

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**А. И. Хотянович, И. В. Турлай**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ  
И ОПТИМИЗАЦИЯ  
ПРОЦЕССОВ ЛЕСОЗАГОТОВОК  
И ТРАНСПОРТА ЛЕСА  
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

*Учебно-методическое пособие  
для студентов специальности 1-46 01 01  
«Лесоинженерное дело»*

Минск 2015

УДК 630\*31:519.85(076.5)

ББК 43.90я73

X-85

Рассмотрено и рекомендовано редакционно-издательским советом Белорусского государственного технологического университета

Рецензенты:

кандидат физико-математических наук,  
доцент кафедры высшей математики  
учреждения образования «Белорусский государственный  
технологический университет»

*В. В. Игнатенко;*

кандидат технических наук,  
доцент кафедры строительных и дорожных машин  
Белорусского национального технического университета

*А. А. Ермалицкий*

**Хотянович, А. И.**

X-85 Моделирование и оптимизация процессов лесозаготовок и транспорта леса. Лабораторный практикум : учеб.-метод. пособие для студентов специальности 1-46 01 01 «Лесоинженерное дело» / А. И. Хотянович, И. В. Турлай. – Минск : БГТУ, 2015. – 72 с.

В лабораторном практикуме приведены методики выполнения задач по оптимизации технологических процессов лесосечных, лесоскладских работ, вывозке заготовленной древесины: в каждой лабораторной работе указана цель, даны задания, содержатся очередность выполнения расчетов и используемые для этого математические зависимости, приводится перечень контрольных вопросов. В виде приложений оформлены варианты индивидуальных заданий по каждой задаче.

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов специальности 1-46 01 01 «Лесоинженерное дело», а также может быть полезным инженерно-техническим работникам предприятий и научно-исследовательских организаций лесного комплекса.

УДК 630\*31:519.85(076.5)

ББК 43.90 я73

© УО «Белорусский государственный технологический университет», 2015

© Хотянович А. И., Турлай И. В., 2015

# ПРЕДИСЛОВИЕ

В современном мире высокого развития математического аппарата, приспособленности его к прикладным наукам, более совершенного технического сопровождения сложных производственных процессов, затрагивающих интересы различных компонентов экосистемы, лесной комплекс Республики Беларусь постепенно наполняется новейшими высокопроизводительными решениями в каждой сфере своей деятельности: от лесного хозяйства через лесопользование до химической переработки и энергетического использования древесины. Происходит этот процесс, прежде всего, благодаря интересу зарубежных (европейских) переработчиков древесины, которых республика привлекает своими запасами древесины, низкой стоимостью энергоносителей, недорогой квалифицированной рабочей силой. В такой ресурсно-технологической интеграции закономерно возрастает потребность в квалифицированном менеджменте, главным образом отечественном.

Знание современных методов математического описания и компьютерного моделирования помогает специалистам максимально быстро применить навыки в реализации инновационных процессов заготовки, транспортировки, переработки древесины, торговли ею.

Данное издание будет способствовать этим процессам за счет решения конкретных задач в наиболее приближенной к реальным природно-производственным условиям постановке.

Лабораторные работы составлены в соответствии с учебной программой по дисциплине «Моделирование и оптимизация процессов лесозаготовок и транспорта леса» и предназначены для студентов, обучающихся по специальности 1-46 01 01 «Лесоинженерное дело», инженерно-технических работников предприятий и научно-исследовательских организаций лесного комплекса.

Учебно-методическое пособие содержит 10 лабораторных заданий, каждое из которых будет выполняться студентами по индивидуальным вариантам и оформляться как отдельная зачетная работа с указанием названия и цели работы, методик и результатов расчетов.

Полученные результаты приводятся в форме таблиц и графиков, которые в дальнейшем обрабатываются и интерпретируются. После каждой лабораторной работы необходимо сделать аргументированные выводы.

Все работы адаптированы для их выполнения с применением персонального компьютера, а также предусмотрена возможность последующего вывода результатов расчета на бумажный носитель.

Лабораторные работы содержат элементы научных исследований. Их выполнение способствует повышению познавательной активности студентов, развивает их творческое мышление и профессиональные способности, учит анализировать полученные результаты.

# ОДНОМАШИННЫЕ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННЫЕ СИСТЕМЫ С УЧЕТОМ НАДЕЖНОСТИ

**Цель работы** – рассчитать оптимальные режимы функционирования одномашинной лесопромышленной системы с учетом фактора надежности оборудования.

## **Задания к лабораторной работе**

Задание 1. Изучить возможные состояния одномашинной лесопромышленной системы с учетом надежности оборудования.

Задание 2. Исследовать потоки событий, которые переводят одномашинные лесопромышленные системы из состояния в состояние.

Задание 3. Составить размеченный граф состояний одномашинной лесопромышленной системы.

Задание 4. Рассчитать интенсивность потоков событий одномашинной лесопромышленной системы.

Задание 5. Составить систему уравнений Колмогорова для вероятностей состояний одномашинной лесопромышленной системы во времени.

Задание 6. Записать формулу для вычисления финальных вероятностей состояний одномашинной лесопромышленной системы.

Задание 7. Построить графики зависимостей вероятностей состояний одномашинной лесопромышленной системы от интенсивностей потоков событий.

Задание 8. Определить оптимальную величину интенсивности подачи сырья на обработку для исследуемой лесопромышленной системы.

Надежность оборудования лесопромышленной системы обуславливает длительность выполнения системой своих функций. Расчет параметров функционирования лесопромышленной системы с учетом надежности оборудования является актуальной научно-производствен-

ной задачей. Знание характера технических отказов оборудования позволяет достаточно эффективно организовать работу служб ремонта и материально-технического обеспечения.

На рис. 1 изображен граф состояний одномашинной лесопромышленной системы.

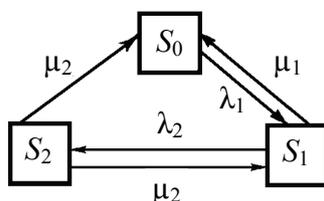


Рис. 1. Граф состояний одномашинной лесопромышленной системы с учетом надежности оборудования:

$S_0$  – состояние, в котором лесопромышленная система технически исправна, но не работает по причине отсутствия сырья;  $S_1$  – состояние, находясь в котором лесопромышленная система осуществляет обработку предмета труда;  $S_2$  – состояние, в котором лесопромышленная система технически неисправна;  $\lambda_1$  – интенсивность поступления сырья на обработку;  $\mu_1$  – интенсивность обработки предмета труда;  $\lambda_2$  – интенсивность отказов оборудования;  $\mu_2$  – интенсивность ремонтных работ

Из состояния в состояние лесопромышленную систему переводят потоки событий, например, подача сырья на обработку, ремонт оборудования системы и т. д. Количественной характеристикой потока событий является его *интенсивность*, т. е. число событий в единицу времени.

На основании графа состояний лесопромышленной системы строится математическая модель ее работы в виде дифференциальных уравнений Колмогорова. Система дифференциальных уравнений изменения вероятностей состояний во времени выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{dP_0(t)}{dt} = -\lambda_1 \cdot P_0(t) + \mu_1 \cdot P_1(t) + \mu_2 \cdot P_2(t), \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = \lambda_1 \cdot P_0(t) - \mu_1 \cdot P_1(t) - \lambda_2 \cdot P_1(t), \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = -\mu_2 \cdot P_2(t) + \lambda_2 \cdot P_1(t), \\ P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) = 1. \end{cases} \quad (1)$$

В установившемся режиме работы системы вероятности состояний постоянны, их произведение равно нулю и дифференцированные уравнения Колмогорова преобразуются в систему алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} 0 = -\lambda_1 \cdot P_0 + \mu_1 \cdot P_1 + \mu_2 \cdot P_2, \\ 0 = \lambda_1 \cdot P_0 - \mu_1 \cdot P_1 - \lambda_2 \cdot P_1, \\ 0 = -\mu_2 \cdot P_2 + \lambda_2 \cdot P_1, \\ P_0 + P_1 + P_2 = 1. \end{cases} \quad (2)$$

Решением данной системы будут зависимости вероятностей состояний оборудования от интенсивностей потоков соответствующих событий:

$$P_0 = \left[ 1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 + \mu_1} + \frac{\lambda_1}{(\lambda_2 + \mu_1)} \cdot \frac{\lambda_2}{\mu_2} \right]^{-1}; \quad (3)$$

$$P_1 = \frac{\lambda_1 \cdot P_0}{\lambda_2 + \mu_1}; \quad (4)$$

$$P_2 = \frac{\lambda_2}{\mu_2} \cdot \frac{\lambda_1 \cdot P_0}{\lambda_2 + \mu_1}. \quad (5)$$

Чтобы отыскать оптимальную величину интенсивности подачи сырья на обработку ( $\lambda_1^*$ ) для конкретной лесопромышленной системы в рамках решения данной задачи необходимо в системе координат  $P_i = f(\lambda_1)$  построить соответствующие кривые и отыскать  $\lambda_1^*$  (рис. 2).

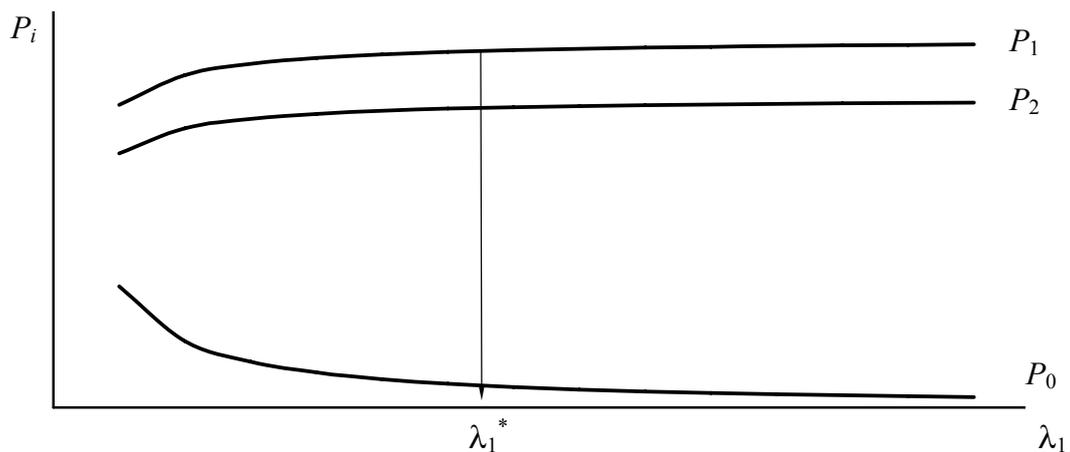


Рис. 2. Зависимость вероятностей состояний лесопромышленной системы от интенсивности подачи сырья на обработку

По численному значению  $\lambda_1^*$  устанавливается оптимальное время подачи сырья на обработку  $t_{\text{подачи}}^*$ .

### **Контрольные вопросы**

1. Размеченный граф состояний одномашинной лесопромышленной системы с учетом надежности оборудования.
2. Потoki событий и их интенсивности.
3. Система уравнений Колмогорова для вероятностей состояний одномашинной лесопромышленной системы во времени.
4. Алгебраические выражения для определения вероятностей состояний одномашинной лесопромышленной системы.
5. Графические зависимости вероятностей состояний одномашинной лесопромышленной системы.
6. Оптимальные параметры работы одномашинной лесопромышленной системы.

# ОДНОМАШИННЫЕ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННЫЕ СИСТЕМЫ БЕЗ ЗАПАСА

**Цель работы** – рассчитать оптимальные режимы функционирования одномашинной лесопромышленной системы без запаса.

## **Задания к лабораторной работе**

Задание 1. Изучить возможные состояния одномашинной лесопромышленной системы без запаса.

Задание 2. Исследовать потоки событий, которые переводят одномашинные лесопромышленные системы из состояния в состояние.

Задание 3. Составить размеченный граф состояний одномашинной лесопромышленной системы без запаса.

Задание 4. Рассчитать интенсивность потоков событий одномашинной лесопромышленной системы без запаса.

Задание 5. Составить систему уравнений Колмогорова для вероятностей состояний одномашинной лесопромышленной системы во времени.

Задание 6. Записать формулу для вычисления финальных вероятностей состояний одномашинной лесопромышленной системы без запаса.

Задание 7. Построить графики зависимостей вероятностей состояний одномашинной лесопромышленной системы от интенсивностей потоков событий.

Задание 8. Определить оптимальную величину интенсивности подачи сырья на обработку для исследуемой лесопромышленной системы.

Лесопромышленные системы без запаса сырья реализуют переработку древесины, где между смежным в технологическом процессе оборудованием организована жесткая связь движения предмета труда, в частности лесо- или пиломатериала.

Отсутствие мест межоперационного хранения предмета труда перед очередным технологическим этапом обработки древесины дает возможность использовать меньшую площадь помещения цехов, делает процесс менее капиталоемким, исключая необходимость

приобретения, размещения, обслуживания буферных площадок и установки на них механизмов поштучной выдачи заготовок для дальнейшей обработки. Вместе с тем подобная организация переработки требует более высокого уровня инженерного сопровождения технологического процесса, в частности соблюдения норм периодичности обслуживания оборудования, диагностирования параметров функционирования узлов и механизмов машин или станков с целью прогнозирования неисправностей и планирования их устранения одновременно с выполнением регламентированных технических обслуживаний. Это в свою очередь предполагает наличие квалифицированной службы сервиса, укомплектованного склада запасных частей и расходных материалов, что является достаточно затратным делом.

На рис. 3 изображен граф состояний одномашинной лесопромышленной системы без запаса.

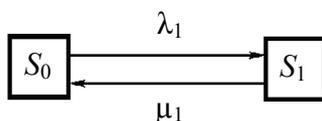


Рис. 3. Граф состояний одномашинной лесопромышленной системы без запаса:

$S_0$  – состояние, в котором лесопромышленная система технически исправна, но не работает по причине отсутствия сырья;  $S_1$  – состояние, находясь в котором лесопромышленная система осуществляет обработку предмета труда;  $\lambda_1$  – интенсивность поступления сырья на обработку;  $\mu_1$  – интенсивность обработки предмета труда

Из состояния в состояние лесопромышленную систему переводят такие потоки событий, как подача сырья на обработку и обработка сырья. Количественной характеристикой потока событий является его *интенсивность*, т. е. число событий в единицу времени.

На основании графа состояний лесопромышленной системы строится математическая модель ее работы в виде дифференциальных уравнений Колмогорова. Система дифференциальных уравнений изменения вероятностей состояний во времени выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{dP_0(t)}{dt} = -\lambda_1 \cdot P_0(t) + \mu_1 \cdot P_1(t), \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = \lambda_1 \cdot P_0(t) - \mu_1 \cdot P_1(t), \\ P_0(t) + P_1(t) = 1. \end{cases} \quad (6)$$

В установившемся режиме работы системы вероятности состояний постоянны, их произведение равно нулю и дифференцированные уравнения Колмогорова преобразуются в систему алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} 0 = -\lambda_1 \cdot P_0 + \mu_1 \cdot P_1, \\ 0 = \lambda_1 \cdot P_0 - \mu_1 \cdot P_1, \\ P_0 + P_1 = 1. \end{cases} \quad (7)$$

Решением данной системы будут зависимости вероятностей состояний оборудования от интенсивностей потоков соответствующих событий:

$$P_0 = \frac{\mu_1}{\lambda_1 + \mu_1}; \quad (8)$$

$$P_1 = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \mu_1}. \quad (9)$$

Чтобы отыскать оптимальную величину интенсивности подачи сырья на обработку ( $\lambda_1^*$ ) для конкретной лесопромышленной системы в рамках решения данной задачи необходимо в системе координат  $P_i = f(\lambda_1)$  построить соответствующие кривые и отыскать  $\lambda_1^*$  (рис. 4).

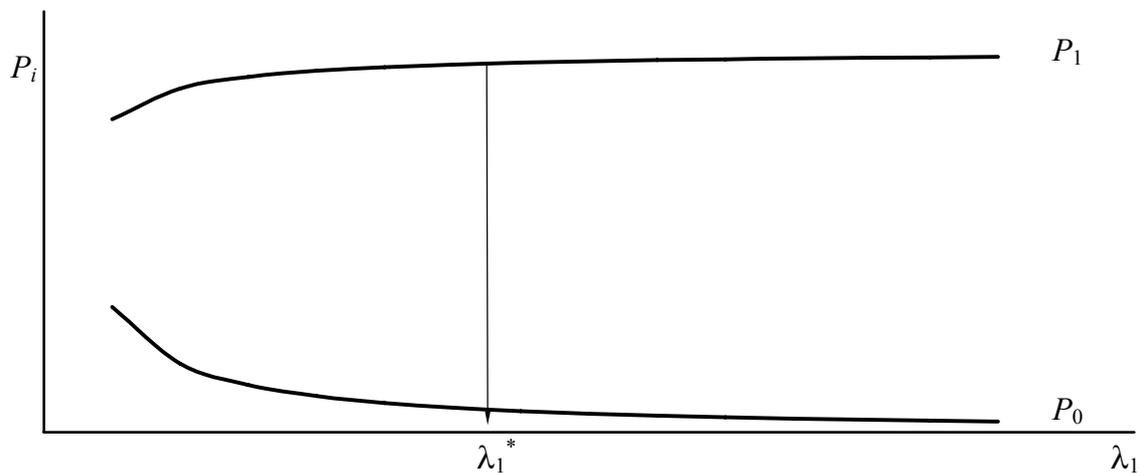


Рис. 4. Зависимость вероятностей состояний одномашинной лесопромышленной системы без запаса от интенсивности подачи сырья на обработку

По численному значению  $\lambda_1^*$  устанавливается оптимальное время подачи сырья на обработку  $t_{\text{подачи}}^*$ .

## **Контрольные вопросы**

1. Размеченный граф состояний одномашинной лесопромышленной системы без запаса.
2. Потоки событий и их интенсивности.
3. Система уравнений Колмогорова для вероятностей состояний одномашинной лесопромышленной системы без запаса во времени.
4. Алгебраические выражения для определения вероятностей состояний одномашинной лесопромышленной системы без запаса.
5. Графические зависимости вероятностей состояний одномашинной лесопромышленной системы без запаса.
6. Оптимальные параметры работы одномашинной лесопромышленной системы без запаса.

# МНОГОМАШИННЫЕ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННЫЕ СИСТЕМЫ БЕЗ ЗАПАСА

**Цель работы** – рассчитать оптимальные режимы функционирования многомашинной лесопромышленной системы без запаса.

## **Задания к лабораторной работе**

Задание 1. Изучить возможные состояния многомашинной лесопромышленной системы без запаса.

Задание 2. Исследовать потоки событий, которые переводят многомашинные лесопромышленные системы из состояния в состояние.

Задание 3. Составить размеченный граф состояний многомашинной лесопромышленной системы без запаса.

Задание 4. Рассчитать интенсивность потоков событий многомашинной лесопромышленной системы без запаса.

Задание 5. Составить систему уравнений Колмогорова для вероятностей состояний многомашинной лесопромышленной системы во времени.

Задание 6. Записать формулу для вычисления финальных вероятностей состояний многомашинной лесопромышленной системы без запаса.

Задание 7. Построить графики зависимостей вероятностей состояний многомашинной лесопромышленной системы от интенсивности подачи сырья на обработку.

Задание 8. Определить оптимальную величину интенсивности подачи сырья на обработку для исследуемой лесопромышленной системы.

*Многомашинная лесопромышленная система* – это группа одинаковых машин или станков, где каждая единица оборудования в системе выполняет один и тот же комплекс операций с поступающим на обработку однотипным предметом труда.

На рис. 5 изображен граф состояний многомашинной лесопромышленной системы без запаса.

Из состояния в состояние лесопромышленную систему переводят такие потоки событий, как подача сырья на обработку и обработка сырья. Количественной характеристикой потока событий является его *интенсивность*, т. е. число событий в единицу времени.

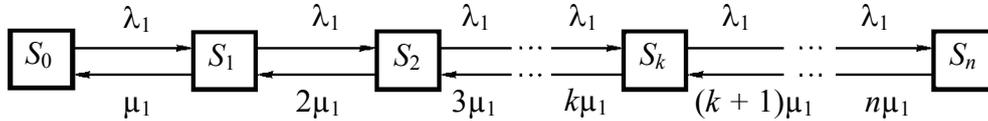


Рис. 5. Граф состояний многомашинной лесопромышленной системы без запаса:

$S_0$  – состояние, находясь в котором лесопромышленная система (все станки) технически исправна, но не работает по причине отсутствия сырья;

$S_1$  – состояние, в котором одна машина системы осуществляет обработку предмета труда, остальные машины системы простаивают;

$S_2$  – работают две машины системы, остальные простаивают;

$S_k$  – работают  $k$  машин системы, остальные простаивают;

$S_n$  – работают все  $n$  машин, полная загрузка системы;

$\lambda_1$  – интенсивность поступления сырья на обработку;

$\mu_1$  – интенсивность обработки предмета труда

На основании графа состояний лесопромышленной системы строится математическая модель ее работы в виде дифференциальных уравнений Колмогорова. Система дифференциальных уравнений изменения вероятностей состояний во времени выглядит следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_0(t)}{dt} = -\lambda_1 \cdot P_0(t) + \mu_1 \cdot P_1(t), \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = -(\lambda_1 + \mu_1) \cdot P_1(t) + \lambda_1 \cdot P_0(t) + 2 \cdot \mu_1 \cdot P_2(t), \\ \dots \\ \frac{dP_k(t)}{dt} = -(\lambda_1 + \mu_1) \cdot P_k(t) + \lambda_1 \cdot P_{k-1}(t) + (k+1) \cdot \mu_1 \cdot P_{k+1}(t), \\ \dots \\ \frac{dP_n(t)}{dt} = -n \cdot \mu_1 \cdot P_n(t) + \lambda_1 \cdot P_{n-1}(t), \\ P_0(t) + P_1(t) = 1. \end{array} \right. \quad (10)$$

В установившемся режиме работы системы вероятности состояний постоянны, их произведение равно нулю и дифференцированные уравнения Колмогорова преобразуются в систему алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} 0 = -\lambda_1 \cdot P_0 + \mu_1 \cdot P_1, \\ 0 = -(\lambda_1 + \mu_1) \cdot P_1 + \lambda_1 \cdot P_0 + 2 \cdot \mu_1 \cdot P_2, \\ \dots \\ 0 = -(\lambda_1 + \mu_1) \cdot P_k + \lambda_1 \cdot P_{k-1} + (k+1) \cdot \mu_1 \cdot P_{k+1}, \\ \dots \\ 0 = -n \cdot \mu_1 \cdot P_n + \lambda_1 \cdot P_{n-1}, \\ P_0 + P_1 = 1. \end{cases} \quad (11)$$

Решением данной системы будут зависимости вероятностей состояний оборудования от интенсивностей потоков соответствующих событий:

$$P_0 = \left[ 1 + \frac{\rho_1}{1!} + \frac{\rho_1^2}{2!} + \dots + \frac{\rho_1^n}{n!} \right]^{-1}; \quad (12)$$

$$P_1 = \frac{\rho_1}{1!} \cdot P_0; \quad (13)$$

$$P_2 = \frac{\rho_1^2}{2!} \cdot P_0; \quad (14)$$

$$P_n = \frac{\rho_1^n}{n!} \cdot P_0. \quad (15)$$

В выражениях (12)–(15) параметр  $\rho_1$  – коэффициент загрузки оборудования и представляет собой отношение интенсивности подачи сырья на обработку к интенсивности обработки предмета труда:

$$\rho_1 = \frac{\lambda_1}{\mu_1}. \quad (16)$$

Чтобы отыскать оптимальную величину интенсивности подачи сырья на обработку для конкретной лесопромышленной системы в рамках решения данной задачи необходимо в системе координат  $P_i = f(\lambda_1)$  построить соответствующие кривые и отыскать  $\lambda_1^*$  (рис. 6).

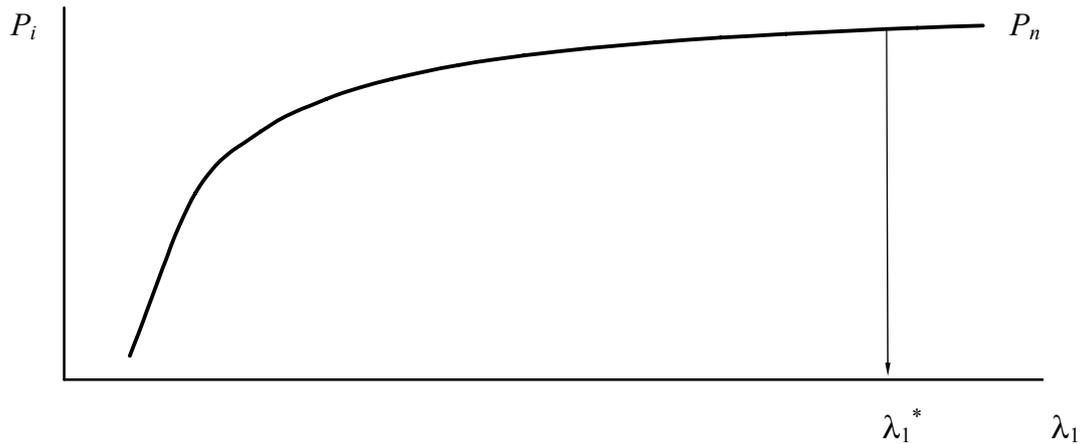


Рис. 6. Зависимость вероятности состояния многомашинной лесопромышленной системы без запаса (режим полной загрузки всех машин в системе) от интенсивности подачи сырья на обработку

По численному значению  $\lambda_1^*$  устанавливается оптимальное время подачи сырья на обработку  $t_{\text{подачи}}^*$ .

### Контрольные вопросы

1. Размеченный граф состояний многомашинной лесопромышленной системы без запаса.
2. Потоки событий и их интенсивность.
3. Система уравнений Колмогорова для вероятностей состояний многомашинной лесопромышленной системы без запаса во времени.
4. Алгебраические выражения для определения значений вероятности состояний многомашинной лесопромышленной системы без запаса.
5. Графические зависимости вероятностей состояний многомашинной лесопромышленной системы без запаса.
6. Оптимальная величина интенсивности подачи сырья на обработку для многомашинной лесопромышленной системы без запаса.

# ОДНОМАШИННЫЕ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННЫЕ СИСТЕМЫ С ЗАПАСОМ

**Цель работы** – рассчитать оптимальные режимы функционирования одномашинной лесопромышленной системы с запасом.

## **Задания к лабораторной работе**

Задание 1. Изучить возможные состояния одномашинной лесопромышленной системы без запаса.

Задание 2. Исследовать потоки событий, которые переводят одномашинные лесопромышленные системы с запасом из состояния в состояние.

Задание 3. Составить размеченный граф состояний одномашинной лесопромышленной системы с запасом.

Задание 4. Рассчитать интенсивность потоков событий одномашинной лесопромышленной системы с запасом.

Задание 5. Составить систему уравнений Колмогорова для вероятностей состояний одномашинной лесопромышленной системы с запасом.

Задание 6. Записать формулы для вычисления финальных вероятностей состояний одномашинной лесопромышленной системы с запасом.

Задание 7. Построить графики зависимостей вероятностей состояний одномашинной лесопромышленной системы с запасом от величины запаса и интенсивности подачи сырья на обработку.

Задание 8. Определить оптимальную величину запаса предмета труда и интенсивности подачи сырья на обработку для исследуемой лесопромышленной системы.

Лесопромышленные системы с запасом сырья реализуют переработку древесины, где между смежным в технологическом процессе

оборудованием организована гибкая связь движения предмета труда, в частности лесо- или пиломатериала.

Наличие мест межоперационного хранения предмета труда перед очередным технологическим этапом обработки древесины дает возможность производственным линиям и участкам быть менее зависимыми друг от друга, т. е. в случае остановки по техническим или организационным причинам какого-нибудь оборудования позади и впереди расположенные станки могут продолжать обработку древесины, накопленную в предстаночных буферных магазинах.

На рис. 7 изображен размеченный граф состояний одномашинной лесопромышленной системы с запасом.

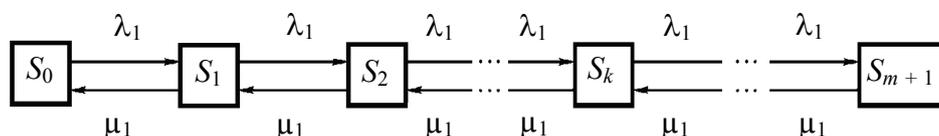


Рис. 7. Граф состояний одномашинной лесопромышленной системы с запасом:

- $S_0$  – состояние, в котором лесопромышленная система технически исправна, но не работает по причине отсутствия сырья;
- $S_1$  – состояние, находясь в котором лесопромышленная система осуществляет обработку предмета труда, в запасе при этом отсутствует сырье;
- $S_2$  – состояние, в котором лесопромышленная система обрабатывает древесину, а в запасе в это время находится одна единица сырья;
- $S_{m+1}$  – состояние, в котором лесопромышленная система работает и в запасе находится  $m$  единиц предмета труда;
- $\lambda_1$  – интенсивность поступления сырья на обработку;
- $\mu_1$  – интенсивность обработки предмета труда

Из состояния в состояние лесопромышленную систему переводят такие потоки событий, как подача сырья на обработку и обработка сырья. Количественной характеристикой потока событий является его *интенсивность*, т. е. число событий в единицу времени.

На основании графа состояний лесопромышленной системы строится математическая модель ее работы в виде дифференциальных уравнений Колмогорова. Система дифференциальных уравнений изменения вероятностей состояний во времени выглядит следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l}
\frac{dP_0(t)}{dt} = -\lambda_1 \cdot P_0(t) + \mu_1 \cdot P_1(t), \\
\frac{dP_1(t)}{dt} = -(\lambda_1 + \mu_1) \cdot P_1(t) + \lambda_1 \cdot P_0(t) + \mu_1 \cdot P_2(t), \\
\dots\dots\dots \\
\frac{dP_2(t)}{dt} = -(\lambda_1 + \mu_1) \cdot P_2(t) + \lambda_1 \cdot P_1(t) + \mu_1 \cdot P_3(t), \\
\dots\dots\dots \\
\frac{dP_{m+1}(t)}{dt} = -\mu_1 \cdot P_{m+1}(t) + \lambda_1 \cdot P_m(t), \\
P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) + \dots + P_{m+1}(t) = 1.
\end{array} \right. \quad (17)$$

В установившемся режиме работы системы вероятности состояний постоянны, их произведение равно нулю и дифференцированные уравнения Колмогорова преобразуются в систему алгебраических уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l}
0 = -\lambda_1 \cdot P_0 + \mu_1 \cdot P_1, \\
0 = -(\lambda_1 + \mu_1) \cdot P_1 + \lambda_1 \cdot P_0 + \mu_1 \cdot P_2, \\
\dots\dots\dots \\
0 = -(\lambda_1 + \mu_1) \cdot P_2 + \lambda_1 \cdot P_1 + \mu_1 \cdot P_3, \\
\dots\dots\dots \\
0 = -\mu_1 \cdot P_{m+1} + \lambda_1 \cdot P_m, \\
P_0 + P_1 + P_2 + \dots + P_{m+1} = 1.
\end{array} \right. \quad (18)$$

Решением данной системы будут зависимости вероятностей состояний оборудования от интенсивностей потоков соответствующих событий:

$$P_0 = \left[ \frac{1 - \rho_1^{m+2}}{1 - \rho_1} \right]^{-1} = \frac{1 - \rho_1}{1 - \rho_1^{m+2}}; \quad (19)$$

$$P_1 = \rho_1 \cdot P_0; \quad (20)$$

$$P_2 = \rho_1^2 \cdot P_0; \quad (21)$$

$$P_{m+1} = \rho_1^{m+1} \cdot P_0. \quad (22)$$

В выражениях (19)–(22) параметр  $\rho_1$  – коэффициент загрузки оборудования и представляет собой отношение интенсивности подачи сырья на обработку к интенсивности обработки предмета труда:

$$\rho_1 = \frac{\lambda_1}{\mu_1}. \quad (23)$$

Для того, чтобы найти оптимальную величину запаса сырья  $m$ , а от значения этого параметра зависит геометрия буферного магазина, в котором накапливаются заготовки перед подачей их на обработку, необходимо воспользоваться выражением (19) и коэффициент загрузки оборудования  $\rho_1$  принять в диапазоне 0,8–0,9.

В осях  $P_0 = f(m)$  представим соответствующую зависимость графически и установим оптимальное значение запаса сырья  $m^*$  перед станком (рис. 8).

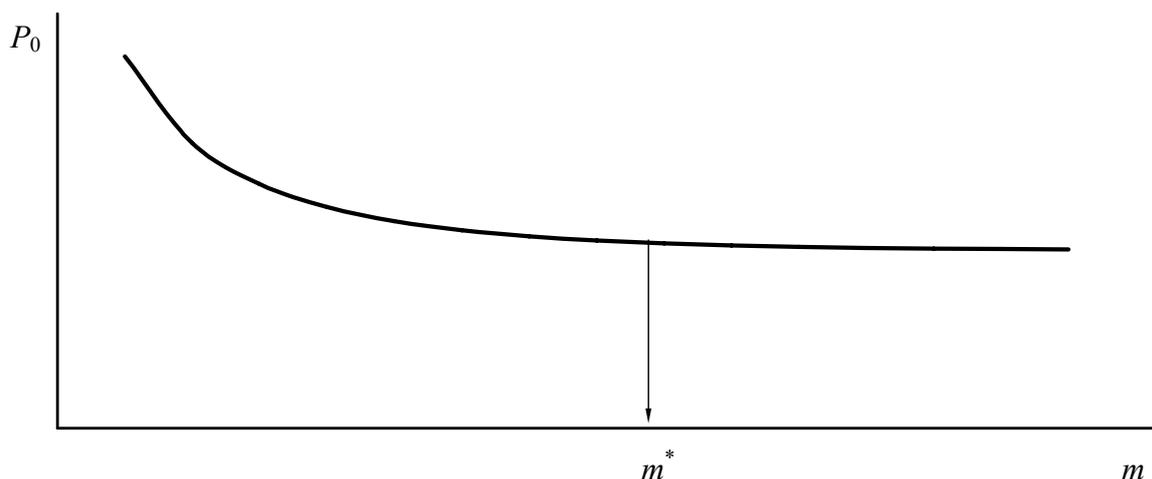


Рис. 8. Зависимость вероятности того, что лесопромышленная система не работает из-за отсутствия сырья, от величины запаса сырья, готового поступить на обработку

Чтобы отыскать оптимальную величину интенсивности подачи сырья на обработку для конкретной лесопромышленной системы в рамках решения данной задачи необходимо воспользоваться выражением для определения вероятности работы всей лесопромышленной системы с запасом  $P_{p.з}$ . При этом в уравнении (19) вместо переменной  $m$  следует подставить значение оптимальной величины запаса  $m^*$ .

$$P_{p.з} = 1 - P_0 - P_1. \quad (24)$$

В системе координат  $P_{p.з} = f(\lambda_1)$  следует построить соответствующую кривую и отыскать  $\lambda_1^*$  (рис. 9).

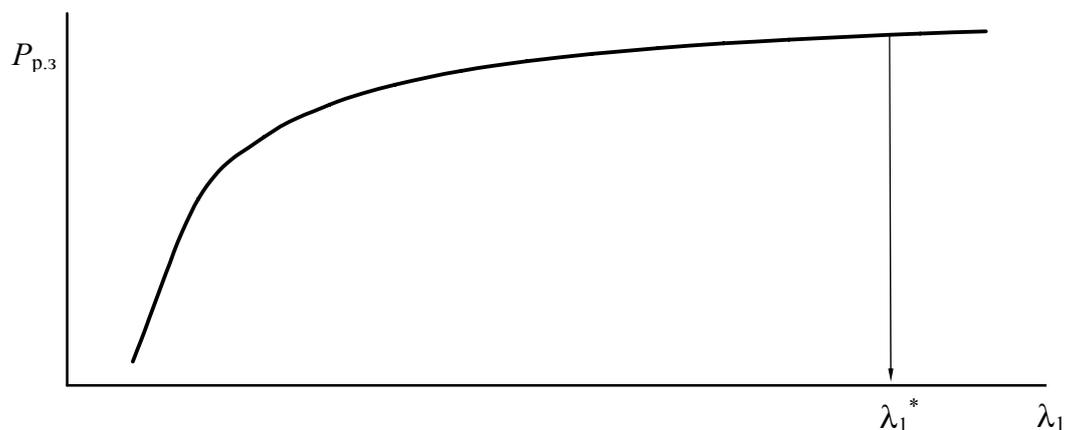


Рис. 9. Зависимость вероятности работы одномашинной лесопромышленной системы с запасом от интенсивности подачи сырья на обработку

По численному значению  $\lambda_1^*$  устанавливается оптимальное время подачи сырья на обработку  $t_{\text{подачи}}^*$ .

### Контрольные вопросы

1. Размеченный граф состояний одномашинной лесопромышленной системы с запасом.
2. Потoki событий и их интенсивность.
3. Система уравнений Колмогорова для вероятностей состояний одномашинной лесопромышленной системы с запасом во времени.
4. Алгебраические выражения для определения значений вероятностей состояний одномашинной лесопромышленной системы с запасом.
5. Графические зависимости вероятностей состояний одномашинной лесопромышленной системы с запасом.
6. Оптимальная величина запаса и интенсивности подачи сырья на обработку для одномашинной лесопромышленной системы с запасом.

# МНОГОМАШИННЫЕ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННЫЕ СИСТЕМЫ С ЗАПАСОМ

**Цель работы** – рассчитать оптимальные режимы функционирования многомашинной лесопромышленной системы с запасом.

## **Задания к лабораторной работе**

Задание 1. Изучить возможные состояния многомашинной лесопромышленной системы без запаса.

Задание 2. Исследовать потоки событий, которые переводят многомашинные лесопромышленные системы с запасом между состояниями.

Задание 3. Составить размеченный граф состояний многомашинной лесопромышленной системы с запасом.

Задание 4. Рассчитать интенсивность потоков событий многомашинной лесопромышленной системы с запасом.

Задание 5. Записать формулы для вычисления финальных вероятностей состояний многомашинной лесопромышленной системы с запасом.

Задание 6. Построить графики зависимостей вероятностей состояний многомашинной лесопромышленной системы с запасом от величины запаса и интенсивности подачи сырья на обработку.

Задание 7. Определить оптимальную величину запаса предмета труда и интенсивности подачи сырья на обработку для исследуемой лесопромышленной системы.

На рис. 10 изображен размеченный граф состояний многомашинной лесопромышленной системы с запасом.

Из состояния в состояние лесопромышленную систему переводят такие потоки событий, как подача сырья на обработку и обработка сырья. Количественной характеристикой потока событий является его *интенсивность*, т. е. число событий в единицу времени.

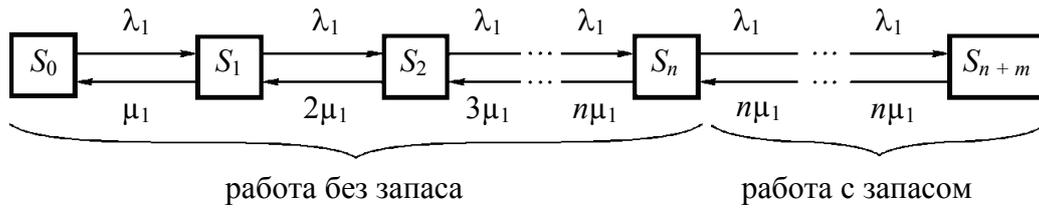


Рис. 10. Граф состояний многомашинной лесопромышленной системы с запасом:

- $S_0$  – состояние, в котором лесопромышленная система технически исправна, но не работает по причине отсутствия сырья;
- $S_1$  – состояние, находясь в котором одна машина системы осуществляет обработку предмета труда, остальные машины системы простаивают;
- $S_2$  – работают две машины системы, остальные простаивают;
- $S_n$  – работают все  $n$  машин, полная загрузка системы, запас пуст;
- $S_{n+1}$  – работают все машины системы, в запасе одна единица сырья;
- $S_{n+2}$  – работают все машины системы, в запасе две единицы сырья;
- $S_{n+m}$  – работают все машины системы, в запасе  $m$  единиц сырья;
- $\lambda_1$  – интенсивность поступления сырья на обработку;
- $\mu_1$  – интенсивность обработки предмета труда

Из состояния в состояние лесопромышленную систему переводят потоки событий подача сырья на обработку и обработка сырья. Количественной характеристикой потока событий является его *интенсивность*, т. е. число событий в единицу времени.

Алгебраические выражения для определения значений зависимостей вероятностей состояний оборудования от интенсивностей соответствующих событий:

$$P_0 = \left[ 1 + \frac{\rho_1}{1!} + \frac{\rho_1^2}{2!} + \dots + \frac{\rho_1^n}{n!} + \frac{\rho_1^n}{n!} \cdot \frac{\frac{\rho_1}{n} - \left(\frac{\rho_1}{n}\right)^{m+1}}{1 - \frac{\rho_1}{n}} \right]^{-1}; \quad (25)$$

$$P_1 = \frac{\rho_1}{1} \cdot P_0; \quad (26)$$

$$P_2 = \frac{\rho_1^2}{2!} \cdot P_0; \quad (27)$$

$$P_n = \frac{\rho_1^n}{n!} \cdot P_0. \quad (28)$$

В выражениях (25)–(28) параметр  $\rho_1$  – коэффициент загрузки оборудования и представляет собой отношение интенсивности подачи сырья на обработку к интенсивности обработки предмета труда:

$$\rho_1 = \frac{\lambda_1}{\mu_1}. \quad (29)$$

Для того, чтобы найти оптимальную величину запаса сырья  $m$ , а от значения этого параметра зависит геометрия буферного магазина, в котором накапливаются заготовки перед подачей их на обработку, необходимо воспользоваться выражением (25) и коэффициент загрузки оборудования  $\rho_1$  принять в диапазоне 0,8–0,9.

В осях  $P_0 = f(m)$  представим соответствующую зависимость графически и установим оптимальное значение запаса сырья перед станком  $m^*$  (рис. 11).

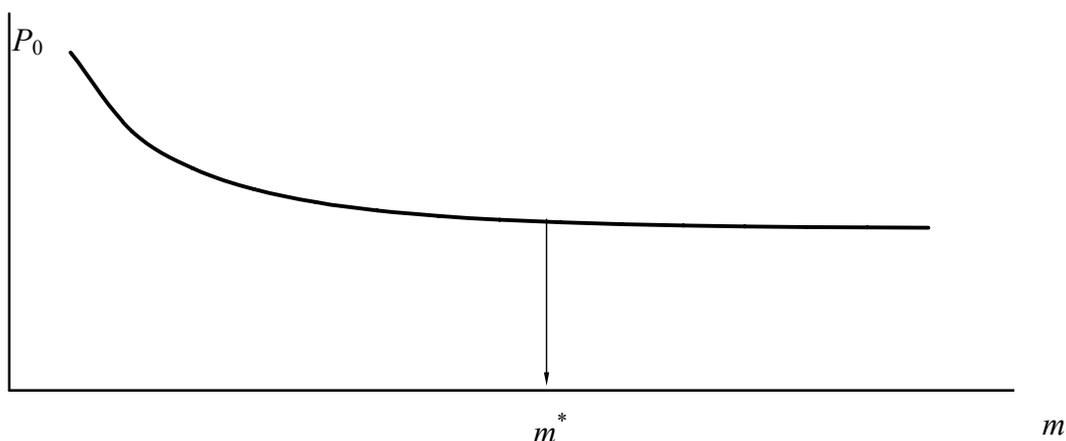


Рис. 11. Зависимость вероятности того, что лесопромышленная система не работает из-за отсутствия сырья, от величины запаса сырья, готового поступить на обработку

Чтобы отыскать оптимальную величину интенсивности подачи сырья на обработку для конкретной лесопромышленной системы в рамках решения данной задачи необходимо воспользоваться выражением для определения вероятности работы всей лесопромышленной системы с запасом  $P_{p.з}$ . При этом в уравнении (25) вместо переменной  $m$  следует подставить значение оптимальной величины запаса  $m^*$ .

$$P_{p.з} = 1 - P_0 - P_1 - \dots - P_n. \quad (30)$$

В системе координат  $P_{p.з} = f(\lambda_1)$  следует построить соответствующую кривую и отыскать  $\lambda_1^*$  (рис. 12).

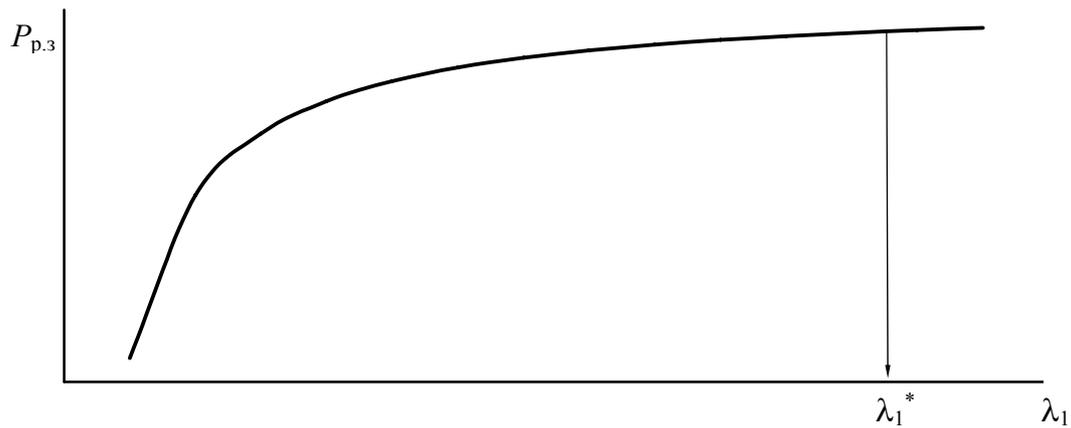


Рис. 12. Зависимость вероятности работы многомашинной лесопромышленной системы с запасом от интенсивности подачи сырья на обработку

По численному значению  $\lambda_1^*$  устанавливается оптимальное время подачи сырья на обработку  $t_{\text{подачи}}^*$ .

### Контрольные вопросы

1. Размеченный граф состояний многомашинной лесопромышленной системы с запасом.
2. Потоки событий и их интенсивность.
3. Алгебраические выражения для определения значений вероятностей состояний многомашинной лесопромышленной системы с запасом.
4. Графические зависимости вероятностей состояний многомашинной лесопромышленной системы с запасом.
5. Оптимальная величина запаса и интенсивности подачи сырья на обработку для многомашинной лесопромышленной системы с запасом.

# ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫХОДА ПРОДУКЦИИ И ЗАГРУЗКИ ОБОРУДОВАНИЯ В ЦЕХАХ ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

**Цель работы** – оптимизировать выход продукции и рассчитать режимы работы оборудования, обеспечивающие его максимальную загрузку.

## Задания к лабораторной работе

Задание 1. Составить систему ограничений в нормальной форме, накладываемых на решения задачи.

Задание 2. Преобразовать систему ограничений из нормальной в каноническую форму.

Задание 3. Составить уравнение целевой функции и объяснить вид ее экстремума.

Задание 4. Симплекс-методом найти оптимальные объемы выпуска трех видов продукции, обеспечивающие экстремум целевой функции.

Задание 5. Рассчитать коэффициент загрузки оборудования.

Задание 6. Предложить организационные меры, обеспечивающие максимальную загрузку оборудования в цехах переработки древесины.

В основе решения задачи лежит организация выпуска трех видов пилопродукции  $P_1$ ,  $P_2$  и  $P_3$  в лесопильном цеху.

Выпуском продукции занято оборудование четырех групп:  $A$  – окорочные станки,  $B$  – лесопильные,  $C$  – обрезные,  $D$  – торцовочные.

Исходные данные в общем виде приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Исходные данные в общем виде для решения задачи оптимизации выхода продукции и загрузки оборудования в цехах переработки древесины**

Группы оборудования	Количество станков в группе	Фонд времени станков, ч	Затраты времени на 1 м <sup>3</sup>		
			$P_1$	$P_2$	$P_3$
$A$	$n_1$	$\Phi_1$	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$
$B$	$n_2$	$\Phi_2$	$a_{21}$	$a_{22}$	$a_{23}$

Группы оборудования	Количество станков в группе	Фонд времени станков, ч	Затраты времени на 1 м <sup>3</sup>		
			$P_1$	$P_2$	$P_3$
$C$	$n_3$	$\Phi_3$	$a_{31}$	$a_{32}$	$a_{33}$
$D$	$n_4$	$\Phi_4$	$a_{41}$	$a_{42}$	$a_{43}$
Прибыль за 1 м <sup>3</sup> продукции			$c_1$	$c_2$	$c_3$

Фонд времени работы станков в этом случае устанавливает потенциал лесопильного цеха, т. е. лимитирует максимальную загрузку оборудования без привязки к виду выпускаемой продукции и объемам ее переработки. Фонд времени работы  $i$ -го станка вычисляется по формуле

$$\Phi_i = T_i \cdot n_{Ci} \cdot n_i, \quad (31)$$

где  $T_i$  – продолжительность смены, ч;  $n_{Ci}$  – количество смен в сутки;  $n_i$  – количество станков в группе.

Целью данной задачи является получение максимальной прибыли  $\Pi$  от реализации пиломатериалов и в этом случае целевая функция будет иметь вид

$$\Pi = c_1 \cdot x_1 + c_2 \cdot x_2 + c_3 \cdot x_3 \rightarrow \max, \quad (32)$$

где  $c_1, c_2, c_3$  – прибыль от продажи единицы пиломатериалов каждого вида;  $x_1, x_2, x_3$  – оптимальные объемы выпуска каждого вида продукции.

Ограничением выпуска пиломатериалов является время работы каждой группы станков с учетом принятой организации труда в рассматриваемом лесопильном цеху. Отсюда и получается система ограничений, накладываемых на решение данной задачи.

$$\begin{cases} a_{11} \cdot x_1 + a_{12} \cdot x_2 + a_{13} \cdot x_3 \leq \Phi_1, \\ a_{21} \cdot x_1 + a_{22} \cdot x_2 + a_{23} \cdot x_3 \leq \Phi_2, \\ a_{31} \cdot x_1 + a_{32} \cdot x_2 + a_{33} \cdot x_3 \leq \Phi_3, \\ a_{41} \cdot x_1 + a_{42} \cdot x_2 + a_{43} \cdot x_3 \leq \Phi_4; \\ x_1, x_2, x_3 \geq 0. \end{cases} \quad (33)$$

Данная система неравенств является системой ограничений в нормальной форме. Для последующего решения задачи следует эту систему представить в канонической форме, т. е. заменить знак неравенства на знак равенства, для чего в каждое уравнение системы введем мнимую переменную.

Тогда система ограничений будет иметь вид

$$\begin{cases} a_{11} \cdot x_1 + a_{12} \cdot x_2 + a_{13} \cdot x_3 + x_4 = \Phi_1, \\ a_{21} \cdot x_1 + a_{22} \cdot x_2 + a_{23} \cdot x_3 + x_5 = \Phi_2, \\ a_{31} \cdot x_1 + a_{32} \cdot x_2 + a_{33} \cdot x_3 + x_6 = \Phi_3, \\ a_{41} \cdot x_1 + a_{42} \cdot x_2 + a_{43} \cdot x_3 + x_7 = \Phi_4; \\ x_1, x_2, x_3 \geq 0. \end{cases} \quad (34)$$

Далее данные из системы размещаются в таблице и симплекс-методом отыскиваются оптимальные объемы трех видов пиломатериалов, производство которых планируется в лесопильном цеху.

Таблица имеет следующий вид (табл. 2).

Таблица 2

Первая симплекс-таблица

Мнимые переменные	Фонд времени	Объемы выпускаемой пилопродукции			Отношения
		$x_1$	$x_2$	$x_3$	
$x_4$	$\Phi_1$ $-\lambda \cdot a_{12} \cdot \Phi_3$	$a_{11}$ $-\lambda \cdot a_{12} \cdot a_{31}$	$a_{12}$ $-\lambda \cdot a_{12}$	$a_{13}$ $-\lambda \cdot a_{12} \cdot a_{33}$	$\Phi_1 / a_{12}$
$x_5$	$\Phi_2$ $-\lambda \cdot a_{22} \cdot \Phi_3$	$a_{21}$ $-\lambda \cdot a_{22} \cdot a_{31}$	$a_{22}$ $-\lambda \cdot a_{22}$	$a_{23}$ $-\lambda \cdot a_{22} \cdot a_{33}$	$\Phi_2 / a_{22}$
$x_6$	$\Phi_3$ $\lambda \cdot \Phi_3$	$a_{31}$ $\lambda \cdot a_{31}$	$a_{32}$ $\lambda$	$a_{33}$ $\lambda \cdot a_{33}$	$\Phi_3 / a_{32}$
$x_7$	$\Phi_4$ $-\lambda \cdot a_{42} \cdot \Phi_3$	$a_{41}$ $-\lambda \cdot a_{42} \cdot a_{31}$	$a_{42}$ $-\lambda \cdot a_{42}$	$a_{43}$ $-\lambda \cdot a_{42} \cdot a_{33}$	$\Phi_4 / a_{42}$
<b>П</b>	0 $-\lambda \cdot c_2 \cdot \Phi_3$	$c_1$ $-\lambda \cdot c_2 \cdot a_{31}$	$c_2$ $-\lambda \cdot c_2$	$c_3$ $-\lambda \cdot c_2 \cdot a_{33}$	

Последовательность решения задачи следующая:

1. Определяется столбец генерального члена, для чего в строке значения целевой функции выбирается любое положительное значение, например,  $c_2$ .

2. Находится строка генерального члена, для чего устанавливается отношение значений столбца «Фонд времени» к числам столбца генерального члена (результат записывается в столбец «Отношения»).

3. В столбце «Отношения» выбирается минимальное положительное значение, например,  $\Phi_3 / a_{32}$ , а строка с таким значением и будет являться строкой генерального члена.

4. На пересечении выделенных строки и столбца находится генеральный член.

5. Вычисляется частное от деления единицы на значение генерального члена  $\lambda = 1 / a_{32}$  и результат записывается внизу ячейки генерального члена.

6. В нижние части всех ячеек строки генерального члена записываются произведения верхних частей этих ячеек на коэффициент  $\lambda$ .

7. В нижние части всех ячеек столбца генерального члена записываются произведения верхних частей этих ячеек на коэффициент  $-\lambda$ .

8. В строке генерального члена выделяем верхние значения ячеек.

9. В столбце генерального члена выделяем нижние значения ячеек.

10. Нижние части остальных ячеек заполняем произведением выделенных значений строки и столбца генерального члена.

11. Создается новая таблица, в которой переменные столбца и строки генерального члена меняются местами ( $x_2$  и  $x_6$  меняются местами), а в самой таблице значения нижней части ячеек столбца и строки генерального члена занимают соответствующие верхние части (табл. 3).

Таблица 3

**Вторая симплекс-таблица**

Мнимые переменные	Фонд времени	Объемы выпускаемой пилопродукции			Отношения
		$x_1$	$x_6$	$x_3$	
$x_4$	$-\lambda \cdot a_{12} \cdot \Phi_3 + \Phi_1$	$-\lambda \cdot a_{12} \cdot a_{31} + a_{11}$	$-\lambda \cdot a_{12}$	$-\lambda \cdot a_{12} \cdot a_{33} + a_{13}$	
$x_5$	$-\lambda \cdot a_{22} \cdot \Phi_3 + \Phi_2$	$-\lambda \cdot a_{22} \cdot a_{31} + a_{21}$	$-\lambda \cdot a_{22}$	$-\lambda \cdot a_{22} \cdot a_{33} + a_{23}$	
$x_2$	$\lambda \cdot \Phi_3$	$\lambda \cdot a_{31}$	$\lambda$	$\lambda \cdot a_{33}$	
$x_7$	$-\lambda \cdot a_{42} \cdot \Phi_3 + \Phi_4$	$-\lambda \cdot a_{42} \cdot a_{31} + a_{41}$	$-\lambda \cdot a_{42}$	$-\lambda \cdot a_{42} \cdot a_{33} + a_{43}$	
<b>П</b>	$-\lambda \cdot c_2 \cdot \Phi_3 + 0$	$-\lambda \cdot c_2 \cdot a_{31} + c_1$	$-\lambda \cdot c_2$	$-\lambda \cdot c_2 \cdot a_{33} + c_3$	

12. В верхние части остальных ячеек записывается сумма значений соответствующих ячеек из табл. 2.

13. Если в строке целевой функции табл. 3 все значения окажутся отрицательными, значит, оптимальное решение найдено и составит  $x^{\circ}_2 = \lambda \cdot \Phi_3$ .

14. Если в строке целевой функции табл. 3 окажется хотя бы одно положительное значение работа со значениями табл. 3 начинается с пункта 1 и до пункта 13.

Существует вероятность ошибочных действия при решении настоящей задачи и основные признаки этого следующие:

- 1) если после двух и более таблиц значения в строке целевой функции уменьшаются по модулю;
- 2) если показатель  $\lambda$  оказывается на одном и том же месте;
- 3) если количество положительных значений в строке целевой функции увеличивается.

После определения оптимальных значений объемов каждого вида продукции ( $x^{\circ}_1, x^{\circ}_2, x^{\circ}_3$ ) необходимо рассчитать действительный фонд времени ( $\Phi_i^д$ ), т. е. сколько по времени будет загружено оборудование лесопильного цеха, если будет организован объем выпуска продукции, соответствующий оптимальному:

$$\begin{aligned}\Phi_1^д &= a_{11} \cdot x^{\circ}_1 + a_{12} \cdot x^{\circ}_2 + a_{13} \cdot x^{\circ}_3; \\ \Phi_2^д &= a_{21} \cdot x^{\circ}_1 + a_{22} \cdot x^{\circ}_2 + a_{23} \cdot x^{\circ}_3; \\ \Phi_3^д &= a_{31} \cdot x^{\circ}_1 + a_{32} \cdot x^{\circ}_2 + a_{33} \cdot x^{\circ}_3; \\ \Phi_4^д &= a_{41} \cdot x^{\circ}_1 + a_{42} \cdot x^{\circ}_2 + a_{43} \cdot x^{\circ}_3.\end{aligned}\tag{35}$$

Значение прибыли, которая будет получена после организации выпуска оптимальных объемов продукции можно найти по следующему выражению:

$$\Pi = c_1 \cdot x^{\circ}_1 + c_2 \cdot x^{\circ}_2 + c_3 \cdot x^{\circ}_3.\tag{36}$$

Отношение действительного фонда времени ( $\Phi_i^д$ ) к максимальному ( $\Phi_i$ ), рассчитанному по выражению (31), есть коэффициент использования (загрузки) оборудования  $k_{и}$ .

$$k_{и} = \frac{\Phi_i^д}{\Phi_i}.\tag{37}$$

Если численное значение коэффициента загрузки оборудования для каждой группы станков меньше 0,8, то необходимо изменить режим работы оборудования, например, продолжительность смены или число смен работы в сутки, что приведет к изменению численного значения фонда времени  $\Phi_i$ .

### **Пример решения задачи линейного программирования при помощи Microsoft Excel**

Условие задачи приведено в табл. 4.

Таблица 4

## Условие задачи

Операция технологического процесса	Количество станков	Затраты времени на производство единицы продукции, ч		
		Продукция 1	Продукция 2	Продукция 3
Окорка	2	0,18	0,21	0,19
Распиловка	2	0,11	0,17	0,09
Обрезка	2	0,22	0,17	0,14
Строгание	1	0,18	0,21	0,31
Прибыль от реализации единицы продукции, у. е.		290	250	350

Задача будет решена с использованием программы «Поиск решения», вызываемой из меню «Сервис».

1. Подготовка таблицы исходных данных для последующего корректного расчета. Форма представления исходной информации для выполнения оптимизационного расчета приведена в табл. 5.

Таблица 5

## Форма представления исходной информации

	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>
1	План выпуска продукции, м <sup>3</sup> /сут				
2			Вид получаемой продукции		
3	Фонд времени, ч		П1	П2	П3
4		16	0,18	0,21	0,19
5		16	0,11	0,17	0,09
6		16	0,22	0,17	0,14
7		8	0,18	0,21	0,31
8	Прибыль от реализации 1 м <sup>3</sup> продукции, у. е.		290	250	350
9	<b>Фонд времени действительный, ч</b>				
10		0	0	0	0
11		0	0	0	0
12		0	0	0	0
13		0	0	0	0
14	<b>Суммарная прибыль, у. е.</b>		0	0	0

Значения, для записи в табл. 5 берут из прил. 2. Фонд времени работы оборудования рассчитывают по зависимости (25).

Поиску оптимального решения предшествует запись в диапазоне строк 10–14 формул, по которым будет выполняться расчет.

Запишем в ячейку C10 формулу = C4\*C\$1 и скопируем ее в диапазон ячеек C10:E14. В ячейку B10 запишем формулу = СУММ(C10:E10) и скопируем ее в область B11:B14. В случае правильно выполненных действия в диапазоне ячеек B10:E14 будут стоять нули.

2. Ввод информации в окно программы «Поиск решения».

Программа «Поиск решения» вызывается из меню «Сервис».

Окно программы приведено на рис. 13.

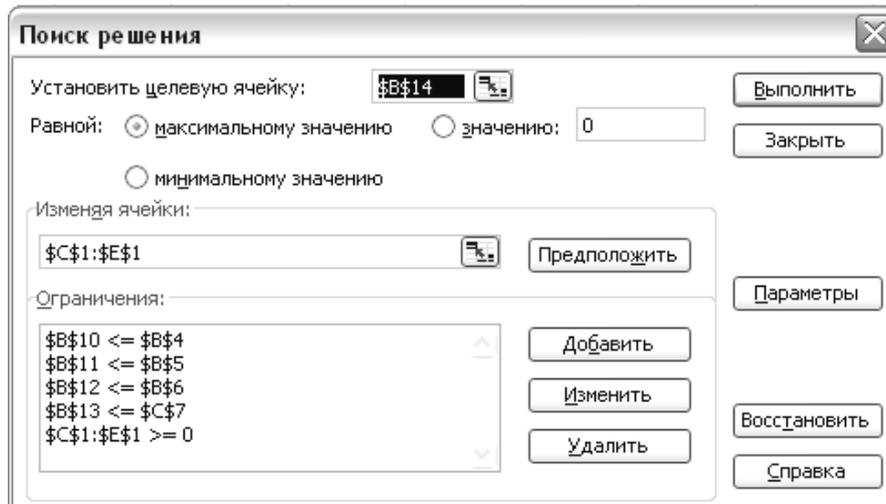


Рис. 13. Окно программы «Поиск решения»

В окне «Параметры» необходимо установить флажки возле условий: *Линейная модель*; *Неотрицательные значения*; *Автоматическое масштабирование*.

3. Результат вычисления.

После этого в окне «Поиск решения» нажимаем «Ок» и получаем результат вычисления (табл. 6).

Таблица 6

**Таблица результатов расчета задачи методом симплекс-таблицы**

	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>
1	План выпуска продукции, м <sup>3</sup> /сут		44,4		
2			Вид получаемой продукции		
3		Фонд времени, ч	П1	П2	П3
4		16	0,18	0,21	0,19
5		16	0,11	0,17	0,09
6		16	0,22	0,17	0,14
7		8	0,18	0,21	0,31
8	Прибыль от реализации 1 м <sup>3</sup> продукции, у. е.		290	250	350

	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>
9	<b>Фонд времени действительный, ч</b>				
10		8,0	8,0	0	0
11		4,9	4,9	0	0
12		9,8	9,8	0	0
13		8,0	8,0	0	0
14	<b>Суммарная прибыль, у. е.</b>	<b>12 888,9</b>	12 888,9	0	0

Как видно из таблицы, для получения максимальной прибыли от последующей реализации пиломатериалов необходимо ориентироваться на производство первого вида продукции в объеме 44,4 м<sup>3</sup> в сутки. В этом случае суточная прибыль составит 12 888,9 у. е. По выражению (37) будет найден коэффициент загрузки каждого станка в цеху и приняты меры более эффективной организации работы цеха, ориентированного на выпуск оптимального объема пиломатериалов.

### **Контрольные вопросы**

1. Условие задачи, нормальная и каноническая формы системы ограничений, целевая функция.
2. Максимальный и действительный фонд времени работы оборудования.
3. Оптимальные значения объемов производства продукции.
4. Коэффициент загрузки оборудования и методы управления им.

# ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРКА АВТОПОЕЗДОВ НА ВЫВОЗКЕ ДРЕВЕСИНЫ

**Цель работы** – оптимальным способом распределить лесовозные автопоезда, участвующие в вывозке заготовленной древесины, между пунктами погрузки и лесными складами с учетом потребности в сырье каждого предприятия, имеющих на лесосеках погрузчиков и кранов на выгрузке древесины.

## **Задания к лабораторной работе**

Задание 1. Согласно индивидуальному варианту составить таблицу исходных данных.

Задание 2. Выполнить расчет числа рейсов одного лесовозного автопоезда для различных маршрутов доставки древесины.

Задание 3. В зависимости от характеристик погрузчиков, определить их количество на погрузке древесины, доставляемой конкретному потребителю.

Задание 4. Установить число кранов, занятых на выгрузке лесоматериалов на каждом предприятии.

Задание 5. Предложить целевую функцию для условий данной задачи.

Задание 6. Записать систему ограничений, накладываемых на решение данной задачи.

Задание 7. Определить число лесовозных поездов, направляемых на конкретное предприятие.

Задание 8. Вычислить суммарное число рейсов задействованных лесовозных автопоездов.

В современный период развития лесной промышленности наряду с функционированием крупных комплексных деревообрабатывающих предприятий создаются узкоспециализированные перерабатывающие мощности, ориентированные на выпуск, например, целлюлозы или плит ДСП.

В этом случае производство требует конкретного сортимента, т. е. для получения целлюлозы нужна балансовая древесина, а для изготовления древесных плит необходимо технологическое сырье.

Неодинаковое удаление подобных специализированных производств от мест заготовки древесины (делянка, группа делянок) обуславливает различные условия доставки лесоматериалов автомобильным транспортом. Помимо различных расстояний вывозки, погрузка каждого вида сортиментов на однотипное транспортное средство и последующая их выгрузка занимает также неодинаковое время.

В этой связи эффективное использование парка лесовозных автопоездов является важной научно-производственной задачей.

Исходными данными для рассматриваемой задачи являются общее число погрузчиков на лесосеках  $n_{\Pi}$  (если погрузка древесины осуществляется гидроманипуляторами, установленными на лесовозном автотранспорте, число погрузчиков приравнивается к числу автопоездов), продолжительность загрузки единицы подвижного состава  $i$ -м видом сортимента  $t^{\Pi}_i$ , количество механизмов, используемых на выгрузке древесины на  $i$ -м предприятии  $n^B_i$ , время выгрузки  $i$ -го вида сортимента из лесовоза  $t^B_i$ , число заготавливаемых сортиментов  $i$  или число потребителей, так как подразумевается, что каждый вид сортиментов доставляется конкретному потребителю, общее время движения автопоезда с грузом и в порожнем состоянии  $T_i$ , продолжительность смены на вывозке древесины  $T_{\text{см}}$ .

Исходные данные в общем виде для трех потребителей древесины приведены в табл. 7.

Таблица 7

**Таблица исходных данных на примере трех потребителей древесины**

Показатель	Потребители древесины		
	1	2	3
Продолжительность смены на вывозке древесины, ч	$T_{\text{см}}$		
Погрузчики, шт.	$n_{\Pi}$		
Количество механизмов, используемых на выгрузке древесины на $i$ -м предприятии, шт.	$n^B_1$	$n^B_2$	$n^B_3$
Продолжительность загрузки единицы подвижного состава $i$ -м видом сортимента, ч	$t^{\Pi}_1$	$t^{\Pi}_2$	$t^{\Pi}_3$
Время движения автопоезда от лесосеки до потребителя и обратно, ч	$T_1$	$T_2$	$T_3$
Время выгрузки $i$ -го вида сортимента из лесовоза, ч	$t^B_1$	$t^B_2$	$t^B_3$
Общее время одного рейса автопоезда, ч	$T^P_1$	$T^P_2$	$T^P_3$

Число рейсов одного лесовозного автопоезда на склад  $i$ -го потребителя ( $m_i$ ) определяется по выражениям:

для первого потребителя

$$m_1 = \frac{T_{\text{см}}}{T_1^{\text{р}}}; \quad (38)$$

для второго потребителя

$$m_2 = \frac{T_{\text{см}}}{T_2^{\text{р}}}; \quad (39)$$

для третьего потребителя

$$m_3 = \frac{T_{\text{см}}}{T_3^{\text{р}}}. \quad (40)$$

Устанавливается отношение времени погрузки  $i$ -го вида сортамента на лесовозный автотранспорт ко времени смены:

для первого потребителя

$$\frac{t_1^{\text{п}}}{T_{\text{см}}}; \quad (41)$$

для второго потребителя

$$\frac{t_2^{\text{п}}}{T_{\text{см}}}; \quad (42)$$

для третьего потребителя

$$\frac{t_3^{\text{п}}}{T_{\text{см}}}. \quad (43)$$

Аналогичным образом устанавливается отношение продолжительности выгрузки лесоматериалов у  $i$ -го потребителя ко времени смены:

для первого потребителя

$$\frac{t_1^{\text{в}}}{T_{\text{см}}}; \quad (44)$$

для второго потребителя

$$\frac{t_2^B}{T_{\text{см}}}; \quad (45)$$

для третьего потребителя

$$\frac{t_3^B}{T_{\text{см}}}. \quad (46)$$

Решением данной задачи будет число лесовозов  $x_i$ , которые обеспечивают в течение смены доставку  $i$ -го вида сортиментов конкретному потребителю. При этом необходимо распределить лесовозы между потребителями древесины таким образом, чтобы суммарное число рейсов было максимальным, т. е.

$$m_{\text{общ}} = \sum_i m_i \cdot x_i \rightarrow \max; \quad (47)$$

$$m_{\text{общ}} = m_1 \cdot x_1 + m_2 \cdot x_2 + m_3 \cdot x_3 \rightarrow \max. \quad (48)$$

Выражение (47) в общем виде и выражение (48) в развернутом виде представляют собой целевую функцию рассматриваемой задачи.

Совокупность ограничений, накладываемых на решение данной задачи, следующая.

Ограничения по количеству автопоездов

$$\sum_i x_i \leq n_{\text{л}}, \quad (49)$$

где  $n_{\text{л}}$  – суммарное количество автопоездов, используемых на вывозке древесины.

Ограничения по количеству погрузчиков

$$\sum_i \left( \frac{t_i^{\text{п}}}{T_{\text{см}}} \cdot x_i \right) \leq n_{\text{п}}. \quad (50)$$

Ограничения по числу применяемого на выгрузке оборудования

$$\sum_i \left( \frac{t_i^{\text{б}}}{T_{\text{см}}} \cdot x_i \right) \leq \sum_i n_i^{\text{б}}. \quad (51)$$

Объединив зависимости (49)–(51), получим систему линейных неравенств, другими словами, систему ограничений, накладываемых на решение задачи:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 + x_2 + x_3 \leq n_{\text{л}}, \\ \frac{t_1^{\text{п}}}{T_{\text{см}}} \cdot x_1 + \frac{t_2^{\text{п}}}{T_{\text{см}}} \cdot x_2 + \frac{t_3^{\text{п}}}{T_{\text{см}}} \cdot x_3 \leq n_{\text{п}}, \\ \frac{t_1^{\text{б}}}{T_{\text{см}}} \cdot x_1 \leq n_1^{\text{б}}, \\ \frac{t_2^{\text{б}}}{T_{\text{см}}} \cdot x_2 \leq n_2^{\text{б}}, \\ \frac{t_3^{\text{б}}}{T_{\text{см}}} \cdot x_3 \leq n_3^{\text{б}}, \\ x_1 \geq 0; x_2 \geq 0; x_3 \geq 0. \end{array} \right. \quad (52)$$

Таким образом, целевая функция в виде выражения (47) или (48) и система ограничений (52) представляют собой линейные зависимости между входящими в них переменными. Целевая функция имеет экстремум. Это дает все основания классифицировать данную задачу как задачу линейного программирования. Решается она методом симплекс-таблицы. Алгоритм построения таблицы и решения задачи подробно изложен в лабораторной работе № 6.

Исходные данные для решения данной задачи приведены в прил. 3.

### Контрольные вопросы

1. Постановка, актуальность задачи, нормальная и каноническая формы системы ограничений, целевая функция.
2. Варианты условий и особенности решения в случае использования самозагружающихся лесовозных автопоездов на погрузке и/или на выгрузке древесины.
3. Оптимальные решения и численное значение целевой функции.
4. Производственные факторы, определяющие условия эффективного использования парка лесовозных автопоездов.

# ОПТИМИЗАЦИЯ ГРУЗОПОТОКОВ ДРЕВЕСИНЫ

**Цель работы** – оптимизировать потоки лесоматериалов между лесосеками и потребителями с учетом характеристик лесосечного фонда, потребности в сырье перерабатывающих производств, имеющегося парка лесовозных автопоездов, обеспечив минимум затрат на вывозку древесины.

## **Задания к лабораторной работе**

Задание 1. Обосновать актуальность оптимизации переместительных операций в процессе заготовки древесины.

Задание 2. Сформулировать условие задачи.

Задание 3. Предложить целевую функцию для условий данной задачи.

Задание 4. Записать систему ограничений, накладываемых на решение данной задачи.

Задание 5. Определить объемы лесоматериалов, доставляемых из каждой лесосеки конкретному потребителю.

Задание 6. Вычислить общую стоимость вывозки древесины.

В экономике лесозаготовительного процесса значительную часть занимают расходы, связанные с перемещением древесины. В себестоимости лесопродукции доля транспортных операций составляет около 30%. В этой связи важное значение для эффективной организации лесопромышленного процесса играет оптимизация грузопотоков древесины.

В общем виде условие задачи по оптимизации потоков лесоматериалов от мест их заготовки до пунктов потребления следующее.

Заготовка древесины осуществляется на нескольких лесосеках  $L_1, L_2, \dots, L_m$ . На каждой лесосеке традиционно заготавливаются одинаковые лесоматериалы: пиловочник; балансы; технологическое сырье; дрова. В каждой категории лесоматериалов могут быть различия в породе, размерах, качестве, что позволяет потребителю сделать выбор именно того лесоматериала (группы лесоматериалов), который

наиболее полно соответствует требованиям его производства. С другой стороны, большой параметрический ряд выпиленных сортиментов в лесу делает более трудоемкой, а потому и более затратной, трелевку и вывозку древесины.

На вывозке древесины часто используется подвижной состав различных характеристик. По этой причине и стоимость вывозки единицы лесоматериалов будет неодинаковой.

В этой связи для простоты понимания и удобства расчетов в задаче будут рассматриваться обезличенный сортимент и одинаковый для всех маршрутов лесовозный автотранспорт.

На каждой из  $m$  лесосеках следует заготовить  $a_1, a_2, \dots, a_m$  кубометров древесины и доставить на  $n$  перерабатывающих производств  $B_1, B_2, \dots, B_n$  с объемами переработки  $b_1, b_2, \dots, b_n$  метров кубических соответственно.

Схема возможных грузопотоков древесины приведена на рис. 14.

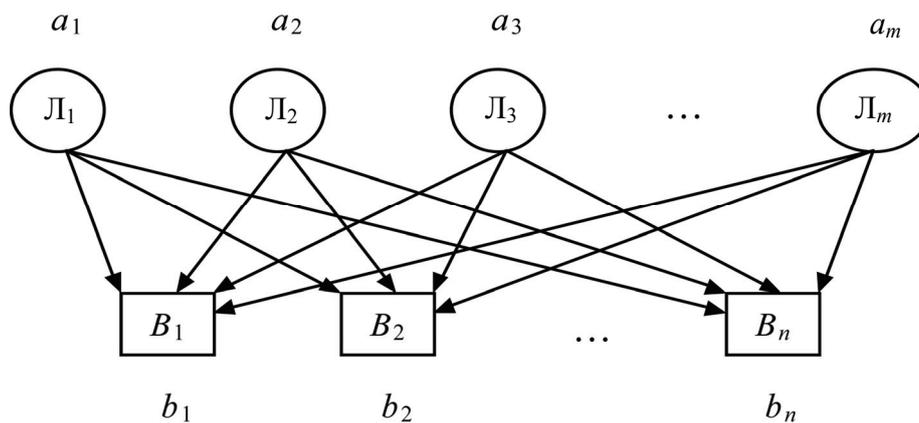


Рис. 14. Схема грузопотоков древесины

Обозначим через  $x_{ij}$  объем древесины, перевозимой с  $i$ -й лесосеки до  $j$ -го потребителя, а себестоимость перевозки  $1 \text{ м}^3$  с  $i$ -й лесосеки до  $j$ -го потребителя – через  $c_{ij}$ . Тогда суммарная стоимость перевозки древесины составит

$$z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot x_{ij} \rightarrow \min . \quad (53)$$

Суммарный объем древесины, поставляемый из  $i$ -й лесосеки, не должен превышать объем заготовок на данной лесосеке. Поэтому ограничения по вывозке древесины с лесосек представим следующим образом:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq a_i; i \in \overline{1, m}. \quad (54)$$

Ограничения по удовлетворению запросов потребителей

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \leq b_j; j \in \overline{1, n}. \quad (55)$$

Естественно, для удовлетворения запросов потребителей необходимо, чтобы суммарные объемы заготовок были не меньше суммарных потребностей, т. е.

$$\sum_{i=1}^m a_i \geq \sum_{j=1}^n b_j. \quad (56)$$

Таким образом, данная математическая модель представляет собой задачу нахождения экстремума целевой функции (53) при ограничениях (54)–(56). Так как и целевая функция, и ограничения имеют линейную зависимость, задача относится к задачам линейного программирования. Решается она методом симплекс-таблицы. Алгоритм построения таблицы и решения задачи подробно изложен в лабораторной работе № 6.

Исходные данные для решения данной задачи приведены в прил. 4.

### **Контрольные вопросы**

1. Постановка, актуальность задачи, нормальная и каноническая формы системы ограничений, целевая функция.
2. Совокупность оптимальных решений и численное значение целевой функции.
3. Производственные факторы, определяющие условия эффективного использования парка лесовозных автопоездов.
4. Статьи затрат в себестоимости вывозки древесины.

# ОПТИМИЗАЦИЯ СОРТИМЕНТНОЙ ПРОГРАММЫ НА ЗАГОТОВКЕ ДРЕВЕСИНЫ

**Цель работы** – оптимизировать сортиментный план с учетом ресурсов лесозаготовительного предприятия и текущего спроса на круглые лесоматериалы.

## **Задания к лабораторной работе**

Задание 1. Обосновать актуальность задачи по оптимизации сортиментного плана лесозаготовительного предприятия.

Задание 2. Сформулировать условие задачи.

Задание 3. Предложить целевую функцию для условий данной задачи.

Задание 4. Записать систему ограничений, накладываемых на решение данной задачи.

Задание 5. Определить вид и объемы лесоматериалов, планируемых для заготовки в конкретных производственных и экономических условиях.

Задание 6. Вычислить общую прибыль от реализации планируемых мероприятий.

Практической реализации лесозаготовительного процесса на каждой лесосеке предшествует изучение текущего спроса на круглые лесоматериалы. Это практика всех развитых стран, которые в своем развитии взяли курс на бережное и рациональное использование древесного ресурса. Глубина изучения спроса на внутреннем и зарубежных рынках, готовность четко выполнять договорные обязательства по срокам, качеству, объемам и цене на древесину гарантируют прибыльную деятельность белорусских лесозаготовительных компаний.

С появлением многооперационных лесозаготовительных машин, в которых оптимизацию раскроя ствола поваленного дерева на требуемые сортименты выполняет компьютерная программа и делается это в считанные секунды, стало возможным с учетом динамики спроса на

различные лесоматериалы оперативно вносить изменения в программу раскряжевки и обеспечивать тем самым заготовку лесоматериалов именно тех размеров и того количества, за которые потребитель готов заплатить.

Таким образом, планирование деятельности лесозаготовительной компании с учетом наличия собственных ресурсов (техника, средства на приобретение древесины на корню, покупки топлива и смазочных материалов и т. п.) и характеристик древостоев, ориентированной на удовлетворение текущего спроса на лесоматериалы, является актуальной научной и производственной задачей.

В общем виде условие рассматриваемой задачи следующее.

У лесозаготовительного предприятия имеются  $m$  видов ресурсов  $P_1, P_2, \dots, P_m$  в количествах  $b_1, b_2, \dots, b_m$  соответственно.

Используя имеющиеся ресурсы, предприятие может производить  $n$  видов сортиментов: пиловочник хвойный –  $L_1$ , пиловочник лиственный –  $L_2$ , фанерный кряж –  $L_3, \dots$ , балансы –  $L_n$ .

На производство единицы ( $1 \text{ м}^3$ ) сортимента  $L_j$  необходимо затратить  $a_{ij}$  единиц ресурса  $P_i$  ( $i \in \overline{1, m}, j \in \overline{1, n}$ ). Прибыль от реализации  $1 \text{ м}^3$   $j$ -го лесоматериала равна  $c_j$ .

Исходные данные сведены в табл. 8.

Таблица 8

**Таблица исходных данных в общем виде**

Ресурсы, $\text{м}^3$	Затраты на производство $1 \text{ м}^3$ каждого сортимента				Объемы ресурсов, $\text{м}^3$
	$L_1$	$L_2$	...	$L_n$	
$P_1$	$a_{11}$	$a_{12}$	...	$a_{1n}$	$b_1$
$P_2$	$a_{21}$	$a_{22}$	...	$a_{2n}$	$b_2$
...	...	...	...	...	...
$P_m$	$a_{m1}$	$a_{m2}$	...	$a_{mn}$	$b_m$
Прибыль от реализации $1 \text{ м}^3$ каждого сортимента	$c_1$	$c_2$	...	$c_n$	

Требуется составить такой план выпуска сортиментов, чтобы прибыль от их последующей продажи была максимальной.

Обозначим через  $x_1, x_2, \dots, x_n$  соответственно объемы заготовки лесоматериалов  $L_1, L_2, \dots, L_n$ . Для работы предприятия необходимо, чтобы объем ресурсов, вовлекаемых в производство лесоматериалов,



# ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ОБЪЕКТА ЛЕСОПОЛЬЗОВАНИЯ

**Цель работы** – оптимизировать размещение в лесном фонде лесохозяйственного учреждения магистральных трелевочных волоков и лесовозных усов с учетом объемов заготовки лесоматериалов, применяемого оборудования, структуры и конфигурации существующей лесотранспортной сети.

## **Задания к лабораторной работе**

Задание 1. Сформулировать условие задачи и ее актуальность.

Задание 2. Предложить математическое описание системного подхода в вопросах поиска оптимальных решений на трелевке и вывозке лесоматериалов.

Задание 3. Представить на карте лесосечного фонда оптимальную конфигурацию и структуру лесотранспортной сети.

Транспортные операции являются неотъемлемой составляющей любого производственного процесса. Лесозаготовка имеет свою специфику планирования и организации переместительных работ. Древостои, которые назначены в рубку лесоустроительным проектом, произрастают на площадях в 3–10 га (площадь делянки), а десятки таких делянок разбросаны по территории в несколько тысяч гектар. Чтобы доставить древесину от делянки до потребителя, который, как правило, размещается на значительном удалении, и сделать это рентабельно, необходимо иметь представление как о характере заготавливаемого лесоматериала, так и о наличии и состоянии лесотранспортной сети. Важно также знать технические возможности, производственные условия и экономику эксплуатации используемых трелевочных машин и лесовозов.

С увеличением доли сортиментной заготовки и возможности трелевки лесоматериалов в полностью погруженном положении появляется возможность размещения погрузочного пункта у существующей дороги. В этом случае погрузочный пункт называется верхним складом.

Преимущества использования в практике лесозаготовок промежуточного склада заключаются в доступности древесины для вывозки в течение всего года; обеспечивается при прочих равных условиях более высокая производительность лесовоза, так как движение происходит по дорогам с искусственным покрытием; из-за того что не нужно заезжать в лесной массив непосредственно к делянке, нет необходимости в строительстве временных подъездных путей, а, значит, затраты на лесозаготовительные работы не будут возрастать; в этой связи также уменьшается антропогенное воздействие на лесную среду.

При этом форвардер, имея нагрузку на рейс в несколько раз меньше, чем у лесовоза, и небольшие скорости движения, достаточно результативно может передвигаться по насаждению даже в условиях отсутствия естественных транспортных путей.

С другой стороны, именно эта благоприятная для фазы «вывозка» возможность трелевочного трактора является причиной снижения уже его производительности, а значит удорожания лесосечных работ и всего производственного процесса лесозаготовок в целом.

Для форвардера управляемыми факторами его работы являются скоростные режимы в грузовом и порожнем направлениях, а также расстояние от делянки до погрузочного пункта.

В этой связи при планировании лесосечных работ и последующей вывозке древесины возникает потребность в инженерном решении о том, где будет организован промежуточный склад с учетом не только конкретно разрабатываемой делянки, но и возможности использования этого места штабелевки для доставки к нему лесоматериалов из соседних лесосек, так как обустройство каждого нового промежуточного склада требует временных и трудовых затрат, что также скажется на результативности лесозаготовительного процесса.

Тот факт, что рассматриваемые смежные транспортные операции (трелевка и вывозка лесоматериалов) оказывают влияние на результативность друг друга, требует системного подхода для оптимизации переместительных работ на заготовке древесины.

По совокупности принятых решений в вопросах обеспечения транспортной доступности заготавливаемых лесоматериалов в границах лесосечного фонда лесохозяйственного предприятия или лесосырьевой базы лесозаготовительной компании формируется представление о конфигурации и структуре лесотранспортной сети.

Здесь под конфигурацией понимается маршрут движения древесины от делянки до лесного склада, а структура представляет собой

вид транспорта и характеристику дороги, которые должны обеспечить эффективное перемещение древесины.

Оптимизировать конфигурацию и структуру сети, равно как и планировать весь комплекс лесозаготовительных работ, позволяют географические информационные системы (ГИС). В практическом смысле ГИС – это интеграция компьютерного оборудования и программного обеспечения, которые вместе используются для сбора, хранения, анализа и отображения пространственно распределенной информации.

Практически задача сводится к выбору альтернативы строительству лесовозной дороги к делянке (группе делянок) или трелевке древесины на промежуточный склад.

В случае, когда в конкретных условиях затраты на трелевку превышают расходы на вывозку древесины и строительство нового участка лесотранспортной сети, принимается решение в пользу создания дороги. При этом характеристика и география новой дороги обязательно должны соответствовать цели лесного хозяйства и перспективе заготовки древесины.

Анализ условий выбора места размещения погрузочного пункта (промежуточного склада) начинается с неравенства

$$C_d \cdot l_d + \left( \frac{C_t}{\Pi_1} + C_a \cdot l_d \right) \cdot Q \leq C_v \cdot l_d + \frac{C_t}{\Pi_2} \cdot Q, \quad (59)$$

где  $C_d$  – себестоимость строительства 1 км лесовозной дороги, руб.;  $l_d$  – длина участка дороги, проложенного до лесосеки, или длина магистрального трелевочного волока;  $C_t$  – себестоимость трелевки древесины, руб./машино-смены;  $\Pi_1$  – сменная производительность трелевочной машины при трелевке древесины к погрузочному пункту внутри лесосеки, м<sup>3</sup>;  $C_a$  – себестоимость вывозки 1 м<sup>3</sup> древесины на 1 км, руб.;  $Q$  – ликвидный запас древесины на лесосеке, м<sup>3</sup>;  $C_v$  – себестоимость устройства 1 км трелевочного волока, руб.;  $\Pi_2$  – сменная производительность трелевочной машины при трелевке древесины к погрузочному пункту возле существующей дороги, м<sup>3</sup>.

Сменные производительности трелевочной машины в двух рассматриваемых вариантах  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ :

$$\Pi_1 = \frac{T \cdot \Phi_1 \cdot q}{\frac{2 \cdot l_t}{v_{cp}} + t}, \quad (60)$$

$$\Pi_1 = \frac{T \cdot \varphi_1 \cdot q}{\frac{2 \cdot l_T + 2 \cdot l_D + t}{v_{cp}}}, \quad (61)$$

где  $T$  – продолжительность смены, ч;  $\varphi_1$  – коэффициент использования рабочего времени;  $q$  – рейсовая нагрузка трелевочной машины, м<sup>3</sup>;  $l_T$  – среднее расстояние трелевки, м;  $v_{cp}$  – средняя скорость движения трелевочной машины с пакетом древесины и без него км/ч;  $t$  – суммарное время на формирование пачки и при ее выгрузке, ч.

В обоих вариантах, принятых к рассмотрению, значения  $T$ ,  $\varphi$ ,  $q$ ,  $l_T$ ,  $v_{cp}$ ,  $t$ ,  $C_a$  принимаются одинаковыми, так как предполагается использование однотипных трелевочных машин и автопоездов.

Подставив в формулу (59) значения  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  и выполнив ряд преобразований, получим:

$$C_D \cdot l_D - C_B \cdot l_D \leq \left( \frac{C_T}{\frac{2 \cdot l_T + 2 \cdot l_D + t}{v_{cp}}} - \frac{C_T}{\frac{2 \cdot l_T}{v_{cp}}} - C_a \cdot l_D \right) \cdot Q; \quad (62)$$

$$(C_D - C_B) \cdot l_D \leq \left( \frac{2 \cdot C_T \cdot l_D}{T \cdot \varphi_1 \cdot q \cdot v_{cp}} - C_a \cdot l_D \right) \cdot Q; \quad (63)$$

$$C_D - C_B \leq \left( \frac{2 \cdot C_T}{T \cdot \varphi_1 \cdot q \cdot v_{cp}} - C_a \right) \cdot Q. \quad (64)$$

Строительство участка лесовозной дороги для освоения конкретной лесосеки (группы лесосек) будет целесообразным, если объем древесины, заготавливаемой и вывозимой с данной лесосеки (группы лесосек) по устраиваемой дороге, будет больше, чем критический объем, найденный из выражения

$$Q \geq \frac{C_D - C_B}{\frac{2 \cdot C_T}{T \cdot \varphi_1 \cdot q \cdot v_{cp}} - C_a}. \quad (65)$$

Исходные сведения для решения данной задачи приведены в прил. 6.

Используя карту лесосечного фонда лесничества с обозначенными на ней делянками и исходные данные своего варианта, студенту необходимо предложить оптимальную конфигурацию

и структуру дорожной сети, связывающей места рубок с пунктами переработки древесины.

### **Контрольные вопросы**

1. Условие и актуальность задачи.
2. Алгоритм решения задачи.
3. Математические зависимости, используемые для решения задачи.
4. Факторы, оказывающие влияние на организацию и экономику трелевки и вывозки древесины.
4. Статьи затрат в себестоимости трелевки и вывозки древесины.
5. Карта лесосечного фонда с оптимальной конфигурацией и структурой лесотранспортной сети.

# ПРИЛОЖЕНИЕ 1

## Варианты индивидуальных заданий для задач 1–5

Номер варианта	Операция технологического процесса	Время обработки, мин	Время между отказами, ч	Время ремонта, ч
1	Окорка	5	30	3
	Распиловка	10	25	1,5
	Обрезка	2	32	2
	Строгание	3	20	4
2	Окорка	3	29	2,5
	Распиловка	11	19	2
	Обрезка	3	15	1,5
	Строгание	2	21	2
3	Окорка	7	28	1,7
	Распиловка	12	15	1,9
	Обрезка	3	19	2,1
	Строгание	4	22	2,2
4	Окорка	5	29	2,5
	Распиловка	10	19	2
	Обрезка	2	15	1,5
	Строгание	3	21	2
5	Окорка	3	28	3
	Распиловка	11	15	1,5
	Обрезка	3	19	2
	Строгание	2	22	4
6	Окорка	7	30	0,9
	Распиловка	12	25	1,7
	Обрезка	3	32	0,65
	Строгание	4	20	3,1
7	Окорка	6	25	4
	Распиловка	11	30	2
	Обрезка	3	29	3
	Строгание	4	18	3

Номер варианта	Операция технологического процесса	Время обработки, мин	Время между отказами, ч	Время ремонта, ч
8	Окорка	4	30	2
	Распиловка	12	20	2,5
	Обрезка	4	17	1,5
	Строгание	3	18	3
9	Окорка	6	20	1,8
	Распиловка	10	16	1,4
	Обрезка	2	17	2,3
	Строгание	4	20	2,0
10	Окорка	6	25	1,7
	Распиловка	11	14	2,3
	Обрезка	3	18	1,9
	Строгание	4	20	4
11	Окорка	3	22	3
	Распиловка	9	15	1,9
	Обрезка	3	17	2
	Строгание	3	22	1,4
12	Окорка	5	28	0,7
	Распиловка	10	25	1,6
	Обрезка	2	31	0,7
	Строгание	3	25	3,3
13	Окорка	6	30	3,5
	Распиловка	9	25	1,5
	Обрезка	2	31	2
	Строгание	2	20	4
14	Окорка	3	29	2,5
	Распиловка	11	20	3
	Обрезка	3	15	1,5
	Строгание	2	19	2,5
15	Окорка	5	30	1,7
	Распиловка	12	15	1,7
	Обрезка	3	19	2,1
	Строгание	6	20	2,4
16	Окорка	3	28	4
	Распиловка	9	15	1,5
	Обрезка	3	20	2
	Строгание	2	15	5

Окончание прил. 1

Номер варианта	Операция технологического процесса	Время обработки, мин	Время между отказами, ч	Время ремонта, ч
17	Окорка	8	28	0,9
	Распиловка	9	25	1,7
	Обрезка	5	33	0,6
	Строгание	6	20	2,7
18	Окорка	6	25	4
	Распиловка	9	30	3
	Обрезка	3	29	4
	Строгание	4	20	4,5
19	Окорка	4	25	1,5
	Распиловка	10	20	2,5
	Обрезка	3	17	2
	Строгание	5	18	3
20	Окорка	6	20	2
	Распиловка	11	16	1,4
	Обрезка	2	15	2,3
	Строгание	4	20	2,5
21	Окорка	4	20	1,5
	Распиловка	9	15	2,3
	Обрезка	3	19	2
	Строгание	5	15	3

# ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Варианты индивидуальных заданий для задач 1–6

Номер варианта	Операция технологического процесса	Количество станков	Заграты времени на производство единицы продукции, ч		
			Продукция 1	Продукция 2	Продукция 3
1	Окорка	2	0,17	0,19	0,18
	Распиловка	2	0,12	0,15	0,09
	Обрезка	1	0,2	0,21	0,08
	Строгание	2	0,19	0,26	0,32
	Прибыль от реализации единицы продукции, у. е.		300	270	275
2	Окорка	2	0,15	0,17	0,19
	Распиловка	1	0,11	0,13	0,1
	Обрезка	3	0,21	0,19	0,11
	Строгание	3	0,2	0,24	0,29
	Прибыль от реализации единицы продукции, у. е.		295	305	300
3	Окорка	2	0,19	0,14	0,17
	Распиловка	3	0,11	0,14	0,1
	Обрезка	2	0,21	0,19	0,13
	Строгание	2	0,26	0,21	0,29
	Прибыль от реализации единицы продукции, у. е.		245	250	260
4	Окорка	2	0,2	0,18	0,17
	Распиловка	3	0,14	0,14	0,1

Номер варианта	Операция технологического процесса	Количество станков	Затраты времени на производство единицы продукции, ч		
			Продукция 1	Продукция 2	Продукция 3
4	Обрезка	2	0,21	0,17	0,13
	Строгание	2	0,27	0,20	0,31
5	Прибыль от реализации единицы продукции, у. е.		285	275	295
	Окорка	2	0,14	0,19	0,15
	Распиловка	3	0,14	0,15	0,11
	Обрезка	2	0,22	0,15	0,13
	Строгание	3	0,24	0,20	0,32
	Прибыль от реализации единицы продукции, у. е.		280	290	305
6	Окорка	2	0,14	0,19	0,15
	Распиловка	3	0,14	0,15	0,12
	Обрезка	2	0,22	0,18	0,13
	Строгание	3	0,24	0,20	0,32
7	Прибыль от реализации единицы продукции, у. е.		300	295	305
	Окорка	2	0,17	0,21	0,18
	Распиловка	2	0,14	0,15	0,11
	Обрезка	3	0,21	0,15	0,13
	Строгание	1	0,24	0,21	0,31
	Прибыль от реализации единицы продукции, у. е.		245	255	275
8	Окорка	2	0,17	0,21	0,18
	Распиловка	2	0,13	0,15	0,11
	Обрезка	2	0,21	0,17	0,14
	Строгание	3	0,20	0,21	0,31
Прибыль от реализации единицы продукции, у. е.		285	295	285	

Номер варианта	Операция технологического процесса	Количество станков	Затраты времени на производство единицы продукции, ч		
			Продукция 1	Продукция 2	Продукция 3
9	Окорка	1	0,17	0,21	0,18
	Распиловка	2	0,14	0,18	0,12
	Обрезка	2	0,20	0,15	0,13
	Строгание	3	0,24	0,20	0,33
	Прибыль от реализации единицы продукции, у. е.		245	255	300
10	Окорка	2	0,18	0,20	0,19
	Распиловка	3	0,12	0,15	0,09
	Обрезка	2	0,22	0,19	0,13
	Строгание	2	0,18	0,26	0,32
	Прибыль от реализации единицы продукции, у. е.		285	295	305
11	Окорка	2	0,20	0,21	0,17
	Распиловка	3	0,12	0,15	0,08
	Обрезка	2	0,21	0,18	0,13
	Строгание	3	0,18	0,25	0,32
	Прибыль от реализации единицы продукции, у. е.		350	325	300
12	Окорка	2	0,20	0,21	0,17
	Распиловка	1	0,12	0,16	0,08
	Обрезка	2	0,20	0,18	0,13
	Строгание	3	0,17	0,26	0,31
	Прибыль от реализации единицы продукции, у. е.		265	245	295

Номер варианта	Операция технологического процесса	Количество станков	Затраты времени на производство единицы продукции, ч		
			Продукция 1	Продукция 2	Продукция 3
13	Окорка	1	0,21	0,19	0,16
	Распиловка	3	0,12	0,16	0,08
	Обрезка	2	0,20	0,18	0,13
	Строгание	3	0,17	0,26	0,31
	Прибыль от реализации единицы продукции, у. е.		310	275	290
14	Окорка	2	0,20	0,21	0,17
	Распиловка	3	0,12	0,16	0,10
	Обрезка	3	0,20	0,16	0,13
	Строгание	1	0,19	0,26	0,31
	Прибыль от реализации единицы продукции, у. е.		300	350	360
15	Окорка	2	0,22	0,21	0,17
	Распиловка	2	0,12	0,16	0,08
	Обрезка	2	0,20	0,16	0,13
	Строгание	3	0,14	0,27	0,33
	Прибыль от реализации единицы продукции, у. е.		285	275	295
16	Окорка	1	0,20	0,21	0,17
	Распиловка	2	0,12	0,16	0,10
	Обрезка	2	0,19	0,18	0,13
	Строгание	1	0,17	0,22	0,31
	Прибыль от реализации единицы продукции, у. е.		345	300	290

Номер варианта	Операция технологического процесса	Количество станков	Затраты времени на производство единицы продукции, ч		
			Продукция 1	Продукция 2	Продукция 3
17	Окорка	2	0,20	0,21	0,17
	Распиловка	1	0,12	0,16	0,08
	Обрезка	2	0,20	0,18	0,13
	Строгание	3	0,17	0,26	0,31
	Прибыль от реализации единицы продукции, у. е.		245	280	340
18	Окорка	2	0,21	0,20	0,17
	Распиловка	2	0,12	0,19	0,08
	Обрезка	3	0,20	0,18	0,13
	Строгание	3	0,19	0,24	0,30
	Прибыль от реализации единицы продукции, у. е.		260	380	410
19	Окорка	2	0,21	0,20	0,17
	Распиловка	2	0,14	0,18	0,10
	Обрезка	1	0,20	0,18	0,15
	Строгание	3	0,17	0,23	0,29
	Прибыль от реализации единицы продукции, у. е.		250	370	390
20	Окорка	1	0,21	0,21	0,19
	Распиловка	2	0,14	0,19	0,08
	Обрезка	2	0,20	0,18	0,16
	Строгание	2	0,17	0,22	0,32
	Прибыль от реализации единицы продукции, у. е.		280	375	395
21	Окорка	2	0,18	0,21	0,19
	Распиловка	2	0,11	0,17	0,09
	Обрезка	2	0,22	0,17	0,14
	Строгание	1	0,18	0,21	0,31
	Прибыль от реализации единицы продукции, у. е.		290	250	350

# ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Варианты (1–11) индивидуальных заданий для задачи 7

Показатель	Варианты значений										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Продолжительность смены на вывозке древесины $T_{см}^B$ , ч	8	9	10	9	10	8	8	9	10	9	7
Коэффициент сменности $k_{см}$	1	2	1,5	2	1	1	1,5	1	2	2	1,5
Погрузчики $n^B$ , шт.	3	4	2	5	3	5	4	3	2	4	3
Продолжительность загрузки единицы подвижного состава $i$ -м видом сортамента $t^B_i$ , ч:											
– первым видом сортамента $t^B_1$	0,30	0,40	0,28	0,35	0,37	0,42	0,40	0,31	0,28	0,32	0,41
– вторым видом сортамента $t^B_2$	0,32	0,41	0,30	0,25	0,29	0,40	0,42	0,28	0,31	0,40	0,30
– третьим видом сортамента $t^B_3$	0,3	0,33	0,25	0,35	0,37	0,42	0,41	0,35	0,29	0,34	0,36
– четвертым видом сортамента $t^B_4$	0,33	0,30	0,27	0,31	0,40	0,32	0,28	0,41	0,31	0,42	0,38
Время движения автопоезда от лесосеки до потребителя и обратно, ч:											
– первый потребитель $T_1$	3,2	3,3	3,0	3,2	3,3	3,0	3,2	3,3	3,0	3,2	3,2
– второй потребитель $T_2$	2,1	2,7	3,5	2,1	2,7	3,5	2,1	2,7	3,5	2,1	2,1
– третий потребитель $T_3$	4,0	4,2	4,5	4,0	4,2	4,5	4,0	4,2	4,5	4,0	4,0
– четвертый потребитель $T_4$	4,6	4,0	4,3	4,6	4,0	4,3	4,6	4,0	4,3	4,6	4,6
Количество механизмов, используемых на выгрузке древесины на $i$ -м предприятии $n^B_i$ , шт.:											
– у первого потребителя $n^B_1$	2	1	3	1	2	2	1	3	1	2	1
– у второго потребителя $n^B_2$	3	3	2	1	2	3	3	2	1	2	2
– у третьего потребителя $n^B_3$	2	2	3	2	1	2	2	3	2	1	3
– у четвертого потребителя $n^B_4$	2	1	1	3	2	2	1	1	3	2	2

Показатель	Варианты значений										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Время выгрузки $i$ -го вида сортимента с одного лесовоза $t^B_i$ , ч:											
– у первого потребителя $t^B_1$	0,35	0,40	0,30	0,35	0,40	0,40	0,35	0,41	0,30	0,28	0,35
– у второго потребителя $t^B_2$	0,32	0,45	0,37	0,20	0,30	0,30	0,32	0,30	0,45	0,45	0,20
– у третьего потребителя $t^B_3$	0,40	0,33	0,25	0,35	0,35	0,45	0,40	0,36	0,48	0,30	0,35
– у четвертого потребителя $t^B_4$	0,33	0,32	0,27	0,41	0,45	0,35	0,30	0,38	0,42	0,40	0,41

### Варианты (12–21) индивидуальных заданий для задачи 7

Показатель	Варианты значений										
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
Продолжительность смены на вывозке древесины $T_{см}$ , ч	10	9	8	10	8	10	10	8	8	10	
Коэффициент сменности $k_{см}$	1,5	2	1,5	2	2	1,5	1	2	1	1,5	
Погрузчики $n_{п}$ , шт.	3	4	2	5	3	5	4	3	2	4	
Продолжительность загрузки единицы подвижного состава $i$ -м видом сортимента $t^П_i$ , ч:											
– первым видом сортимента $t^П_1$	0,35	0,40	0,30	0,35	0,40	0,40	0,35	0,41	0,30	0,28	
– вторым видом сортимента $t^П_2$	0,32	0,45	0,37	0,20	0,30	0,30	0,32	0,30	0,45	0,45	
– третьим видом сортимента $t^П_3$	0,40	0,33	0,25	0,35	0,35	0,45	0,40	0,36	0,48	0,30	
Время движения автопоезда от лесосеки до потребителя и обратно, ч:											
– первый потребитель $T_1$	3,0	3,2	3,2	3,3	3,2	3,0	3,2	3,3	3,0	3,3	
– второй потребитель $T_2$	3,5	2,1	2,1	2,7	2,1	3,5	2,1	2,7	3,5	2,7	
– третий потребитель $T_3$	4,5	4,0	4,0	4,2	4,0	4,5	4,0	4,2	4,5	4,2	

Показатель	Варианты значений										
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
Количество механизмов, используемых на выгрузке древесины на $i$ -м предприятии $n^B_i$ , шт.:											
– у первого потребителя $n^B_1$	1	2	3	2	3	2	1	3	1	2	
– у второго потребителя $n^B_2$	3	3	2	3	2	3	3	2	3	3	
– у третьего потребителя $n^B_3$	1	2	3	1	1	1	2	1	2	1	
Время выгрузки $i$ -го вида сортимента с одного лесовоза $t^B_i$ , ч:											
– у первого потребителя $t^B_1$	0,30	0,40	0,28	0,35	0,37	0,42	0,40	0,31	0,28	0,32	
– у второго потребителя $t^B_2$	0,32	0,41	0,30	0,25	0,29	0,40	0,42	0,28	0,31	0,40	
– у третьего потребителя $t^B_3$	0,30	0,33	0,25	0,35	0,37	0,42	0,41	0,35	0,29	0,34	

# ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Варианты (1–11) индивидуальных заданий для задачи 8

Показатель	Варианты значений										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Объемы заготовок на лесосеках, тыс. м <sup>3</sup> :											
– на первой лесосеке	0,8	5,2	4,3	2,9	4,5	3,1	6,3	5,6	0,95	0,87	1,4
– на второй лесосеке	3,4	1,5	2,6	1,9	0,85	4,6	8,4	6,4	2,3	1,4	0,95
– на третьей лесосеке	2,2	3,1	3,6	4,6	4,2	5,1	3,7	0,87	0,55	3,3	1,4
– на четвертой лесосеке	5,4	–	2,4	3,4	1,6	–	0,7	2,6	–	7,1	0,82
Объемы переработки древесины, тыс. м <sup>3</sup> :											
– у первого переработчика	4,3	2,5	4,1	6,3	7,6	2,7	5,5	7,4	4,1	5,8	6,9
– у второго переработчика	3,2	1,6	2,8	3,2	5,4	2,5	3,1	1,2	5,2	4,2	2,9
– у третьего переработчика	5,1	2,7	1,7	1,5	2,3	1,9	2,6	3,4	6,3	3,1	6,4
– у четвертого переработчика	6,4	3,1	–	4,9	1,6	4,1	–	4,6	4,7	–	1,8
Себестоимость перевозки одного метра кубического древесины на 1 км, у. е.:											
– от первой лесосеки до первого переработчика	1,2	0,85	0,8	1,1	1,45	0,8	1,1	0,95	1,3	0,8	1,4
– от первой лесосеки до второго переработчика	1,35	1,23	0,9	0,9	1,23	1,1	1,35	0,85	1,25	1,3	1,25
– от первой лесосеки до третьего переработчика	0,84	1,21	1,1	0,75	1,32	0,75	0,75	0,75	1,4	0,9	1,4
– от первой лесосеки до четвертого переработчика	0,75	0,74	–	1,3	1,5	1,23	–	1,0	1,35	–	1,2
– от второй лесосеки до первого переработчика	1,45	1,3	1,1	1,4	0,8	0,85	0,95	0,8	1,1	0,8	1,2
– от второй лесосеки до второго переработчика	1,23	1,25	0,9	1,25	0,9	1,23	0,85	1,3	1,35	1,1	1,35
– от второй лесосеки до третьего переработчика	1,32	1,4	0,75	1,4	1,1	1,21	0,75	0,9	0,75	0,75	0,84
– от второй лесосеки до четвертого переработчика	1,5	1,35	–	1,2	0,85	0,74	–	1,1	1,45	–	0,75

Показатель	Варианты значений										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
– от третьей лесосеки до первого переработчика	1,4	0,9	1,1	0,8	1,1	1,25	1,23	1,2	1,1	1,23	0,8
– от третьей лесосеки до второго переработчика	1,25	1,23	1,35	0,9	0,9	1,4	0,8	1,35	0,9	1,32	1,3
– от третьей лесосеки до третьего переработчика	1,4	1,21	0,75	1,1	0,75	1,35	0,9	0,84	0,75	1,31	0,9
– от третьей лесосеки до четвертого переработчика	1,2	0,85	–	0,85	1,3	1,1	–	0,75	1,3	–	1,1
– от четвертой лесосеки до первого переработчика	1,25	–	1,3	0,75	1,23	–	1,5	0,74	–	0,8	1,45
– от четвертой лесосеки до второго переработчика	1,4	–	1,4	1,0	1,21	–	1,4	1,3	–	1,3	1,1
– от четвертой лесосеки до третьего переработчика	1,35	–	1,25	0,8	0,74	–	1,25	1,25	–	0,9	0,9
– от четвертой лесосеки до четвертого переработчика	0,9	–	–	1,3	1,25	–	–	1,4	–	–	1,1
Расстояние между лесосеками и переработчиками древесин, км:											
– от первой лесосеки до первого переработчика	125	215	110	64	75	122	205	75	104	206	116
– от первой лесосеки до второго переработчика	82	150	98	102	80	148	146	84	140	48	96
– от первой лесосеки до третьего переработчика	75	175	76	134	92	200	84	96	52	138	85
– от первой лесосеки до четвертого переработчика	104	206	–	146	104	87	–	103	111	–	76
– от второй лесосеки до первого переработчика	116	206	104	205	122	75	200	64	110	150	125
– от второй лесосеки до второго переработчика	96	48	140	146	148	80	145	102	98	175	82
– от второй лесосеки до третьего переработчика	85	138	52	84	200	92	110	134	76	206	75
– от второй лесосеки до четвертого переработчика	76	113	–	109	87	104	–	111	88	–	104
– от третьей лесосеки до первого переработчика	113	215	125	213	145	64	148	96	96	84	111
– от третьей лесосеки до второго переработчика	103	122	82	205	102	113	200	125	85	80	84
– от третьей лесосеки до третьего переработчика	64	148	75	146	134	103	87	82	76	117	109
– от третьей лесосеки до четвертого переработчика	102	89	–	84	146	94	–	75	105	–	213
– от четвертой лесосеки до первого переработчика	52	–	76	80	205	–	95	104	–	125	245
– от четвертой лесосеки до второго переработчика	111	–	125	116	103	–	142	146	–	82	85
– от четвертой лесосеки до третьего переработчика	110	–	82	96	64	–	75	84	–	75	76
– от четвертой лесосеки до четвертого переработчика	98	–	–	85	102	–	–	109	–	–	113

**Варианты (1–11) индивидуальных заданий для задачи 8**

Показатель	Варианты значений									
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
<b>Объемы заготовок на лесосеках, тыс. м<sup>3</sup>:</b>										
– на первой лесосеке	1,4	0,87	0,95	5,6	6,3	3,1	2,9	4,3	5,2	0,8
– на второй лесосеке	0,95	1,4	2,3	6,4	8,4	4,6	1,9	2,6	1,5	3,4
– на третьей лесосеке	1,4	3,3	0,55	0,87	3,7	5,1	4,6	3,6	3,1	2,2
– на четвертой лесосеке	0,82	7,1	2,2	2,6	0,7	0,9	3,4	2,4	1,1	5,4
<b>Объемы переработки древесины, тыс. м<sup>3</sup>:</b>										
– у первого переработчика	2,7	5,8	4,1	6,9	6,3	4,3	2,5	7,6	7,4	4,1
– у второго переработчика	2,5	4,2	5,2	2,9	3,2	3,2	1,6	5,4	1,2	2,8
– у третьего переработчика	1,9	3,1	6,3	6,4	1,5	5,1	2,7	2,3	3,4	1,7
– у четвертого переработчика	4,1	4,2	4,7	1,8	4,9	6,4	3,1	1,6	4,6	3,1
<b>Себестоимость перевозки одного метра кубического древесины на 1 км, у. е.:</b>										
– от первой лесосеки до первого переработчика	0,85	1,1	1,3	0,97	0,8	1,4	1,4	1,35	0,75	0,8
– от первой лесосеки до второго переработчика	1,1	0,9	1,25	1,35	1,3	1,25	1,25	0,9	1,0	1,3
– от первой лесосеки до третьего переработчика	0,9	0,75	1,4	0,75	0,9	1,0	1,4	1,45	1,4	0,9
– от первой лесосеки до четвертого переработчика	0,75	1,35	1,35	1,45	0,75	0,8	1,21	1,23	1,2	1,1
– от второй лесосеки до первого переработчика	1,35	0,84	1,1	1,1	1,35	0,87	0,74	1,13	0,9	0,8
– от второй лесосеки до второго переработчика	0,75	1,25	1,35	0,9	0,9	1,21	1,3	1,1	1,1	0,9
– от второй лесосеки до третьего переработчика	1,23	1,4	0,75	1,1	0,75	0,85	1,54	1,35	0,85	0,77
– от второй лесосеки до четвертого переработчика	0,85	1,2	1,45	1,2	1,3	1,15	1,2	1,45	1,21	1,1
– от третьей лесосеки до первого переработчика	1,23	0,8	1,1	1,1	0,85	1,1	1,35	1,35	0,85	1,35
– от третьей лесосеки до второго переработчика	1,21	0,9	1,25	1,35	1,2	1,35	0,84	0,75	0,8	0,75
– от третьей лесосеки до третьего переработчика	0,85	1,45	1,1	1,4	0,9	0,75	0,9	1,13	1,35	1,25
– от третьей лесосеки до четвертого переработчика	0,74	1,35	0,8	1,2	0,75	1,45	1,1	1,35	0,9	1,4
– от четвертой лесосеки до первого переработчика	1,3	0,75	1,35	1,3	1,1	1,23	1,2	0,75	0,84	1,2
– от четвертой лесосеки до второго переработчика	0,75	1,13	0,9	1,23	1,2	1,13	0,75	1,12	1,25	0,8

Показатель	Варианты значений										
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
– от четвертой лесосеки до третьего переработчика	1,4	1,0	0,75	1,13	1,35	0,75	1,45	0,85	1,4	1,54	
– от четвертой лесосеки до четвертого переработчика	1,2	0,8	1,3	1,4	0,75	1,21	0,75	1,23	1,2	1,2	
Расстояние между лесосеками и переработчиками древесин, км:											
– от первой лесосеки до первого переработчика	116	104	75	122	110	205	75	64	215	125	
– от первой лесосеки до второго переработчика	48	140	80	148	98	146	84	102	150	82	
– от первой лесосеки до третьего переработчика	138	52	92	200	76	84	96	134	175	75	
– от первой лесосеки до четвертого переработчика	76	111	104	87	96	55	103	146	206	104	
– от второй лесосеки до первого переработчика	150	110	122	75	104	200	64	205	206	116	
– от второй лесосеки до второго переработчика	175	98	148	80	140	145	102	146	48	96	
– от второй лесосеки до третьего переработчика	75	76	200	92	52	110	134	84	138	85	
– от второй лесосеки до четвертого переработчика	104	88	87	104	202	78	111	109	113	76	
– от третьей лесосеки до первого переработчика	84	96	145	64	125	148	96	213	215	113	
– от третьей лесосеки до второго переработчика	84	85	102	113	82	200	125	205	122	103	
– от третьей лесосеки до третьего переработчика	117	76	134	103	75	87	82	146	148	64	
– от третьей лесосеки до четвертого переработчика	213	105	146	94	81	68	75	84	89	102	
– от четвертой лесосеки до первого переработчика	125	81	205	96	76	95	104	80	134	52	
– от четвертой лесосеки до второго переработчика	85	76	103	85	125	142	146	116	111	111	
– от четвертой лесосеки до третьего переработчика	75	125	64	76	82	75	84	96	96	110	
– от четвертой лесосеки до четвертого переработчика	113	81	102	113	113	89	109	85	125	98	

# ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Варианты (1–11) индивидуальных заданий для задачи 9

Показатель	Варианты значений										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Стоимость древесины на корню, у. е./м <sup>3</sup>											
– первый сортимент	5	4,6	7,0	4,1	2,9	6,0	6,4	2,9	4,4	7,0	5,5
– второй сортимент	5,5	5,4	4,0	3,8	4,3	5,1	4,3	4,3	5,4	4,2	5,7
– третий сортимент	4,2	6,3	4,4	5,2	5,1	5,3	4,0	5,0	6,1	4,4	4,2
– четвертый сортимент	3,7	5,1	6,1	6,4	4,1	4,8	6,0	4,7	5,4	6,1	3,7
Стоимость заготовки, у. е./м <sup>3</sup>											
– первый сортимент	11,1	10,2	10,8	11,0	10,6	10,2	11,4	11,2	12,2	11,0	10,2
– второй сортимент	10,8	12,1	12,2	10,0	11,3	12,0	12,1	10,2	11,1	10,8	12,2
– третий сортимент	11,3	11,4	11,1	11,3	10,8	11,3	10,6	12,4	11,3	11,4	11,4
– четвертый сортимент	12,0	11,5	11,4	12,1	12,0	11,4	11,3	11,1	12,0	12,1	11,6
Стоимость вывозки, у. е./м <sup>3</sup> на 1 км											
– первый сортимент	1,25	1,23	1,35	0,9	0,9	1,4	0,8	1,35	0,9	1,32	1,3
– второй сортимент	1,23	1,4	0,75	1,1	0,75	0,85	1,54	1,35	0,85	0,77	1,3
– третий сортимент	1,45	1,3	1,1	1,4	0,8	0,85	0,95	0,8	1,1	0,8	0,9
– четвертый сортимент	0,85	1,45	1,1	1,4	0,9	0,75	0,9	1,13	1,35	1,25	1,1
Расстояние вывозки лесоматериалов, км											
– первого сортимента	116	206	104	205	122	75	200	64	110	150	125
– второго сортимента	96	48	140	146	148	80	145	102	98	175	82
– третьего сортимента	85	138	52	84	200	92	110	134	76	206	75
– четвертого сортимента	103	122	82	205	102	113	200	125	85	80	84

Показатель	Варианты значений										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<b>Объем древесины для производства 1 м<sup>3</sup> каждого сортамента, м<sup>3</sup></b>											
– первый сортимент	1,3	1,42	1,4	1,25	1,8	1,7	1,25	1,4	1,4	1,35	1,8
– второй сортимент	1,25	1,6	1,5	1,35	1,75	1,8	1,35	1,3	1,65	1,2	1,7
– третий сортимент	1,2	1,8	1,45	1,4	1,85	1,5	1,3	1,45	1,85	1,25	1,6
– четвертый сортимент	1,4	1,55	1,6	1,45	1,25	1,4	1,4	1,35	1,55	1,3	1,5
<b>Прибыль от реализации 1 м<sup>3</sup> каждого сортамента, у. е.</b>											
– первый сортимент	4,0	2,5	4,1	6,3	7,6	2,7	5,5	7,4	4,1	5,8	6,9
– второй сортимент	3,2	1,6	2,8	3,2	5,4	2,5	3,1	1,2	5,2	4,2	2,9
– третий сортимент	5,1	2,7	1,7	1,5	2,3	1,9	2,6	3,4	6,3	3,1	6,4
– четвертый сортимент	6,4	3,1	3,1	4,9	1,6	4,1	4,2	4,6	4,7	2,8	1,8
<b>Ресурсы предприятия:</b>											
– приобретение древесины на корню, тыс. у. е.	70	80	85	75	95	100	80	85	75	105	95
– организация заготовки, тыс. у. е.	100	150	120	90	80	95	125	110	105	150	115
– организация вывозки, тыс. у. е.	35	40	46	50	30	42	51	60	55	45	40
– лесосечный фонд, тыс. м <sup>3</sup>	12	17	21	35	40	18	15	22	32	41	30

### Варианты (12–21) индивидуальных заданий для задачи 9

Показатель	Варианты значений										
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
<b>Стоимость древесины на корню, у. е./м<sup>3</sup></b>											
– первый сортимент	5,5	6,0	4,4	4,1	2,9	4,6	7,0	6,4	2,9	7,0	
– второй сортимент	5,7	5,1	5,4	3,8	4,3	5,4	4,0	4,3	4,3	4,2	
– третий сортимент	4,2	5,3	6,1	5,2	5,0	6,3	4,4	4,0	5,1	4,4	
– четвертый сортимент	3,7	4,8	5,4	6,4	4,7	5,1	6,1	6,0	4,1	6,1	

Показатель	Варианты значений									
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Стоимость заготовки, у. е./м <sup>3</sup>										
– первый сортимент	10,2	11,0	11,4	12,2	10,2	11,2	10,8	10,6	11,0	10,2
– второй сортимент	12,2	10,8	12,1	11,1	12,0	10,2	12,2	11,3	10,0	12,1
– третий сортимент	11,4	11,4	10,6	11,3	11,3	12,4	11,1	10,8	11,3	11,4
– четвертый сортимент	11,6	12,1	11,3	12,0	11,4	11,1	11,4	12,0	12,1	11,5
Стоимость вывозки, у. е./м <sup>3</sup> на 1 км										
– первый сортимент	0,9	1,35	1,32	1,25	0,9	1,3	1,35	1,23	0,9	0,8
– второй сортимент	1,1	1,35	0,77	1,23	0,85	1,3	0,75	1,4	0,75	1,54
– третий сортимент	1,4	0,8	0,8	1,45	1,1	0,9	1,1	1,3	0,8	0,95
– четвертый сортимент	1,4	1,13	1,25	0,85	1,35	1,1	1,1	1,45	0,9	0,9
Расстояние вывозки лесоматериалов, км										
– первого сортимента	64	75	125	110	150	206	122	116	205	200
– второго сортимента	102	80	82	98	175	48	148	96	146	145
– третьего сортимента	134	92	75	76	206	138	200	85	84	110
– четвертого сортимента	125	113	84	85	80	122	102	103	205	200
Объем древесины для производства 1 м <sup>3</sup> каждого сортимента, м <sup>3</sup>										
– первый сортимент	1,4	1,8	1,35	1,25	1,3	1,4	1,42	1,7	1,8	1,25
– второй сортимент	1,3	1,75	1,2	1,35	1,25	1,65	1,6	1,8	1,7	1,35
– третий сортимент	1,45	1,85	1,25	1,3	1,2	1,85	1,8	1,5	1,6	1,4
– четвертый сортимент	1,35	1,25	1,3	1,4	1,4	1,55	1,55	1,4	1,5	1,45
Прибыль от реализации 1 м <sup>3</sup> каждого сортимента, у. е.										
– первый сортимент	5,5	6,9	7,6	4,1	7,4	5,8	4,0	2,7	4,1	6,3
– второй сортимент	3,1	2,9	5,4	5,2	1,2	4,2	3,2	2,5	2,8	3,2
– третий сортимент	2,6	6,4	2,3	6,3	3,4	3,1	5,1	1,9	1,7	1,5
– четвертый сортимент	4,2	1,8	1,6	4,7	4,6	2,8	6,4	4,1	3,1	4,9

Показатель	Варианты значений										
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
Ресурсы предприятия:											
– приобретение древесины на корню, тыс. у. е.	85	70	80	105	85	95	75	95	100	80	
– организация заготовки, тыс. у. е.	110	100	125	150	120	115	105	80	95	150	
– организация вывозки, тыс. у. е.	60	35	51	45	46	40	55	30	42	40	
– лесосечный фонд, тыс. м <sup>3</sup>	22	12	15	41	21	30	32	40	18	17	

# ПРИЛОЖЕНИЕ 6

**Варианты (1–11) индивидуальных заданий для задачи 10**

Показатель	Варианты значений										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Стоимость строительства 1 км лесной дороги, тыс. у. е.	115	110	112	114	116	115	114	113	112	110	114
Стоимость вывозки 1 м <sup>3</sup> лесоматериалов на 1 км, у. е.	1,2	1,3	1,1	1,2	1,1	1,0	1,4	1,3	1,1	1,4	1,2
Стоимость трелевки древесины, у. е./машино-смены	315	320	290	300	285	250	330	340	305	300	280
Стоимость устройства 1 км магистрального трелевочного волока, у. е.	1500	1520	1600	1550	1570	1560	1610	1600	1500	1510	1490
Ликвидный запас древесины на 1 га, м <sup>3</sup>	300	280	310	250	325	400	290	315	220	290	310

**Варианты (12–21) индивидуальных заданий для задачи 10**

Показатель	Варианты значений										
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
Стоимость строительства 1 км лесной дороги, тыс. у. е.	114	115	112	105	110	115	115	110	112	116	
Стоимость вывозки 1 м <sup>3</sup> лесоматериалов на 1 км, у. е.	1,2	1,0	1,1	1,3	1,2	1,3	1,3	1,1	1,2	1,1	
Стоимость трелевки древесины, у. е./машино-смены	280	240	315	305	315	310	290	285	290	285	
Стоимость устройства 1 км магистрального трелевочного волока, у. е.	1610	1600	1500	1510	1500	1520	1600	1550	1570	1560	
Ликвидный запас древесины на 1 га, м <sup>3</sup>	310	400	220	290	310	290	300	310	250	325	

# ЛИТЕРАТУРА

1. Игнатенко, В. В. Моделирование и оптимизация процессов лесозаготовок: учеб. пособие для студентов специальности «Лесоинженерное дело» / В. В. Игнатенко, И. В. Турлай, А. С. Федоренчик. – Минск: БГТУ, 2004. – 180 с.

2. Игнатенко, В. В. Высшая математика. Математические методы и модели в расчетах на ЭВМ: лабораторный практикум / В. В. Игнатенко, О. Н. Пыжкова, Л. Д. Яроцкая. – Минск: БГТУ, 2006. – 126 с.

3. Андерсон, Т. Р. Введение в многофакторный статистический анализ / Т. Р. Андерсон. – М.: Физматгиз, 1963. – 375 с.

4. Митропольский, А. К. Техника статистических вычислений / А. К. Митропольский. – М.: Наука, 1971. – 403 с.

5. Смирнов, Н. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений / Н. В. Смирнов, И. В. Дунин-Барковский. – М.: Наука, 1965. – 395 с.

6. Турлай, И. В. Методические указания по дисциплине «Основы научных исследований» специальностей 17.04., 26.01 / И. В. Турлай, А. С. Федоренчик, В. В. Игнатенко. – Минск: БТИ им. С. М. Кирова, 1988. – 74 с.

7. Алябьев, В. И. Оптимизация производственных процессов на лесозаготовках / В. И. Алябьев. – М.: Лесная промышленность, 1977. – 198 с.

8. Барановский, В. А. Системы машин для лесозаготовок / В. А. Барановский, Р. М. Некрасов. – М.: Лесная промышленность, 1977. – 205 с.

9. Редькин, А. К. Основы моделирования и оптимизации лесозаготовок / А. К. Редькин. – М.: Лесная промышленность, 1988. – 256 с.

10. Вентцель, Е. С. Исследование операций / Е. С. Вентцель. – М.: Советское радио, 1972. – 552 с.

11. Вентцель, Е. С. Исследование операций. Задачи, принципы, методология / Е. С. Вентцель. – М.: Наука, 1980. – 208 с.

12. Волк, А. М. Математические методы и модели в расчетах на ЭВМ: учеб.-метод. пособие по дисциплине «Высшая математика» / А. М. Волк, В. В. Игнатенко, А. В. Яценко. – Минск: БГТУ, 2003. – 85 с.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	3
Лабораторная работа № 1. Одномашинные лесопромышленные системы с учетом надежности .....	5
Лабораторная работа № 2. Одномашинные лесопромышленные системы без запаса .....	9
Лабораторная работа № 3. Многомашинные лесопромышленные системы без запаса .....	13
Лабораторная работа № 4. Одномашинные лесопромышленные системы с запасом .....	17
Лабораторная работа № 5. Многомашинные лесопромышленные системы с запасом .....	22
Лабораторная работа № 6. Оптимизация выхода продукции и загрузки оборудования в цехах переработки древесины .....	26
Лабораторная работа № 7. Оптимизация парка автопоездов на вывозке древесины .....	34
Лабораторная работа № 8. Оптимизация грузопотоков древесины .....	39
Лабораторная работа № 9. Оптимизация сортиментной программы на заготовке древесины .....	42
Лабораторная работа № 10. Оптимизация транспортно-технологических элементов объекта лесопользования .....	45
Приложение 1 .....	50
Приложение 2 .....	53
Приложение 3 .....	58
Приложение 4 .....	61
Приложение 5 .....	65
Приложение 6 .....	69
Литература .....	70

Учебное издание

**Хотянович** Александр Иванович  
**Турлай** Иван Васильевич

# **МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ЛЕСОЗАГОТОВОК И ТРАНСПОРТА ЛЕСА**

Лабораторный практикум

Редактор *Ю. А. Юрчик*  
Компьютерная верстка *Ю. А. Юрчик*  
Корректор *Ю. А. Юрчик*

Издатель:

УО «Белорусский государственный технологический университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/227 от 20.03.2014.  
Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.