

УДК 630

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СХЕМЫ ЛЕСОТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ

Рунова Е.М., Костяев В.Н.

*ГОУ ВПО «Братский государственный университет»,
Братск, e-mail: chessmaster-russt@yandex.ru*

В статье рассмотрен способ, основанный на инструментарии теории графов (построение минимального покрывающего дерева). Описан алгоритм поиска оптимальной схемы сети лесовозных дорог для транспортировки древесины с осваиваемых лесосырьевых баз и учитывающий особенности местности, неравномерность распределения запасов древесины, наличие существующих транспортных путей, динамику лесоводственно-таксационных характеристик насаждений и условия их произрастания. Предложены механизм определения экономически доступных лесных участков и способ соединения их в единую лесотранспортную сеть; выведены формулы расчета экономической доступности лесных ресурсов, основанные на сопоставлении доходов от реализации заготовленной древесины и расходов на освоение лесных участков; приведен пример построения схемы кратчайшей сети лесовозных дорог, найденной с помощью методов математического моделирования; предложена методика расчета экономической эффективности проекта по освоению конкретных участков. Метод может применяться для любых по масштабу территорий с различными природно-климатическими условиями, породным составом и количественным запасом древесины. На основе предложенной математической модели возможно создание компьютерной программы по проектированию сети лесовозных дорог.

Ключевые слова: оптимизация лесотранспортной сети, транспортно-технологические процессы, математическое моделирование, теория графов, минимальное остовное дерево, экономическая доступность лесных ресурсов

DESIGN OF FOREST ROAD NETWORK

Runova E.M., Kostyaev V.N.

Bratsk State University, Bratsk, e-mail: chessmaster-russt@yandex.ru

The article presents a method based on the methods of mathematical modeling, in particular with the tools of graph theory (constructing minimum spanning tree). Described in detail search algorithm of optimal forest road network for transporting wood from reclaimed timber resources and takes into account the terrain, the presence of existing transport routes, the dynamics of silvicultural taxation characteristics of stands and their growing conditions, the availability of existing logging roads and other parameters. Proposed mechanism for choosing the most profit forest areas and a way to connect them into a forest road network; derived formula for calculating affordability of forest resources; example scheme shortest network of logging roads, was found by the methods of mathematical modeling the technique of calculating the economic efficiency of the project. The method can be applied to any scale areas with different climatic conditions, species composition and quantitative supply of wood. Based on the proposed mathematical model for how a computer program to design a network of logging roads.

Keywords: optimization of forest road network, mathematical simulation, graph theory, economic availability of forest resources

Строительство сети лесовозных дорог, обеспечивающей доступ к лесным ресурсам, наряду с транспортировкой древесины являются одними из наиболее затратных статей расходов для большинства лесозаготовительных предприятий [8], что обуславливает необходимость разработки научно обоснованных и пригодных для применения на практике методов проектирования лесотранспортной сети и оптимизации транспортно-технологических процессов лесозаготовок. Оптимальной может считаться такая лесотранспортная сеть, которая обеспечивает эффективный доступ к лесным ресурсам и при этом требует минимальных затрат на её строительство, дальнейшее обслуживание и транспортировку древесины [4]. Обеспечение экономической эффективности лесозаготовительного предприятия и сохранение экологической безопасности на осваиваемых территориях требует разработки универсального метода поиска оптимальной лесотранспортной сети. При

проектировании сети лесовозных дорог необходимо принимать во внимание специфику лесозаготовок, характеризующуюся неравномерностью запасов лесных ресурсов; разрозненностью лесных участков; односторонностью лесных грузопотоков; специфичностью грузов; ярко выраженной сезонностью; увеличивающимся расстоянием вывозки и т.д. [2]. Точность определения очередности строительства лесовозных дорог с учетом динамики лесоводственно-таксационных характеристик насаждений и условий их произрастания, выбор наилучшего расположения искусственных сооружений оказывают существенное влияние на рентабельность лесозаготовительного предприятия, а значит, должны быть учтены в процессе проектирования и положены в основу комплексной математической модели для решения задачи по поиску оптимальной схемы сети лесовозных дорог. [1]

С целью оптимизации процессов транспортного освоения лесосырьевых баз пред-

ложена методика поиска оптимального пространственного расположения лесовозных дорог на основе методов математического моделирования, в частности, инструментария теории графов (метода остовного покрывающего дерева).

Процесс проектирования лесотранспортной сети включает в себя постановку задачи и задание целевой функции на минимизацию затрат на строительство лесовозных дорог, после чего проводится оценка текущей ситуации с характеристикой местности (особенности рельефа; гидрологические и грунтовые условия; природные и искусственные преграды; наличие особо охраняемых природных территорий и мест обитания животных; другие факторы, оказывающие влияние на расположение дорожной сети и стоимость её строительства). [3]. На основе материалов лесоустройства, таксационных и картографических данных рассчитывается ликвидный запас древесины и определяется годовой объем вывозки леса, а также территориальное расположение транспортных путей, погрузочных пунктов, верхних и нижних складов.

С учетом имеющихся систем и комплектов машин рассчитывается стоимость строительства 1 км дороги для определенных условий местности; вводятся соответствующие коэффициенты, корректирующие стоимость участков дороги в зависимости от различных факторов; выбираются ключевые участки, к которым необходимо проложить транспортные пути. При помощи математической модели, основанной на инструментарии теории графов (ключевые участки являются вершинами связанного неориентированного графа, а возможные пути между ними – нагруженными ребрами, веса которых соответствуют стоимости строительства дорог), производится поиск оптимальной транспортной сети. На последнем этапе рассчитывается экономический эффект от реализации проекта и даются рекомендации к очередности освоения лесосек с учетом динамики лесного фонда.

Использование цифровой модели местности позволяет учесть лесоводственно-таксационные характеристики насаждений и особенности осваиваемой территории: участки с разными типами рельефа и местности, на которых стоимость строительства и содержания участка дороги существенно отличается от базовой; участки-линии (реки, ручьи, овраги), пересечение которых требует дополнительных расходов на строительство искусственных сооружений и введение соответствующих коэффициентов; ключевые участки: места концентрации древесины, пункты примыкания лесовоз-

ных дорог, места расположения дорожно-строительных материалов и т.д. [7]. Распределение территорий на несколько категорий обусловлено необходимостью учета затрат на строительство 1 км дороги, которые могут быть выражены в виде базового значения и корректирующих коэффициентов. Все данные сводятся к единой размерности – денежному выражению.

Места концентрации древесины выбираются посредством расчета имеющегося объема лесных ресурсов на потенциальных ключевых участках (территориях, имеющих некоторый запас древесины), а после сравнения их между собой выбираются наиболее предпочтительные с точки зрения экономической эффективности – максимально возможной прибыли от реализации древесины с участка за вычетом расходов на лесозаготовку:

$$S_{iCh} = \sum_i^n Q_i^n P^n - \sum_i Q_i C, \quad (1)$$

где S_{iCh} – потенциальный доход, который может быть получен от реализации всего запаса древесины, находящегося на i -м участке (i -й вершине графа) за вычетом расходов на заготовку древесины, руб.; Q_i^n – объем i -й породы дерева на i -м участке (i -й вершине графа), m^3 ; Q_i – объем заготавливаемой древесины на i -м участке независимо от породы, $1 m^3$; P_n – цена реализации $1 m^3 n$ -й породы дерева, руб.; C – расходы (в зависимости от комплекта лесосечных машин и рельефа) на заготовку $1 m^3$ древесины независимо от породы, руб.

Критерием выбора ключевых участков может явиться минимальный порог доходности, устанавливаемый предприятием, а после проведения соответствующих расчетов выбираются все участки, соответствующие выбранному критерию, и обозначаются как вершины связанного неориентированного графа, которые должны быть соединены оптимальной дорожной сетью – ребрами, суммарный вес которых будет минимальным. Критерием оптимальности является минимальная стоимость строительства лесотранспортной сети, соединяющей обозначенные участки (вершины). Общая стоимость строительства сети лесовозных дорог определяется как сумма весов ребер, образующих минимальное покрывающее дерево, связывающее все участки в единую сеть. Вес ребра соответствует стоимости строительства дороги на конкретном участке. В общем виде формула определения веса ребра имеет следующее выражение:

$$w_{ij} = L_{ij,общ} C_{стр}, \quad (2)$$

где w_{ij} – вес ребра, соединяющего i -ую вершину с j -й, руб.; $L_{ij,общ}$ – общая длина дороги, соединяющего i -ую вершину с j -й, км;

$C_{стр}$ – стоимость строительства 1 км дороги, руб.

Общая длина дороги может быть выражена следующей формулой:

$$L_{ij,общ} = L_{баз} + \sum_i^n k_{i,отл}^n L_{i,отл}^n + \sum_i^n k_{i,вст}^n L_{i,вст}^n - L_{сущ}, \quad (3)$$

где $L_{баз}$ – длина участка, строительство дороги на котором имеет базовую стоимость, км; $L_{сущ}$ – длина участка, имеющего дорогу, пригодную для транспортировки древесины и не требующая строительства и ремонта, км; $L_{i,отл}^n$ – длина участка, строительство дороги на котором отличается от базовой стоимости, км; $L_{i,вст}^n$ – длина участка, на котором расположена дорога, требующая восстановления (ремонта), км; $k_{i,отл}^n$ – повышающий коэффициент в зависимости от i -го типа местности на n -м участке дороги; $k_{i,вст}^n$ – понижающий коэффициент в зависимости от i -го состояния дороги, требующей ремонта, на i -м участке дороги.

В ходе строительства дороги возможно осуществление заготовки древесины с близлежащих участков, что может быть принято во внимание при проектировании дорожной сети, т.к. прибыль от реализации заготовленной таким образом древесины напрямую влияет на возможность нахождения оптимального решения [5]. Тогда формула расчета веса ребра будет иметь следующий вид:

$$w'_{ij} = L_{ij,общ} C_{ij,стр} - V_{ij,пр}, \quad (4)$$

где w'_{ij} – вес ребра с учетом доходов от «промежуточной» заготовки древесины на участке дороги ij , руб; $V_{ij,пр}$ – прибыль от

реализации древесины, заготовленной на «промежуточном» участке от i -й вершины до j -й.

В свою очередь расчеты $V_{ij,пр}$ включают в себя суммарную прибыль от реализации древесины, заготовленной на «промежуточном» участке, за вычетом стоимости строительства трелевочных волоков, погрузочных пунктов, расходов на лесозаготовку:

$$V_{ij,пр} = \sum_i^n Q_{ij}^n P^n - C_{ij,общ}, \quad (5)$$

где Q_{ij}^n – объем древесины, заготовленной на базе построенной дороги от вершины i до вершины j ; $C_{ij,общ}$ – общие расходы, которые рассчитываются по следующей формуле:

$$C_{ij,общ} = l_{ij,вол} c_{вол} + \sum_i^n h_{пп}^k c_{пп} + Q_{ij} C_{заг}, \quad (6)$$

где $l_{вол}$ – общая длина трелевочных волоков, км; $c_{вол}$ – стоимость строительства 1 км волока, руб; $h_{пп}^k$ – количество погрузочных площадок, шт.; $c_{пп}$ – стоимость строительства погрузочных площадок, руб.; Q_{ij} – общее количество заготовленной древесины, на промежуточном участке от i -й вершины до j -й, м³; $C_{заг}$ – стоимость заготовки 1 м³ древесины, руб.

В итоге формула (4) примет следующий вид:

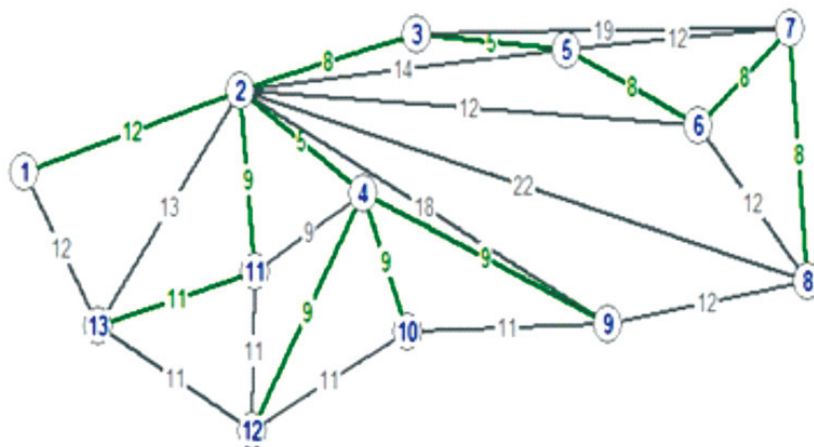
$$w'_{ij} = \left(L_{баз} + \sum_i^n k_{i,отл}^n L_{i,отл}^n + \sum_i^n k_{i,вст}^n L_{i,вст}^n - L_{сущ} \right) \cdot C_{ij,стр} - \sum_i^n Q_{ij}^n \cdot P^n - \left(l_{ij,вол} c_{вол} + \sum_i^n h_{пп}^k c_{пп} + Q_{ij} C_{заг} \right). \quad (7)$$

Ключевые участки могут быть выбраны по методу экспертных оценок и ранжированы на классы от 1 до 5 в соответствии с имеющимися запасами древесины, удаленностью, рельефом, строением почвы и т.д. После нахождения ключевых участков их условные обозначения переносятся на компьютерную платформу, пригодную для расчета оптимальных путей на основе теории графов. Кругами (вершинами графа) обозначаются участки леса, наиболее привлекательные для освоения с точки зрения экономической эффективности

(цифрами обозначены номера участков – например, цифра «1» обозначает исходную точку – нижний склад/предприятие/железнодорожный тупик), а соединяющие эти вершины ребра являются возможными транспортными путями. Затем проводится расчет стоимости строительства каждого пути: определяется базовая стоимость строительства 1 км дороги (в млн руб.) и с учетом особенностей местности и климата вводятся дополнительные коэффициенты, корректирующие стоимость строительства всех участков дороги, после чего ребрам

присваиваются соответствующие веса. Вес каждого ребра соответствует расходам на строительство дороги на определенном участке. После того, как выбраны верши-

ны и соединены между собой возможными ребрами, запускается алгоритм построения минимального дерева в соответствии с формулой (7).



Минимальное остовное дерево (оптимальная транспортная сеть)

На рисунке показана схема построенного минимального остовного дерева (выбранная сеть выделена жирными линиями), суммарный вес которого соответствует стоимости строительства всей дорожной сети, соединяющий ключевые участки концентрации древесины. Окончательная стоимость строительства в дальнейшем может быть уточнена во время проведения полевых исследований.

Помимо экономического эффекта от лесозаготовок необходимо учитывать социальные и экологические составляющие [6], которые в общем виде можно представить формулой:

$$E = U + G + C - I, \quad (8)$$

где E – общая эффективность проекта (экономическая, социальная, экологическая); U – выигрыш для пользователей транспортной инфраструктуры; G – выигрыш для экологии; C – прибыль от реализации заготовленной древесины; I – инвестиции в лесозаготовку. Общая экономическая эффективность капитальных вложений выражается формулой:

$$E = \frac{D + T + N + P + V + C}{I}, \quad (9)$$

где D – сокращение текущих издержек реализации проекта; T – выигрыш транспортных предприятий; N – снижение расходов в народном хозяйстве; P – прирост валового объема различной продукции в отраслях народного хозяйства; V – выигрыш в соци-

альной сфере; C – улучшение экологии; I – капитальные инвестиции.

Заключение

Последовательность освоения лесного массива может производиться двумя способами: посредством постепенного продвижения лесозаготовок вглубь лесного массива со строительством магистрали небольшой протяженности, обеспечивающей вывозку древесины в краткосрочный период или через строительство магистрали на всю длину (так называемая «глубинная схема»). Второй вариант является наиболее предпочтительным ввиду того, что объемы работ по дорожному строительству концентрируются в одном месте и обеспечивают эффективное применение машин, а единовременные общие капиталовложения позволяют сократить расходы на множество подготовительных работ, которые имели бы место в «пошаговом» освоении лесосырьевых баз. Кроме того, появляется возможность проведения комплексных работ по охране и защите леса на начальном этапе, однако к недостатку второго метода можно отнести большие капиталовложения на первом этапе. В дальнейшем необходимо разработать алгоритм определения очередности освоения ключевых участков в зависимости от сроков, необходимых на строительство дорог, заготовку, вывозку и реализацию древесины, а также наличия у предприятия свободных денежных средств для инвестирования в долгосрочные проекты.

Список литературы

1. Бавбель Е.И. Прогнозирование расположения лесотранспортной сети на основе динамики лесоводственно-таксационных характеристик насаждений: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Минск, 2009. – 20 с.

2. Болотов О.В., Мохирев А.П. Автоматизированное проектирование и оптимизация транспортной схемы освоения лесосырьевой базы // Лесной комплекс – состояние и перспективы развития международный сб. науч. тр. – Брянск, 2003. – С. 62–65.

3. Результаты экспериментальных исследований воздействия древесины на почву при различных способах трелевки / И.В. Григорьев, В.А. Иванов, А.И. Жукова, А.В. Иванов, М.Е. Рудов, Ф.В. Свойкин // Системы. Методы. Технологии. – 2012. – № 4 (12). – С. 96–100.

4. Иванов В.А. Обоснование технологии и оборудования для освоения древесины прибрежной зоны и ложа водохранилищ: дис. ... д-ра техн. наук. – СПб., 2008. – 278 с.

5. Костяев В.Н. Использование методов математического моделирования для нахождения оптимальной схемы сети лесовозных дорог // Теория и практика актуальных исследований: материалы II Международной научно-практической конференции. Сб. науч. тр. – Краснодар, 2012. – Т. 2. – 176 с.

6. Прохоров А.В., Ильин И.В. Информационно-аналитические системы и оценка экономической эффективности проектов транспортного планирования // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2010. – № 112. – С. 291–295.

7. Рунова Е.М., Костяев В.Н. Подход к проектированию оптимальной лесотранспортной сети с помощью математического моделирования. // Системы. Методы. Технологии. – 2012. – № 4 (16). – С. 170–176.

8. Шукин П.О. Повышение эффективности транспортных связей заготовителей и переработчиков круглых лесоматериалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Петрозаводск, 2009. – 20 с.

References

1. Bavbel E.I. Prediction of the location-based forest road network dynamics silvicultural taxation characteristics of plantations: Avtoref. dis. kand. tehn. nauk. Minsk, 2009. 20 p.

2. Bolotov O.V., Mohirev A.P. Computer-aided design and optimization of the transport scheme development forest resources. Lesnojkompleks sostojanie i perspektivy razvitiya mezhdunarodnyj sb. nauch. tr. Brjansk, 2003. pp. 62–65.

3. Grigor'ev I.V., Ivanov V.A., Zhukova A.I., Ivanov A.V., Rudov M.E., Svoikin F.V. Results of experimental studies of the effects of wood on the soil at various ways of logging // Sistemy. Metody. Tehnologii. 2011. no. 4 (12). pp. 96–100.

4. Ivanov V.A. Substantiation of technology and equipment to develop the coastal zone and the wood lodge reservoirs: Dis ... dokt. tehn. nauk. SPb. 2008. 278 p.

5. Kostjaev V.N. The use of mathematical modeling to find the optimal forest road network. Teorija i praktika aktual'nyh issledovanij: Materialy II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. Sb. nauch. tr. Krasnodar, 2012. Vol. 2-h tomah. T. 2. 176 p.

6. Prohorov A.V., Il'in I.V. Information-analytical systems and economic evaluation of transport planning projects // Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo sudarstvennogo politehnicheskogo universiteta. 2010. no. 112. pp. 291–295.

7. Runova E.M., Kostjaev V.N. Approach to the design of optimal forest road network using mathematical modeling // Sistemy. Metody. Tehnologii. 2012. no. 4 (16).

8. Shhukin P.O. Improving the efficiency of transport link-spacers and processors of roundwood: avtoref dis. kand. tehn. nauk. Petrozavodsk, 2009. 20 p.

Рецензенты:

Иванов В.А., д.т.н., профессор, академик РАЕ, заведующий кафедрой «Лесные машины и оборудование», ФГБОУ ВПО «Братский государственный университет», г. Братск;

Огар П.М., д.т.н., профессор, проректор по научной деятельности, ФГБОУ ВПО «Братский государственный университет», г. Братск.

Работа поступила в редакцию 14.02.2013