

5. Гаспарян Г.Д. Энергосберегающие технологии окорки круглых лесоматериалов. Братск: Изд-во БрГУ, 2012. 150 с.
6. Гаспарян Г.Д. Анализ ультразвуковых технологий, с целью оценки интродукции в лесопромышленный сектор экономики // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 6. URL: <http://www.science-education.ru/106-7441> (дата обращения: 16.11.2012).
7. Гаспарян Г.Д., Гаспарян М.Д. Перспективы применения ультразвука при окорке лесоматериалов // Труды Братского государственного университета. Сер. Естественные и инженерные науки - развитию регионов Сибири. 2012. Т. 2. С. 5-13.
8. Калиманов А.В. Возможности использования ультразвука в промышленности // Применение ультразвука в промышленности: сб. ст. 1959. № 3. С. 48-57.
9. Кикоин И.К. Таблицы физических величин: справочник. М.: Атомиздат, 1976.1008 с.
10. Розенберг Л.Д. Физика и техника мощного ультразвука. Кн. 2. Мощные ультразвуковые поля. М.: Наука, 1968. 267 с.
11. Ультразвуковые технологии и аппараты [Электронный ресурс]: офиц. сайт лаб. акустических процессов и аппаратов Бий. технол. ин-та. 1994-2011. URL: <http://u-sonic.ru> (дата обращения: 05.05.2012).
3. Gasparyan G.D. Obosnovanie tekhnologicheskoy skhemy okorki lesomaterialov ul'trazvukom. Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki - razvitiyu regionov Sibiri. 2009. T.2. S.223-225;
4. Gasparyan G.D. Kontseptual'noe modelirovanie tekhniki i tekhnologii okorki lesomaterialov s primeneniem ul'trazvuka// Fundamental'nye issledovaniya. 2012. № 11 S. 1451-1454;
5. Gasparyan G.D. Energoberegayushchie tekhnologii okorki kruglykh lesomaterialov. - Bratsk: FGBOU VPO "BrGU", 2012. - 150 s;
6. Gasparyan G.D. Analiz ul'trazvukovykh tekhnologiy, s tsel'yu otsenki introduktsii v lesopromyshlenny sektor ekonomiki // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2012. № 6; URL: <http://www.science-education.ru/106-7441> (data obrashcheniya: 16.11.2012);
7. Gasparyan G.D. Perspektivy primeneniya ul'trazvuka pri okorke lesomaterialov // Gasparyan G.D., Gasparyan M.D. Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki - razvitiyu regionov Sibiri. 2012. T. 2. S. 5-13.
8. Kalimanov A.V. Vozmozhnosti ispol'zovaniya ul'trazvuka v promyshlennosti // Primenenie ul'trazvuka v promyshlennosti. 1959. Sb. statey № 3 S. 48-57.
9. Kikoin, I.K. Tablitsy fizicheskikh velichin: spravochnik / I. K. Kikoina. - M.: Atomizdat, 1976.1008 s;
10. Rozenberg L.D. Kavitatsionnaya oblast' / V kn. Fizika i tekhnika moshchnogo ul'trazvuka, kniga II, Moshchnye ul'trazvukovye polya. M.: Izd-vo "Nauka", 1968 267 s;
11. Ul'trazvukovye tekhnologii i apparaty [Elektronnyy resurs]. Elektron. dan. [Biysk]: Ofitsial'nyy sayt laboratorii akusticheskikh protsessov i apparatov Biyskogo tekhnologicheskogo instituta. 1994-2011. Rezhim dostupa: <http://u-sonic.ru>;

References

1. Gasparyan G.D. Razrabotka i obosnovanie parametrov ustanovki dlya okorki lesomaterialov ul'trazvukom: dis. ... kand. tekhn. nauk / Gasparyan Garik Davidovich; nauch. Ruk. G.L. Kozinov; Bratskiy gosudarstvennyy universitet. Bratsk, 2005. 160 s.
2. Gasparyan G.D. Issledovanie protsessa ul'trazvukovoy okorki. Vestnik KrasGAU. 2007. №3(18) S. 216-221;

УДК 630

К вопросу проектирования схемы лесотранспортной сети с учетом оптимизации грузопотоков

В.Н. Костяев

Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, г. Братск, Россия
 chessmaster-russt@yandex.ru
 Статья поступила 14.10.2012, принята 6.02.2013

Рассмотрены основные концепции проектирования лесотранспортной сети и описаны их основные недостатки, обусловленные сложностью учета всех факторов, оказывающих влияние на лесозаготовительный процесс. Предложен алгоритм проектирования схемы сети лесовозных дорог с детальным описанием наиболее важных параметров (особенности рельефа местности, численное количество и территориальное расположение лесосек, характеристика существующих транспортных путей, вместимость погрузочных пунктов, удаленность потребителей древесины, имеющиеся системы и комплекты машин и др.). Описан универсальный метод поиска оптимальной лесотранспортной сети, основанный на инструментарии теории графов (в частности – построении минимального покрывающего дерева). Предложены подход к проведению оценки доступности лесных ресурсов и расчету экономической эффективности от реализации проекта по освоению лесных участков посредством выбора наиболее привлекательных с экономической точки зрения лесосек и способ соединения их в единую лесотранспортную сеть. Приведен пример построения кратчайшей схемы сети лесовозных дорог, найденной с помощью методов математического моделирования, а также рассмотрены возможности оптимизации грузопотоков от пункта лесозаготовок до конечного потребителя. Описана необходимость проектирования лесовозных дорог с учетом динамики лесоводственно-таксационных характеристик насаждений, а также требований к обеспечению экологической безопасности на осваиваемых территориях. На основе предложенной математической модели возможна разработка программного обеспечения для инженеров лесозаготовительных предприятий, занимающихся вопросами проектирования лесотранспортной сети. Метод может применяться для любых по масштабу территорий с различными природно-климатическими условиями, породным составом и количественным запасом древесины.

Ключевые слова: грузопотоки, лесотранспортная сеть, математическое моделирование, теория графов.

On the design of forest network based on traffic optimization

V.N. Kostyaev

Bratsk State University, 40, Makarenko str., Bratsk, Russia
chessmaster-russt@yandex.ru
Received 14.10.2012, accepted 6.02.2013

The article describes the basic concepts of forest road network design and the main disadvantages resulting from the complexity of accounting for all the factors that influence the logging process. The algorithm for designing the scheme of logging roads network giving a detailed description of the most important parameters (especially the terrain, the numerical number and geographical location of cutting areas, the existing transport routes characteristic, the loading points capacity, wood consumers remoteness, the existing systems and sets of machines, etc.). The universal method to search for optimal forest road network based on the graph theory tools (in particular, the minimum covering tree construction) has been described. The approach to the forest resources availability assessment and the calculation of the project cost-effectiveness to develop forest areas by selecting the most attractive cutting areas from the economic point of view and the way of combining them into the unique forest road network has been proposed. The example of the shortest forest road network scheme construction found by the mathematical modeling methods has been given; the capabilities of the traffic flow optimization from the cuttings areas to the end user have been considered. The necessity for designing forest roads with due regard for the dynamics of the silvicultural-taxation stands characteristics, as well as the requirements for environmental safety for the developed territories have been described. On the basis of the proposed mathematical model, the software for logging company engineers involved in the forest road network design can be developed. The method can be applied to the areas of any scale, climatic conditions, species composition and quantitative supply of wood.

Key words: cargo traffic, forest road network, mathematic simulation, graph theory.

Лесопромышленный сектор составляет более 6 % объема ВВП в экономике России, свыше 12 % доходной части федерального бюджета и обеспечивает существенную долю валютных поступлений [1]. Развитие лесной промышленности неразрывно связано со строительством лесовозных дорог и транспортировкой древесины, однако эти процессы являются одними из наиболее затратных статей расходов в лесозаготовительной деятельности, а потому требуют применения научно обоснованных подходов к проектированию оптимальных схем лесотранспортной сети, обеспечивающих быстрый и качественный доступ к лесным ресурсам [2]. Решением задач по оптимизации грузоперевозок занимается наука логистика, а применение методов математического моделирования при проектировании сети автомобильных дорог позволяет найти оптимальные параметры для строительства, как автомагистралей, так и лесовозных усов.

Размещение элементов лесотранспортной сети в настоящее время зачастую основывается на аналитическом методе, описанном в [3], и сводится к следующим допущениям:

- форма лесосырьевой базы принимается прямоугольной, а затем разбивается на полосы шириной 5-7 км, через которые проводится экономическая ось будущей дороги;
- запасы древесины рассматриваются без учета породной и товарной структуры;
- не учитываются погрузочные пункты и промежуточные склады древесины, последовательность разработки лесосек, размещение и очередность строительства первичных путей;
- планы рубок, размещение лесосек, условия строительства дорог на конкретных участках не принимаются во внимание;
- плотность лесных запасов полагается постоянной по всей лесосырьевой базе, и делается допущение, что

дорожно-строительные условия являются однородными по всей территории массива – стоимость строительства и эксплуатации путей, а также транспортировки древесины по ним принимается постоянной;

- не учитывается наличие препятствий географического характера (болот, рек, малых озер и т. п.).

Такой подход непригоден для практической деятельности, требующей учета множества факторов, таких как порода, состав и запас стволовой древесины; характеристики почвы, грунта и рельефа; особенности климатических и гидрологических условий; комплекты машин, применяемые для транспортировки древесины и др. В целях разрешения поставленной задачи многими исследователями предлагаются различные концепции проектирования лесотранспортной сети. Одна из таких концепций описана в [4], ее основные положения заключаются в следующем.

1. Стратегическое планирование должно быть обеспечено системой взаимодействующих экономико-математических моделей, учитывающих сложность и комплексность организации основного технологического процесса лесозаготовок.

2. Планирование деятельности предприятия основывается на концепции его устойчивого развития, отражающегося в системе моделей в виде ограничений, определяющих равномерную динамику показателей по годам планирования.

3. Основная цель планирования заключается в достижении максимальной дисконтированной прибыли за плановый период с учетом выполнения системы существующих ограничений предприятия на производственную деятельность.

4. Срок планирования определяется как внешний параметр, с учетом размера банковской процентной ставки, уровня инфляции и длительности основных технологических циклов предприятия.

5. На весь период планирования лесозаготовок портфель заказов на лесопroduкцию принимается заданным отдельно для лесных пород и товарностей, а также делается допущение, что количество заказов известно ввиду заключения фьючерсных контрактов.

6. Критерием оптимального развития лесотранспортной сети является получение заданного объема сортиментов леса, определяемого по годам планирования на основе портфеля заказов предприятия.

7. Структура и характеристики сети лесовозных дорог рассчитываются с учетом необходимости вырубki лесосек будущих лет и лесохозяйственных требований. Принимаются во внимание различия дорожно-строительных условий, необходимость ремонта и реконструкции существующих дорог, учитывается требование соответствия категории дороги складывающемуся на ней грузопотоку и условиям организации движения.

8. Размещение элементов лесотранспортной сети на осваиваемой территории определяется нахождением оптимального плана решения задачи среди множества допустимых вариантов, задаваемых проектировщиком.

9. Модель лесотранспортной сети предполагает произвольное число источников, транзитных пунктов, имеющих индивидуальные характеристики продуцирования, спроса, затрат на погрузку-разгрузку и переработку леса. Затраты на строительство новых и обслуживание существующих элементов сети (участков дорог) полагаются в соответствии с производственными условиями и складывающимися на них грузопотоками.

10. Лесосечные работы дифференцируются для отдельных лесосек: при этом каждая лесосека полностью вырубается в течение определенного периода согласно плану и правилам рубок. Древесина с лесосеки вывозится потребителю (на нижний склад, в железнодорожный тупик), а сопутствующая древесина либо перерабатывается на нижнем складе, либо также вывозится потребителю.

11. Прибыль или убыток для нижних складов и пунктов переработки лесных ресурсов рассчитываются от обработки каждого кубометра древесины определенной породы и товарности, привезенной на склад или пункт.

При необходимости выполняются ограничения на динамику прибыли по годам планирования. В сжатом виде подобная концепция, представленная в [5], предполагает:

- проведение анализа состава пород и запаса ствольной древесины территории, на которой планируется проводить лесозаготовку;

- формирование базы данных по природно-производственным условиям в лесозаготовительных районах на основании карт и геоинформационных систем;

- выполнение исследования технологических показателей зон летней и зимней вывозки [6];

- построение математических моделей, описывающих природно-производственные факторы, которые влияют на лесозаготовительные работы (температура воздуха, высота снежного покрова, глубина промерзания грунта, заболоченность, продолжительность светового дня, осадки и др.);

- выполнение технико-экономического обоснования и проектирование рациональной сети автомобильных дорог.

Проектирование лесовозных дорог должно осуществляться комплексно, с учетом большого количества факторов, оказывающих существенное влияние на себестоимость строительства дорог и вывозки древесины, по следующему примерному алгоритму.

1. Постановка задачи и целевой функции (например, освоение лесосырьевых баз по критерию максимизации прибыли от реализации заготовленной древесины или минимизации затрат на строительство дорог).

2. Оценка текущей ситуации, включающая в себя:

- характеристику местности: особенности рельефа (открытые площадки, природные террасы, расположенные карьеры, скалистые и каменистые площади, крутые склоны, подверженные весенним паводкам и сточным водам места, территории с благоприятным наклоном рельефа); гидрологические условия (реки, озера, болотистые местности); грунтовые условия (дренирующие, недренирующие почвы, их несущая способность); особо охраняемые природные территории, места обитания животных, природные и искусственные преграды, прилегающие территории, а также другие параметры, определяемые на основе картографических данных [7];

- численное количество и территориальное расположение лесосек, их характеристику на основе материалов лесоустройства, таксационных данных и др. (распределение ликвидных запасов древесины по лесосырьевой базе; длина и ширина лесосырьевой базы, км; ликвидный запас древесины на 1 га в каждом квадрате, куб. м/га; расчетный годовой объем вывозки леса, млн. куб. м; средний объем хлыста в каждом квадрате);

- территориальное расположение и характеристика существующих транспортных путей (расположение автомобильных и железных дорог, водных путей, воздушных путей; типы покрытия усов, веток и магистралей; ширина дорог по верху усов, веток и магистралей; местоположение нижнего склада; наличие песка и гравия, дальность подвозки гравийных материалов и др.);

- территориальное расположение и вместимость погрузочных (перевалочных) пунктов, как в местах трелевки, так и рядом с автомобильными дорогами;

- территориальное расположение и удаленность потребителей древесины (лесозаготовительных предприятий, конечных потребителей, пунктов отгрузки и т. п. – при этом важно учесть вместимость складов конечного потребителя и средние сроки их наполнения);

- имеющиеся системы и комплекты машин (для лесозаготовки и трелевки, вывозки древесины по автомобильным дорогам), а также доступность транспорта для вывозки по железной дороге и по водным путям.

3. Расчет стоимости строительства 1 км дороги для «базовых» условий местности (определенные тип грунта, гидрологические условия, комплект дорожных машин и др.).

4. Ввод дополнительных коэффициентов, увеличивающих или уменьшающих стоимость строительства дорог, в зависимости от различных условий местности.

5. Выбор ключевых участков, содержащих определенный запас древесины, которые требуется освоить:

- расчет прибыли на всех потенциальных участках, обладающих наибольшими запасами древесины;
- наиболее привлекательные с экономической точки зрения лесные участки («ключевые участки»), отобранные на основе установленного предприятием норматива прибыли с одного участка (*тыс. руб. / участок*).

6. Построение цифровой модели местности (перевод информации в цифровой формат).

7. Перевод данных в математическую модель, основанную на использовании инструментария теории графов: «ключевые участки» являются вершинами, а возможные пути между ними – нагруженными ребрами, веса которых соответствуют стоимости строительства дорог.

8. Поиск оптимальной транспортной сети посредством использования методов математического моделирования.

9. Рекомендации к очередности освоения с учетом динамики лесного фонда.

10. Решение задачи по оптимизации грузопотоков для вывозки древесины.

Затраты на строительство дорог, их дальнейшее обслуживание и ремонт должны быть минимальными. Требуется учитывать специфику лесозаготовок, характеризующуюся разрозненностью участков и неравномерностью расположения лесных ресурсов, необходимостью доставки древесины в единый центр (на нижний склад), однонаправленностью лесных грузопотоков, специфичностью грузов (крупные, длинномерные грузы: деревья, хлысты, сортименты), постоянно увеличивающимся расстоянием вывозки, ярко выраженной сезонностью (лето / зима) и т. д. [8]. Определение очередности строительства лесовозных дорог с учетом прогноза динамики лесоводственно-таксационных характеристик насаждений и условий их произрастания, выбор наилучшего расположения искусственных сооружений и другие факторы оказывают существенное влияние на рентабельность лесозаготовительного производства, а значит, должны быть положены в основу комплексной математической модели для решения поставленной задачи.

Точность определения очередности строительства лесовозных дорог с учетом прогноза динамики лесоводственно-таксационных характеристик насаждений и условий их произрастания, выбор наилучшего расположения искусственных сооружений и другие факторы 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. Перечисленные параметры учитываются цифровой моделью местности, включающей в себя три основных вида объектов: участки, характеризующиеся разными типами рельефа и местности (болота, озера и др.), на которых стоимость строительства и содержания участка дороги существенно отличается от базовой; участки-линии, характеризующиеся реками, ручьями, оврагами и т. д., пересечение которых требует допол-

нительных расходов на строительство искусственных сооружений (мостов, виадуков и др.); ключевые участки, к которым относятся места концентрации древесины, возможные пункты примыкания существующих дорог, расположения дорожно-строительных материалов и т. д. Это позволяет провести оценку природно-производственных условий, оптимально выбрать конструкции лесных дорог, сделать точный расчет расходов на строительство. Распределение территорий на три категории обусловлено необходимостью учета затрат на строительство 1 км дороги, которые могут быть выражены в виде базового значения и повышающих (или понижающих) коэффициентов, в зависимости от вида рельефа, особенностей местности, необходимости строительства временных сооружений, наличия существующих дорог и др. [9].

После того, как объективная информация о состоянии лесосырьевой базы получена и перенесена в цифровой вид, необходимо выбрать наилучший подход к выбору оптимального расположения лесовозных дорог на основе методов математического моделирования. Исследователями предлагаются различные подходы к проектированию оптимальной лесотранспортной сети с использованием алгоритма Штейнера [10], Дейкстры [11] и других. В настоящей статье предложен подход с использованием инструментария теории графов – минимального покрывающего дерева (дерева Прима) как один из наиболее пригодных к проектированию оптимальной схемы лесотранспортной сети в условиях неоднородности запасов древесины. С этой целью на первом этапе рассчитывается доходность лесных участков, а затем проводится сравнение их между собой для определения наиболее предпочтительных для дальнейшего освоения. Оценка таких ключевых участков проводится в денежном выражении:

$$S_i = \sum_i^n Q_i^n \times P^n, \quad (1)$$

где S_i – потенциальный доход от реализации всего запаса древесины, находящегося на i -м участке, руб.; Q_i^n – объем i -й породы дерева на i -м участке; m^3 – цена реализации 1 m^3 древесины n -й породы, руб.

Формула (1) может быть дополнена учетом расходов на лесозаготовку (например, включением затрат на заготовку древесины, зависящих от комплекта машин, особенностей рельефа и т. д.):

$$S_{ic} = \sum_i^n Q_i^n \times P^n - \sum_i Q_i \times C, \quad (2)$$

где S_{ic} – 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 – 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. Если доходность с участка соответствует заданному ограничению, участок выбирается как ключевой. В противном случае, участок исключается из рассматриваемых. После проведения соответствующих расчетов по каждому потенциальному участку выбираются ключевые точки, отвечающие выбранным критериям, и обозначаются как вершины связанного неориентированного графа. Затем запускается алгоритм построения минимального покрывающего дерева, соединяющего нагруженными ребрами ключевые точки. Критерием оптимальности является минимальная стоимость строительства лесотранспортной сети (наименьшее суммарное значение весов ребер), соединяющей обозначенные участки (вершины). Сумма весов ребер, образующих минимальное покрывающее дерево, связывающее все участки в единую сеть, будет соответствовать расходам на строительство лесовозных дорог на выбранной территории.

В общем виде формула определения веса ребра имеет следующее выражение:

$$w_{ij} = L_{ij} \times C_{стр}, \quad (3)$$

где w_{ij} – вес ребра, соединяющего i -ую вершину с j -ой, руб.; $C_{стр}$ – стоимость строительства 1 км дороги, руб.; L_{ij} – общая длина дороги, соединяющей i -ую вершину с j -ой, км.

В свою очередь, общая длина дороги, требующей строительства, может быть выражена следующей формулой:

$$L_{ij,общ} = L_{баз} + \sum_i^n k_{i,отл}^n \times L_{i,отл}^n + \sum_i^n k_{i,вст}^n \times L_{i,вст}^n - L_{сущ}, \quad (4)$$

где $L_{баз}$ – длина участка, на котором строительство дороги имеет стандартную (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, на котором строительство дороги 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 типа местности на i -м участке дороги; $k_{i,вст}^n$ – понижающий коэффициент, в зависимости от n -го состояния дороги, требующей ремонта, на i -м участке дороги.

На практике часто складывается ситуация, когда построенная дорога становится своеобразным плацдармом для освоения близлежащих участков посредством прокладки от нее трелевочных волоков к участкам, содержащим определенный запас древесины. Тогда формула расчета веса ребра, учитывающая прибыль от такой «промежуточной» заготовки и реализации древесины, имеет следующий вид:

$$w_{ij} = L_{ij,общ} \times C_{ij,стр} - V_{ij,пр}, \quad (5)$$

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.

Расчеты $V_{ij,пр}$ включают в себя суммарную прибыль от реализации древесины за вычетом стоимости строительства трелевочных волоков, погрузочных пунктов и расходов на лесозаготовку:

$$V_{ij,пр} = \sum_i^n Q_{ij}^n \times P^n - C_{ij,общ}, \quad (6)$$

где Q_{ij}^n – объем древесины, заготовленной на базе построенной дороги от вершины i до вершины j ; $C_{ij,общ}$ – общие расходы.

Общие расходы рассчитываются по формуле:

$$C_{ij,общ} = l_{ij,вол} \times c_{вол} + \sum_i^n h_{mn}^k \times c_{mn}^k + Q_{ij} \times C_{заг}, \quad (7)$$

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

Скрытые резервы снижения себестоимости могут быть выявлены, начиная с момента трелевки деревьев: постановка экстремальной задачи на минимизацию затрат позволяет найти оптимальное количество пазов, ширину зоны тяготения к погрузочным пунктам, их количество на верхнем складе и расстояние между ними. Для решения поставленной задачи необходимо рассчитать себестоимость трелевки леса и грузооборот, зависящий от ликвидного запаса стволовой древесины, учесть производственные мощности предприятия и оценить рыночный спрос на конечную продукцию [12].

После нахождения оптимальной схемы лесотранспортной сети ставится вопрос о необходимости комплексной оптимизации транспортно-технологического процесса (ТП) лесозаготовительных предприятий (ЛЗП). Грамотное разрешение задачи позволяет значительно сократить издержки на транспортировку древесины с погрузочных пунктов на лесосеках до конечного потребителя. Сделать это возможно на основании математических методов планирования производства посредством выработки алгоритма оптимизации ТП ЛЗП и построения логистико-математической модели, обеспечивающей наилучшее взаимодействие между основными элементами сложной системы, включающей пункты заготовки древесины, погрузочные пункты, промежуточные и нижние склады, склады потреби-

телей, сеть транспортных связей между всеми пунктами отправления и потребителями. [13]

Разработка систем уравнений и ограничений, учитывающих характеристику имеющейся техники, осуществляющей перевозки (количество единиц техники, грузоподъемность, быстроходность, расход топлива); предел вместимости нижнего и промежуточного складов; затраты (как временные, так и финансовые) на погрузку-разгрузку на этих складах и другие параметры, позволит решить поставленную задачу оптимизации. Модель также должна учитывать удаленность потребителей от лесосек, промежуточных и нижних складов, а постановка экстремальной задачи на минимизацию затрат позволит найти оптимальное количество пазов, ширину зоны тяготения к погрузочным пунктам, их количество на верхнем складе и расстояние между ними, что способствует снижению производственных издержек. Математически такая система лесозаготовок может быть представлена в стандартном виде уравнения, решаемого симплекс-методом:

$$Z_{\text{общ}} = ax_1 + bx_2 + cx_3 + dx_4 + \dots + nx_k \rightarrow \min, \quad (8)$$

где $Z_{\text{общ}}$ – общие затраты на заготовку и доставку древесины, руб.; x_1 – затраты на заготовку и транспортировку древесины из лесосек непосредственно потребителям, минуя промежуточные склады. Данный элемент системы представляет собой следующую логистико-математическую модель:

$$x_1 = \sum_{i=1}^I i \sum_{j=1}^J j \sum_{m=1}^M m \sum_{p=1}^P p \sum_{k=1}^K k Q_{ijmpk} Z_{ijmpk}, \quad (9)$$

где Q_{ijmpk} – объемы доставки древесины с лесосек до пункта назначения, м³; Z_{ijmpk} – удельные затраты на заготовку и транспортировку древесины до пункта назначения, руб/м³.

Модель описывает затраты на заготовку i -х сортиментов ($i = 1.2.3, \dots, I$) на i -х лесосеках ($j = 1.2.3, \dots, J$) с использованием m -й технологии ($m = 1.2.3, \dots, M$) и доставку p -м типом транспорта ($p = 1.2.3, \dots, P$) k -ому конечному потребителю ($k = 1.2.3, \dots, K$). Аналогичным способом рассчитываются и другие элементы: x_2 – заготовка и транспортировка древесины конечному потребителю через нижние склады; x_3 – тот же процесс, но через промежуточные склады; x_4 – заготовка и транспортировка древесины последовательно: с лесосек на промежуточные склады, а затем на нижние склады с последующей доставкой конечному потребителю; x_k – заготовка и транспортировка древесины до конечного потребителя через другие каналы. При этом все элементы системы должны быть сведены к единой размерности, для чего вводятся поправочные коэффициенты a, b, c, \dots, n . Наиболее подходящей размерностью является денежное выражение (в рублях, долларах США или евро), что позволяет наглядно представить долю каждого элемента в системе транспортно-технологического процесса лесозаготовок [14].

Последовательность освоения лесного массива может производиться двумя способами:

- посредством постепенного продвижения лесозаготовок вглубь лесного массива со строительством магистрали небольшой протяженности, обеспечивающей вывозку древесины в период пять-десять лет эксплуатации лесного массива;
- 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 капитальные инвестиции позволяют сократить расходы на множество подготовительных работ, которые имели бы место в «пошаговом» освоении лесосырьевых баз. Кроме того, в рамках подобной схемы появляется возможность проведения комплексных работ по охране и защите леса на начальном этапе. К недостатку второго метода относятся большие капиталовложения на первом этапе, однако в долгосрочной перспективе они многократно окупаются.

Помимо экономического эффекта от строительства лесовозных дорог, необходимо учитывать социальные и экологические составляющие, которые в общем виде можно представить следующей формулой, предложенной [15]:

$$E = U + G + C - I, \quad (10)$$

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.

Расчет общей экономической эффективности капитальных вложений в общем случае можно представить в следующей формуле:

$$E = \frac{D + T + N + P + V + C}{I}, \quad (11)$$

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

Разработка программного обеспечения под описанные логистико-математические модели позволит широко использовать на практике приведенные методы оптимизации ТП лесозаготовительным предприятиям, осуществляющим производственный цикл от заготовки древесины до поставки ее конечному потребителю. Такая схема оптимизации может быть учтена при проектировании новой схемы сети лесовозных дорог, поскольку позволит наиболее рационально осуществить их строительство.

К вопросам дальнейшего изучения требуется отметить необходимость поиска эффективных подходов к определению очередности освоения ключевых участков, в зависимости от сроков, необходимых на строительство дорог, заготовку, вывозку и реализацию дре-

весины, а также наличия у предприятия свободных денежных средств для инвестирования в подобные долгосрочные проекты. Как правило, на практике освоение лесосырьевых баз происходит не за один год, а в достаточно длительный временной период, что обуславливает необходимость учета инфляционной составляющей. В зависимости от того, как долго предприятие может эффективно осуществлять свою деятельность без притока денежных средств, ожидающихся от реализации проекта, необходимо выбирать очередность освоения лесосек и строительства дорог.

В добывающих и перерабатывающих отраслях на сегодняшний день прослеживается тенденция к созданию территориально распределенных многоуровневых холдингов, включающих в себя десятки крупных предприятий и осуществляющих полный цикл производства: от заготовки сырья с его комплексным использованием, производством и расширением видов выпускаемой продукции до транспортировки потребителям. Такая интеграция позволяет концентрировать (накапливать и перераспределять) значительные финансовые, материальные и кадровые ресурсы в рамках единой системы, что существенно расширяет возможности по развитию производственно-хозяйственных связей (обеспечение развития капиталоемких производств, техническое перевооружение и т. д.) [16].

В лесопромышленном комплексе основными направлениями интеграции являются увязывание предприятий, входящих в единую технологическую систему; углубление переработки сырья; создание новых видов продукции и завоевание новых сегментов рынка и т. д., что требует разработки методики оценки соразмерных инвестиций предприятий в строительство дорог на взаимовыгодных условиях.

Литература

1. Шадаева И.Е. Трансформация экономических отношений в лесопромышленном секторе: автореф. ... дис. канд. эконом. наук. С-Петербург, 2007. 20 с.
2. Иванов В.А., Ичев Д.А. Рациональное лесопользование в неосвоенных районах Восточной Сибири // Труды Братского государственного университета: Серия Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири. Том 1. – Братск ГОУ ВПО «БрГУ», 2007. 119 с.
3. Салминен Э.О., Грехов Г.Ф. Транспорт леса. В 2 т. Т. 1: Сухопутный транспорт. М.: Академия, 2009. 370 с.
4. Гладков Е.Г. Территориальная динамика лесозаготовок: Моделирование и оптимизация эффективного развития лесозаготовок в современных экономических условиях. СПб: СПбГУ, 2006. 188 с.
5. Kostyaev V.N., Runova E.M. Method of forest roads network design using mathematical simulation // Applied and Fundamental Studies: proceedings of the 1st International Academic Conference. 2012. St. Louis, USA, 2012. Vol. 1. 428 p.
6. Лукашевич В. М., Щеголева Л.В. Климатические условия как фактор для обоснования периода эксплуатации зимних лесовозных дорог // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: материалы междунар. науч.-техн. конф. Вологда: ВоГТУ, 2006. С. 36-38.
7. Иванов В.А. Обоснование технологии и оборудования для освоения древесины прибрежной зоны и ложа водохранилищ: дис. ... д-ра техн. наук. СПб, 2008. 278 с.
8. Патакин В.И., Григорьев И.В., Иванов В.А., Редькин А.К. Технология и оборудование лесопромышленных производств. СПб.: ГЛТА, 2009. 362 с.
9. Костяев В.Н. Проектирование сети лесовозных дорог на основе теории графов // Материалы III молодежной международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука XXI века: новый подход». Петрозаводск: Петро-Пресс, 2012. 134 с.
10. Борисов Г.А., Кукин В.Д. Об оптимизации параметров лесотранспортных сетей в современных условиях // Изв. ВУЗов. Лесной журн. 2009. № 1. С. 60–65.

11. Черных Р.А. Обоснование выбора алгоритма поиска кратчайшего пути для построения схемы сети лесовозных дорог // Хвойные бореальной зоны. 2011. № 1-2. С.130-133.

12. Костяев В.Н. Оптимизация лесотранспортной сети как основа развития лесопромышленного комплекса России // Стратегия устойчивого развития регионов России: сб. докл. XI всерос. науч.-практ. конф. Новосибирск, 2012. С. 25-27.

13. Яшин А.В. Оптимизация транспортно-технологического процесса лесозаготовительного предприятия: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2009. 19 с.

14. Рунова Е.М., Костяев В.Н. Задачи оптимизации транспортно-технологических процессов лесозаготовительных предприятий и пути их решений [Электронный ресурс] // Лесной комплекс: состояние и перспективы развития: материалы X междунар. науч.-техн. конф. Брянск, 2010. URL. http://science-bsea.bgita.ru/2010/les_komp_2010/runova_kost.htm (дата обращения: 17.12.2012).

15. Прохоров А.В., Ильин И.В. Информационно-аналитические системы и оценка экономической эффективности проектов транспортного планирования // Научно-технические ведомости С.-Петерб. гос. политех. ун-та. 2010. № 112. С. 291-295.

16. Рулев В.И. Управление материально-транспортными потоками лесопромышленного комплекса: дис. ... канд. техн. наук Воронеж, 2007. 225 с.

References

1. Shadaeva I. E. Transformation of economic relations in the forestry industry: avtoref. dis. ... kand. ekonom. nauk. Sankt-Peterburg, 2007. 20 s.
2. Ivanov V.A., Ichev D.A. Sustainable forest management in the undeveloped regions of Eastern Siberia // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta: Seriya Estestvennye i inzhenernye nauki – razvitiyu regionov Sibiri. Tom 1. Bratsk, 2007. 19 s.
3. Salminen E.O., Grekhov G.F. et al. Transport for forest harvesting. V 2 t. T. 1. Sukhoputny transport. M.: Akademiya, 2009. 370 s.
4. Gladkov E.G. Territorial harvesting dynamics: modeling and optimizing the logging performance in the current economic environment. SPb.: SPbGU, 2006. 188 s.
5. Kostyaev V.N., Runova E.M. Method of forest roads network design using mathematical simulation. Applied and Fundamental Studies: Proceedings of the 1st International Academic Conference. Vol. 1. St. Louis, USA. 2012. 428 p.
6. Lukashovich V. M., Shchegoleva L.V. The climatic conditions as a factor to substantiate the operation period of winter forest roads // Aktual'nye problemy razvitiya lesnogo kompleksa: materialy mezhd. nauch.-tehn. konf. Vologda: VoGTU, 2006. S. 36-38.
7. Ivanov V.A. The substantiation of the technology and equipment to develop the coastal zone and reservoir floor wood: dis ... dokt. tehn. nauk. SPb., 2008. 278 s.
8. Patyakin V.I., Grigor'yev I.V., Ivanov V.A., Red'kin A.K. The technology and equipment of timber production. SPbGLTA, 2009. 362 s.
9. Kostyaev V.N. The forest roads network design based on the graph theory // Materialy III molodezhnoy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh. Petrozavodsk, 2012. 134 s.
10. Borisov G.A., Kukin V.D. On the optimization of forest road network parameters in the modern world // Izv. VUZov. Lesnoy zhurn. 2009. №1. S. 60–65.
11. Chernyh R. A. Rationale for the shortest path algorithm to construct a logging roads network diagram // Khvoynye boreal'noy zony. 2011. № 1/2. S.130-133.
12. Kostyaev V.N. Optimization of forest road network for the development of Russia's timber industry complex // sb. dokl. XI vseross. nauch.-prakt. konf. Novosibirsk, 2012. S. 25-27.
13. Yashin A.V. Optimization of timber company's transport and technological process: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk. SPb., 2009. 19 s.
14. Runova E. M., Kostyaev V. N. Optimization tasks of transport and technology processes in timber industry complex and the ways to solve them [Elektronny resurs] // Lesnoy kompleks: sostoyanie i perspektivy razvitiya: materialy X mezhdunar. nauch.-tehn. konf. Bryansk, 2010. http://science-bsea.bgita.ru/2010/les_komp_2010/runova_kost.htm (access date: 17.12.2012)
15. Prokhorov A.V., Il'in I.V. Information-analytical systems and economic evaluation of transport planning projects // Nauchno-tehnicheskiye vedomosti S.-Peterb. gos. politehn. un-ta. 2010. № 112. S. 291-295
16. Rulev V.I. Inventory management of the timber industry traffic: dis. ... kand. tehn. nauk. Voronezh. 2007. 225 s.