{(i=b)(j=U)}^k(\theta)$) реализуемой потребителю (U) продукции, протекающего по дуге ($x_{(i=b)}, x_{j=U}$) от вершины ($i = b$) в анализируемом периоде (θ), должна соответствовать следующему неравенству:

$$\tilde{\theta} \leq \tilde{\xi}_{(i=b)(j=U)}^y(\theta) \leq Q_U^y - \sum_{\theta=1}^p \left(\sum_{i \in [1;b] \cup (b;g]} \tilde{\xi}_{iU}^y(\theta) - \tilde{\xi}_{bU}^y(\theta - \tau_{bU}(\theta)) - \tilde{\xi}_{bU}^y(\theta + \tau_{bU}(\theta)) \right). \quad (12)$$

Заключение

Предложенная динамическая модель позволит осуществить графоаналитический подход к обоснованию: последовательности транспортировки древесины с различных лесосек; использования в лесозаготовительном процессе лесных складов, рейдов; применения погрузочно-разгрузочных работ, обрабатывающих операций, вида транспорта (водный, сухопутный); выбора потребителя и вида конечной товарной продукции в динамических природно-производственных условиях окружающей среды.

При решении данной задачи можно получить рациональный вариант технологического процесса лесозаготовительных работ в динамических природно-производственных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Беляков С.Л., Белякова М.Л., Боженик А.В., Савельева М.Н.* Оптимизация потоков в транспортных системах // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2014. № 5(154). С. 161–167.
2. *Берштейн Л.С., Беляков С.Л., Боженик А.В.* Использование нечетких темпоральных графов для моделирования в ГИС // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2012. № 1(126). С. 121–127.
3. *Боженик А.В., Герасименко Е.М.* Разработка алгоритма нахождения максимального потока минимальной стоимости в нечеткой динамической транспортной сети // Инж. вестн. Дона. 2013. № 1. Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1583> (дата обращения: 25.05.2019).
4. *Боженик А.В., Розенберг И.Н.* Размещение центров обслуживания в ГИС на основе интервальных графов // Обозрение прикладной и промышленной математики. 2007. Т. 14, № 4. С. 682–683.
5. *Борисов Г.А., Кукин В.Д., Кузина В.И.* Методы поиска наивыгоднейшего варианта сети лесовозных дорог // Лесн. журн. 2001. № 3. С. 63–70.
6. *Бурмистрова О.Н., Сушков С.И., Пильник Ю.Н.* Оптимизация параметров транспортных процессов на предприятиях лесопромышленного комплекса // Фундаментальные исследования. 2015. № 11-2. С. 237–241. Режим доступа: <http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=39317> (дата обращения: 25.02.2019).
7. *Рукомойников К.П.* Графоаналитическое моделирование технологии поквартального освоения лесосек в нечетких динамических природно-производственных

условиях // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. Режим доступа: <http://www.science-education.ru/120-16417> (дата обращения: 25.02.2019).

8. Сазонова Е.А. Исследование и обоснование технологических процессов лесосечных работ на основе сквозного энергетического анализа: дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2005. 145 с.

9. Шегельман И.П. Анализ сквозных процессов заготовки биомассы дерева и ее переработки на щепу // Современные проблемы развития лесопромышленных производств: науч. тр. 2001. № 6. Петрозаводск: Карел. регион. инж. акад., 2001. С. 13–23.

10. Шегельман И.П., Скрыпник В.И., Кузнецов А.В. Анализ показателей работы и оценка эффективности лесозаготовительных машин в различных природно-производственных условиях // Учен. зап. ПетрГУ. Сер.: Естественные и технические науки. 2010. № 4(109). С. 66–75.

11. Шегельман И.П., Щеголева Л.В., Пономарев А.Ю. Математическая модель выбора сквозных потоков заготовки, транспортировки и переработки древесного сырья // Изв. СПбЛТА. 2005. № 172. С. 32–37.

12. Bellman R. On a Routing Problem // Quarterly of Applied Mathematics. 1958. Vol. 16. Pp. 87–90. DOI: 10.1090/qam/102435

13. Bozhenyuk A., Gerasimenko E., Rozenberg I. The Methods of Maximum Flow and Minimum Cost Flow Finding in Fuzzy Network // Proceedings of the 2nd Int. Workshop on Concept Discovery in Unstructured Data Workshop (CDUD 2012), Leuven, Belgium, May 6–10, 2012. Belgium: Leuven Katholieke Universiteit, 2012. Pp. 1–12.

14. Carlsson D., D'Amours S., Martel A., Rönnqvist M. Decisions and Methodology for Planning the Wood Fiber Flow in the Forest Supply Chain // Recent Developments in Supply Chain Management / ed by R. Koster, W. Delfmann. Helsinki: University Press, 2008. Pp. 11–39.

15. Dijkstra E.W. A Note on Two Problems in Connection with Graphs // Numerische Mathematik. 1959. Vol. 1. Pp. 269–271.

16. Floyd R.W. Algorithm 97: Shortest Path // Communications of the ACM. 1962. Vol. 5, no. 6. Pp. 345. DOI: 10.1145/367766.368168

17. Kovács P. Minimum-Cost Flow Algorithms: An Experimental Evaluation. EGRES Technical Report no. 2013-04. Budapest: Egervary Research Group, 2015. 40 p.

18. Kumar A., Kaur M. A Fuzzy Linear Programming Approach to Solve Fuzzy Maximal Flow Problems // International Journal of Physical and Mathematical Sciences. 2010. Vol. 1, no. 1. Pp. 6–12.

19. Mokhirev A., Gerasimova M., Pozdnyakova M. Finding the Optimal Route of Wood Transportation // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 226, conference 1. Pp. 1–7. DOI: 10.1088/1755-1315/226/1/012053

20. Mokhirev A.P., Pozdnyakova M.O., Medvedev S.O., Mammatov V.O. Assessment of Availability of Wood Resources Using Geographic Information and Analytical Systems (The Krasnoyarsk Territory as a Case Study) // Journal of Applied Engineering Science. 2018. Vol. 16. Pp. 313–319. DOI: 10.5937/jaes16-16908

21. Moore E.F. The Shortest Path through a Maze // Proceedings of an International Symposium on the Theory of Switching, April 2–5, 1957. Part II. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1959. Pp. 285–292.

22. Pentek T., Nevečerel H., Ećimović T., Lepoglavec K., Papa I., Tomašić Z. Strategijsko planiranje šumskih prometnica u Republici Hrvatskoj – raščlamba postojećega stanja kao podloga za buduće aktivnosti // Nova Mehanizacija Šumarstva. 2014. Vol. 35, no. 1. Pp. 63–78.

23. Rukomojnikov K.P. Structuring of Loading Points and Main Skid Road in Conditions of Existing Road Network in Forest Compartment // Journal of Applied Engineering Science. 2015. No. 13. Pp. 167–174. DOI: 10.5937/jaes13-8866

UDC 630*311+519.1

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.94

Validation of the Logging Operations Scheme through the Creation of Dynamical Model of the Enterprise Functioning

K.P. Rukomojnikov¹, Doctor of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [N-6961-2019](#), ORCID: [0000-0002-9956-5081](#)

A.P. Mokhirev², Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [N-9961-2019](#), ORCID: [0000-0002-1692-3323](#)

¹Volga State University of Technology, pl. Lenina, 3, Yoshkar-Ola, Mari El Republic, 424000, Russian Federation; e-mail: rukomojnikovkp@volgatech.net

²Lesosibirsk Branch of Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, ul. Pobedy, 29, Lesosibirsk, 662543, Russian Federation; e-mail: ale-mokhirev@yandex.ru

It is possible to build a technological scheme using various options in the process of logging. Water or land transport is used in different seasons during wood transportation from the cutting area at different stages. The presence of wood depots and wood processing at them also increase the multivariance of the technological process. The operation flow in various natural and industrial conditions differs in productivity and material expenses. Production efficiency depends on the effective validation of the technology of logging operations' implementation with regard to the dynamic natural and industrial conditions of the enterprise functioning. The research purpose is improving of the technological scheme of transport, handling and processing operations of logging in dynamic natural production conditions. The solution of the issue is proposed to perform using semi-graphical modeling. Variable and constant material expenses for the individual operations flow of the technological process define the technological scheme in the dynamic natural and industrial conditions. As a result detailed graphic models of wood transportation from the cutting area to the consumer, handling and processing operations taking place in the intermediate and lower wood depots have been developed. The possible variants of the logging technological scheme are shown. Possible volumes of timber harvesting in cutting areas and consumer sales of products are used as one of the restrictions imposed on the flow running through the graph arcs. Mathematical functions allowing searching for the maximum flow of the minimum cost in the dynamic structure of the technological process of work flow at the enterprise are proposed. They define the conditions for problem solving. The proposed semi-graphical model will enable the analytical approach to validation the sequence of wood transportation from the cutting area and usage of wood depots and raids in logging, using of handling and processing operations, choosing the transport type, consumer and type of final commodity products in the dynamic natural production conditions of the enterprise working. A distinctive feature of the proposed model is its functioning based on the performance and labor costs proposed as the throughput of the graph arcs.

For citation: Rukomojnikov K.P., Mokhirev A.P. Validation of the Logging Operations Scheme through the Creation of Dynamical Model of the Enterprise Functioning. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2019, no. 4, pp. 94–107. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.94

Funding: The research was carried out with the financial support of the RFBR, Government of Krasnoyarsk Krai and Krasnoyarsk Regional Fund of support scientific and technical activities, KSAU within the framework of the scientific project “Research and Modeling of the Economic Development Processes of the Region’s Timber Industry in the Context of Natural and Climatic Conditions and Resource Potential”, no. 18-410-240003.

Keywords: wood transportation, graphic-analytical model, technological process, technological scheme, dynamic conditions, season of wood transportation.

REFERENCES

1. Belyakov S.L., Belyakova M.L., Bozhenyuk A.V., Savelyeva M.N. Optimization of Flows in Transport Systems. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering sciences], 2014, no. 5(154), pp. 161–167.
2. Bershtein L.S., Beliakov S.L., Bozhenyuk A.V. The Using of Fuzzy Temporal Graphs for Modeling in GIS. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering sciences], 2012, no. 1(126), pp. 121–127.
3. Bozhenyuk A.V., Gerasimenko E.M. Developing of the Algorithm of Maximum Flow of Minimum Cost Finding in a Fuzzy Dynamic Network. *Inzhenernyj vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2013, iss. 1. Available at: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1583> (Accessed 25.05.2019).
4. Bozhenyuk A.V., Rozenberg I.N. Placement of Service Centers in GIS Based on Interval Graphs. *Obozrenie prikladnoy i promyshlennoy matematiki*, 2007, vol. 14, no. 4, pp. 682–683.
5. Borisov G.A., Kukin V.D., Kuzina V.I. Methods of Searching the Best Profitable Variant for the Forest Road Network. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2001, no. 3, pp. 63–70.
6. Burmistrova O.N., Sushkov S.I., Pilnik Y.N. Optimization Parameters of Transport Processes on Forestry Enterprises. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research], 2015, iss. 11 (part 2), pp. 237–241. Available at: <http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=39317> (Accessed 25.02.2019).
7. Rukomoynikov K.P. Graphic-Analytical Modeling of Technology of Forest Harvesting in Forest Compartment with Fuzzy Dynamic Natural Production Conditions. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2014, no. 6. Available at: <http://www.science-education.ru/120-16417> (Accessed 25.02.2019).
8. Sazonova E.A. *Research and Validation of Technological Processes of Logging Operations Based on End-to-End Energy-Dispersive Analysis*: Cand. Eng. Sci. Diss. Yekaterinburg, 2005. 135 p.
9. Shegelman I.R. Analysis of End-to-End Processes of Harvesting Tree Biomass and Its Processing into Wood Chips. *Current Issues of Timber Industry Development: Scientific Works*. Petrozavodsk, Karel'skaya regional'naya inzhenernaya akademiya Publ., 2001, pp. 13–23.
10. Shegelman I.R., Skrypnik V.I., Kuznetsov A.V. Performance Analysis and Evaluation of the Effectiveness of Logging Machines in Various Natural and Industrial Conditions. *Uchenye zapiski PetrGU. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskiye nauki* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Series: Natural & Engineering Sciences], 2010, no. 4(109), pp. 66–75.
11. Shegelman I.R., Shchegoleva L.V., Ponomarev A.Yu. Mathematical Model of the Choice of Through Flows of Procurement, Transportation and Processing of Wood Raw Materials. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii* [News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy], 2005, no. 172, pp. 32–37.
12. Bellman R. On a Routing Problem. *Quarterly of Applied Mathematics*, 1958, vol. 16, pp. 87–90. DOI: 10.1090/qam/102435
13. Bozhenyuk A., Gerasimenko E., Rozenberg I. The Methods of Maximum Flow and Minimum Cost Flow Finding in Fuzzy Network. *Proceedings of the 2nd Int. Workshop on Concept Discovery in Unstructured Data Workshop (CDUD 2012), Leuven, Belgium, May 6–10, 2012*. Belgium, Leuven Katholieke Universiteit, 2012, pp. 1–12.
14. Carlsson D., D'Amours S., Martel A., Rönnqvist M. Decisions and Methodology for Planning the Wood Fiber Flow in the Forest Supply Chain. *Recent Developments in Supply Chain Management*. Ed by R. Koster, W. Delfmann. Helsinki, University Press, 2008, pp. 11–39.

-
15. Dijkstra E.W. A Note on Two Problems in Connection with Graphs. *Numerische Mathematik*, 1959, vol. 1, pp. 269–271.
 16. Floyd R.W. Algorithm 97: Shortest Path. *Communications of the ACM*, 1962, vol. 5, no. 6, pp. 345. DOI: 10.1145/367766.368168
 17. Kovács P. *Minimum-Cost Flow Algorithms: An Experimental Evaluation*. EGRES Technical Report no. 2013-04. Budapest, Egervary Research Group, 2015. 40 p.
 18. Kumar A., Kaur M. A Fuzzy Linear Programming Approach to Solve Fuzzy Maximal Flow Problems. *International Journal of Physical and Mathematical Sciences*, 2010, vol. 1, no. 1, pp. 6–12.
 19. Mokhiev A., Gerasimova M., Pozdnyakova M. Finding the Optimal Route of Wood Transportation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 226, conference 1, pp. 1–7. DOI: 10.1088/1755-1315/226/1/012053
 20. Mokhiev A.P., Pozdnyakova M.O., Medvedev S.O., Mammatov V.O. Assessment of Availability of Wood Resources Using Geographic Information and Analytical Systems (The Krasnoyarsk Territory as a Case Study). *Journal of Applied Engineering Science*, 2018, vol. 16, pp. 313–319. DOI: 10.5937/jaes16-16908
 21. Moore E.F. The Shortest Path through a Maze. *Proceedings of an International Symposium on the Theory of Switching, April 2–5, 1957, Part II*. Cambridge, MA, Harvard University Press, 1959, pp. 285–292.
 22. Pentek T., Nevečerel H., Ećimović T., Lepoglavec K., Papa I., Tomašić Z. Strategijsko planiranje šumskih prometnica u Republici Hrvatskoj – raščlamba postojećega stanja kao podloga za buduće aktivnosti. *Nova Mehanizacija Šumarstva*, 2014, vol. 35, no. 1, pp. 63–78.
 23. Rukomojnikov K.P. Structuring of Loading Points and Main Skid Road in Conditions of Existing Road Network in Forest Compartment. *Journal of Applied Engineering Science*, 2015, no. 13, pp. 167–174. DOI: 10.5937/jaes13-8866
-

Received on March 13, 2019