

**АНТОН ИГОРЕВИЧ ШАБАЕВ**

кандидат технических наук, директор Центра ПетрГУ-Метко Систем Автоматизации, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

*ashabaev@petrsu.ru*

**ВЛАДИМИР АЛЕКСЕЕВИЧ КУЗНЕЦОВ**

доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики и кибернетики математического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

*kuznetcv@mail.ru*

**МАКСИМ ВЛАДИМИРОВИЧ СПИРИЧЕВ**

программист Центра ПетрГУ-Метко Систем Автоматизации, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

*MaxSpirichev@gmail.com*

**ДМИТРИЙ ПЕТРОВИЧ КОСИЦЫН**

кандидат технических наук, заместитель директора Центра ПетрГУ-Метко Систем Автоматизации, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

*kosit syn@petrsu.ru*

## ПОДХОДЫ К РАЗРАБОТКЕ КОМПЛЕКСА АЛГОРИТМОВ И ПРОГРАММ ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ СКВОЗНЫМИ ПРОЦЕССАМИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ\*

Представлен подход к созданию новой автоматизированной системы оптимального планирования «Лесопереработка» для повышения эффективности управления сквозными процессами использования древесины от леса до конечной продукции.

Ключевые слова: управление производством, лесопромышленный комплекс, методы оптимизации, исследование операций

Лесопромышленный комплекс (ЛПК) – один из важнейших секторов экономики России. Россия занимает 1-е место в мире по площади лесов и 2-е – по запасам древесины [2]. Лесные богатства России позволяют ей стать крупнейшим производителем продукции ЛПК в мире, однако на ее долю приходится всего 2 % мирового производства бумаги и картона (14-е место в мире на 2009 год [4]). При этом Финляндия, располагающая лишь 0,5 % мировых лесных ресурсов, является 5-м в мире крупнейшим производителем бумаги и картона и 7-м – лесопильной продукции.

В настоящее время одной из тенденций в добывающих и перерабатывающих отраслях промышленности (в том числе ЛПК, ЦБП и пр.) является создание территориально распределенных многоуровневых холдингов, включающих в себя от 3 до 30 (и даже более) предприятий (то есть общее количество предприятий составляет более 500) и осуществляющих полный цикл производства: заготовку сырья, его комплексную переработку с получением готовой продукции и транспортировку потребителям. Это позволяет (а иногда вынуждает) решать задачу выполнения одного крупного заказа несколькими (в том числе территориально удаленными друг от друга) предприятиями холдинга.

Примерами таких распределенных холдинговых структур в отраслях ЦБП и ЛПК России являются ЗАО «Инвестлеспром», ОАО «Группа Илим», ОАО «SFT Group» и др. Например, у ЗАО «Инвестлеспром» территориальные управления расположены в Москве, Вологде и Петрозаводске, а предприятия – в Республике Карелия, Кировской, Вологодской, Архангельской, Томской областях, Пермском крае, а также в 11 странах мира. У ОАО «Группа Илим» центральный офис расположен в Санкт-Петербурге, предприятия – в Архангельской и Иркутской областях, а также имеется централизованное сервисное предприятие («Финтранс»), оказывающее логистические и транспортные услуги в Ленинградской, Архангельской и Иркутской областях.

Среди зарубежных компаний ЛПК можно привести в качестве примера холдинг UPM Kymmene (Финляндия). Объем продаж холдинга в 2011 году превысил 10 млрд евро, более 45 его производственных предприятий расположены в 16 странах и сгруппированы в 9 бизнес-линий, включая централизованную службу лесоснабжения. Также среди компаний дальнего зарубежья можно упомянуть Abitibi-Bowater, West Fraser, Canfor (Канада), Weyerhaeuser (США) и многие другие.

## ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ

Предприятия в составе вертикально-интегрированного операционного лесопромышленного холдинга, как правило, создают стоимость по цепочке «лес → древесина → целлюлоза → бумага → продукция», требуют высокого уровня интеграции и должны быть мотивированы на повышение прибыли по всей этой цепочке. Схема процессов использования древесины представлена на рис. 1 [6].

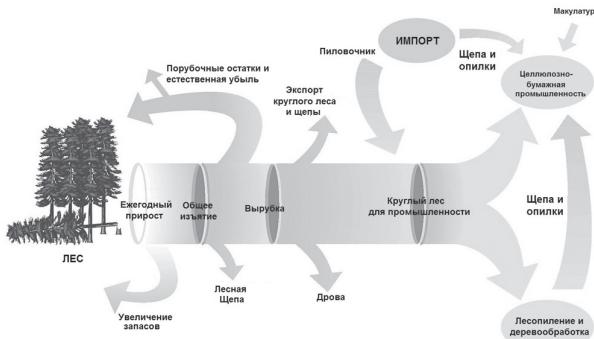


Рис. 1. Сквозная схема процессов использования древесины

### Структура активов лесопромышленного холдинга:

- Лесозаготовительные (валка и первичная транспортировка). Основная продукция – «сырая» древесина. Интересны только в том случае, если связаны с поставками на предприятия холдинга.
- Лесопильные и деревообрабатывающие. Сыре – круглая древесина (пиловочник). Основная продукция – пиломатериалы и многое другое (фанера, плиты, мебель и т. д.). Сопутствующие виды продукции включают технологическую и энергетическую щепу и опилки. Активы интересны только в привязке к другим цепочкам создания стоимости, где за счет более высокого передела создается добавленная стоимость.
- Целлюлозно-бумажные. Сыре – круглая древесина, щепа. Основная продукция – целлюлоза, бумага, картон и многое другое.
- Производство упаковки, мешков и прочей продукции. Сыре – картон собственного или внешнего производства.

Примерная структура активов лесопромышленного холдинга изображена на рис. 2.



Рис. 2. Примерная структура активов лесопромышленного холдинга

Большое количество вовлеченных предприятий приводит к необходимости разработки процессов и процедур поиска решений «на стыках» во избежание внутренних конфликтов между продавцами и потребителями леса внутри холдинга, в том числе процессов:

- сквозного планирования цепочки поставок и интегрированного управления логистическими потоками внутри холдинга;
- закрепления решения задач взаимодействия между дивизионами в целях повышения EBITDA цепочки «лес → бумага → продукция» в регламентах и системе мотивации;
- рассмотрения заводов не как отдельных бизнесов, а как производственных элементов общей цепочки создания стоимости;
- оперативного учета данных о состоянии и параметрах производственного оборудования.

Необходимо выделить следующие задачи:

- Исследование лесосырьевой базы в целях определения номенклатуры и объемов заготовки и потребления лесосырья с учетом возможностей продажи части лесосырья определенного вида и качества непосредственно на лесосеке или его закупки у внешних поставщиков. Цель ее решения – расчеты оптимальных объемных показателей для каждой лесосеки и лесозаготовительного предприятия в целом (объемов заготовки, поставки, перевозки, внешних продаж) с целью минимизации суммарных затрат.
- Специализация предприятий холдинга и формирование номенклатуры продукции. Цель решения – определить для каждого предприятия номенклатуру наиболее подходящей продукции и используемые технологии, чтобы снизить себестоимость продукции, более эффективно использовать производственное оборудование, повысить качество продукции для максимизации общего экономического эффекта.
- Задача оптимального развития (реконструкции) предприятий и производственной инфраструктуры с учетом стратегии развития и специализации предприятий. Цель решения – оптимизация экономического эффекта холдинга от капиталовложений в развитие инфраструктуры, лесозаготовительной и иной производственной базы.
- Задача оптимального распределения операций по переработке и транспортировке лесосырья и продуктов его переработки (переделов) различного уровня в рамках цепочки «лес → древесина → целлюлоза → бумага → продукция». Цель решения – минимизация транспортно-производственных затрат предприятий холдинга для выработки всей требуемой продукции.
- Совместное решение задач производства и транспортировки продукции. Цель – составление плана производства продукции группой

предприятий и транспортировки сырья, полуфабрикатов и готовой продукции.

- Задача управления запасами лесосырья и продуктов, а также транспортными потоками с учетом сезонности и спроса на продукцию. Цель решения – оптимальное управление логистикой в рамках холдинга. Себестоимость лесозаготовок в течение года может различаться до 25 %.

В целом теоретической и методологической основой решения задач планирования и управления производственными процессами являются достаточно хорошо известные методы исследования операций и математического программирования [5], [7], [8], однако «классические» задачи редко встречаются в чистом виде. Прикладные задачи существенно усложняются необходимостью учета дополнительных требований и факторов, в том числе:

- Учет стохастических факторов и элементов неопределенности, обусловленных неполнотой или возможными искажениями нормативной и оперативной информации. К примеру, лесозаготовка и транспортировка лесосырья существенно зависят от сезона и погодных условий.
- Многоцелевой характер задач планирования и управления.
- Учет большого количества альтернативных технологий переработки древесины в целях выбора согласованных режимов переработки лесосырья, обеспечивающих минимальные потери материала.
- Требование комплектности производства некоторых видов продукции, то есть пропорциональности объемов их производства, с поправкой на имеющиеся запасы по каждому виду.
- Неделимость и целочисленность производства некоторых видов лесопродукции и расходования лесосырья.
- Дискретность в выборе номенклатуры и текущих объемов выработки продукции, суть которой заключается в принятии решения либо не производить лесопродукцию определенного вида, либо производить ее в объеме, не меньшем установленной нижней границы.
- Учет большого количества самых разных технологических особенностей лесопереработки. Например, чтобы заказ не находился на границе раскюя, он выпускался на определенном агрегате, чтобы шел парной доской, исключал сердцевину бревна и т. д.
- Возможность частичной взаимозамены лесосырья и лесопродукции различного вида, к примеру, замены части шпонов или переработки фанеры с неудачными внешними слоями в ламинат.
- Степень загрузки и состояние оборудования.

Для решения задач с указанными дополнительными требованиями необходимы спе-

циальные средства преобразования решений, полученных методами линейного программирования. Нередко объем вычислений, связанных с подобными преобразованиями, существенно выше, чем при решении основной задачи. Расширение объекта планирования при переходе от одного предприятия к группе (холдингу и т. д.) приводит к необходимости решения дискретных линейных и нелинейных задач сложной структуры и большой размерности, что требует исследования и разработки схем декомпозиции возникающих оптимизационных задач.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ

Сформулируем основную математическую задачу. Пусть  $p \in P$  – множество территориально распределенных производственных звеньев (предприятий). Каждое производственное звено  $p \in P$  может организовывать собственную работу в соответствии с производственным заданием холдинга в целом.

Обозначим  $N_p \subset N$  – подмножество технологических операций (технологий), выполняемых производственным звеном с индексом  $p \in P$ ; их объединение обозначим  $N = \bigcup_{p \in P} N_p$ , множества  $N_p$  будем считать непересекающимися для различных  $p \in P$ . Поскольку решение производственной задачи может быть связано с использованием различных технологий, основные управляющие факторы – интенсивности использования соответствующих технологий, которым сопоставим переменные  $x_j$  ( $j \in N$ ). Эти переменные ограничены сверху неотрицательными величинами  $d_j$ , а их совокупность в силу ряда производственных условий содержится в некотором множестве  $\Omega_p$ . Затраты, связанные с использованием технологий, отражает функционал  $F(x[N_p]) : \Omega_p \rightarrow \mathbb{R}^1$ .

Кроме собственных ресурсов производственная программа различных звеньев  $p \in P$  может включать обработку множества  $S$  внешних ингредиентов (переделов) технологической системы. Типичные примеры ресурса  $s \in S$  – баланс, щепа, целлюлоза, картон. Предполагается, что каждый ингредиент  $s \in S$  связан по меньшей мере с двумя производственными звеньями.

Интенсивности технологий производства  $p \in P$  определяют объемы выработки и потребления ресурсов  $\omega_p[S] = (\omega_p^1, \omega_p^2, \dots, \omega_p^{|S|})$ , что отражает оператор:  $G_p(x[N_p]) : \Omega_p \rightarrow \mathbb{R}^{|S|}$ , то есть  $\omega_p[S] = G_p(x[N_p])$ . Отметим, что  $\omega_p[S] \geq 0$  – для пункта производства  $p$  продукта  $s$ ,  $\omega_p[S] \leq 0$  – для пункта потребления  $p$  продукта  $s$ ,  $\omega_p[S] = 0$  – если производство  $p$  не связано с потреблением или выработкой продукта  $s$ .

Для пункта  $p \in P$  будем считать объемы внешней выработки и потребления ресурса  $s$  равными  $z_p^s$  и ограниченными сверху и снизу значениями  $H_p^s \geq h_p^s$  ( $p \in P, s \in S$ ). Значения  $H_p^s$  и  $h_p^s$  могут быть близки или даже равны нулю для

производственного передела  $s \in S$ ; положительны, если  $s$  – индекс вырабатываемой продукции для пункта  $p$ , и отрицательны, если  $s$  – некоторый внешний (ввозимый) ресурс для пункта  $p$ . Стоимость ресурса  $s$  в пункте  $p$  обозначим  $c_p^s$  ( $p \in P, s \in S$ ).

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

Построим целевую функцию:

- $\sum_{s \in S} \sum_{p \in P} c_p^s z_p^s$  – суммарная прибыль и затраты, связанные с внешней выработкой и потреблением ресурсов,
  - $\sum_{p \in P} F_p(x[N_p])$  – суммарные затраты, связанные с производством,
  - $\sum_{s \in S} \sum_{p, q \in P} y_{pq}^s \sigma_{pq}^s$  – суммарные затраты, связанные с транспортировкой ресурсов,
- получим суммарную прибыль

$$\sum_{s \in S} \sum_{p \in P} c_p^s z_p^s - \sum_{p \in P} F_p(x[N_p]) - \sum_{s \in S} \sum_{p, q \in P} y_{pq}^s \sigma_{pq}^s.$$

Построим ограничение на баланс ресурса  $s$  в пункте  $p$ :

- $\omega_p[s_j]$  – объемы выработки и потребления ресурса,
  - $z_p^s$  – объемы внешней выработки и потребления ресурса,
  - $\sum_{q \in P} y_{qp}^s$  – суммарный объем привезенного ресурса из других пунктов,
  - $\sum_{q \in P} y_{pq}^s$  – суммарный объем вывезенного ресурса в другие пункты,
- получим  $\omega_p[s_j] - z_p^s + \sum_{q \in P} y_{qp}^s - \sum_{q \in P} y_{pq}^s = 0$ .

Добавим ограничений на интенсивность производства  $x[N_p] \in \Omega_p$ , ограничения на объемы внешней выработки и потребления ресурса  $h_p^s \leq z_p^s \leq H_p^s$ , неотрицательность транспортных потоков  $y_{pq}^s \geq 0$ .

Таким образом получим задачу следующего вида:

$$\sum_{s \in S} \sum_{p \in P} c_p^s z_p^s - \sum_{p \in P} F_p(x[N_p]) - \sum_{s \in S} \sum_{p, q \in P} y_{pq}^s \sigma_{pq}^s \rightarrow \max$$

$$\omega_p[s_j] - z_p^s + \sum_{q \in P} y_{qp}^s - \sum_{q \in P} y_{pq}^s = 0, \forall p \in P, s \in S,$$

$$x[N_p] \in \Omega_p, \forall p \in P$$

$$h_p^s \leq z_p^s \leq H_p^s,$$

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

## ИМЕЮЩИЙСЯ ЗАДЕЛ

Следует отметить, что в Петрозаводском государственном университете под нашим руководством и при

нашем непосредственном участии уже проводились исследования, нацеленные на решение частных задач, и осуществлялись разработки, ориентированные на внедрение программных систем на предприятиях ЦБП и ЛПК [1], [3]. Имеются отраслевые свидетельства о регистрации программных систем для решения отдельных задач оптимального планирования и управления производственными процессами предприятий.

В частности, был разработан модуль UPS. Solver («универсальный решатель»). В его составе реализован так называемый «матричный конструктор», главная цель которого – построение структуры данных для хранения матрицы ограничений в прикладных задачах оптимизации. Матричный конструктор позволяет удобно и корректно формировать матрицу ограничений с учетом ее блочной структуры, а также эффективно организовать работу с матрицей для получения данных, операций с ней, модификации в случае изменения условий задачи или необходимости ее адаптации для другого предприятия и т. д. С использованием матричного конструктора реализованы алгоритмы эффективного решения задач линейного, динамического и дискретного программирования, ряда задач выпуклого программирования; задач высокой размерности; многоцелевых задач с комбинированными критериями и др. Это позволяет с минимальными затратами находить решение широкого круга оптимизационных задач планирования и управления предприятием [3].

Для реализации пользовательского интерфейса программных систем разработана библиотека UPS Framework, которая включает большое количество тесно интегрированных друг с другом программных компонент, позволяющих унифицировать процессы и ускорить разработку модулей системы, упростить программное описание моделей данных, уменьшить количество ошибок. Все компоненты UPS Framework интегрированы в среду программирования MS Visual Studio .NET [1].

Поскольку ранее разработанные программные системы ориентированы на отдельные предприятия, то требуются дополнительные исследования и разработки для их адаптации к использованию в условиях холдинга, состоящего из нескольких (или нескольких десятков) территориально распределенных предприятий. Тем не менее имеющийся опыт позволяет осуществить постановку многопродуктовой производственно-транспортной задачи, провести ее исследование и предложить методы решения возникающих задач и подзадач с целью широкого тиражирования, внедрения и сопровождения новой автоматизированной системы оптимального планирования (АСОП) «Лесопереработка» для оптимального планирования и управления сквозными процессами использования древесины.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный поиск не выявил прямых аналогов разрабатываемой АСОП «Лесопереработка». Имеются только условные аналоги, общим существенным недостатком которых является отсутствие использования сложных математических алгоритмов для решения задач планирования производства с учетом большого количества дополнительных ограничений, обусловленных

особенностями производств и технологий предприятий ЛПК.

АСОП «Лесопереработка» ориентирована как на внутренний, так и на внешние рынки сбыта. Математические модели и методы решения задач обладают достаточной общностью и могут использоваться для планирования и управления производствами на не менее 500 предприятий отраслей ЦБП и ЛПК России и других стран.

\* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития (ПСР) ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг., а также при поддержке госконтракта № 14.514.11.4004 Министерства образования и науки Российской Федерации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронин А. В., Шабаев А. И., Печников А. А. Конвейерная технология разработки программного обеспечения для управления производственными ресурсами и процессами // Перспективы науки. 2010. Т. 4. С. 95–99.
2. Выступление руководителя Федерального агентства лесного хозяйства В. Н. Маслякова [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.rosleshoz.gov.ru/media/appearance/68>
3. Кузнецов В. А., Печников А. А., Шабаев А. И. Многофункциональная программная система разработки приложений для задач раскроя материалов и комплектования изделий // Автоматизация и современные технологии. 2008. № 11. С. 10–14.
4. Список стран, производящих бумагу и картон [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Список\\_стран,\\_производящих\\_бумагу\\_и\\_картон](http://ru.wikipedia.org/wiki/Список_стран,_производящих_бумагу_и_картон)
5. Таха Х. А. Введение в исследование операций. М.: Вильямс, 2005. 912 с.
6. Forest.fi [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.forest.fi>
7. Stevenson W. J. Operations Management. Boston: McGraw-Hill Companies, Incorporated, 2011. 908 p.
8. Wang L., Shen W. Process Planning and Scheduling for Distributed Manufacturing. London: Springer, 2007. 430 p.