УДК: 630*03

П. А. Лыщик, кандидат технических наук, доцент;
В. В. Игнатенко, канд. техн. наук, доцент; Е. И. Бавбель, аспирант

РАСЧЕТ ОЧЕРЕДНОСТИ ТРАНСПОРТНОГО ОСВОЕНИЯ ЛЕСНЫХ МАССИВОВ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

A lot of interesting and important kinds of activity can be treated as multistage processes of the decision. Application of classical methods in these new areas has appeared useful, but their range and flexibility obviously insufficient, especially, when it was a question of reception of numerical results.

All this has led to creation of new mathematical methods and theories among which there was also the theory of dynamic programming representing the new approach, based on use of the functional equations and a principle of optimality.

One of the primary goals which are solved by means of a method of dynamic programming are problems of accommodation forest road networks and definitions of sequence of transport development of large forests.

Введение. При проектировании лесозаготовительных предприятий приходится решать много вопросов, связанных с трудоемкими технико-экономическими вычислениями. К числу таких вопросов относятся размещение транспортной сети и определение очередности транспортного освоения лесных массивов.

Решение задач размещения транспортной сети в лесных массивах, выбора типа дорожной одежды, выбора пункта примыкания магистрали производится методом сравнения ряда вариантов. Многообразие и сложность взаимосвязанных факторов, которые следует учитывать при проектировании, и трудоемкость расчетов ограничивают при ручном счете количество вариантов. При этом перечисленные задачи решают как самостоятельные, вне связи друг с другом, так и в комплексе. Лучшее решение каждого отдельного вопроса оценивается определенным показателем.

Также известно, что анализ незначительного числа вариантов и решение взаимосвязанных вопросов, входящих в общую проблему, как самостоятельных задач не всегда приводит к лучшему решению проблемы в целом. Однако для решения общей задачи по освоению лесных массивов нужен критерий, который выражается одним числом, а не векторный многоцелевой.

Очевидно, что необходимо принимать оптимальные решения на год (или другой срок) и одновременно на весь рассматриваемый период в целом с учетом возможных изменений параметров. Для решения такого рода задач, которые получили название многошаговых, разработан соответствующий математический аппарат, носящий название динамического программирования [1, 2].

Основные преимущества этого метода: прежде всего, он позволяет найти глобальное оптимальное решение; оптимизация ведется по одной переменной; при этом необходимо учитывать изменения параметров во времени.

Основные положения. Для поиска оптимального решения комплекса вопросов, связанных с транспортным освоением лесных массивов, следует рассматривать большое число задач и решать их не отдельно на каждом этапе, а в неразрывном единстве [3].

Для освоения лесосырьевой базы необходимо:

- найти оптимальное начертание сети лесных дорог;
- установить типы лесных автопоездов;
- определить типы дорожных одежд;
- выбрать пункт примыкания магистрали;
- наряду с оптимальным решением получить ряд близких к нему.

Для решения этих задач задаются:

1. Сеть конкурентоспособных путей в лесосырьевой базе (граф).
2. Длина звеньев сети $l_{i,j}$.
3. Грузообороты по каждому маршруту $q_{i,j}$.
4. Нормативные затраты на строительство и эксплуатацию 1 км дорог с различными типами дорожных одежд $K_{i,j}$ и $Э_{i,j}$.
5. Нормативные показатели себестоимости перевозок 1 м^3 км по дорогам различных категорий $S_{i,j}$.
6. Стоимость единицы тягового и подвижного состава $K_т$. Возможны и другие показатели.

В связи с такой постановкой задачи возникла необходимость выбора критерия оптимальности и метода решения задачи.

При выборе критерия оптимальности следует подчеркнуть, что точное количественное решение конкретной задачи практически невозможно, если результат этого решения не выражается одним показателем. Наиболее общим и целесообразным критерием является критерий экономической эффективности в лесном хозяйстве.

Разрабатывая схему транспортного освоения лесосырьевой базы (включая в этот термин только перечисленные выше вопросы), недостаточно учитывать первоначальные затраты на строительство или реконструкцию дорог и на приобретение тягового и подвижного состава. Учет только инвестиций затрагивает обычно общее

направление решения, а не выявление конкретных показателей того или иного варианта [4].

Для оптимального решения задач в расчет необходимо вводить расходы по содержанию и ремонту дорог и эксплуатационные издержки транспорта. Важно, чтобы в процессе решения задачи целевая функция отражала движение затрат при переходе от одного рассматриваемого звена сети к другому.

Дугой сети будем называть дорогу или участок дороги между двумя пунктами (i, j) (грузонапряженность звена постоянна).

Грузовая работа и удельные дорожно-транспортные расходы в рамках рассматриваемой задачи не могут быть приняты за критерий оптимальности по следующим соображениям. Грузовая работа однозначна движению затрат по перевозкам. Однако использование грузовой работы в качестве критерия возможно, если все условия транспорта древесины по звеньям сети идентичны, т. е. вывозка осуществляется одним типом транспорта по дорогам с однородными покрытиями и близкими продольными уклонами. Строительные и эксплуатационные расходы по сетям этим показателем совсем не учитываются.

Удельные расходы на 1 м^3(м^{3}км) не отражают характера изменения общей суммы расходов по отдельным звеньям сети и экономии на транспортных расходах, получаемой от всего объема перевозок.

Выражением для целевой функции, наиболее соответствующим условиям рассматриваемой задачи, является минимум суммарных приведенных дорожно-транспортных затрат, приходящихся на весь объем перевозок и на всю дорожную сеть. Этот показатель позволяет учитывать все изменения разных видов затрат в зависимости от изменения объема перевозок и звеньев сети и взаимное влияние отдельных видов затрат. Выбранный показатель для выражения целевой функции позволяет наиболее полно учитывать влияние различных факторов на эффективность капитальных вложений в дорожное строительство и транспорт.

Суммарные приведенные затраты по сети определяются уравнением [5]

$$= \sum_{i,j=1}^{p} a_{i,j} + \sum_{i,j=1}^{p} c_{i,j} + E_0 K_{\text{т}},\ p = 1, 2, ..., m, \quad (1)$$

где $K_{i,j}$ – инвестиции, приходящиеся на 1 км i, j-го звена; $K_{\text{т}}$ – стоимость тягового и прицепного состава; E_0 – нормативный коэффициент экономической эффективности; $Э_{i,j}$ – годовые дорожно-эксплуатационные затраты (по текущему ремонту и содержанию дорог), приходящиеся на 1 км i, j-й дуги; $l_{i,j}$ – длина i, j-й дуги; $Q_{i,j}$ – годовой грузооборот i, j-й дуги; $S_{i,j}$ – себестоимость перевозки 1 м^3 км по i, j-й дуге; $a_{i,j}$ – полные дорожные затраты на i, j-й дуге; $c_{i,j}$ – полные транспортно-эксплуатационные затраты на i, j-й дуге.

Таким образом, задача представляет собой нахождение

,

где Ω – пространство всех звеньев.

Задача транспортного освоения лесного массива относится к группе многовариантных. Сложность и особенность ее заключаются в том, что система уравнений, описывающих поставленную задачу, содержит большое количество неизвестных, а большой объем информации приходится задавать в табличной форме.

Трудности увеличиваются определенным числом ограничений и сложностью критерия, по которому производится сравнение вариантов. Как следствие этого, уже выбор лучшего решения проблемы транспорта лесоматериалов представляет собой сложную задачу, не поддающуюся решению классическими методами анализа и вариационного исчисления.

Использование современных компьютеров для решения задач подобного рода увеличивает возможности «просмотра» различных вариантов и помогает принимать правильное решение. Однако возможности «перебора» ограничены известными пределами. Как правило, простой перебор всех возможных вариантов оказывается недоступным и машинам. Поэтому разработка машинных схем проектирования должна идти по пути поиска и разработки эффективных математических методов, которые позволяют за счет исключения заведомо негодных вариантов резко сократить перебор.

Методы динамического программирования охватывают различные задачи оптимального управления и планирования. В частности, метод последовательного анализа вариантов применяется для решения задач оптимального профилирования автомобильных лесных дорог. Методами динамического программирования можно получать приближенные решения, разбивая задачу на ряд этапов и находя для каждого этапа решение как для статических задач. В этом случае лучший вариант из всех возможных выбирают по определенной программе, построенной таким образом, что заведомо худшие варианты исключаются из расчета [2].

Решение задач методом динамического программирования осуществляется в два этапа:

1) от последнего шага к первому (от конца к началу);

2) от первого шага к последнему (от начала к концу).

На первом этапе находятся условные оптимальные управления u_1* и выигрыши w_1* на каждом шаге. Условное оптимальное управление выбирается так, чтобы все предыдущие шаги обеспечили максимальную эффективность последующего. Основу такого подхода составляет принцип оптимальности Беллмана: каково бы ни было состояние системы перед очередным шагом, управление на этом шаге надо выбирать так, чтобы выигрыш на данном шаге плюс выигрыш на всех последующих шагах был минимальным.

Другими словами, управление на i-м шаге выбирается таким образом, чтобы не выигрыш на данном шаге был минимальным, а чтобы была оптимальна сумма выигрышей на всех оставшихся до конца шагах плюс данный. Исключение составляет заключительный шаг, который может планироваться без учета будущих последствий. Поэтому процесс динамического программирования разворачивается от конца к началу – первым планируется последний шаг.

На втором этапе определяются оптимальное управление u и оптимальный выигрыш w . На этом этапе вычисления практически уже не выполняются, а просматриваются и сравниваются решения, полученные на первом этапе. Для этого достаточно, двигаясь от начала к концу, прочитать уже готовые рекомендации и найти u, состоящее из u_1*, u_2*, …, u_m*. Что касается оптимального выигрыша w в целом, то он нам уже известен, именно на его оптимальности выбрано управление на первом шаге. Следует отметить, что в отличие от оптимального выигрыша w, оптимальное управление u* может быть неоднозначно [1].

Методом динамического программирования могут решаться задачи, обладающие тремя свойствами:

1. Общая задача должна допускать пошаговое ее рассмотрение с принятием решений на каждом шаге.

2. Оптимальный план решения задачи не должен зависеть от предыстории, от того, как рассматриваемый процесс достиг исходного состояния; он должен определяться только исходным состоянием процесса, т. е. состоянием в рассматриваемый период времени.

3. Задача должна допускать получение общего оптимального решения путем сложения решений, принимаемых на отдельных шагах процесса (свойство аддитивности).

При использовании методов динамического программирования определяются новые резервы улучшения конфигурации и структуры лесотранспортной сети, а также схем соединения лесотранспортных путей с оптимизацией координат развилок путей при существующей сети лесных дорог [6]. При этом необходимо выполнять обязательные условия:

1) лесоэксплуатационные районы являются объектами для размещения лесосек и лесотранспортных сетей,

2) точечные и линейные препятствия требуют строительства мостов и т. д.;

3) прокладка путей по контурным «недоступным» областям исключается.

Определение очередности транспортного освоения лесных массивов. При проектировании транспортного освоения лесных массивов возникает задача по определению очередности строительства лесных дорог. От правильности ее решения зависит ритмичность работы предприятий, динамика освоения инвестиций и в конечном итоге эффективность лесозаготовительного производства [3].

Основное требование при расчете очередности транспортного освоения сырьевой базы – обеспечить заданный по отдельным периодам план транспортировки древесины с использованием построенных дорог при минимуме суммарных приведенных затрат на строительство дорог, их содержание и вывозку по ним древесины [4].

При постановке задачи приняты следующие допущения.

1) запасы древесины считаются сконцентрированными в отдельных пунктах (вершинах), соединенных между собой дорогами (дугами) по известной схеме с известной структурой;

2) древесину можно транспортировать из каждого пункта в любой период;

3) участок дороги, расположенный между двумя пунктами, строят в течение одного планового периода;

4) древесину вывозят в периоды, следующие за периодом строительства участка дороги.

При формулировании задачи и ее решении применяем терминологию теории графов. В приложении к схемам транспортного освоения лесных массивов пункт концентрации древесины или развилка дорог называется вершиной, а дорога, соединяющая две вершины, – ориентированной дугой. Направление дуг (i, j – i до j) совпадает с направлением вывозки древесины из пункта i в пункт j (например, рис. 1, a – $l_{14,6}$ и $l_{3,1}$). Для транспортных сетей лесозаготовительных предприятий характерны вершины двух видов – промежуточные и концевые. Различаются они тем, что в промежуточную вершину дуги входят и выходят (например, рис. 1 a вершины 9, 14, 16), а из концевой только выходят.

Исходные данные для решения задачи: сеть дорог с известной (древовидной) конфигурацией, характеризующаяся вершинами с номерами i = 1, 2, 3, ..., n и дугами (i, j). Предполагаем, что если i – концевая вершина, то в ней сконцентрирован запас древесины, равный q_i, если i, j – дуга, исходящая из концевой вершины, то суммарный объем вывозки по дуге равен q_i. Если i – некоторая промежуточная вершина, то

сумма объемов вывозки по входящим в нее дугам равна объему вывозки по выходящей из нее дуге (дуга с номером i, j). Кроме того, задан план вывозки древесины для всей сети по периодам: Q_1, Q_2, ..., Q_i, …, Q_N.

Пусть i, j-я дуга вводится в действие в v-й период. Тогда суммарные приведенные затраты на i, j-й дуге можно определить по формуле [7]

, (2)

где $K_{i,j}^{k}$ – инвестиции в i, j-ю дугу при строительстве; $e_н$ – нормативный отраслевой коэффициент эффективности инвестиций; v – период ввода дуги в эксплуатацию; $c_{i,j}$ – удельные затраты (на 1 м^3 древесины) на вывозку древесины и содержание дороги по i, j-й дуге; $q_{i,j,t}$ – объем вывозки древесины по i, j-й дуге в t-й период.

Приведенные затраты для всей сети

, (3)

где суммирование производят по всем дугам.

Для лесотранспортных сетей справедлив ряд условий. В любой концевой вершине i объем вывозки за весь период N освоения лесосырьевой базы равен запасу древесины в ней

$$q_{i,j} = \sum_{t=1}^{N} q_{i,j,t} \,. \qquad (4)$$

Если вершина неконцевая и не точка примыкания, то для нее в каждый период справедливо уравнение баланса древесины, т. е. объем ввоза равен объему вывозки.

Для пункта примыкания лесотранспортной сети в каждый период t сумма объемов вывозки по дугам (i, j), входящим в вершину с пунктом примыкания, равна Q_t, т. е. плану вывозки за t-й период.

При решении задачи используют алгоритм оптимального распределения планируемого за один период объема вывозки между пунктами концентрации древесины (концевыми вершинами), соединенными сетью дорог, а также алгоритм распределения пунктов концентрации по периодам. Первый из упомянутых алгоритмов – обобщение алгоритма распределения ресурсов Беллмана [8] на случай, когда планируемый за один период объем вывозки распределяется между пунктами концентрации древесины на сети, имеющей вид дерева (рис. 1, *а*). Алгоритм же Беллмана применяется только к сети, имеющей вид дерева – частного типа (рис. 1, *б*).

Алгоритм распределения ресурсов Беллмана применительно к сети (рис. 1, *б*) можно описать следующим образом. Если имеется концевая вершина под номером i, то можно считать, что задана стоимость затрат на концентрацию древесины в эту вершину, равная $T_i(x)$, где $0 \le x \le q_i$ (q_i – запас в вершине i). Для фрагмента сети рис. 1, *б* на каждой дуге i, j задана функция стоимости $S_{i,j}(x)$ строительства дуги, содержания и транспортировки по ней древесины в зависимости от объема вывозки x:

(5)

где $k = 0$, если лесная дорога существует; $k = 1$, если дорога существует и требует ремонта или реконструкции; $k = 2$, необходимо построить новую лесную дорогу.

Всякое оптимальное распределение заданного объема вывозки между n дугами в пределах одного планового периода требует оптимального распределения объема, приходящегося на первые $n - 2$ дуг, в пределах того же периода (в этом состоит применительно к данной задаче так называемый принцип оптимальности). В случае, если $n = 1$ – сеть состоит из одной дуги, распределение объема вывозки единственно и поэтому оптимально. Суммарные затраты $F_1(x)$ в зависимости от объема x для вершины 1 выражаются так [9]:

, (6)

где $0 \le x_1 \le q_1$.

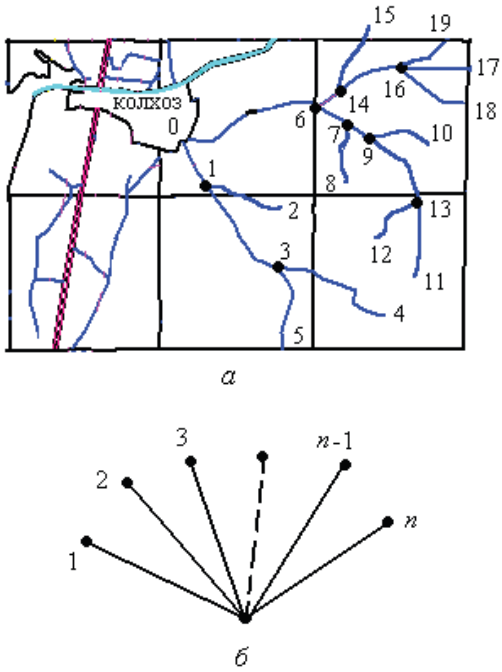

Рис. 1. Графы сети лесных дорог:
а – фрагмент лесотранспортной сети;
б – частный тип дерева Беллмана

Если число дуг, входящих в n, равно 2, то минимальные затраты на фрагменте сети будут

$$F_2(x_2) = \min[F_1(x_1) + T_2(x_1 - x_2) + S_2^{'}(x_1 - x_2)]\,;$$

$$0 \le x_2 \le x_1; \qquad (7)$$

$$x_2 \le q_1 + q_2,$$

т. е. выбирается оптимальное распределение между дугами 1 и 2.

При наличии $m+1$ дуг для выбора объема транспортировки по $m+1$ дуге в соответствии с этим же принципом оптимальности используют рекуррентную формулу

$$F_{m+1}(x) = \min[F_m(x_{m+1}) + T_{m+1}(x - x_{m+1}) + \\ + S'_{m+1}(x - x_{m+1})],\ 0 \le x_{m+1} \le x, \qquad (8)$$

$$x_{m+1} \le q_1 + \ldots + q_{m+1},$$

где $0 \le x \le q_1 + \ldots + q_m + q_{m+1}$.

Применяя ее, можно выбирать распределение объемов между дугами, приводящее к минимуму суммарных затрат для определенного планового периода при любом заданном объеме вывозки в пределах от 0 до $((n/z)\ q_i)$ (n – число дуг, z – число плановых периодов).

Перейдем теперь к рассмотрению произвольной сети вида дерева (рис. 2, *а*). Сначала, пользуясь изложенным алгоритмом Беллмана, для всех фрагментов, выделенных кругом на рис. 2, *а*, решаем задачу распределения ресурсов, считая вершины 3, 13, 16 пунктами примыкания соответствующих фрагментов. Для этих вершин найдем функции оптимального распределения, которые обозначим через $T_3(x)$, $T_{13}(x)$, $T_{16}(x)$. Функции представляются в виде таблиц, где каждому значению x (для $T_3(x)$, например, x принимает значения 0, 1, 2, ..., $q_4 + q_5$) соответствуют минимальные затраты на вывозку объема x в пункт примыкания фрагмента.

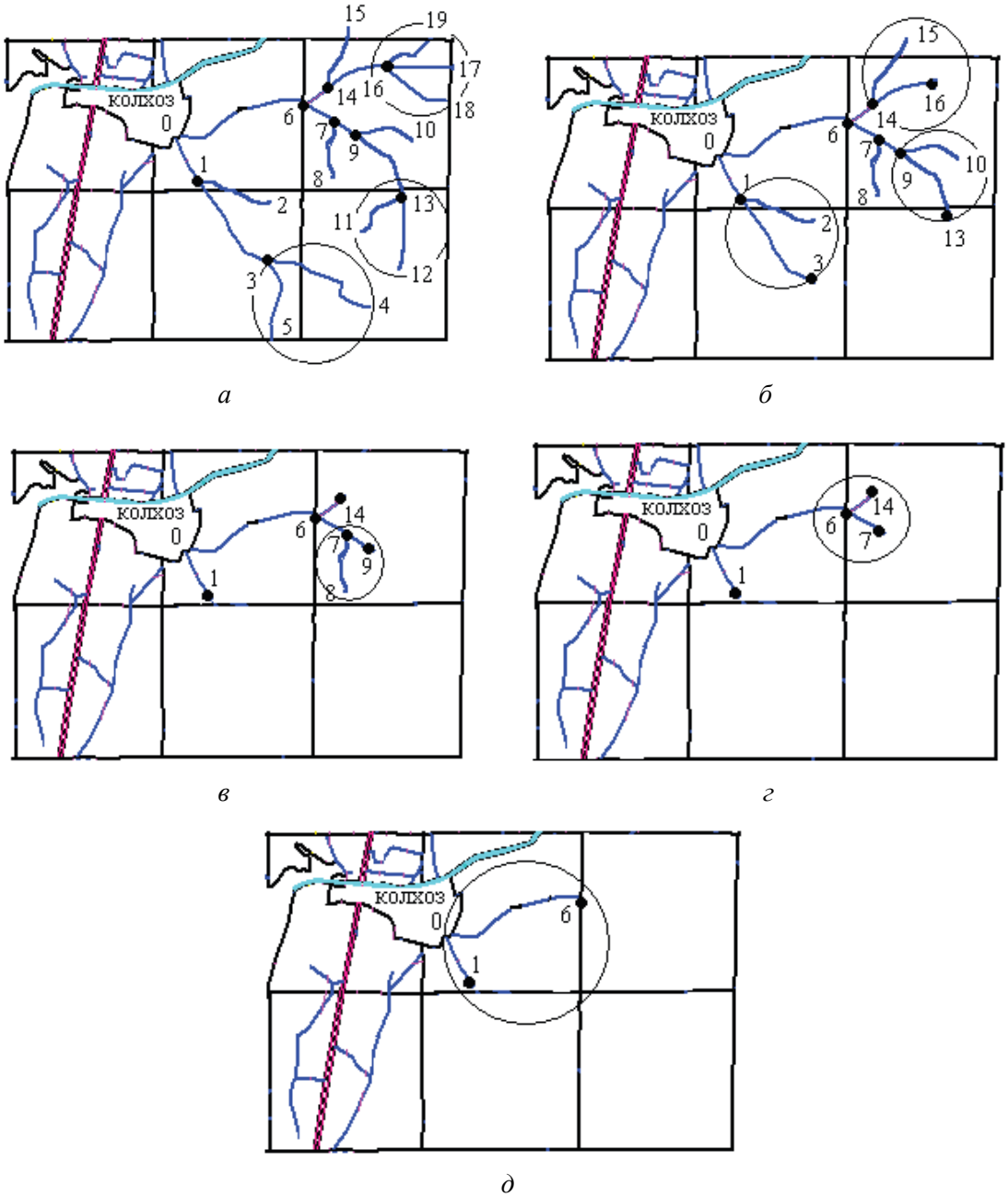

Рис. 2. Преобразования лесотранспортной сети (графа вида дерева) в процессе решения

Далее рассмотрим дерево на рис. 2, *б*. Оно получено из дерева 2, *а* исключением фрагментов, обведенных кругом. Для каждой концевой вершины этого дерева можно считать заданной стоимость затрат на транспортировку древесины в эту вершину в зависимости от объема x. Для вершин 3, 13, 16 функции были получены на предыдущем шаге, а для остальных известны ранее.

Для обведенных кругом фрагментов дерева рис. 2, *б* найдем функции $T_1(x)$, $T_{14}(x)$, $T_9(x)$ и перейдем к рассмотрению дерева рис. 2, *в*.

Рассуждая аналогичным образом (рис. 2, *г*, *д*), получим в итоге функцию $T_0(x)$ – стоимость оптимального распределения объема x между пунктами концентрации древесины (между концевыми вершинами дерева рис. 2, *а*).

Полученная совокупность функции $T_i(x)$ и параметры, которые можно попутно найти при определении этих функций, позволяют для каждого заданного объема x указать его конкретное распределение между пунктами концентрации, обеспечивающее минимальное количество суммарных затрат (т. е. оптимальное распределение) в пределах одного планового периода.

Заключение. Метод динамического программирования является очень мощным и плодотворным методом оптимизации управления. Первый вопрос, на который нужно ответить: какими параметрами характеризуется состояние управляемой системы перед каждым шагом? От удачного выбора набора этих параметров часто зависит возможность успешно решить задачу оптимизации.

При определении очередности освоения сырьевых баз в практике сложился подход, при котором дороги, подлежащие строительству в текущий период, стараются выбирать по минимуму суммарных затрат, пренебрегая возможным увеличением затрат в последующие периоды. Однако из-за отсутствия точных алгоритмов и большого объема информации, подлежащей обработке, этот подход не реализуется достаточно корректно. Излагавшееся выше обобщение алгоритма Беллмана для случая сети типа дерева с корнем (обозначим его через $M_{\text{белм}}$) позволяет при использовании компьютера запрограммировать этот алгоритм.

1. В исходной сети с помощью алгоритма $M_{\text{белм}}$ выделяется фрагмент, обеспечивающий вывозку древесины объемом Q_1 и имеющий минимальные затраты по сравнению с другими фрагментами, занимающими такой же объем. Оставшаяся часть сети представляет собой некоторую совокупность деревьев (которая, в частности, может состоять и из одного дерева). Каждое дерево из этой совокупности «примыкает» к выделенному на первом шаге фрагменту только в одной точке. Теперь строим новое, «сокращенное» дерево следующим образом: стираем выделенный фрагмент; из точки примыкания каждого дерева из вышеупомянутой совокупности проводим в точку примыкания сети дугу, с которой сопоставляют удельные затраты, равные затратам на доставку единицы объема из этой точки в пункт примыкания по выделенному фрагменту.

2. В полученном дереве (аналогично пункту 1) находим фрагмент с запасом древесины Q_2. Повторяем этот процесс (построение сокращенного дерева и выделение фрагмента) до тех пор, пока не будет найдено искомое разбиение пунктов концентрации древесины по периодам освоения.

Таким образом, получим очередность транспортного освоения лесосырьевой базы. Эта очередность может и не быть строго оптимальной, но такой подход к ее определению более предпочтителен.

Литература

1. Игнатенко, В. В. Моделирование и оптимизация процессов лесозаготовок / В. В. Игнатенко, И. В. Турлай, А. С. Федоренчик. – Минск: БГТУ, 2004. – 180 с.

2. Скотта, А. В. Метод динамического программирования в решении транспортных задач: учеб. пособие / А. Скотта. – Хабаровск: Хабаров. гос. техн. ун-т, 2003. – 107 с.

3. Гордеев, С. М. К обоснованию очередности освоения лесосек / С. М. Гордеев // Лесной журнал. – 1992. – № 3. – С. 37–42.

4. Транспортное освоение и строительство лесохозяйственных дорог в лесах Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь на период до 2010 года: программа / РУП «Белгипролес». – Минск, 2006. – 60 с.

5. Ларионов, В. Я. Об оптимальном технико-экономическом решении вопросов транспортного освоения лесосырьевых баз / В. Я. Ларионов // Оптимальное планирование и управление лесопромышленными комплексами: материалы науч.-техн. конф. – М.: МЛТИ, 1970. – С. 77–84.

6. Бавбель, Е. И. Оптимизация транспортно-технологических схем освоения лесосырьевой базы в лесах второй группы / Е. И. Бавбель // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. – 2007. – Вып. XV. – С. 100–103.

7. Борисов, Г. А. Методы автоматизированного проектирования лесотранспорта / Г. А. Борисов. – Петрозаводск: Карелия, 1978. – 198 с.

8. Беллман Р. Динамическое программирование / Р. Беллман. – М.: ИЛ, 1960. – 400 с.

9. Осетров, Е. П. Оптимизация очередности и стадийности строительства автомобильных дорог с учетом ограниченных ресурсов / Е. П. Осетров, Н. Д. Татенко // Оптимальное использование машин в строительстве. – Хабаровск, 1976. – С. 63–71.