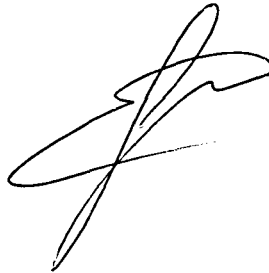


На правах рукописи



РЫЖИКОВА Елена Геннадьевна

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПЛАНИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ
ПРОЦЕССОВ С ПЕРЕМЕННЫМ СОСТАВОМ ОБОРУДОВАНИЯ НА
ОСНОВЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА**

Специальность: 05.13.18 – Математическое моделирование, численные
методы и комплексы программ

9 ОКТ 2014

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



005553274

Брянск – 2014

Работа выполнена на кафедре «Информационные технологии» ФГБОУ
ВПО «Брянская государственная инженерно-технологическая академия»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВПО «Брянская
государственная инженерно-
технологическая академия»
Евельсон Лев Игоревич

Официальные оппоненты: **Шведенко Владимир Николаевич**
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВПО «Костромской
государственный технологический
университет»

Подвесовский Александр Георгиевич
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВПО «Брянский
государственный технический
университет»

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Воронежский
государственный университет
инженерных технологий»

Защита состоится «11» ноября 2014 года в 14 час. 00 мин. на заседании
диссертационного совета Д 212.021.03 при ФГБОУ ВПО «Брянский
государственный технический университет» по адресу: 241035, г. Брянск, ул.
Харьковская, д.10-Б, учебный корпус №4, ауд. Б101.


С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО
«БГТУ» и на сайте <http://www.tu-bryansk.ru/>

Отзывы на автореферат высылать по адресу: 241035, г. Брянск, бул.
50 лет Октября, д.7.

Автореферат разослан « 8 » октября 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,

кандидат технических наук, доцент



В.А. Шкабарин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Для производственных процессов с переменным составом оборудования проведение натуральных экспериментов часто становится нерациональным или невозможным ввиду сложности организации, больших затрат, ограниченности ресурсов, поэтому происходит их замена вычислительными, в которых исследованию подлежат математические модели процессов. К настоящему времени разработано большое количество методов математического моделирования, планирования эксперимента, обработки результатов, оптимизации. Их многообразие связано с тем, что для решения производственных задач разных классов требуется учет различных нюансов, и поэтому необходимо выработать методы, которые обладали бы достаточкой универсальностью. Решение практических задач с помощью аппарата моделирования, планирования эксперимента может быть осложнено нарушением условий применимости методов, сложностью их реализации.

Таким образом, актуальность темы диссертационной работы обусловлена необходимостью совершенствования методов планирования и обработки результатов компьютерных экспериментов, их адаптации к специфике производственных процессов, повышения эффективности реализации методик и надежности результатов с помощью специальных комплексов программ.

Цель работы. Целью данной диссертационной работы является совершенствование методики вычислительного эксперимента, математического моделирования и численных методов оптимизации, а также разработка комплекса программ для их практического применения к планированию производственных процессов с переменным составом оборудования.

Решаемые задачи:

1. Проанализировать основные положения теории планирования эксперимента, методов оптимизации, статистические критерии для исследования регрессионных моделей и их применение для компьютерного моделирования производственных процессов с переменным составом оборудования.

2. Провести исследование особенностей организации и оценки результатов вычислительного эксперимента при обнаружении недопустимых опытов и точек плана.

3. Разработка методики компьютерного эксперимента для поиска оптимальных параметров производственных процессов с переменным составом оборудования.

4. Совершенствование численного метода для нахождения экстремума в задачах условной оптимизации при наличии большого числа недопустимых точек, выявляемых в ходе проведения эксперимента.

5. Разработка комплекса программ для реализации усовершенствованных методики вычислительного эксперимента и метода поиска оптимальных параметров производственных процессов с переменным составом оборудования.

6. Апробация разработанных методики компьютерного эксперимента, метода оптимизации и комплекса программ на примере конкретного производственного процесса.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются математические модели производственных процессов, отличительной особенностью которых является возможность использования комплектов оборудования переменного состава. Предмет – методы математического моделирования, численные методы исследования поверхности функции отклика, статистические критерии анализа регрессионных моделей, методики компьютерных экспериментов.

Методы исследования. При выполнении работы использовались методы анализа, наблюдения, сравнения, эксперимента, моделирования, основные положения математической теории планирования эксперимента, метод регрессионного анализа, методы оптимизации.

Научная новизна. В работе получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

1. Усовершенствован численный метод исследования многомерной поверхности функции отклика, получаемой в результате вычислительного эксперимента. Отличительной особенностью метода является его применимость к решению задач условной оптимизации, где значения целевой функции определяются в результате компьютерного моделирования, и характерно наличие большого числа точек факторного пространства, в которых целевая функция не определена, что выявляется в ходе вычислительного эксперимента.

2. Разработана методика проведения компьютерного эксперимента для выбора оптимальных параметров производственных процессов, которая позволяет учитывать существенные отличия закона распределения отклика от нормального закона, наличие недопустимых точек плана и точек с большим числом условно-недопустимых параллельных опытов, в том числе, в которых остается всего один опыт.

3. Создан комплекс программ, реализующий взаимодействие модулей, предназначенных для проведения вычислительных экспериментов в рамках научных исследований и модулей, позволяющих выполнить поиск оптимальных параметров производственных процессов с переменным составом оборудования.

4. Получены математические модели производственного процесса, отличительной особенностью которого является учет переменности состава используемого парка машин за счёт подключения дополнительного оборудования, что обеспечивает равенство производительности групп машин в комплексе.

Практическая значимость работы.

1. Экономия ресурсов за счет организации оптимальных производственных процессов по результатам решения задач условной оптимизации представленным методом.

2. Использование комплекса программ для проведения компьютерных экспериментов и оптимального планирования производственных процессов с переменным составом оборудования с получением экономического эффекта.

3. Применение полученных детерминированных и статистических моделей для планирования и исследования производственных процессов с переменным составом оборудования.

Достоверность исследований определяется использованием фундаментальных методов математического моделирования, теории планирования эксперимента, методов статистического анализа, оптимизации, результатами внедрения разработанных методики и программного обеспечения в практику.

Реализация и внедрение результатов. Основные результаты работы использовались как экспериментальная разработка на предприятиях ГУП «Дятьковский лесхоз», ООО «Клетнянский лес», ООО ЛПК «Навля», ООО «БрянскСтройПроект». Внедрены в учебный процесс БГИТА на кафедрах «Информационные технологии», «Оборудование лесного комплекса» при написании курсовых и дипломных проектов студентами по дисциплинам «Методы оптимизации», «Математические методы и модели принятия хозяйственных решений», «Моделирование и организация производственных процессов лесопромышленного комплекса».

Апробация работы. Основные научные и практические результаты работы докладывались на научных конференциях: студентов и аспирантов «Достижения молодых учёных Брянской области» (БГТУ, Брянск, 2009г., отмечена дипломом), молодых исследователей и специалистов «Приоритетные направления современной науки: фундаментальные проблемы, инновационные проекты» (БГУ, Брянск, 2010г.); вторая региональная научно-практическая конференция молодых исследователей и специалистов «Приоритетные направления современной науки: фундаментальные проблемы, инновационные проекты» (БГУ, Брянск, 2011г.); на XXVII международной научно-практической конференции «Технические науки — от теории к практике» (Новосибирск, 2013 г.); на международной научно-технической конференции «Эколого-ресурсосберегающие технологии и системы в лесном и сельском хозяйстве» (Воронеж, 2014). Результаты работы представлялись на конкурсах. Смотр-конкурс разработок в области информационных технологий БГИТА 2011 (2 место), 2014 гт. Конкурс БГИТА на лучшую научную работу аспирантов, докторантов и молодых ученых по естественным, техническим и гуманитарным наукам, проект 2009, 2011-2013 гт. Конкурсы на лучшую научную работу молодых учёных и аспирантов Брянской области «Современные научные достижения. Брянск -2009» (2 место), 2011г. (диплом), 2012-2013 (2 место). Конкурсе «Участник Молодежного Научно – Инновационного Конкурса (УМНИК)», 2010-2011г. (1 место в номинации «Информационные технологии»).

Личный вклад соискателя. Разработка методики компьютерного эксперимента для оптимального планирования производственных процессов с переменным составом оборудования, которая позволяет учитывать существенные отличия закона распределения отклика от нормального закона, наличие недопустимых точек плана, точек с большим числом условно-недопустимых параллельных опытов, в том числе, в которых остается один опыт. Предложены способы организации условно-параллельных опытов при

планировании компьютерных экспериментов. Модификация численного метода условной оптимизации, пригодного в ситуациях обнаружения недопустимых опытов и точек плана эксперимента. Построение алгоритмов для компьютерного моделирования производственных процессов с переменным составом оборудования. Разработка комплекса программ, сочетающего функции проведения вычислительных экспериментов в рамках научных исследований с функциями поиска оптимальных параметров производственных процессов с переменным составом оборудования. Проведение вычислительных экспериментов и получение оптимальных параметров производственных процессов с переменным составом оборудования на примере лесозаготовок.

Публикации. Основные результаты исследований отражены в 20 научных работах, из них – 4 публикации в центральных рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ, в 1 учебном пособии с грифом УМО, в 3 свидетельствах о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, приложений. Общий объём диссертации 170 страниц машинописного текста, содержит 15 таблиц, 34 рисунка, список литературы включает 143 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы цель работы, обоснована её актуальность, изложены задачи работы, объект, предмет, методология и методы исследования, научная новизна, практическая значимость, положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены исследования и основные подходы к планированию эксперимента, расчету коэффициентов полиномиальной регрессионной модели, её оптимизации, выполнен обзор программ для планирования вычислительных экспериментов, статистической обработки данных, имитационного моделирования, проанализированы производственные процессы, выполняемые комплектами оборудования переменного состава.

Фундаментальным основам математической теории планирования эксперимента, построению регрессионных моделей, статистическому анализу посвящены работы Ю.П. Адлера, В.И. Барабашука, Ю.В. Грановского, Н. Дрейпера, Дж. Клейнена, Г.И. Красовского, В.И. Крутова, Е.А. Марковой, Д.К. Монтгомери, В.В. Налимова, А.И. Орлова, Г.С. Розенберга, Г. Смита, и др. Развитием теории вычислительных экспериментов занимались А.А. Самарский, Б.Я. Советов, С.А. Яковлев, и др. На основе выполненного обзора методов оптимизации функции отклика, обоснована необходимость исследования возможности их применения и целесообразность модификаций для решения специфичных производственных задач.

Приведен анализ программного обеспечения для вычислительных экспериментов, статистической обработки данных SPSS, STATISTICA, STADIA, STATA, ОЛИМП, ЭВРИСТА и др, имитационного моделирования GPSS, Arena, AutoMod, Promodel, Vissim, AweSim и др. Определена потребность в разработке программ для моделирования исследуемых производственных процессов и их интеграции с программами для планирования и обработки результатов экспериментов в единые комплексы.

Дана характеристика производственным процессам с переменным составом оборудования, имеющим место в горном деле, сахарной промышленности, мелиорационных работах, земляных работах в строительстве и др. Выявлено, что их исследование с помощью натурных экспериментов затруднительно. Одним из видов производственных процессов с переменным составом оборудования являются лесозаготовки, занимающие в экономике России значительное место, на их примере происходит апробация основных результатов данной работы. Выполнен обзор исследований в области математического моделирования, оптимизации комплектов машин и организации лесозаготовительных процессов.

В результате проведенного анализа, можно сделать вывод, что актуальным является совершенствование методов планирования эксперимента, моделирования, оптимизации, направленных на исследование производственных процессов с переменным составом оборудования, например лесозаготовительного и др. Также актуальна разработка программных комплексов, сочетающих выполнение производственных задач и научных исследований.

Вторая глава посвящена совершенствованию методики вычислительного эксперимента и метода оптимизации планирования производственных процессов с переменным составом оборудования. Рассмотрены вопросы повышения эффективности производственных процессов, выполняемых комплектами машин, с созданием запасов между операциями, путём определения оптимальных режимов их организации. Отличительной особенностью исследуемых процессов является учет переменности состава используемого парка машин за счёт подключения дополнительного оборудования, что приближает к равенству производительности машин в комплексе.

Для решения этих задач предлагается методика компьютерного эксперимента по поиску оптимальных параметров производственных процессов, основанная на положениях математической теории планирования эксперимента, регрессионном анализе. Методика включает в себя пункты:

1. Формируется математическая модель исследуемого производственного процесса, позволяющая определять целевую функцию.
2. Определяются основные факторы и область факторного пространства.
3. Составляется матрица планирования эксперимента для построения квадратичной регрессионной модели.
4. Выполняются условно-параллельные опыты. При проведении компьютерного эксперимента, очевидно, что повторный расчёт выходного параметра при том же наборе входных не приведёт к его изменению. Нами предлагается организовывать условно-параллельные опыты. В них варьируются входные параметры модели, значения которых находятся в определенном диапазоне, и исследователь не может оказать влияние на их изменение, но имеет возможность зафиксировать принимаемые ими значения в различных условиях. Искусственно изменяя значения параметров данного класса, исследователь получит различные значения отклика в данной точке плана, которые можно принять как результаты параллельных опытов. Таким образом,

моделируется вариабельность параметров, имеющая место в реальности. Альтернативным способом организации условно-параллельных опытов является генерация соответствующих значений с помощью датчиков случайных чисел. Такой подход позволяет реализовать принцип рандомизации. Компьютерный эксперимент предлагается проводить с учётом вероятностей p_{ij} наступления условий j -го условно-параллельного опыта в i -той точке плана. Если вероятности или другие статистические характеристики аргументов не заданы, хотя сами аргументы, как правило, являются случайными величинами, то рекомендуется задаваться (на основании априорной информации) законом распределения вероятностей. При отсутствии подходящей информации считать вероятности одинаковыми в случае дискретной случайной величины или принимать равномерный закон в случае непрерывной.

5. В каждой точке матрицы плана определяется математическое ожидание целевой функции, рассчитанное по условно-параллельным опытам.

6. Построение регрессионной модели в виде полинома второго порядка с помощью взвешенного метода наименьших квадратов и проведение ее статистического анализа по следующей схеме:

6.1. Проверка соответствия значений функции отклика в условно-параллельных опытах нормальному закону распределения с помощью критерия согласия Пирсона (χ^2) при объёмах выборки более 50, иначе можно применить критерий Шапиро-Уилка.

6.2. Проверка однородности дисперсий. При неравномерном дублировании опытов для оценки дисперсии однородности применяется критерий Бартлетта. Неравномерное дублирование в точках плана обусловлено возникновением условно-недопустимых опытов, в которых значение отклика не может быть определено ввиду нарушения ограничений, накладываемых на аргументы целевой функции.

6.3. Выполнение оценки значимости коэффициентов регрессионной модели с помощью критерия Стьюдента. Исследованы подходы к оценке дисперсии воспроизводимости при неравномерном дублировании опытов, включающих значительное число точек с одним опытом. Предлагается в случае неравномерного дублирования опытов в точках плана и наличии точек с одним опытом, при оценке дисперсии воспроизводимости использовать её значение в центре плана или (при отсутствии параллельных опытов в центре плана) принимать среднее значение по всем допустимым точкам плана эксперимента, прошедшим проверку однородности дисперсии.

6.4. Оценивание адекватности регрессионной модели. При выполнении нормального закона распределения отклика рекомендуется использование критерия Фишера, в противном случае – непараметрического критерия Сиджела-Тьюки.

На значения параметров модели производственных процессов накладываются естественные ограничения, вытекающие из сути конкретной задачи, т.е. изначально рассматривается задача условной оптимизации. При нарушении ограничений модели в некоторых точках плана значение отклика не будет определено, несмотря на то, что точка принадлежит области планирования. Предлагается модификация метода поиска экстремума

квадратичной функции, эффективная в случае обнаружения недопустимых точек плана в ходе вычислительного эксперимента. Используется следующий алгоритм.

Шаг 1. Представление регрессионной модели в виде:

$$f = b_0 + \{x\}^T \{b\} + \{x\}^T [B] \{x\}, \quad (1)$$

где $\{x\}^T = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$, x_i - факторы, $i = \overline{1, k}$,

Матрица $[B]$ составлена из элементов вектора $\{b\}$.

$$[B] = \begin{cases} b_{ij}, & \text{если } i = j, \\ \frac{1}{2} b_{ij}, & \text{если } i \neq j, \end{cases} \quad i, j = \overline{1, k}, \quad b_{ij} = b_{ji}. \quad (2)$$

Шаг 2. Вычисление координат стационарной точки $\{x_0\}$:

$$\{x_0\} = -0,5[B]^{-1}\{b\}, \quad (3)$$

Шаг 3. Расчёт значения целевой функции в стационарной точке:

$$f_0 = b_0 + 0,5\{x_0\}^T \{b\}. \quad (4)$$

Шаг 4. Целевую функцию приводим к каноническому виду с началом координат в точке $\{x_0\}$ и осями, совпадающими с главными осями поверхности f .

$$f = f_0 + \sum_{i=1}^k \lambda_i \varphi_i^2, \quad (5)$$

где λ_i – собственные значения матрицы $[B]$.

Базисные векторы в новой системе координат, в которой целевая функция имеет канонический вид, получаем по формуле:

$$\{\varphi\} = [U]^T (\{x\} - \{x_0\}), \quad (6)$$

где $[U]$ – ортогональная матрица, столбцы которой представляют нормированные собственные векторы матрицы $[B]$, соответствующие λ_i .

Шаг 5. Анализ возможных ситуаций:

5.1 Точка $\{x_0\}$ принадлежит области планирования эксперимента. Если все $\lambda_i > 0$, то она является точкой минимума. Если все $\lambda_i < 0$, то точка $\{x_0\}$ является точкой максимума. Если знаки λ_i различны, то получена седловая точка. Если, например, решается задача минимизации, то в первом случае найденная точка является ее решением, а во втором и третьем – решения нет.

5.2 Стационарная точка оказалась за пределами области планирования. Рекомендуется расширить область планирования, если это не нарушит условий эксперимента, или выполнить процедуры для перехода к новой начальной точке, принадлежащей области планирования. Считая полученную точку центром нового плана эксперимента, следует построить новую регрессионную модель и повторить шаги метода.

Направление движения к новому центру плана определяем в зависимости от вида стационарной точки из эвристических соображений. Для смещения к области планирования эксперимента предлагается построить вектор, соединяющий стационарную точку с первоначальным центром плана:

$$\vec{c} = \{x_c\} - \{x_0\}, \quad (7)$$

где $\{x_c\}$ - центр первоначального плана эксперимента.

Также строим вектор

$$\vec{v} = \frac{\alpha \vec{c} \pm \beta \vec{l}}{2}, \quad (8)$$

где \vec{l} – вектор, координаты которого пропорциональны значениям λ_i , $i = \overline{1, k}$ в базисе, составленном из собственных векторов $[B]$. Здесь учитываем, что λ_i характеризует крутизну поверхности отклика в направлении i -го базисного вектора в базисе собственных векторов матрицы $[B]$.

Делаем шаг вдоль вектора \vec{v} , рассчитываемого по (8) при $\alpha = \beta = 1$, полученную точку рассматриваем как центр нового плана (смещенный относительно первоначального) и повторяем вычислительный эксперимент, получая новую квадратичную регрессионную модель целевой функции. Если полученная точка вновь оказалась за пределами области планирования и не удовлетворяет ограничениям, то шаг корректируется, причем принимается $\beta < 1$.

Если стационарная точка является седловой, то в области исследования функция отклика экстремума не достигает. В качестве оптимальной точки нами предлагается выбрать допустимую точку, входящую в первоначальный план эксперимента, в которой целевая функция достигает наилучшего значения.

В третьей главе описаны результаты проектирования и разработки комплекса программ «КОПТРЕГ». Основными модулями «КОПТРЕГ» являются «ВычЭксп» и «Оквар». Фрагмент интерфейса модуля «Оквар» представлен на рисунке 1.

Коэффициенты функции отклика

№		
1	x1	22569,35
2	x2	-1413,28
3	x3	0
4	x4	1445,03
5	x5	-414,54
6	x1*x1	0
7	x2*x2	-253,4
8	x3*x3	427,95
9	x4*x4	624,24
10	x1*x2	326,6
11	x1*x3	686,87
12	x1*x4	-760,48
13	x2*x3	0
14	x2*x4	0
15	x3*x4	548,3
16	x1*x2*x3	0
17	x1*x2*x4	0
18	x1*x3*x4	0
19	x2*x3*x4	0
20	x1*x2*x3*x4	0

Количество не активных коэффициентов: 0
 Номер активных коэффициентов: 3 6 13 14 16 1

Убрать неактивные коэффициенты

Составить матрицу

W: 22569,35
 Матрица b: 1413,28 0 1445,03 -414,54
 Матрица B: 0 163,3 443,44 -380,24
 163,3 -253,4 0 0
 443,44 0 -427,95 548,3
 -380,24 0 548,3 -624,24

Стационарная точка в безразмерных величинах: 14,822 9,5518 -6,3137 -44,77

В натуральных величинах В безразмерных величинах

Значение отклика в стационарной точке: 18284,98

Перейти к отклику функции отклика

Рисунок 1 – Фрагмент интерфейса модуля «Оквар»

В модуле «ВычЭксп» реализована разработанная методика планирования вычислительного эксперимента. В «Оквар» реализован численно-аналитический метод решения задач однокритериальной условной оптимизации, для которых значения целевой функции найдены в результате компьютерного моделирования, причем характерно наличие большого числа

точек факторного пространства, в которых целевая функция не определена, но это обстоятельство выявляется только в ходе вычислительного эксперимента. Блок-схема алгоритма усовершенствованных методики и метода представлена на рисунке 2.

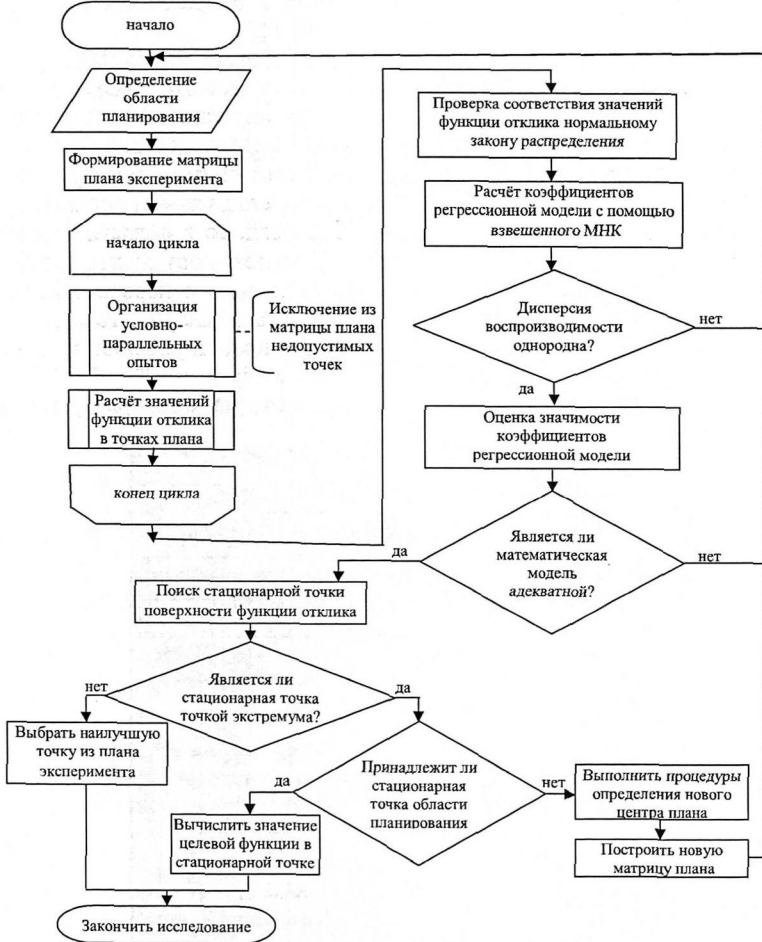


Рисунок 2 – Укрупненная блок-схема методики вычислительного эксперимента и метода оптимизации

Актуальна разработка специальных программных модулей, которые позволяют для выбранной предметной области получить целевую функцию по результатам компьютерного эксперимента. Разработан модуль «МППлес» – программный модуль, автоматизирующий расчёт параметров производственного процесса лесозаготовок. Блок-схема расчетного алгоритма «МППлес» представлена на рисунке 3.

При реализации представленной методики компьютерного эксперимента активно используются значения параметров управляющих факторов и других параметров математических моделей, что обуславливает необходимость разработки модуля информационного обеспечения для исследуемой предметной области. База данных «ЛЗтех» содержит систематизированные данные о параметрах лесозаготовительных машин, позволяет подбирать комплект дополнительных машин при заданном комплекте основных, экспортирует данные в «МПШлес». Для реализации БД выбрана СУБД MySQL и система объектно-ориентированного программирования Delphi.

В результате создан комплекс программ «КоптРЕГ», состоящий из модулей: «ВычЭксп», «Оквар», «МПШлес», БД «ЛЗтех». Структура комплекса представлена на рисунке 5.

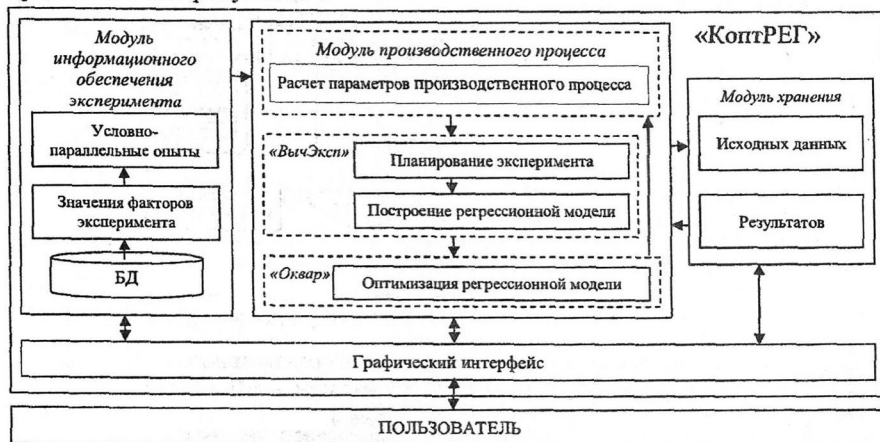


Рисунок 5 - Структура комплекса «КоптРЕГ»

Он имеет простой, интуитивно понятный интерфейс пользователя, отвечает требованиям открытости и масштабируемости. Одной из отличительных особенностей комплекса программ является сочетание функций по исследованию и оптимизации функции отклика с практическим планированием производственных процессов с переменным составом оборудования. Потенциальными потребителями комплекса «КоптРЕГ» являются исследователи производственных процессов (пользователи-исследователи), промышленные предприятия (пользователи - практики). Пользователями-исследователями могут быть использованы все модули программного комплекса для построения и оптимизации математических моделей производственных процессов, проведения компьютерного эксперимента в исследуемых областях, совершенствования методов оптимизации. Пользователи-практики могут использовать комплекс программ для решения практических задач по планированию конкретных производственных процессов, выполняемых комплектами машин. Механизмы для выполнения научных исследований для них являются прозрачными и не оказывают влияние на ход планирования.

В четвертой главе описан процесс апробации методики вычислительного эксперимента. За основу взят производственный процесс лесозаготовок, отличительной особенностью которого является обеспечение равенства выработки машин в комплекте за счёт подключения дополнительного оборудования. Выполнено математическое моделирование рассматриваемого процесса. В таблице 1 представлены полученные зависимости для расчёта параметров производственного процесса, планируемого на один месяц.

Таблица 1 - Математические модели производственного процесса

Время создания запаса, смен	Время пополнения и потребления запаса, смен	Время работы дополнит. машин, смен	Время выработки запаса, смен	Объем гарантийного запаса, м ³
$Q_i > Q_s$ или $Q_i = Q_{\max}$				
$t_1 = \frac{Z_r}{Q_{\max}^D}$	$t_2 = \frac{Z_r - Z_c}{Q_{\max} - Q_c}$	$t_3 = \frac{Z_r - Z_c}{Q_c^D - Q_{\max}}$	$t_4 = \frac{Z_c}{Q_s}$	$Z_r = \frac{Z_c \cdot Q_{DS} \cdot Q_s \cdot Q_{\max} + (T_{II} \cdot Q_c \cdot Q_{\max} - Z_c \cdot (Q_{\max} + Q_i)) \cdot (Q_{\max} - Q_s) \cdot (Q^D - Q_{\max})}{Q_{DS} \cdot Q_s \cdot Q_{\max}}$
$Q_i < Q_s$ или $Q_i = Q_{\max}$				
$t_1 = \frac{Z_r}{Q_i}$	$t_2 = \frac{Z_r - Z_c}{Q_{\max} - Q_c}$	$t_3 = \frac{Z_r - Z_c}{Q_c^D - Q_{\max}}$	$t_4 = \frac{Z_r}{Q_{\max}}$	$Z_r = \frac{Q_i \cdot Q_{\max} \cdot (T_{II} \cdot (Q_{\max} - Q_i) \cdot (Q^D - Q_{\max}) + Z_c \cdot Q_{DS})}{(Q_{\max} - Q_i) \cdot (Q_c^D - Q_{\max}) \cdot (Q_{\max} + Q_i) + Q_i \cdot Q_{\max} \cdot Q_{DS}}$

Условные обозначения для таблицы 1: T_{II} - продолжительность выполнения производственного процесса, дни; Z_c - объем страхового запаса, м³; Z_r - объем гарантийного запаса, м³; i - номер предыдущей операции; s - номер следующей операции; Q_i - объем выработки основных машин на i -й операции, м³; Q_s - объем выработки основных машин на s -й операции, м³; Q_i^D - уровень, до которого увеличивается объем выработки (Q_i) на i -й операции после подключения дополнительной машины с объемом выработки Q_{Di} , м³; Q_{\max} (Q_{\min}) - максимальный (минимальный) объем выработки машин на одной из операций, м³; Q_s^D - уровень, до которого увеличивается объем выработки (Q_s) на s -й операции после подключения дополнительной машины с объемом выработки Q_{Ds} , м³.

Энергозатраты машин на i -той операции производственного процесса составляют:

$$E_{ci} = W_i \cdot T_{ii}^{(i)} \quad (9)$$

где $T_{ii}^{(i)}$ - время работы машины на i -той операции, дни;
 W_i - мощность двигателя машины на i -ой операции, кВт.

$$T_{ii}^{(i)} = \begin{cases} t_1^{(i)} [1] + \sum_{j=1}^M (t_{2[j]}^{(i-s)} + t_{3[j]}^{(i-s)}), & \text{если } i = 1, \\ t_1^{(i)} [1] + \sum_{j=1}^M (t_{2[j]}^{(i-s)} + t_{3[j]}^{(i-s)}) + t_4^{(i)} [M], & \text{если } i = \overline{2, N-1}, \\ \sum_{j=1}^M (t_{2[j]}^{(i-s)} + t_{3[j]}^{(i-s)}) + t_4^{(i)} [M], & \text{если } i = N. \end{cases} \quad (10)$$

где $t_1^{(i)} [1]$ - время создания запаса машинами i -той операции в течение первого месяца, смен;
 $t_{2[j]}^{(i-s)}$ - время одновременного пополнения запаса машинами i -той операции и его потребления машинами s -той операции в j -том месяце, смен; $t_{3[j]}^{(i-s)}$ - время одновременного пополнения запаса машинами i -той операции и его потребления машинами s -той операции с подключением дополнительных машин в j -том месяце, смен; $t_4^{(i)} [M]$ - время выработки запаса машинами s -той операции для последнего расчётного месяца, смен; j -номер месяца; N

– число производственных операций; M – продолжительность выполнения процесса, месяцы; i, s – номера производственных операций, $s = i + 1$.

В результате получены математические модели производственного процесса, проводимого с изменением сменности и (или) подключением дополнительного оборудования, по которым определяется целевая функция. На основании полученных моделей выполнена постановка задачи оптимизации лесозаготовительного процесса по критерию минимума энергозатрат. При этом контролировались значения и других технико-экономических характеристик процесса (себестоимость работ, удельные трудозатраты, затраты на топливо).

С помощью вычислительного эксперимента выполнено построение и оптимизация регрессионной модели, выражающей энергозатраты. В качестве факторов были приняты продолжительности работы лесозаготовительных машин на операциях, функция отклика выражает суммарные энергозатраты лесозаготовительного процесса. Проведены четырехфакторные эксперименты с варьированием факторов на трёх уровнях (план 3^4). В первом случае, выполнено 60 условно-параллельных опытов в 81 точке плана, всего – 4860 опытов. Условно-параллельные опыты основаны на учете изменчивости производительности лесозаготовительных машин в зависимости от природно-производственных условий. Было проведено три вычислительных эксперимента по представленной методике с разными способами организации условно-параллельных опытов.

Первый эксперимент характеризуется равными вероятностями условно-параллельных опытов в точке плана, значения производительности машин для их организации были взяты из БД «ЛЗтех». В результате построена регрессионная модель вида:

$$f(x_1, x_2, x_3, x_4) = -1413x_1 + 1445x_2 - 414,571x_4 - 253,208x_2^2 - 427,792x_3^2 - 624,119x_4^2 + 326,52x_1x_2 + 886,757x_1x_3 - 760,27x_1x_4 + 548,297x_3x_4 + 22570 \quad (11)$$

При проведении второго эксперимента учитывались различия вероятностей условно-параллельных опытов в точках плана. Получена регрессионная модель вида:

$$f(x_1, x_2, x_3, x_4) = -1413x_1 + 218,235x_2 + 1500x_3 - 567,475x_4 - 214,186x_2^2 - 562,565x_3^2 - 191,789x_4^2 + 348,082x_1x_2 + 952,214x_1x_3 - 934,283x_1x_4 + 417,658x_3x_4 + 21950 \quad (12)$$

В третьем эксперименте значения производительности машин для организации условно-параллельных опытов были сгенерированы с помощью датчика случайных чисел. Построена регрессионная модель следующего вида:

$$f(x_1, x_2, x_3, x_4) = -890,66x_1 + 1012,52x_2 - 864,29x_1^2 - 130,04x_1x_4 - 96,98x_2x_3 + 19596,29 \quad (13)$$

На аргументы моделей (11)–(13) накладываются ограничения:

$$\begin{cases} P_m[i, j] \cdot X_i \cdot N_m[i, j] + P_d[i, j] \cdot N_d[i, j] > P_{\max[i]} \cdot X_i \cdot N_{\max[i]}, \\ P_m[i, j] \cdot X_i \cdot N_m[i, j] < P_{\max[i]} \cdot X_i \cdot N_{\max[i]}, \\ X_i > 0, \end{cases} \quad (14)$$

где $i = 1, 2, \dots, M, j = 1, 2, \dots, 4, i \neq j$; i – номер расчётного месяца; j – номер производственной операции; m, j – номер производственной операции, выполняемой машиной с максимальной производительностью; $P_m[i, j]$ – производительность основных машин, $л^3/смена$; $N_m[i, j]$ – количество основных машин; $P_d[i, j]$ – производительность дополнительных машин,

$m^3/\text{смена}$; $N_d[i_j]$ – количество дополнительных машин; $P_{\max}[i]$ – максимальная производительность машин в комплекте, $m^3/\text{смена}$; $N_{\max}[i]$ – количество машин с максимальной производительностью в комплекте; X_i – число смен работы машин на i -той операции.

Модели (11)-(13) представлены без учета незначимых коэффициентов. При построении модели (12) вероятности были распределены с учётом параметров исследуемой лесосеки и статистических данных об их изменении под влиянием различных факторов.

Выполнен статистический анализ моделей. Близость закона распределения отклика в точках матрицы плана к нормальному проверена с помощью критерия Шапиро-Уилка. Обнаружены точки плана, в которых распределение отклика подчиняется нормальному закону, а также точки, для которых нормальный закон не имеет места. Однородность дисперсии воспроизводимости подтверждена с помощью критерия Бартлета. Значимость коэффициентов регрессионных моделей была оценена по критерию Стьюдента.

Адекватность оценена с помощью критерия Фишера. Его использование при нарушении закона нормального распределения отклика в ряде точек матрицы плана эксперимента может привести к ошибочным результатам. Поэтому адекватность моделей была также подтверждена с помощью непараметрического критерия Сиджела-Тьюки, который нечувствителен к закону распределения случайных величин. Модели (11) и (12) являются адекватными по критериям Фишера и Сиджела-Тьюки, модель (13) адекватна только по критерию Сиджела-Тьюки.

При проверке адекватности регрессионной модели необходимо учесть, что наблюдается большое число точек плана с одним опытом, в которых дисперсия воспроизводимости не может быть определена. В соответствии с методикой вычислительного эксперимента, предложенной во второй главе, было принято решение при оценке дисперсии воспроизводимости в указанных точках использовать её значение в центре плана.

Выполнена оптимизация моделей (11)-(13) по разработанному методу. Экономия энергозатрат лесозаготовительных процессов составила 8,6% по сравнению с их организацией без учёта результатов вычислительного эксперимента и оптимизации. Экономия затрат топлива составляет 30% по сравнению с разработкой конкретной лесосеки без использования дополнительного оборудования и без расчета оптимального числа смен работы машин.

Экономическая эффективность проведенного исследования рассчитана по следующим методикам: расчет затрат на топливо в зависимости от продолжительности работы лесозаготовительных машин на операциях с помощью «МППлес», расчет и сравнение ряда технико-экономических показателей, рассчитываемых с помощью специально разработанного программного обеспечения «ТЭП».

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. Разработана методика вычислительного эксперимента для определения оптимальных параметров производственных процессов с переменным составом оборудования, отличительной особенностью которой является учёт отклонений

от традиционных допущений регрессионного анализа: допускаются существенные отличия закона распределения отклика от нормального закона, наличие точек плана с большим числом условно-недопустимых параллельных опытов, включая точки, в которых остается всего один опыт. В процессе вычислительного эксперимента обнаруживаются опыты, в которых значение отклика не может быть определено ввиду нарушения ограничений, накладываемых на аргументы целевой функции, им дано название условно-недопустимых. В связи с их наличием возникают ситуации неравномерного дублирования опытов и могут присутствовать точки с одним опытом.

2. Были исследованы три подхода к организации вычислительного эксперимента с определенным целевой функции в результате математического моделирования. Первый подход основан на проведении эксперимента с организацией условно-параллельных опытов путём варьирования значениями параметров модели при проведении компьютерных экспериментов, что соответствует изменению условий протекания процесса, которые могли происходить в реальности. Во втором подходе рекомендуется учитывать возможные различия вероятностей p_{ij} j -го условно-параллельного опыта в i -той точке плана. Вероятности могут быть заданы на основании априорной информации об исследуемом процессе. В третьем подходе значения для организации условно-параллельных опытов сгенерированы с помощью датчика случайных чисел. Такой подход позволяет реализовать принцип рандомизации. Вопрос о выборе одного из способов требует проработки для конкретных задач. Результаты, полученные при проведении вычислительных экспериментов для лесозаготовительных процессов, незначительно отличаются друг от друга, рекомендуется использовать подход с равными вероятностями условно-параллельных опытов.

3. Исследованы подходы к статистическому анализу регрессионных моделей в ситуациях отклонения распределения значений отклика от нормального закона, неравномерного дублирования опытов и значительном числе точек с одним опытом. Рекомендуется в случае наличия точек с одним опытом, при оценке дисперсии воспроизводимости использовать её значение в центре плана или (когда центр плана является недопустимой точкой) принимать среднее значение по всем допустимым точкам плана эксперимента, для которых доказана однородность дисперсии. Рекомендуется использование следующих критериев: Шапиро-Уилка для проверки закона нормального распределения отклика, Бартлета для оценки однородности дисперсии, Стьюдента – для оценки значимости коэффициентов регрессионной модели, Фишера – для оценки адекватности модели при выполнении закона нормального распределения отклика, Сиджела-Тьюки – для оценки адекватности при нарушении закона нормального распределения.

4. Усовершенствован численный метод оптимизации, рекомендуемый для решения задач условной оптимизации при обнаружении условно-недопустимых опытов и точек плана вычислительного эксперимента.

5. Разработан комплекс программ «КоптРЕГ», оригинальность которого проявляется во взаимодействии модулей, предназначенных для проведения вычислительных экспериментов в рамках научных исследований и модулей,

позволяющих выполнить поиск оптимальных параметров производственных процессов с переменным составом оборудования. Для комплекса характерны открытость и масштабируемость, обеспечивающие возможность его расширения за счёт подключения программных модулей, разработанных для различных предметных областей.

6. Показано, что организация производственных процессов с подключением дополнительных машин позволяет существенно повысить их эффективность. Применение представленных методов вычислительного эксперимента, математического моделирования и оптимизации, а также комплекса программ «КоптРЕГ» позволяют сократить затраты на топливо на 171864,1 р. (30,5%) по сравнению с разработкой конкретной лесосеки без использования дополнительного оборудования и без расчета оптимального числа смен работы машин.

7. Результаты расчёта экономической эффективности, полученные в результате компьютерного эксперимента, показали, что организация лесозаготовительных работ с наилучшим сочетанием числа смен работы машин на операциях приводит к сокращению энергозатрат (8,6%), себестоимости лесосечных работ до 13,7 %, удельного расхода энергии до 20,8%, удельных трудозатрат до 36,9%. Экономия расходов на топливо составляет 81737р. за 2 месяца, а значит до 489222р. в год. Модули комплекса программ использовались как экспериментальная разработка на предприятии ГУП «Дятьковский лесхоз», ООО «Клетнянский лес», ООО ЛПК «Навля», ООО «БрянскСтройПроект». Прогнозируемый экономический эффект от внедрения рассчитанных на ЭВМ режимов работы и организации лесосечных работ достигает 2,1 млн. руб. в год, земляных работ в строительстве – 1,7 млн. руб.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Заикин, А.Н Автоматизация расчёта режимов работы комплектов машин [Текст] / А.Н. Заикин, Е.А. Памфилов, Е.Г. Изюмова // Вестник БГТУ, 2009 - №1 - с. 69-75.

2. Заикин, А.Н. Варианты прогнозирования продолжительности расчётного периода при моделировании работы лесосечных машин [Текст] / А.Н. Заикин, В.М. Меркелов, Е.Г. Рыжикова, И.И. Теремкова // Вестник КрасГАУ. – Красноярск, 2013. – с. 191-196.

3. Заикин, А.Н. Метод автоматизации расчёта режимов работы комплектов лесосечных машин и оборудования при заданных объёмах производства [Текст] / А.Н. Заикин, Е.Г. Изюмова // Вестник КрасГАУ. – Красноярск, 2010. – Вып. 2. – с.3-8.

4. Заикин, А.Н. Постановка задачи оптимизации объёмов запасов и режимов работы лесосечных машин [Текст] / А.Н. Заикин, Л.И. Евельсон, Е.Г. Изюмова // Лесной журнал: известия высш. учебн. заведений, 2011.- с. 92-100.

Статьи и материалы конференций

5. Евельсон, Л.И. Информационная поддержка процесса заготовки леса [Текст] / Л.И. Евельсон, Е.Г. Изюмова // Актуальные проблемы лесного комплекса: сб. научн. трудов по итогам международной науч.-техн. конференции. - Брянск: БГИТА, 2010. - Вып.25. – с.157-160.

6. Евельсон, Л.И. Комплекс программ для имитационного моделирования и оптимального планирования технологических процессов [Текст] / Евельсон Л.И., Рыжикова Е.Г. // Сборник статей по материалам XXVII международной научно-практической конференции Технические науки — от теории к практике. № 10 (23). Часть I. — Новосибирск: Изд. «Сибак», 2013. — с. 12-19.
7. Евельсон, Л.И. Комплекс программ «КопТРЕГ» [Текст] / Евельсон Л.И., Заикин А.Н., Рыжикова Е.Г. // Информационные технологии в науке, образовании и производстве: сб. научных трудов по итогам междунар. научно-практич. конф. — Выпуск 3. — Брянск: БГИТА, 2014. — с. 103-106.
8. Евельсон, Л.И. Методика и комплекс программ для оптимизации на основе вычислительного эксперимента [Текст] / Евельсон Л.И., Рыжикова Е.Г. // Информационное общество: технологии, человек, бизнес: материалы междунар. заоч. научн.-практ. конф. — Пермь, 2013. — с. 53-59.
9. Евельсон, Л.И. Методика компьютерного эксперимента для оптимального планирования технологических процессов [Текст] / Евельсон Л.И., Рыжикова Е.Г. // Информатика: проблемы, методология, технологии: материалы XIV междунар. конф. — Воронеж, 2014. — Т3 - с. 337-341.
10. Заикин, А.Н. Автоматизация расчёта режимов работы комплектов лесосечных машин [Текст] / А.Н. Заикин, Е.А. Памфилов, Е.Г. Изюмова // Вестник БГИТА, 2009 - №2. - с. 185-191.
11. Заикин, А.Н. Определение снижения энергозатрат и степени вредного воздействия лесосечных машин на лесные экосистемы [Текст] / А.Н. Заикин, В.Я. Сосновский, Е.Г. Изюмова // Лес 2011: сб. научн. трудов по итогам XII международной науч.-техн. конференции. — Брянск: БГИТА, 2011. — с. 12-17.
12. Заикин, А.Н. Опыт внедрения методики автоматизации расчёта режимов работы комплектов лесосечных машин и оборудования [Текст] / А.Н. Заикин, Е.Г. Изюмова // Информационные технологии в науке, образовании и производстве / Под общ. ред. Е.А. Памфилова. Сб. научн. трудов по итогам междунар. научно — практич. конф. — Брянск: БГИТА, 2011. — с. 104-108.
13. Заикин, А.Н. Результаты моделирования работы лесосечных машин и определения объёмов снижения негативного воздействия лесосечных машин на лесные экосистемы [Текст] / А.Н. Заикин, Д.С. Ильяхин, Е.Г. Рыжикова, И.И. Теремкова // Эколого-ресурсосберегающие технологии и системы в лесном и сельском хозяйстве: сб. трудов междунар. научно-технич. конф. — Воронеж, 2014. — с. 212-216.
14. Изюмова, Е.Г. Информационное обеспечение лесозаготовок [Текст] // Вестник Славянских вузов: ежегодный международный журнал. — Брянск: БГТУ, 2010.- №2, с. 182-185.
15. Изюмова, Е.Г. Информационная система для оптимизации процесса лесозаготовки [Текст] // Инновации 2010. Современное состояние и перспективы развития инновационной экономики: сб. материалов международного молодежного форума / под общ. ред. проф. А.В. Матвеева, доц. Ю.Н. Лунева. - Брянск, 2010. - с. 487-490.
16. Изюмова, Е.Г. Информационное обеспечение лесозаготовок [Текст] // Информационные технологии, энергетика и экономика: сб. трудов 8-й межд. научн.-техн. конф. студентов и аспирантов. — Смоленск, 2011. - Т1.— с. 39-43.

17. Изюмова, Е.Г. Компьютерное моделирование режимов работы комплектов машин [Текст] // Достижения молодых учёных Брянской области: материалы региональной научн. конференции студентов и аспирантов / под. ред. И.А. Лагерева. – Брянск: БГТУ, 2010. – с. 251-254.

18. Рыжикова, Е.Г. Математические модели для определения основных параметров лесозаготовительного процесса, планируемого на один месяц [Текст] // Сборник материалов Всероссийского конкурса проектов студентов и аспирантов в области инновационно-ориентированного развития и сетевого взаимодействия в аграрном секторе экономики РФ. – Брянск: ЦНТИ, 2012. – с. 259-266.

19. Рыжикова, Е.Г. Методика расчёта общего времени работы комплекта лесосечных машин [Текст] // Сборник материалов Всероссийского конкурса проектов студентов и аспирантов в области инновационно-ориентированного развития и сетевого взаимодействия в аграрном секторе экономики РФ. – Брянск: ЦНТИ, 2012. – с. 252-258.

20. Занкин, А.Н. Результаты исследований изменения оперативных запасов древесины в технологическом процессе лесосечных работ [Текст] / А.Н. Занкин, Е.Г. Рыжикова, И.И. Теремкова // Лесотехнический журнал. – Воронеж, 2014.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. МППлес / Евельство Л.И., Занкин А.Н., Изюмова Е.Г. - №2011618265.

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. «Определение оптимальной последовательности перемещения дополнительных машин» / Занкин А.Н., Каштенков А.Д., Рыжикова Е.Г. - №2012613073.

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. ТЭП. / Занкин А.Н., Каштенков А.Д., Моисеева О.Д., Рыжикова Е.Г. - 201261307.

РЫЖИКОВА Елена Геннадьевна

ОПТИМИЗАЦИЯ ПЛАНИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ С ПЕРЕМЕННЫМ СОСТАВОМ ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Подписано в печать 02.09.2014 г. Формат 60×84 1/16

Бумага офсетная.

Офсетная печать Печ. л. 1,0 Тираж 100 экз. Заказ 249.

Издательство Брянского государственного технического университета.
241035, г. Брянск; БГТУ, бульвар 50 лет Октября, 7. Тел. 55-90-49.