

УДК 338.4:330.4:630

ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОПТИМИЗАЦИИ ПОРТФЕЛЯ ЗАКАЗОВ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ С УЧЕТОМ МНОВАРИАНТНОСТИ ВЫХОДА СОРТИМЕНТОВ С ЛЕСОСЫРЬЕВОЙ БАЗЫ

¹Шегельман И.Р., ²Будник П.В., ²Щеголева Л.В.¹*Карельская региональная общественная организация «Инженерная академия», Петрозаводск, e-mail: shegelman@onego.ru;*²*ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», Петрозаводск, e-mail: budnikpavel@yandex.ru, schegoleva@petrsu.ru*

Рассматривается задача оптимизации портфеля заказов лесозаготовительных предприятий. В отличие от традиционного подхода к решению данной задачи запасы леса рассматриваются не как константа объема определенных сортиментов, а как гибкая система, подстраиваемая под потребности участников рынка лесной продукции. Такой подход обуславливается тем, что ствол дерева может быть раскряжеван различными способами с получением лесоматериалов разного назначения. Задача оптимизации портфеля заказов решается методом математического программирования. Описаны математические модели, которые были использованы для обоснования портфеля заказов ряда предприятий лесопромышленного комплекса. В качестве целевых функций математических моделей предложены выражения, максимизирующие прибыль либо конкретного лесозаготовительного предприятия, либо их совокупности. Также в качестве целевой функции предложено использовать выражения максимизирующие прибыль лесозаготовительного предприятия с минимальной прибылью. Разработанные модели позволяют определять значения оптимальных портфелей заказов для лесозаготовительных предприятий с учетом: характеристик предмета труда; вариативности их вида и формы с учетом фактора возможности управления (изменения); затрат на преобразование предмета труда в готовую продукцию; договорных соглашений между предприятиями отрасли; мощности предприятий по заготовке и переработке биомассы древесины; индивидуальных особенностей предприятий отрасли, исключающих банкротство отдельных лесозаготовительных предприятий. Отличительной особенностью предлагаемых моделей является то, что они позволяют получать рекомендации по способам раскряжевки стволов.

Ключевые слова: математическое моделирование, портфель заказов, оптимизация, лесозаготовительное предприятие, многовариантность выхода лесоматериалов

ECONOMIC AND MATHEMATICAL MODELS FOR OPTIMIZING OF PRODUCT PORTFOLIO OF LOGGING ENTERPRISES TAKING INTO ACCOUNT THE MULTIVARIATE OUTPUT OF ASSORTMENTS FROM THE FOREST RAW MATERIAL BASE

¹Shegelman I.R., ²Budnik P.V., ²Shchegoleva L.V.¹*Karelian regional public organization «Engineering Academy», Petrozavodsk, e-mail: shegelman@onego.ru;*²*Petrozavodsk State University (PetrSU), Petrozavodsk, e-mail: budnikpavel@yandex.ru, schegoleva@petrsu.ru*

The problem of optimization of product portfolio of logging enterprises is considered. Unlike the traditional approach to solving this problem, the forest resources are considered as a flexible system, adjusted to the needs of the participants of the forest products market. This approach is due to the fact that the trunk of the tree can be cross-cut in various ways to produce timber for different purposes. The task of optimizing the portfolio of orders is solved by mathematical programming. Mathematical models that were used to substantiate the order portfolio of enterprises of the timber industry complex are described. As the objective function of mathematical models, expressions are proposed that maximize the profit of either a particular logging enterprise or their aggregate. Also, as an objective function, it is proposed to use the expression maximizing the profit of a timber enterprise with a minimum profit. Models allow to determine the values of optimal product portfolio for logging enterprises taking into account: the characteristics of the subject of labor; taking into account the possibility of managing the output of assortments; costs for converting the subject of labor into finished products; contractual agreements between enterprises of the industry; capacity of enterprises for harvesting and processing of wood biomass; individual features of the enterprises of the industry that preclude the bankruptcy of individual logging enterprises. Also, the models allow you to receive recommendations on how to truss the trunks.

Keywords: mathematical modeling, product portfolio, optimization, logging enterprise, multivariate output of timber

Проблема повышения эффективности функционирования лесопромышленного комплекса не может быть преодолена без решения задач построения оптимального баланса производства и потребления

биомассы древесины. Традиционно в задачах такого вида в качестве исходных данных выступают объемы производства лесоматериалов [1, 2], при этом виды лесоматериалов, получаемых на лесосеке,

и их объем зафиксированы и неизменны. Решением задачи в такой постановке являются объемы потоков лесоматериалов каждого вида от лесосек к перерабатывающим предприятиям.

На практике лесозаготовительное предприятие в зависимости от сложившейся конъюнктуры на рынке может варьировать виды вырабатываемых с одной и той же лесосеки сортиментов и их количество. Это обусловлено тем, что ствол дерева может быть раскряжеван различными способами с целью получения сортиментов определенного вида, которые могут быть переработаны лесопотребителями.

Например, в регионе имеются предприятия, потребляющие еловый пиловочник длиной 5 м, еловый баланс длиной 4,5 м, еловые строительные бревна длиной 5 м и дрова 5–4 м. Каждый вид лесоматериала характеризуется: породой; максимальным и минимальным диаметром в верхнем отрезе; длиной; качественными характеристиками (допустимыми пороками). В данных условиях, если рассматривать еловый ствол длиной 16 м, имеется, по крайней мере, два варианта раскряжки: «пиловочник + баланс + дрова»; «строительное бревно + баланс + дрова». Следовательно, возникает более сложная задача оптимизации портфеля заказов, связанная с многовариантностью использования древесины.

Подход к определению портфеля заказов, основанный на принятии многовариантности выхода сортиментов с лесосырьевой базы, позволяет оптимизировать выбор технологических цепочек производства и потребления лесоматериалов по критерию наиболее выгодного использования лесного фонда.

Анализ работ [3, 4] и др. показывает, что решение задачи по формированию оптимального портфеля заказов может осуществляться на основе применения средств экономико-математического моделирования, численных методов решения задач математического программирования, а также информационных технологий.

Задача оптимизации портфеля заказов тесно связана с проблемой оптимального раскря ствола дерева. Задача оптимального раскря сводится к определению рациональных вариантов поперечного деления ствола дерева на сортименты, удовлетворяющих определенному условию максимума, в частности наибольшей стоимости вырабатываемых сортиментов, максимальному использованию древесины ствола и др. Среди отечественных исследований, посвященных анализу процесса оптимальной раскряжки стволов, можно отметить

работы В.С. Петровского, Г.А. Степакова, А.С. Ледяева, И.И. Тихонова, Е.В. Воробьевой и др. [5–7]. За рубежом также ведутся исследования в этом направлении [8, 9].

Цель данного исследования заключается в разработке математических моделей, обеспечивающих оптимизацию портфеля заказов для лесозаготовительных предприятий с учетом многовариантности выхода сортиментов с лесосырьевой базы.

Постановка задачи оптимизации портфеля заказов нами была изложена в работе [10]. Для ясности излагаемого материала кратко приведем суть постановки задачи. Имеются запасы леса с известными значениями его параметров для каждого лесного участка, где предполагается проводить лесозаготовки. Известны лесоперерабатывающие предприятия, для каждого из которых определены виды и необходимые объемы лесоматериалов. Имеется транспортная сеть, соединяющая лесные участки и лесоперерабатывающие предприятия. Необходимо выбрать потребителей и объемы реализации им лесоматериалов посредством выбора вариантов раскряжки хлыстов, с учетом установленного критерия оптимизации. Варьируя способы раскряжки хлыстов, можно получить различные варианты использования древесины, что соответствует различным схемам реализации лесоматериалов лесоперерабатывающим предприятиям.

Материалы и методы исследования

Задача оптимизации портфеля заказов на основе учета многовариантности раскряжки стволов деревьев является сложной многоэтапной задачей, требующей выделения ряда последовательных подзадач. Предложено выделить следующие этапы:

- 1) прогноз выхода стволовой древесины;
- 2) формирование множества вариантов раскряжки стволов;
- 3) определение оптимального портфеля заказов с использованием методов математического программирования.

На первом этапе осуществляется прогноз выхода стволовой древесины с участков, отведенных в рубку. Такие данные могут быть получены на основе материально денежной оценки лесосек. Также для этих целей может быть использована разработанная нами имитационная модель выхода стволовой древесины, описанная в работе [11].

Второй этап предполагает решение задачи формирования множества вариантов раскряжки стволовой древесины на сортименты. Виды сортиментов, рассматриваемые при формировании множества вариантов раскряжки, определяются из анализа потребительского спроса на рынке. Выход сортиментов может быть определен либо по сортиментным таблицам, либо по товарным.

Для решения задачи третьего этапа предлагается следующая модель. Введем необходимые обозначения для описания предмета труда. Пусть k – тип ство-

ла; K – общее количество типов стволов (каждый тип описывается тремя значениями: порода; длина; диаметр у комля), $\sum_{k=1}^K k = K$; N_k – количество вариантов раскряжевки стволов типа k ; N – общее количество вариантов раскряжевки стволов, $\sum_{k=1}^K N_k = N$; r – вид сортимента; R – общее количество видов сортиментов, $\sum_{r=1}^R r = R$; j – вариант раскряжевки; D_{rkj} – количество сортиментов вида r , которые получают из стволов типа k при варианте раскряжевки j ; T – период планирования.

Для описания лесозаготовительных предприятий введем следующие обозначения. Пусть p – лесозаготовительное предприятие; P – общее количество лесозаготовительных предприятий; M_p – множество лесосек, назначенных для рубки лесозаготовительным предприятием p ; M – общее количество лесосек, $\sum_{p=1}^P M_p = M$; i – номер лесосеки; A_{ik} – количество стволов типа k , предназначенных для рубки на лесосеке i ; G_p^1 – количество стволов, заготавливаемых в смену лесозаготовительным предприятием p ; C_i – затраты на заготовку одного ствола на лесосеке i .

Для описания перерабатывающих предприятий введем следующие обозначения. Пусть s – деревообрабатывающее предприятие; S – общее количество перерабатывающих предприятий; B_{rs} – количество сортиментов вида r , необходимых перерабатывающему предприятию s ; B_{rps}^1 – количество сортиментов вида r , которое заготовительное предприятие p должно поставить перерабатывающему предприятию s в рамках договоров; G_s^2 – количество сортиментов, потребляемых в смену на перерабатывающем предприятии s ; F_{rs} – цена реализации сортиментов вида r перерабатывающему предприятию s .

Введем переменные: $X_{ijk} \geq 0$ – количество стволов типа k с лесосеки i , раскряжеванных по варианту j ; $Y_{psr} \geq 0$ – количество сортиментов вида r , поставляемых от лесозаготовительного предприятия p на перерабатывающее предприятие s .

Введем ограничения модели. Количество раскряжеванных стволов типа k не должно превышать числа стволов, имеющих на лесосеке i :

$$\sum_{j=1}^{N_k} X_{ijk} \leq A_{ik}, \text{ для } i = \overline{1, M}, k = \overline{1, K}. \quad (1)$$

Количество поставляемых сортиментов вида r должно быть больше, чем потребность в них на деревообрабатывающем предприятии s :

$$\sum_{p=1}^P Y_{psr} \geq B_{rs}, \text{ для } s = \overline{1, S}, r = \overline{1, R}. \quad (2)$$

Количество поставляемых сортиментов вида r должно быть больше количества, определенного договорными отношениями между лесозаготовительным предприятием p и перерабатывающим предприятием s :

$$Y_{psr} \geq B_{rps}^1, \text{ для } s = \overline{1, S}, p = \overline{1, P}, r = \overline{1, R}. \quad (3)$$

Количество сортиментов вида r , поставляемых лесозаготовительным предприятием p , должно быть меньше или равно количеству сортиментов, поставляемых всем деревообрабатывающим предприятиям:

$$\sum_{i \in M_p} \sum_{k=1}^K D_{rkj} \cdot X_{ijk} \geq \sum_{s=1}^S Y_{psr}, \text{ для } p = \overline{1, P}, r = \overline{1, R}. \quad (4)$$

Количество стволов, заготавливаемых на лесосеках лесозаготовительного предприятия p за период планирования T , не должно превосходить объема работ, который может быть выполнен за период планирования:

$$\sum_{i \in M_p} \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{N_k} X_{ijk} \leq T \cdot G_p^1, \text{ для } p = \overline{1, P}. \quad (5)$$

Количество сортиментов, перерабатываемых на перерабатывающем предприятии s за период планирования T , не должно превосходить объема работ, который может быть выполнен за период планирования:

$$\sum_{r=1}^R \sum_{p=1}^P Y_{psr} \leq T \cdot G_s^2, \text{ для } s = \overline{1, S}. \quad (6)$$

Определение рационального портфеля заказов может осуществляться на основе разных критериев оптимизации. В качестве критериев оптимизации могут выступать: минимизация затрат конкретного лесозаготовительного предприятия или некоторой их совокупности; максимизация прибыли конкретного предприятия или некоторой их совокупности; максимизация прибыли предприятия с минимальной прибылью; минимизация затрат предприятия с максимальными затратами. По нашему мнению, в условиях рыночной экономики целесообразно в качестве критерия оптимизации выбирать прибыль. В таком случае целевая функция модели будет выражать прибыль, получаемую за счет разности между выручкой от продажи лесоматериалов и затратами на их заготовку.

Для конкретного лесозаготовительного предприятия p целевая функция имеет вид

$$\sum_{s=1}^S \sum_{r=1}^R Y_{psr} \cdot F_{rs} - \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{N_k} C_i \cdot X_{ijk} \rightarrow \max. \quad (7)$$

Выражение (7) максимизирует прибыль конкретного лесозаготовительного предприятия.

Целевая функция для определения рационального портфеля заказов для нескольких лесозаготовительных предприятий p :

$$\sum_{s=1}^S \sum_{r=1}^R \sum_{p=1}^P Y_{psr} \cdot F_{rs} - \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{N_k} C_i \cdot X_{ijk} \rightarrow \max. \quad (8)$$

Целевая функция максимизирует прибыль нескольких лесозаготовительных предприятий. Следует отметить, что при использовании целевой функции (8) может сложиться такая ситуация, когда одно или несколько предприятий окажутся банкротами. В таком случае может быть целесообразным введение дополнительного ограничения, при котором количество заготовленных стволов на лесосеках лесозаготовительного предприятия p должно быть больше, чем минимальное количество заготовки:

$$\sum_{i \in M_p} \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{N_k} X_{ijk} \geq E_p, \text{ для } \forall p, \quad (9)$$

где E_p – минимальное количество стволов, которое должно быть заготовлено на лесозаготовительном предприятии p , чтобы избежать банкротства лесозаготовителя.

Также в качестве критерия оптимальности может быть максимизация прибыли лесозаготовительного предприятия с минимальной прибылью:

$$\min_p \left\{ \sum_{s=1}^S \sum_{r=1}^R Y_{psr} \cdot F_{rs} - \sum_{i/j/M_p} \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{N_k} C_i \cdot X_{ijk} \right\} \rightarrow \max. \quad (10)$$

Оптимизация портфеля заказов для конкретного лесозаготовительного предприятия p с учетом транспортных затрат примет вид

$$\sum_{s=1}^S \sum_{r=1}^R Y_{psr} \cdot F_{rs} - \sum_{i=1}^{M_p} \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{N_k} C_i \cdot X_{ijk} - \sum_{s=1}^S \sum_{r=1}^R Y_{psr} \cdot T_{psr} \rightarrow \max, \quad (11)$$

где T_{psr} – затраты на транспортировку сортимента вида r от лесозаготовительного предприятия p к обрабатывающему предприятию s .

Для некоторой совокупности предприятий p :

$$\sum_{s=1}^S \sum_{r=1}^R \sum_{p=1}^P Y_{psr} \cdot F_{rs} - \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{N_k} C_i \cdot X_{ijk} - \sum_{s=1}^S \sum_{r=1}^R \sum_{p=1}^P Y_{psr} \cdot T_{psr} \rightarrow \max. \quad (12)$$

Результаты исследования и их обсуждение

Разработанные модели (1)–(12) позволяют определить оптимальный портфель заказов для лесозаготовительных предприятий с учетом: характеристик предмета труда, вариативность выхода сортиментов; затрат на преобразование предмета труда в готовую продукцию; договорных соглашений между предприятиями отрасли; мощности предприятий по заготовке и переработке биомассы древесины; индивидуальных особенностей предприятий отрасли, исключающих банкротство отдельных лесозаготовительных предприятий. Отличительной особенностью предлагаемых моделей является то, что они позволяют получать рекомендации по способам раскряжевки стволов, а следовательно, рассчитывать оптимальный баланс производства и потребления биомассы древесины с учетом вариативности выхода сортиментов на конкретной лесосеке.

Апробация моделей была проведена при обосновании инвестиционных проектов для предприятий отрасли: ООО «Соломенский лесозавод», ООО «Карлис-Пром», ООО «СтройИнвестРесурс», ООО «Минусинсклес», ООО НПО «Финтек», ООО «Роскомлес».

Следует отметить некоторые сложности в использовании предлагаемых моделей, связанные со временем, затрачиваемым на расчет. Сложность расчетов оптимального портфеля заказов, а следовательно, и их длительность, сильно зависит от количества видов сортиментов, на которые может быть раскряжеван ствол дерева. Опыт применения моделей показал, что задача может быть решена с приемлемой скоростью на настольном компьютере, если рассматри-

вается возможность выпиливания из ствола дерева не более 6–8 видов сортиментов. При увеличении числа сортиментов время расчетов значительно вырастает. В настоящее время нами ведутся исследования по оптимизации расчетов на основе генетических алгоритмов.

Заключение

Традиционно задача построения оптимального баланса производства и потребления биомассы древесины решалась на основе подхода, где в качестве исходных данных предполагались «зафиксированные» объемы производства сортиментов, получаемых с лесных участков. Однако освоение лесного фонда в своей основе предполагает многовариантность использования древесины, обусловленную тем, что ствол дерева может быть раскряжеван различными способами. Представленные в работе математические модели (1)–(12) позволяют решать задачу построения оптимального баланса производства и потребления биомассы древесины с учетом такой многовариантности. Запасы леса рассматриваются не как константа объема лесоматериалов каждого сортимента, а как гибкая система, подстраиваемая под потребности участников рынка лесной продукции. Сортиментный план лесозаготовительного предприятия динамически формируется в процессе решения задачи выбора лесоперерабатывающих предприятий. Такой подход позволяет рациональнее использовать биомассу древесины и способствует повышению эффективности функционирования лесопромышленного комплекса в целом.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-00327 мол_а.

Список литературы

1. Оптимизация логистики лесозаготовок / А.П. Соколов [и др.] // *Resources and Technology*. – 2012. – Т. 9, № 2. – С. 117–128.
2. Математическая модель задачи планирования много-передельного производства в лесопромышленном комплексе / Р.В. Воронов [и др.] // *Ученые записки Петрозаводского государственного университета*. Серия: Естественные и технические науки. – 2013. – № 4 (133). – С. 101–104.
3. Теория и практика принятия оптимальных решений для предприятий лесопромышленного комплекса / А.В. Воронин, В.А. Кузнецов, И.Р. Шегельман, Л.В. Щеголева. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2008. – 80 с.
4. Воронин А.В. Прикладные транспортно-производственные задачи планирования работы предприятий ЛПК / А.В. Воронин // *Лесной журнал*. – 2004. – № 1. – С. 103–110.
5. Петровский В.С. Оптимальная раскряжевка лесоматериалов / В.С. Петровский. – М.: Лесная пром-сть, 1989. – 288 с.
6. Степаков Г.А. Оптимизация производства круглых лесоматериалов / Г.А. Степаков. – М.: Лесная промышленность, 1974. – 160 с.
7. Воробьева Е.В. Оптимизация раскряжевки хвойных хлыстов с получением вершинного тонкомерно-короткомерного сырья: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Архангельск, 2009. – 20 с.
8. Pickens J.B., Lee A., Lyon G.W. Optimal Bucking of Northern Hardwoods // *Northern Journal of Applied Forestry*. – 1992. – vol. 9, no. 18. – P. 149–152.
9. Boston K., Murphy G. Value Recovery from Two Mechanized Bucking Operations in the Southeastern United States // *Southern Journal of Applied Forestry*. – 2003. – vol. 27, no. 4. – P. 259–263.
10. Шегельман И.Р., Щеголева Л.В., Будник П.В. Постановка задачи оптимизации портфеля заказов лесозаготовительных предприятий в технологических сетях лесопромышленных производств // *Инженерный вестник Дона*. – 2015. – № 1 (часть 2). URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2844> (дата обращения: 11.10.2017).
11. Прогнозирование выхода стволовой древесины по средним таксационным характеристикам лесонасаждения на основе имитационного моделирования / И.Р. Шегельман [и др.] // *Фундаментальные исследования*. – 2016. – № 4–1. – С. 118–122.