

ОЛЬГА АНАТОЛЬЕВНА ИВАНОВА

аспирант кафедры технологии и оборудования лесного комплекса лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)

olga402i@mail.ru

ЗАДАЧИ КОМПЛЕКТАЦИИ ПАРКА ЛЕСОВОЗНЫХ АВТОПОЕЗДОВ*

Рассмотрена проблема комплектации парка лесовозных автопоездов для полного или частичного обновления имеющегося подвижного состава и формирования парка лесовозных автопоездов, используемых на вывозке. Разработаны математические модели, позволяющие обосновать комплектацию парка лесовозных автопоездов на основе затрат на содержание одной машино-смены и значений сменной производительности. Представлены алгоритмы – решения оптимизационных задач с использованием метода динамического программирования. Полученные результаты позволяют лесозаготовителям комплектовать парк лесовозных автопоездов с минимальными затратами на их содержание, учитывая особенности применяемых технологий, используемых на вывозке. Применение на практике предлагаемых моделей позволит значительно повысить технико-экономические показатели деятельности лесозаготовительного предприятия.

Ключевые слова: затраты на содержание, парк лесовозных автопоездов, математическая модель, объем вывозки, сменная производительность

В настоящее время особое внимание уделяется проблеме совершенствования лесозаготовительного процесса на стадии транспортировки заготовленных лесоматериалов лесовозными автопоездами. Результаты исследований данного вопроса отражены в научных трудах О. Н. Бурмистровой [2], В. К. Курьянова [6], С. В. Ляхова [8] и др. Колossalный вклад внесли также ученые и специалисты ПетрГУ: А. В. Кузнецов [5], [10], А. М. Крупко [4], В. М. Лукашевич [7], В. И. Скрыпник [10], Л. В. Щеголева [11] и др. Стоит отметить, что перечисленные работы ученых и специалистов ПетрГУ написаны под руководством профессора И. Р. Шегельмана [10]. Все указанные выше авторы к решению данного вопроса подходили с разных точек зрения. В работе [4] предложена математическая модель рациональной структуры парка лесовозных автопоездов лесозаготовительного предприятия, учитывая амортизацию автопоездов и сезонный характер лесозаготовок.

При решении названной проблемы целесообразнее учитывать не амортизацию как отдельный экономический показатель, характеризующий объем затрат на содержание лесовозных автопоездов, а показатель затрат на содержание одной машино-смены лесовозного автопоезда, учитывающий амортизационные отчисления, затраты на текущий и средний ремонт, горюче-смазочные материалы и заработную плату рабочих.

В данной статье представлен подход к решению проблемы комплектации парка лесовозных автопоездов, который включает в себя два этапа. На первом этапе необходимо обосновать комплектацию парка лесовозных автопоездов для

обновления подвижного состава, используемого на вывозке, на втором этапе – обосновать оптимальную комплектацию автопоездов, используемых на вывозке, учитывая приобретенные и имеющиеся автопоезда.

Для обоснования комплектации парка лесовозных автопоездов с целью обновления имеющегося подвижного состава будем предполагать, что лесозаготовительное предприятие планирует приобрести определенное количество лесовозных автопоездов для выполнения нормированного сменного объема вывозки. Каждый автопоезд характеризуется сменной производительностью и затратами на содержание одной машино-смены. Требуется определить, какое количество автопоездов необходимо приобрести для выполнения сменного объема вывозки.

Для описания математической модели введем обозначения индексов, параметров и переменных, используемых в ней: I – множество индексов марок автопоездов, рассматриваемых для замены подвижного состава; $\arg \min C_i$ – индекс автопоезда, имеющего минимальные затраты на содержание одной машино-смены; x_i – количество приобретаемых автопоездов марки i ; W – нормированный сменный объем вывозки, м³; P_i – сменная производительность автопоезда марки i , м³/см; C_i – затраты на содержание одной машино-смены автопоезда марки i , руб./м·см; n – количество автопоездов, шт.; $C_{\arg \min C_i}$ – минимальные затраты на содержание одной машино-смены автопоезда вида $\arg \min C_i$, руб./м·см; $P_{\arg \min C_i}$ – сменная производительность автопоезда вида $\arg \min C_i$, м³/см.

Построим математическую модель. Общий объем вывозки заготовленных лесоматериалов ограничен нормированным сменным объемом вывозки:

$$\sum_{i=1}^n P_i \cdot x_i \geq W. \quad (1)$$

Ограничения на переменные:

$$x_i \geq 0, \quad x_i \in Z, \quad i = 1, \dots, n. \quad (2)$$

Целевая функция минимизирует затраты на содержание одной машино-смены всех автопоездов:

$$\sum_{i=1}^n C_i \cdot x_i \rightarrow \min. \quad (3)$$

Для решения оптимизационной задачи будем использовать метод динамического программирования [1], [3]. Так как данный метод используется для задач с целочисленными исходными данными, а значения P_i и W измеряются в сотых долях, то для нахождения оптимального решения необходимо перевести значения P_i и W в целые числа, умножив на 100.

Пусть функция $\phi(y)$ отображает минимальные затраты на содержание автопоездов при выполнении объема вывозки y :

$$\phi(y) = \min \left\{ \sum_{i=1}^n C_i \cdot x_i \mid \sum_{i=1}^n P_i \cdot x_i \geq y, x_i \geq 0, x_i \in Z, i = 1, \dots, n \right\}. \quad (4)$$

Для хранения номеров автопоездов, при использовании которых достигается минимум функции $\phi(y)$, введем дополнительный массив $\psi(y)$.

Вычислим начальные значения функций $\phi(y)$ и $\psi(y)$ при значении $y = 0$ (5), (6) и $0 < y < P_{\arg \min_{i=1..n} C_i}$ (7), (8):

$$\phi(y) = 0 \quad (5)$$

$$\psi(y) = 0 \quad (6)$$

$$\phi(y) = C_{\arg \min_{i=1..n} C_i}, \quad y = 1, \dots, P_{\arg \min_{i=1..n} C_i} \quad (7)$$

$$\psi(y) = \arg \min_{i=1..n} C_i. \quad (8)$$

Для определения значений функций $\phi(y)$ и $\psi(y)$ при $P_{\arg \min_{i=1..n} C_i} < y < W$ воспользуемся рекуррентным соотношением Беллмана:

$$\phi(y) = \min_{i=1..n} \{\phi(y - P_i) + C_i\}, \quad y = P_{\arg \min_{i=1..n} C_i}, \dots, W, \quad (9)$$

$$\psi(y) = i. \quad (10)$$

Представленная оптимизационная задача реализована на языке программирования Visual Basic в Microsoft Office Excel [9]. Алгоритм расчета количества автопоездов, необходимых для обновления имеющегося подвижного состава, состоит из четырех этапов.

1. Сортировка по возрастанию исходных данных по критерию «затраты на содержание одной машино-смены».

2. Заполнение массивов $\phi(y)$ и $\psi(y)$ при $y = 0$ на основе соотношений (5), (6) и $0 < y < P_{\arg \min_{i=1..n} C_i}$ – (7), (8).

3. Заполнение массивов $\phi(y)$ и $\psi(y)$ при $P_{\arg \min_{i=1..n} C_i} < y < W$ на основе соотношений (9), (10).

4. Подсчет количества автопоездов, необходимых для замены подвижного состава, следует начать со значения функции $\phi(y)$ при $y = W$, тогда функции $\psi(y)$ присваивается значение номера автопоезда $\psi(y) = i$, при котором функция $\phi(y)$ минимальна. Следовательно, для дальнейших расчетов от нормы сменного объема вывозки вычитаем значение сменной производительности того автопоезда, которому присвоен номер i на предыдущем этапе расчетов, тогда номер следующего автопоезда, включенного в автопарк, равен $\psi(y - P_i)$. Подсчет производим до тех пор, пока значение объема вывозки не станет равным нулю ($y = 0$).

На втором этапе обосновуем комплектацию парка лесовозных автопоездов, используемых на вывозке. На данном этапе необходимо распределить имеющиеся автопоезда на вывозке таким образом, чтобы выполнялась сменная норма объема вывозки, а затраты на содержание были минимальны. Опишем математическую модель, действующую в задаче. Введем обозначения: J – множество индексов автопоездов, включенных в состав автопарка, используемого на вывозке; n – количество автопоездов, рассматриваемых для комплектации автопарка, используемого на вывозке; x_j – переменная принимает значение 1, если автопоезд j используется на вывозке, 0 – иначе, $j \in J$; P_j – сменная производительность, выполняемая j -м автопоездом, $j \in J$, m^3/cm ; C_j – затраты на содержание одной машино-смены j -го автопоезда, $j \in J$, руб./м-см; $R_j = \sum_{j=1}^n P_j$ – сумма сменных производительностей для k первых автопоездов, m^3/cm ; W – нормированный сменный объем вывозки, m^3 .

Опишем математическую модель задачи. Общий объем вывозки заготовленных лесоматериалов ограничен нормированным сменным объемом вывозки:

$$\sum_{j=1}^n P_j \cdot x_j \geq W. \quad (11)$$

Ограничения на переменные:

$$x_j \in \{0, 1\}, \quad j = 1, \dots, n. \quad (12)$$

Целевая функция минимизирует затраты на содержание одной машино-смены всех автопоездов, используемых в технологическом цикле:

$$\sum_{j=1}^n C_j \cdot x_j \rightarrow \min. \quad (13)$$

Как и в первой задаче, для решения будем использовать метод динамического программирования.

Введем функцию $\varphi_j(y)$, которая отображает минимальные затраты на содержание автопарка среди первых j автобусов при выполнении сменной нормы вывозки y :

$$\varphi_j(y) = \min \left\{ \sum_{j=1}^n C_j \cdot x_j \mid \sum_{j=1}^n P_j \cdot x_j \geq y, x_j \in \{0, 1\}, j=1, \dots, n \right\}. \quad (14)$$

На начальном этапе расчетов необходимо отсортировать исходные данные по критерию «Производительность в смену» по возрастанию. Объем вывозки для первых рассматриваемых автобусов j функции $\varphi_j(y)$ выразим через R_j . Объем вывозки для всех рассматриваемых автобусов функции $\varphi_n(y)$ определяет максимальный объем вывозки, выполняемый всеми рассматриваемыми автобусами $y = R_n$. В расчетах необходимо учитывать, что значение сменной нормы вывозки не должно быть больше объема вывозки всех рассматриваемых автобусов $W \leq R_n$.

Для отображения использования рассматриваемого автобуса при выполнении объема вывозки y введем вспомогательный массив $\psi_j(y)$. По значениям массива $\psi_j(y)$ будем определять оптимальный набор автобусов, при котором функция $\varphi_j(y)$ принимает минимальные значения. Если $\psi_j(y) = 1$, рассматриваемый автобус при выполнении объема вывозки y используется, если $\psi_j(y) = 0$, автобус не используется.

Зададим начальные условия функции $\varphi_j(y)$ и $\psi_j(y)$ для первого автобуса:

$$\varphi_1(y) = C_1, \text{ если } y \leq R_1, \quad (15)$$

$$\psi_1(y) = 1, \text{ если } y \leq R_1. \quad (16)$$

Для нахождения минимальных затрат на содержание одной машино-смены для оставшихся автобусов построим рекуррентное соотношение Беллмана:

$$\varphi_j(y) = \begin{cases} \min \{ \varphi_{j-1}(\max(0, y - P_j)) + C_j, \varphi_{j-1}(y) \}, & \text{если } y \leq R_{j-1}, \\ \varphi_{j-1}(\max(0, y - P_j)) + C_j & \text{если } R_{j-1} < y \end{cases}, \quad (17)$$

$$y = 0, \dots, R_n, \quad j = 2, \dots, n, \quad (18)$$

где $\varphi_{j-1}(y)$ – функция, отображающая минимальные затраты на содержание автопарка среди предыдущих j автобусов при выполнении объема вывозки y ; $\max(0, y - P_j)$ показывает объем работы, которую необходимо выполнить автобус-

ездами с индексами $j = 1, \dots, j-1$; $R_{j-1}(y)$ – объем вывозки предыдущих j автобусов.

Определим значения массива $\psi_j(y)$

$$\psi_j(y) = \begin{cases} 1, & \text{если } \varphi_j(y) \leq \varphi_{j-1}(y), \text{ при } y \leq R_{j-1} \\ 0, & \text{иначе при } y \leq R_{j-1} \\ 1, & \text{если } y > R_{j-1} \end{cases}. \quad (19)$$

Представленная оптимизационная задача реализована на языке программирования Visual Basic в Microsoft Office Excel. Алгоритм расчета состоит из четырех этапов.

1. Сортировка по возрастанию исходных данных по критерию «Производительность в смену».

2. Заполнение массивов $\varphi_j(y)$ и $\psi_j(y)$ для первого рассматриваемого автобуса согласно соотношениям (15), (16).

3. Заполнение массивов $\varphi_j(y)$ и $\psi_j(y)$ для последующих автобусов согласно соотношениям (17)–(19).

4. Подсчет количества автобусов, используемых на вывозке, начинается с последнего рассматриваемого автобуса при значении $y = W$. Каждый автобус можно включить в используемый на вывозке автопарк только один раз, если функция $\psi_j(y) = 1$, то значение функции для следующего автобуса $\psi_{j+1}(y - P_j)$; если функция $\psi_j(y) = 0$, то $\psi_{j+1}(y)$. Подсчет автобусов осуществляется до тех пор, пока значение объема вывозки не станет равным нулю ($y = 0$).

ВЫВОДЫ

Разработаны математические модели, позволяющие обосновать комплектацию лесовозных автобусов при обновлении подвижного состава и формировании автопарка, используемого на вывозке на основе минимизации затрат на содержание одной машино-смены.

Принимая в качестве оптимизационного показателя затраты на содержание одной машино-смены, лесозаготовитель в одном показателе учитывает амортизационные отчисления, затраты на текущий и средний ремонт, горюче-смазочные материалы и заработную плату основных и дополнительных рабочих.

Используя в качестве ограничения суммарную сменную производительность, рассчитанную в зависимости от технологической схемы, используемой на вывозке, учитывается условие выполнения сменной нормы вывозки.

В настоящее время автором ведется сбор информации для апробации разработанных математических моделей.

* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алгоритмы: построение и анализ: Пер. с англ. / Т. Х. Кормен, Ч. И. Лейзерсон, Р. Л. Ривест, К. Штайн / Под. ред. И. В. Красикова. М.: Вильямс, 2005. 1296 с.

2. Бурмистрова О. Н. Повышение транспортно-эксплуатационных качеств лесовозных автомобильных дорог: для условий Республики Коми: Дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2001. 234 с.
3. Воронов Р. В. Введение в методы решения комбинаторных оптимизационных задач. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2006. 34 с.
4. Крупко А. М. Совершенствование технологических процессов транспортного освоения лесных участков лесовозными автопоездами: Автoref. дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2013. 15 с.
5. Кузнецова А. В. Обоснование технологических решений, повышающих эффективность операций первичного транспорта леса: Дис. ... канд. техн. наук. Петрозаводск, 2003. 169 с.
6. Курьянов В. К. Повышение эксплуатационно-экологического качества уровня лесовозного автомобильного транспорта: Дис. ... д-ра техн. наук. Воронеж, 1992. 509 с.
7. Лукашевич В. М. Обоснование комплексов и режимов работы лесосечных и лесотранспортных машин с учетом сезонности лесозаготовительных работ: Дис. ... канд. техн. наук. Петрозаводск: ПетрГУ, 2007. 150 с.
8. Ляхов С. В. Повышение эффективности вывозки лесоматериалов парком автопоездов на основе планирования технико-эксплуатационных показателей: Дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2012. 166 с.
9. Уокенбах Дж. Excel 2010: профессиональное программирование на VBA: Пер. с англ. М.: Вильямс, 2012. 944 с.
10. Шегельман И. Р., Скрипник В. И., Кузнецов А. В., Плadow А. В. Вывозка леса автопоездами. Техника. Технология. Организация. СПб.: ПРОФИКС, 2008. 304 с.
11. Щеголова Л. В. Модели и методы оптимизации систем машин для сквозных процессов заготовки круглых лесоматериалов: Дис. ... д-ра техн. наук. Петрозаводск, 2011. 288 с.

Ivanova O. A., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

MATHEMATICAL MODELS OF HAULING RIGS' FORMATION

The article is concerned with the problem of logging trucks' fleet formation for a complete or partial renovation of the existing hauling rigs and formation of the vehicle fleet used for timber removal. Mathematical models substantiating the algorithm of lumber trucks' fleet formation based on the maintenance costs per car-shift and values of the effective output per shift are developed. Solution algorithm with the use of dynamic programming method is presented. The obtained results will help logging operators to form a park of the hauling rigs with minimal expenses on its maintenance. Special features of the applied technologies used during removal are considered. Practical application of the proposed models will significantly improve technical and economic performance of the logging company

Key words: maintenance cost, lumber trucks' fleet, mathematical model, cubic capacity, output per shift

REFERENCES

1. Introduction to Algorithms / T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest, C. Stein. MIT Press and McGraw-Hill, 2001.
2. Burmistrova O. N. Povyshenie transportno-ekspluatatsionnykh kachestv lesovoznykh avtomobil'nykh dorog: dlya usloviy Respubliki Komi: Dis. ... kand. tekhn. nauk [Rise of transport and exploitation qualities of timber roads: for conditions of Komi Republic. Ph D thesis in Technical Sciences]. Voronezh, 2001. 234 p.
3. Voronov R. V. Vvedenie v metody resheniya kombinatornykh optimizatsionnykh zadach [Introduction to methods of solving of combinatorial optimization problems]. Petrozavodsk, PetrSU Publ., 2006. 34 p.
4. Krupko A. M. Sovershenstvovanie tekhnologicheskikh protsessov transportnogo osvoeniya lesnykh uchastkov lesovoznymi avtopoedzdam. Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Refinement of technological processes of transport absorption of forest lots by landing road-trains. Author's abstract of Ph D thesis in Technical Sciences]. Arkhangel'sk, 2013. 15 p.
5. Kuznetsov A. V. Obosnovanie tekhnologicheskikh reshenii, povyshayushchikh effektivnost' operatsiy pervichnogo transporta lesa: Dis. ... kand. tekhn. nauk [Substantiation of technological solutions raising effectiveness of operations of primary timber transport. Ph D thesis in Technical Sciences]. Petrozavodsk, 2003. 170 p.
6. Kur'yano V. K. Povyshenie ekspluatatsionno-ekologicheskogo kachestva urovnya lesovoznogo avtomobil'nogo transporta. Dis. ... d-ra tekhn. nauk [Rise of transport and ecological qualities of timber transport. Doctoral dissertation in Technical sciences.]. Voronezh, 1992. 509 p.
7. Lukashhevich V. M. Obosnovanie komplektov i rezhimov raboty lesosechnykh i lesotransportnykh mashin s uchetom sezonnosti lesozagotovitel'nykh rabot: Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Substantiation of packages and modes of work of stump-to-roadside equipment considering seasonality of forest harvesting operations. Author's abstract of Ph D thesis in Technical Sciences]. Petrozavodsk, 2007. 16 p.
8. Lyakhov S. V. Povyshenie effektivnosti vyvozki lesomaterialov parkom avtopoezdov na osnove planirovaniya tekhniko-ekspluatatsionnykh pokazateley. Dis. ... kand. tekhn. nauk [Rise of effectiveness of forwarding by logging trucks on the ground of planning exploitation indexes Ph D thesis in Technical Sciences]. Ekaterinburg, 2012. 166 p.
9. Walkenbach J. Excel 2010 Power Programming with VBA. Wiley, 2010. 1080 p.
10. Shegelman I. R., Skrypnik V. I., Kuznetsov A. V., Pladow A. V. Vyvozka lesa avtopoedzami. Tekhnika. Tekhnologiya. Organizatsiya [Forwarding by logging trucks. Technique. Technology. Organisation]. St. Petersburg, PROFIKS Publ., 2008. 304 p.
11. Shchegoleva L. V. Modeli i metody optimizatsii sistem mashin dlya skvoznykh protsessov zagotovki kruglykh lesomaterialov: Avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk [Models and methods of optimization of systems of machines through processes of round timber logging. Author's abstract of Ph D thesis in Technical Sciences]. Petrozavodsk, 2011. 42 p.

Поступила в редакцию 27.05.2013