



УДК 630\*36.004:518.5

*А.В. Воронин*

Воронин Анатолий Викторович родился в 1959 г., окончил в 1983 г. Петрозаводский государственный университет, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой прикладной математики и кибернетики, первый проректор ПетрГУ. Имеет более 80 печатных работ в области математического моделирования систем управления в лесопромышленном комплексе.



### **МНОГОЭТАПНЫЕ ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛЬНЫМИ ПОТОКАМИ В ВЕРТИКАЛЬНО-ИНТЕГРИРОВАННЫХ СТРУКТУРАХ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА**

Предложены экономико-математические модели для решения многоэтапных транспортно-производственных задач планирования и управления материальными потоками лесопромышленных предприятий. Рассмотрены примеры задач для вертикально-интегрированных производственных структур ЛПК, варианты их использования в практике работы предприятий.

Ключевые слова: лесопромышленный комплекс, вертикально-интегрированные структуры, планирование и управление материальными потоками предприятия, экономико-математические модели.

Рациональное использование ресурсов – одна из важнейших задач в управлении и планировании работы вертикально-интегрированных структур (ВИС) лесопромышленного комплекса (ЛПК), решение которой позволяет использовать экономические методы расчета взаимодействия ВИС с входящими в нее предприятиями, на основе дифференцированных оценок эффективности работы, определения размеров платы за пользование ресурсами и экономических оценок ресурсов контролируемой территории.

Работа дочерних предприятий ВИС в современных условиях перехода к рыночной экономике, в сложной и нестабильной экономической ситуации, при постоянном росте цен на сырье, тарифов на энергию и перевозки, несовершенной налоговой системе, а также с учетом острой необходимости обновления и модернизации основных производственных фондов требует особо тщательного учета расходования ресурсов. Для ВИС в целом, в свою очередь, важнейшее значение имеет рациональный подход к использованию всей массы ресурсов, потребление их таким образом и в таких объемах, чтобы обеспечивалось не только удовлетворение потребностей в на-

стоящее время, но сохранение и воспроизводство для использования в будущем. Одной из первоочередных задач является получение экономических оценок для рационального управления ресурсами.

Для решения перечисленных задач можно эффективно использовать средства экономико-математического моделирования и численные методы с применением информационных технологий.

Экономико-математическое моделирование процессов управления в настоящее время является одним из основных инструментов оптимизации функционирования различных экономических систем. Модели, построенные в определенном соответствии с объектом исследования, позволяют составлять прогнозы развития объекта, его подсистем и изменения основных характеристик. Современная ВИС – многоуровневая иерархическая система, включающая предприятия различных подотраслей, центральные органы управления, некоммерческие союзы, партнерства, организации. В своей деятельности эти структуры постоянно принимают решения в условиях ограниченности времени, финансовых, трудовых, природных ресурсов, технических средств, технологических возможностей. Методы и средства экономико-математического моделирования в сочетании с использованием вычислительной техники позволяют достаточно эффективно решать на практике задачи планирования и управления как для отдельных предприятий ВИС ЛПК, так и для всего комплекса в целом. Ниже рассматриваются некоторые задачи, наиболее часто встречающиеся в практике работы ВИС ЛПК.

Очевидно, что ВИС ЛПК – весьма специфическая большая экономическая система, свойства которой определяют роль и характер задач планирования и управления, следующие особенности их постановки и методов решения:

многоцелевой характер задач (ВИС ЛПК включает относительно экономически самостоятельные объекты, цели которых, а следовательно, и объекты моделирования, образуют иерархическую систему);

значительное влияние «внутренних» и «внешних» факторов неопределенности;

наличие комплекса задач и моделей, так связанных между собой, что невозможно описать ВИС как большую экономическую систему одной моделью;

задачи и модели комплекса имеют четко выраженную иерархическую структуру и могут решаться в определенной последовательности (возможно, с повторным переходом на более низкий уровень);

задачи и модели различаются степенью детализации описания процесса управления ВИС и ее подразделениями; решение одних может дать исходную информацию для решения других;

информационные связи задач обычно образуют контур, при этом возникает проблема декомпозиции их комплекса;

в процессе решения имеется возможность получить экономические оценки ресурсов, технологий и т. д., роль которых в использовании эконо-

мических механизмов управления деятельностью ВИС ЛПК чрезвычайно велика.

*Примеры транспортно-производственных задач*

В управлении предприятиями ЛПК одно из центральных мест занимают транспортно-производственные задачи. Они наиболее сложны для решения, но способны обеспечить высокий экономический эффект, выявить узкие места в производственной структуре, выяснить перспективы развития.

Одна из важнейших специфических особенностей деятельности ВИС ЛПК состоит в разумной специализации дочерних предприятий, что в сочетании с комплексной переработкой сырья и возможностью согласованного планирования деятельности подразделений ВИС дает заметные экономические преимущества. При этом возможности планирования сталкиваются с необходимостью исследования достаточно сложного класса многоэтапных транспортно-производственных задач (МТПЗ).

Рассмотрим особенности задач этого класса:

предприятия ВИС ЛПК территориально разобщены и могут находиться в неодинаковых технико-экономических условиях в силу различных географических, демографических, природных условий и состояния производственной инфраструктуры;

экономико-математические модели этих задач должны учитывать многоэтапность и многовариантность переработки сырья одного или нескольких видов;

многоэтапность переработки приводит к появлению множества промежуточных продуктов – переделов, баланс которых должен рассчитываться отдельно;

частичная специализация предприятий ВИС ЛПК приводит к необходимости выполнять различные операции средствами производств, мощность которых в силу ряда внешних условий ограничена, а затраты неодинаковы;

затраты на переработку сырья и по переделам соизмеримы с транспортными расходами на перевозку продуктов;

допускается создание только ограниченных запасов продуктов на складах предприятий;

оптимальный транспортно-производственный план рассчитывается в предположении достаточной управляемости транспортными потоками и технологическими процессами дочерних предприятий.

Большинство перечисленных требований применимо к крупным предприятиям ЛПК. Так, например, ВИС на основе одного или нескольких ЦБК должна учитывать:

наличие, кроме производств по глубокой переработке древесного сырья, ряда лесозаготовительных предприятий, инфраструктура, состояние лесовозных дорог и лесозаготовительной техники, кадровый потенциал которых весьма неодинаковы, а расстояния между предприятиями составляют сотни (а порой и тысячи) километров;

множество видов лесопродукции (на ЦБК это сотни марок, видов и наименований бумаги, картона, целлюлозы, ДВП и др.), вариантов и способов ее переработки;

большое число переделов (технологическая щепка, промытая и отбеленная листовая целлюлоза, бумага и картон в сьемах тамбуров и в рулонах, множество регенерируемых химикатов), многие из которых подлежат дальнейшей переработке, их баланс должен рассчитываться отдельно;

значительную долю затрат на перевозку сырья, химикатов и готовой продукции в себестоимости выпускаемой продукции;

обширную транспортно-производственную инфраструктуру и большие объемы перевозок в ВИС ЛПК.

Каждая ВИС ЛПК должна иметь очень гибкую и динамичную систему управления. Хотя управляемость предприятий ЛПК не абсолютна и зависит от дисциплины поставщиков сырья, химикатов, погодных и дорожно-транспортных условий, высокой аварийности производства и других факторов, но ее можно считать достаточной при планировании на значительный промежуток времени с учетом всех перечисленных обстоятельств.

Рассмотрим ряд примеров МТПЗ.

1. Комплекс задач планирования работы группы основных производств ВИС на базе предприятия ЦБП включает цепочку последовательных операций от заготовки древесины до производства конечной продукции, к примеру гофрокартона. Древесину при этом заготавливают в территориально разбросанных пунктах, потребители переделов и конечной продукции также рассредоточены. Кроме того, промежуточные операции – выработка технологической щепы, варка целлюлозы и изготовление бумаги (картона) – могут осуществляться различными производствами, расположенными на значительном удалении, в разных населенных пунктах. Каждое из производств (дочернее предприятие, цех) размещено в одном из них и действует в соответствии с имеющимися технологиями, но может получать сырье (передел) от множества находящихся в других пунктах и поставлять продукцию или передел следующего уровня ряду других производств (потребителей).

Наряду с задачами планирования деятельности каждого из производств, возникает группа транспортных задач определения маршрутов (распределения) продукта очередного уровня. Применительно к предприятиям ЦБП комплексная задача планирования производства в ВИС содержит группу производственных задач выбора технологий, связанных системой транспортных задач перевозки сырья, переделов и готовой продукции. Таким образом, данный комплекс можно рассматривать как многоэтапную транспортно-производственную задачу.

На практике некоторые ВИС, встречаясь с этой проблемой, решают ее, максимально приближая переработчиков первого этапа к месту заготовки древесины (производство технологической щепы непосредственно на лесосеке), а производителей на последних этапах (например предприятия по производству гофротары) – к потребителю конечной продукции.

Модели транспортной задачи и планирования производств в этом случае чередуются, вследствие чего получим МТПЗ из  $k_1 + k_2 + k_3 + k_4 + k_5$  задач планирования для  $k_1$  производств по заготовке древесины,  $k_2$  – производств технологической щепы,  $k_3$  – целлюлозы,  $k_4$  – картона,  $k_5$  – гофрокартона и  $k_6$  потребителей конечной продукции, связанных пятью транспортными задачами, а именно: перевозка древесины размерности  $k_1 k_2$ ; доставка технологической щепы –  $k_2 k_3$ ; транспортировка целлюлозы –  $k_3 k_4$ ; перевозка картона –  $k_4 k_5$ ; доставка готовой продукции –  $k_5 k_6$ .

## 2. Задача распределения и выбора технологий производств ВИС ЛПК.

В отличие от предшествующей задачи здесь меньше промежуточных ступеней, однако неоднородность лесосечного фонда (пиловочник, балансы различных пород древесины используются разными производствами и поразному) приводит к появлению целой системы транспортных задач перевозки каждого из видов сырья, переделов и видов продукции. В данной задаче рассматриваются  $k_1$  лесозаготовительных участков (нижних складов),  $k_2$  леспромхозов (верхних складов) и  $k_3$  предприятий-переработчиков, работающих в составе ВИС или обеспечиваемых ее древесным сырьем. Продуктовая структура лесозаготовок регламентируется породно-возрастной структурой лесосечного фонда на обслуживаемых участках и лицензируемыми объемами и видами рубки. Основная часть хлыстов и круглого леса поставляется на нижний склад ЛПХ, где они проходят сортировку и первичную переработку и транспортируются далее предприятиям-переработчикам. Выбор участков рубки и технологий переработки представляет собой  $k_1 + k_2 + k_3$  производственных задачи, связанные большим количеством (по числу продуктов) транспортных задач.

Таким образом, появляется МТПЗ, включающая комплекс из  $k_1 + k_2 + k_3$  задач планирования для  $k_1$  заготовителей древесины,  $k_2$  первичных переработчиков,  $k_3$  основных потребителей лесосырья, связанных  $L_1 + L_2 + L_3$  транспортными задачами, в том числе:  $L_1$  – сбора сырья размерности  $k_1 k_2$ ;  $L_2$  – перевозки древесного сырья размерности  $k_2 k_3$  и  $L_3$  – доставки лесопроductии размерности  $k_2 k_3$ .

Возможны различные варианты этой задачи, а модель применима для других отраслей промышленности.

## 3. Несколько иной пример МТПЗ представляет задача баланса щелоков между очередями ЦБК. В ней производственные участки – варочные котлы и агрегаты циклов регенерации щелоков варочного производства ЦБК (промывочные установки, выпарные станции, содорегенерационные котлы, центры каустизации и регенерации извести), а транспортные компоненты – щелока, переделы варочного производства и этих агрегатов (крепкий белый, слабый и крепкий черные, зеленый и красный щелока).

В этой задаче, как и в предыдущих, управление производственными процессами (технологиями работы агрегатов) перемежается с управлением перетоками щелоков как внутри варочного производственного цикла, так и

между контурами регенерации. Специфические особенности данной задачи таковы:

в отличие от первых двух, граф связей транспортных задач содержит контуры (технологические циклы регенерации);

наряду с производственными компонентами (агрегатами линий), присутствуют складские объекты – емкости ограниченной вместимости для хранения переделов;

производственные звенья представляют собой сложные динамические нелинейные системы управления с инерционностью и запаздыванием;

транспортные системы представлены сетью трубопроводов.

4. Задача перевозок запчастей и объектов ремонта. Здесь объекты это ремонтные производства головной структуры и подразделений ВИС, назначение которых – текущий (плановый) и аварийный ремонт оборудования.

Как правило, крупное производственное предприятие располагает одной или несколькими центральными ремонтными службами (для выполнения крупных плановых профилактических и сложных аварийных ремонтов), а также ремонтными службами дочерних подразделений, которые обязаны производить мелкие текущие и аварийные ремонтные работы. Кроме того, в составе ВИС существует множество специализированных складов, а также ремонтно-механические, литейные, гальванические, кузнечные и другие производства, на которых изготавливают запасные части и восстанавливают изношенные элементы оборудования.

Поскольку склады, обслуживающие ремонтные производства, и ремонтные службы территориально разделены, возникает проблема выбора места размещения конкретного объекта, а следовательно, и транспортировки как объектов ремонта, так и необходимых запчастей.

Логическая схема связи транспортных и производственных подсистем такова. В рамках этой задачи рассматривается комплекс из  $k_1 + k_2 + k_3$  задач планирования:  $k_1$  ремонтных производств,  $k_2$  ремонтных подразделений,  $k_3$  производственных подразделений, связанных  $k_1 + L_1 + L_2$  транспортными задачами, в том числе:

межцеховых связей ремонтных производств размерности  $k_1 k_1$ ;

$L_1$  задачами перевозки запчастей от ремонтных производств к ремонтным подразделениям размерности  $k_1 k_2$  и  $L_1$  – к производственным подразделениям размерности  $k_1 k_3$ ;

$L_2$  задачами перевозки оборудования размерности  $k_2 k_3$ .

Важная особенность рассматриваемой задачи – не только наличие большого количества контуров потоков, но и своеобразная роль ремонтных производств, между которыми осуществляется циркуляция объектов транспортировки.

Совершенно очевидно, что рассматриваемые задачи не могут быть решены в рамках одной математической модели, так как невозможно описать все факторы и связи между ними, ее информационное наполнение и решение соответствующей задачи оптимизации большой размерности. Речь

может идти только о комплексе взаимосвязанных математических моделей, охватывающих как все перечисленные аспекты, так и особенности технико-экономических и информационных задач.

Рассмотренные примеры хорошо иллюстрируют содержание и структуру базового класса рассматриваемых задач. Данный класс МТПЗ, разработанный автором, является своеобразным обобщением и развитием некоторых из представленных ранее классов задач.

#### *Постановка многоэтапной транспортно-производственной задачи*

Согласно рассматриваемой модели территориально разобщенные дочерние компании, производства и службы выступают в качестве относительно самостоятельных (имеющих полномочия организовать собственную производственную деятельность в рамках выделенных ресурсов и производственного задания) производственных звеньев, транспортные задачи формируются в соответствии с количеством производственных ингредиентов.

Сформулируем основную математическую задачу. Для этого введем необходимые обозначения. Пусть  $p \in P$  – множество производственных звеньев (предприятий). Каждое звено может организовать свою работу в соответствии с технологическим заданием ВИС ЛПК, используя внутренние ресурсы множества  $M_p$ . Будем считать, что множества  $M_p$  не пересекаются, и определим  $M = \cup_{p \in P} M_p$ .

Обозначим  $N_p \subset N$  – подмножество технологических операций (технологий), выполняемых производственным звеном; их объединение обозначим  $N = \cup_{p \in P} N_p$  (множества  $N_p$  также будем считать не пересекающимися для различных  $p \in P$ ). Поскольку решение производственной задачи может быть связано с использованием различных технологий, выделим основные управляемые факторы – интенсивности использования соответствующих технологий, с которыми сопоставим переменные  $x_j$  ( $j \in N$ ). Логично считать эти переменные ограниченными сверху величиной  $d_j$  и неотрицательными, а их совокупность, в силу ряда внутренних производственных условий, содержащейся в некотором множестве  $\Omega_p$ . Затраты, связанные с использованием технологий, будет отражать функционал  $F_p(x|N_p) : \Omega_p \rightarrow R^1$ .

Кроме собственных ресурсов, производственная программа каждого звена  $p \in P$  может быть связана с обработкой множества  $S$  внешних, существенных с точки зрения задачи планирования работы ВИС в целом, ингредиентов (переделов) технологической системы. Предполагается, что каждый ингредиент  $s \in S$  связан по меньшей мере с двумя производственными звеньями.

Каждый из ингредиентов рассматривается как некий взаимозаменяемый и равнозначный как для источника, так и для потребителя ресурс. Типичный пример ресурса  $s \in S$  – передел (балансы хвойных пород, технологическая щепка, целлюлоза, картон, древесина разных пород, сортов и степени подготовки).

Интенсивности технологий производства  $p \in P$  определяют объемы выработки и потребления этих ресурсов  $w_p = (w_p^1, w_p^2, \dots, w_p^{|S|})$ , что отражает оператор:  $G_p(x|N_p) : \Omega_p \rightarrow R^{|S|}$ , таким образом  $w_p[S] = G_p(x|N_p)$ . Логично считать, что суммарная выработка ресурсов каждого вида ограничена сверху и снизу значениями  $H_s \geq h_s$  ( $s \in S$ ).

В силу пространственной рассредоточенности потоки материальных ресурсов являются транспортными  $y_{pq}^s$  ( $p, q \in P, s \in S$ ). Эти потоки неотрицательны, затраты, связанные с транспортировкой ресурсов, на уровне рассматриваемой задачи будем считать линейными и пропорциональными значениям  $\sigma_{pq}^s, p, q \in P, s \in S$ .

Остается связать транспортные потоки и выработку (потребление) ресурсов уравнениями баланса, в итоге будет получена следующая математическая модель многоэтапной транспортно-производственной задачи:

допустимость интенсивностей технологий

$$x|N_p \in \Omega_p, p \in P; \tag{1}$$

связь объемов потребления (выработки ресурсов) с интенсивностями технологий

$$w_p[S] = G_p(x|N_p), p \in P; \tag{2}$$

сбалансированность суммарного расходования и выработки ресурсов

$$h_s \leq \sum_{p \in P} w_p^s \leq H_s, s \in S; \tag{3}$$

сбалансированность транспортных потоков производств

$$\sum_{q \in P} y_{qp}^s - y_{pq}^s = w_p^s, p \in P, s \in S; \tag{4}$$

ограниченность интенсивностей технологий

$$0 \leq x_j \leq d_j, j \in N; \tag{5}$$

неотрицательность транспортных потоков

$$y_{pq}^s \geq 0, p, q \in P, s \in S. \tag{6}$$

Постановку задачи завершает целевая функция

$$\sum_{p \in P} F_p(x|N_p) + \sum_{s \in S} \sum_{p \in P} \sum_{q \in P} \sigma_{pq}^s y_{pq}^s \rightarrow \min, \tag{7}$$

которая отражает минимальные транспортно-производственные затраты, необходимые для выполнения плана производства.

Полученная в конечном итоге задача (1)–(7) и будет названа многоэтапной транспортно-производственной задачей (МТПЗ). Очевидно, что рассматриваемая математическая модель включает все примеры задач, представленных ранее, а также ряд других, рассматриваемых позднее.

Задача (1)–(7) и ее варианты содержат в себе как транспортные, так и производственные блоки, которые представляют самостоятельные оптимизационные задачи. Их совместное исследование приводит к сложной ма-

тематической задаче с тысячами переменных и ограничений, решить которую весьма непросто. Ее решение позволит комплексно исследовать работу ВИС ЛПК, а в ряде случаев – функционирование ЛПК региона. Решение общей задачи можно упростить, если найти определенную последовательность решения частных задач, которые, постепенно уточняясь, составят общее решение «большой» задачи. Однако такой алгоритм требует серьезного обоснования, доказательства его сходимости к оптимальному решению общей задачи.

МТПЗ выступает в качестве связующей модели, призванной согласовывать планы работы предприятий, обеспечивающих эффективную работу ВИС ЛПК в целом по критериям экономического характера. Полученная в итоге математическая модель соответствует системе управления производственным процессом «верхнего» уровня, цель которой – согласование агрегированных показателей работы дочерних предприятий с общим критерием эффективности экономического характера.

#### *Применение МТПЗ в планировании и управлении предприятием ЛПК*

Учитывая особенности предприятия ЛПК, можно сформулировать целый комплекс задач, постановка которых соответствует введенному классу МТПЗ. Из них рассмотрены ранее задачи: планирования группы основных производств ВИС ЛПК; распределения и специализации производств ВИС ЛПК; баланса щелоков между очередями ЦБК; перевозки запчастей и объектов ремонта в ВИС ЛПК.

Первые две задачи отражают последовательную цепочку обработки переделов, две последние содержат контуры. В первой и третьей задачах потоки между производствами однородны, для второй и особенно четвертой характерно наличие большого количества разнородных балансируемых потоков между произвольной парой производств.

Задачи существенно различаются и областью приложений. Первые две составлены на примере ЛПК, но характерны и для других отраслей с многоэтапной технологией (химическая, нефтехимическая, горная, металлургическая, машиностроительная и др.), обработка переделов которых осуществляется различными пространственно распределенными производствами. Задача баланса щелоков носит специальный характер и относится только к ЦБП. Последняя из четырех задач имеет прямое отношение к любой вертикально-интегрированной производственной структуре.

Приведем еще один пример для ВИС ЛПК (или даже лесопромышленного региона в целом), а именно двухэтапную задачу выбора оптимальных схем заготовки и переработки сырья. Для этого рассмотрим имеющиеся лесосырьевые зоны региона (нескольких регионов), где для каждой из которых известны: объем расчетной лесосеки; состав по породам (ель, сосна, береза, осина); процент выхода пиловочника и балансов по породам, а также дров с каждого обезличенного кубометра круглого леса; средние затраты на заготовку кубометра древесины по районам и транспортировку к лесоперерабатывающему предприятию.

Для каждого вида выпускаемой продукции установим: структуру потребления сырья при производстве каждого вида продукции; нормативы расходования различных видов сырья (круглых лесоматериалов) для производства единицы продукции; стоимость конечной продукции; ожидаемый спрос (или план) производства продукции в регионе.

Возникает задача максимизации прибыли предприятия, которую можно условно выразить как разность суммарной стоимости запланированного объема продукции и суммарных затрат на заготовку (или закупку) и перевозку необходимого сырья.

Результатом решения данной задачи будет следующая информация: оптимальная структура заготовки сырья отдельно по районам и номенклатуре сырья; схема перевозок древесины по транспортным магистралям, интенсивность потоков и потребность в транспортных средствах; оптимальная номенклатура (ассортимент) лесоматериалов; стоимостная оценка круглого леса в различных районах, которая в дальнейшем может быть использована для расчета системы рентных платежей (на основе анализа двойственных оценок ограничений).

Общей МТПЗ описываются также задачи:

размещения производств и определения структуры заготовок древесного сырья по зонам в регионе;

реконструкции и строительства предприятий, в которой учитываются как имеющиеся мощности леспромхозов, так и возможности реконструкции (строительства) предприятия;

выбора транспортных средств для перевозки продукции с учетом перевалки, в которой учитываются только имеющиеся мощности ЛПХ;

многопродуктовая транспортно-производственная, учитывающая технологии заготовки древесины и структуру сырья, необходимого потребителю.

Более подробное описание этих и других моделей, методов их решения и программных систем, реализующих необходимые расчеты для предприятий ЛПК, приведено в работах [1, 2].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булатов А.Ф. и др. Оптимизация в планировании и управлении предприятиями регионального лесопромышленного комплекса /А.Ф.Булатов, А.В.Воронин, В.А.Кузнецов и др. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2001. – 228 с.
2. Воронин А.В., Кузнецов В.А. Математические модели и методы в планировании и управлении предприятием ЦБП. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2000. – 256 с.

Петрозаводский государственный университет

Поступила 17.01.03

---

*A.V. Voronin*

**Multistage Tasks of Planning and Managing Material Flows  
in Vertical-integrated Structures of Forest Industry**

Economic-mathematical models are proposed for solving multistage transport-and-industrial problems arising in planning and managing material flows of forest-industrial enterprises. Examples of various tasks for vertically integrated production structures of forest industry are considered variants of their practical application at the enterprises.

---