

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева
Сибирского отделения Российской академии наук**

На правах рукописи



Губий Елена Валерьевна

**МЕТОДЫ АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПЛАНТАЦИЙ ДЛЯ
ТОПЛИВОСНАБЖЕНИЯ ОТДАЛЕННЫХ
НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и
комплексы программ

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

Зоркальцев Валерий Иванович,
доктор технических наук,
профессор

Иркутск – 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
Глава 1. Роль биотоплива в энергетике.....	15
1.1 Об использовании энергии растений	15
1.2 Современное состояние использования биотоплива	15
1.3 Классификация биотоплива	19
1.4 Экологические преимущества от использования биотоплива	26
1.5 История изучения вопроса эффективности энергетических плантаций.....	27
1.6 Устройство энергетических плантаций	31
1.7 Необходимость создания комплекса математических моделей для исследования эффективности и надежности топливоснабжения с энергетических плантаций	35
1.8 Основные итоги главы 1	36
Глава 2. Модель комплексного исследования эффективности энергетических плантаций	39
2.1 Модель функционирования энергетических плантаций.....	39
2.1.1 Природно-климатические характеристики, влияющие на расход теплоты на отопление	42
2.1.2 Площадь энергетической плантации	46
2.1.3 Описание базовой модели	47
2.1.4 Свойства базовой модели.....	54
2.1.5 Модификации базовой модели	56
2.2 Методика расчета капитальных затрат в создание энергетических плантаций.....	62
2.3 Методика расчета ежегодных текущих затрат на функционирование энергетических плантаций	66
2.4 Экспериментальные исследования на модели анализа эффективности энергетических плантаций	67
2.4.1 Влияние объемов производства.....	69

2.4.2 Влияние цены привозного топлива	74
2.4.3 Влияние транспортного фактора.....	75
2.4.4 Влияние выбора набора технических средств на эффективность энергетических плантаций	80
2.5 Основные итоги главы 2.....	81
Глава 3. Математическая модель анализа надежности топливоснабжения с энергетических плантаций.....	83
3.1 Случайные факторы в процессах топливоснабжения с энергетических плантаций.....	84
3.2 Модели анализа и синтеза надежности топливоснабжения с энергетических плантаций	88
3.3 Возможность использования алгоритмов покоординатного спуска для определения оптимального состава средств резервирования	94
3.4 Экспериментальные исследования на модели анализа надежности топливоснабжения с энергетических плантаций	98
3.4.1 Влияние интенсивности колебаний урожайности на оптимальные значения состава средств резервирования	99
3.4.2 Верификация модели	100
3.4.3 Влияние величины резерва мощности на показатели надежности топливоснабжения	101
3.5 Метод формирования переходящих запасов топлива.....	105
3.6 Выводы главы 3	113
Глава 4. Программно-вычислительный комплекс для анализа эффективности и надежности топливоснабжения с энергетических плантаций	115
4.1 Описание программно-вычислительного комплекса «Анализ эффективности и надежности топливоснабжения с энергетических плантаций.	115
4.2 Проведение исследования эффективности топливоснабжения с энергетических плантаций	118

4.3 Проведение исследования надежности топливоснабжения с энергетических плантаций.....	121
4.3.1 Экспериментальная оценка числа итераций, необходимых для получения достоверных результатов	125
4.4 Выводы главы 4.....	126
Заключение	127
Список литературы	129
Приложение А	142
Приложение В.....	143
Приложение С.....	144
Приложение D	145
Приложение Е.....	146
Приложение F	147
Приложение G	148

Введение

Диссертационная работа посвящена разработке математических методов и моделей для исследования эффективности и надежности обеспечения котельно-печным топливом с энергетических плантаций отдаленных населенных пунктов, расположенных в разных климатических зонах России. Основной акцент сделан на районы Сибири и Дальнего Востока.

Актуальность диссертационной работы. Актуальность работы обусловлена целесообразностью исследования вопросов эффективного замещения традиционных энергоресурсов (ископаемых видов топлива) местными возобновляемыми экологически более чистыми источниками энергии.

Так как на большей части территории России наблюдается высокая степень разбросанности населенных пунктов и низкая плотность населения, существует потребность в источниках энергии, не требующих дорогостоящей транспортировки. Учитывая исчерпаемость углеводородов (нефть, газ) и постоянный рост цен на них, целесообразно рассмотреть возможности использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Среди широкого спектра технологий использования солнечной энергии для производства тепловой энергии в российских условиях большой интерес представляет энергия биомассы.

На сегодняшний день в России твердая биомасса является наиболее распространенным источником теплоэнергии в сельской местности. Однако вырубка лесов наносит значительный урон дикой природе, разрушая экосистему. На лесосеках часто «порубочные остатки» (откомлевка, сучья, вершинник) используются не полностью. Экологическая и экономическая эффективность биомассы как источника энергии становится значительно выше в тех районах, где уже проводятся специальные мероприятия, направленные на организацию выращивания древесины [1]. В таких странах как Швеция, Канада, Австрия, США существуют специально выращенные леса (энергетические плантации), собранная биомасса с которых используется для производства тепловой или электрической энергии.

Использование биотоплива, выращенного на энергетических плантациях, способно диверсифицировать производство энергии, снизить стоимость энергии в населенных пунктах, отдаленных от основных транспортных магистралей, обеспечить местное население дополнительными рабочими местами, привести к ресурсосбережению и сокращению выбросов парниковых газов и других вредных веществ в атмосферу.

Использование биомассы может быть актуальным, в частности, в Иркутской области, где уже не первый год стоит вопрос о создании особой туристско-рекреационной зоны [2; 3]. Создание такой зоны обязательно требует использования видов топлива, обладающих экологическими преимуществами перед своими традиционными аналогами.

До сих пор крайне мало внимания уделялось комплексным исследованиям всей технологической цепочки производства, транспортировки и хранения биотоплива. Малоизученным в научной литературе остается вопрос эффективности топливоснабжения с энергетических плантаций. Для проведения таких исследований требуется разработка специального инструментария (математических моделей), позволяющего комплексно оценивать все этапы технологической цепочки формирования и функционирования энергетических плантаций.

Исследования эффективности энергетических плантаций с помощью математических методов в мире исследовались крайне мало. Первым данным вопросом занялся финский математик О. Hellman. В 1980 году в своей работе «A special problem of large scale forest management» [4] он впервые рассмотрел ситуацию, когда энергетические плантации состоят из нескольких сегментов (количество которых равно сроку созревания древесины). Каждый год на одном из сегментов весной осуществляются лесозаготовки, а осенью – посадки. Позже такую модель назвали финской моделью. В дальнейшем О. Hellman развивал модель [5–7]. Он занимался поиском оптимального срока произрастания древесины, рассматривал возможность самопроизвольных посадок, произрастания нескольких видов деревьев на одной плантации. Однако в его исследованиях не были учтены некоторые особенности роста разных древесных культур, не учитывались действия случай-

ных факторов в функционировании энергетических плантаций, не рассматривались средства обеспечения надежности топливоснабжения. Последнее особенно важно для использования энергетических плантаций в топливоснабжении отдаленных населенных пунктов.

При анализе эффективности энергетических плантаций необходимо учитывать затраты на мероприятия по обеспечению надежности топливоснабжения из такого источника. Ранее в работах не учитывались действия случайных факторов (годовая потребность в топливе, объем производства топлива в конкретном году и переходящие из года в год запасы топлива), которые влияли бы на надежность топливообеспечения. В большей или меньшей степени, все три случайных фактора зависят от непредсказуемых природно-метеорологических условий. В изучение проблемы надежности теплоснабжения и связанных с ней исследований многолетних колебаний температур воздуха свой вклад внесли следующие ученые: М.А. Великанов, В.И. Зоркальцев, Ю.А. Мазур, А.С. Некрасов, Л.С. Хрилев и др. [8–18]. Несмотря на большое количество работ по проблемам надежности теплоснабжения, ранее не производились работы, связанные с обеспечением надежности топливоснабжения с энергетических плантаций.

Вопросы экономической эффективности производства биомассы рассматривались в следующих работах зарубежных исследователей. В Швеции Н. Rosenqvist и М. Nordborg занимаются оценкой себестоимости твердых видов биотоплива [19–23; 24]. Результаты исследований подтверждают экономическую эффективность энергетических плантаций ивы в условиях Швеции. Исследованием экономической эффективности использования разных видов растений на энергетические цели в условиях Польши изучали Е. Krasuska, Н. Rosenqvist, М. Borzecka–Walker и др. [25–35], в условиях Чехии – К. Navlickova [36; 37].

В республике Беларусь с 2006 года, в том числе на экспериментальных участках, Родькиным О.И., Пашинским В.А. и др. проводятся исследования по оценке эффективности производства различных видов биотоплива [38–43].

Важную роль в изучении эффективности энергетических плантаций занимает вопрос продуктивности искусственных лесов. Большой вклад в изучение дина-

мики биомассы лесов России внес А.В. Усольцев [44; 45]. Изучением влияния агромероприятий на скорость роста ивы и тополя в условиях Швеции занимаются L. Christersson и T. Ericsson и другие [46–49].

Вопросами моделирования процессов выращивания энергетической древесины занимаются Е.М. Онучин, Е.М. Романов [50–55]. Их работы посвящены разработке математических моделей, устанавливающих количественные связи между технологическими параметрами оборудования и процессами выращивания и заготовки энергетической древесины.

Цель работы: создание инструментария для анализа и комплексной оптимизации процессов создания и функционирования энергетических плантаций для обеспечения котельно-печным топливом отдаленных населенных пунктов с учетом действия случайных факторов, влияющих на эффективность и надежность топливоснабжения.

Для достижения поставленной цели автором решались следующие основные **задачи**.

1. Создание комплекса математических моделей для исследования всей технологической цепочки производства, транспортировки и хранения биотоплива с энергетических плантаций с учетом действия случайных факторов.

2. Разработка математических методов для описания действия случайных факторов в производстве, потреблении и в переходящих запасах топлива при реализации моделей анализа и синтеза надежности топливоснабжения с энергетических плантаций.

3. Создание программно-вычислительного комплекса для реализации математических моделей анализа эффективности и надежности топливоснабжения с энергетических плантаций.

4. Апробация разработанных моделей и программно-вычислительного комплекса для оптимизации функционирования энергетических плантаций и анализа надежности на примерах, близких к условиям Иркутской области по ценовым и природно-метеорологическим характеристикам.

Объект исследования – энергетические плантации (специальные лесные насаждения, древесина с которых используется для получения энергии).

Предмет использования – математические модели, вычислительные методы, программно-вычислительный комплекс для исследования эффективности и надежности топливоснабжения с энергетических плантаций.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»:

П. 1. Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений.

П.5. Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.

П.8. Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы математической статистики для подготовки исходных данных, имитационное моделирование, моделирование методом Монте-Карло, функционально-стоимостной анализ.

Составляют предмет **научной новизны** следующие наиболее важные результаты.

1. Впервые произведено полное описание функционирования энергетических плантаций в виде комплекса математических моделей, предназначенного для анализа эффективности и надежности топливоснабжения.

2. Разработаны, теоретически и экспериментально обоснованы математические методы для описания действия случайных факторов в потреблении и производстве топлива с энергетических плантаций, а также в переходящих эксплуатационных запасах топлива, реализующий марковский стационарный эргодический процесс.

3. Математические модели для анализа эффективности и надежности энергетических плантаций реализованы в виде ПВК.

4. На основе созданной модели анализа эффективности топливоснабжения с энергетических плантаций на примере, близком к условиям Иркутской области, оценена эффективность энергетических плантаций при разных объемах потребности в топливе населенного пункта, возможных изменениях дальности перевозок, а также при варьировании цен на привозное топливо.

5. На основе разработанной модели анализа надежности топливоснабжения с энергетических плантаций на примере, близком к условиям Иркутской области, проведен анализ надежности топливоснабжения отдаленных населенных пунктов биотопливом с энергетических плантаций, осуществлены оценки оптимального состава средств обеспечения надежности.

Положения, выносимые на защиту.

1. Комплекс математических моделей для анализа эффективности и надежности топливоснабжения с энергетических плантаций, учитывающий всю технологическую цепочку производства, транспортировки и хранения биотоплива, а также действия случайных факторов.

2. Математические методы для описания действий случайных факторов в производстве, потреблении и переходящих запасах топлива.

3. Инструментарий в виде программно-вычислительного комплекса для анализа и оптимизации состава средств обеспечения надежности топливоснабжения с энергетических плантаций отдаленных населенных пунктов.

4. Технология проведения исследования эффективности и надежности топливоснабжения с энергетических плантаций отдаленных населенных пунктов.

5. Апробация созданного инструментария на примерах, соответствующих природным условиям Иркутской области: проведены экспериментальные исследования, обосновывающие потенциальные эффективность и надежность использования котельно-печного топлива с энергетических плантаций.

Достоверность научных результатов, содержащихся в диссертационной работе, подтверждаются согласованностью полученных результатов с известными

теоретическими и экспериментальными данными, обеспечивается применением строгих методов математического моделирования и статистической обработки данных.

Информационная база исследования. При проведении данного исследования были использованы материалы Международного энергетического агентства, Международного агентства по возобновляемой энергии (IRENA), Организации экономического сотрудничества и развития, европейских отраслевых союзов производителей ВИЭ, в части российской проблематики – материалы отраслевых российских министерств и ведомств. Была изучена отечественная и зарубежная экономическая периодика, материалы информационных агентств.

Теоретическая значимость работы. Разработаны, теоретически и экспериментально обоснованы методы анализа эффективности энергетических плантаций, алгоритмы описания действий случайных факторов в потреблении и производстве топлива, алгоритм, реализующий марковский стационарный эргодический процесс для моделирования переходящих запасов топлива многолетнего регулирования.

Практическая значимость работы. Результаты расчетов на модели позволяют оптимизировать затраты и анализировать эффективность и надежность топливоснабжения с энергетических плантаций для конкретных возможных ценовых, природных и прочих условий.

Внедрение результатов диссертационного исследования. Основные результаты диссертационной работы внедрены в УООХ «Голоустное» Института управления природными ресурсами – факультета охотоведения им. В.Н. Скалона и используются для анализа экономической эффективности и надежности энергетической плантации на территории УООХ «Голоустное» (Приложение А).

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных научных конференциях: «Актуальные проблемы права, экономики и управления», Иркутск, 2011 г.; «Лесопользование в послепожарных древостоях, их реабилитация», Иркутск, 2011 г.; «Охрана и рациональное использование животных и растительных ресурсов»,

Иркутск, 2012 г.; «Проблемы оптимизации и экономические приложения», Омск, 2012 г.; «XLIII конференции–конкурсе научной молодежи», Иркутск, 2013 г.; «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики», Иркутск, 2013 г.; «VIII Международная школа–симпозиум «Анализ, моделирование, управление, развитие экономических систем (АМУР–2014)», Симферополь, 2014 г.; «Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики», Новосибирск, 2014 г.; «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири», Иркутск, 2017 г.; «Марчуковские научные чтения – 2017», Новосибирск, 2017 г.; 48-ая конференция-конкурс молодых ученых ИСЭМ СО РАН «Системные исследования в энергетике», Иркутск, 2018 г.; XIV международная Азиатская школа-симпозиум «Проблемы оптимизации сложных систем», Кыргызская республика, оз. Иссык-Куль, 2018 г., XIX Всероссийский симпозиум с международным участием «Сложные системы в экстремальных условиях», Красноярск, 2018.

Публикации. По теме диссертации было опубликовано 21 печатная работа, в том числе 7 – в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией («ЭКО», «Современные технологии. Системный анализ. Моделирование», «Вестник ИрГСХА», «Вестник ИрГТУ», «Управление большими системами», «Научный вестник Новосибирского государственного технического университета»), одна монография и одно учебное пособие. Получено одно свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, 7 приложений. Список литературы включает 115 наименований. Работа изложена на 148 страницах текста, содержит 27 рисунков, 11 таблиц.

Краткое содержание работы.

Во введении дается общая характеристика диссертационной работы. Обосновывается её актуальность, значимость и научная новизна. Формулируются цели работы и задачи, определяются объект, предмет и методы исследований.

В первой главе дан сравнительный анализ видов биотоплива. Рассмотрено современное состояние использования биотоплива в мире. Представлены экологические преимущества от использования биомассы, выращенной на энергетических плантациях. Обзор литературы по исследуемой тематике показал необходимость разработки математических моделей для комплексного исследования вопросов эффективности и надежности топливоснабжения с энергетических плантаций.

Во второй главе детально рассматривается модель исследования эффективности энергетических плантаций в детерминированных условиях, входящая в разработанный комплекс моделей. Дана методика расчета капитальных и текущих затрат на создание и функционирование энергетических плантаций. На примерах, близких к условиям Иркутской области, дана общая оценка эффективности энергетических плантаций. Проведено исследование влияния объемов производства топлива, цены привозного альтернативного топлива и транспортного фактора на экономическую эффективность энергетических плантаций.

В третьей главе рассмотрено влияние природно-климатических факторов на потребность в топливе на теплоснабжение на основе данных метеорологических наблюдений за последние 100 лет по некоторым пунктам метеонаблюдений Урала, Сибири и Дальнего Востока. Представлены модели анализа и синтеза надежности топливоснабжения, входящие в комплекс моделей. Учитываются действия случайных факторов в производстве и потреблении биотоплива с энергетических плантаций. Представлены методы описания действия случайных факторов в потреблении и производстве топлива. Изложен, теоретически и экспериментально обоснован численный метод описания действия случайных факторов в переходящих запасах топлива многолетнего регулирования в виде однородной марковской стационарной, эргодической последовательности. Представлены результаты апробации моделей, даны оценки оптимального состава средств резервирования топлива.

В четвертой главе дано описание программно-вычислительного комплекса, реализующего модели анализа эффективности и надежности топливоснабже-

ния с энергетических плантаций. Представлены технологии проведения исследований эффективности и надежности топливоснабжения с энергетических плантаций.

Работа выполнена в отделе прикладной математики Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук – ИСЭМ СО РАН.

Глава 1. Роль биотоплива в энергетике

1.1 Об использовании энергии растений

Рост растений основан на процессе фотосинтеза. Растения поглощают из воздуха углекислый газ и вместе с энергией Солнца и водой, перерабатывают его в органическую ткань. При сжигании они выделяют столько же углекислого газа, сколько потребовали в процессе роста.

Совокупный энергетический потенциал всей растительности планеты, поглощающей углекислый газ, составляет около 70 млрд т, что в 10 раз превышает использование ископаемого топлива [56], на котором базируется современная энергетика. Такие источники энергии, как например, уголь или нефть, образовались путем разложения растений, которые миллионы лет назад тоже в процессе своего роста поглощали углекислый газ. Поэтому целесообразно сжигать растения, которые поглощают углекислый газ в наши дни, особенно в тех районах, где достаточно солнечной энергии и воды.

Люди начали использовать растения в виде дров для получения энергии много тысяч лет назад. Однако вырубка лесов без последующего их восстановления чревата печальными последствиями для окружающей среды. В наши дни использование растений и, прежде всего деревьев, для получения энергии возможно только в двух случаях – при санитарных рубках или при создании специальных энергетических плантаций, где все вырубленные растения должны быть заменены вновь посаженными.

1.2 Современное состояние использования биотоплива

В настоящее время 81 % конечного мирового потребления энергии составляют невозобновляемые исчерпаемые ресурсы: твердые (уголь – 21 %), жидкие (нефть – 38 %) и газообразные (природный газ – 21 %). 18 % приходится на воз-

обновляемые источники энергии (ВИЭ), 2 % мирового производства энергии – на ядерную энергетику [57].

Понятие «возобновляемые источники энергии» определяется Федеральным законом РФ «Об электроэнергетике» [58].

«Возобновляемые источники энергии – энергия солнца, энергия ветра, энергия вод (в том числе энергия сточных вод), за исключением случаев использования такой энергии на гидроаккумулирующих электроэнергетических станциях, энергия приливов, энергия волн водных объектов, в том числе водоёмов, рек, морей, океанов, геотермальная энергия с использованием природных подземных теплоносителей, низкопотенциальная тепловая энергия земли, воздуха, воды с использованием специальных теплоносителей, биомасса, включающая в себя специально выращенные для получения энергии растения, в том числе деревья, а также отходы производства и потребления, за исключением отходов, полученных в процессе использования углеводородного сырья и топлива, биогаз, газ, выделяемый отходами производства и потребления на свалках таких отходов, газ, образующийся на угольных разработках».

В масштабах планеты энергетический потенциал большинства из перечисленных выше ВИЭ во много раз превышает современный уровень энергопотребления, поэтому они могут всерьез рассматриваться как возможный источник энергии [59]. Основные возобновляемые источники энергии – биоэнергетика и гидроэнергетика. По имеющимся оценкам [57], из указанной доли ВИЭ в 18 % доля биоэнергетики составляет 14 %. Иные источники энергии (энергия ветра, солнца, приливов и отливов) имеют существенное локальное значение, но вряд ли смогут стать значительными в глобальном масштабе (рисунок 1.1) [57; 60].

Биомасса – один из наиболее перспективных источников возобновляемой энергии на Земле благодаря таким отличительным чертам биотоплива, как его значительный энергетический потенциал и относительно простое возобновление. Возобновление может происходить в природном лесу или на искусственных плантациях (где рост обычно идет быстрее) [61]. Совокупно энергетический по-

тенциал всей растительности нашей планеты составляет около 100 млрд тонн условного топлива (т у.т.) [62].



Рисунок 1.1 – Структура мирового производства ВИЭ в 2013 г. [57]

Около 2 млрд человек (почти треть населения Земли) все еще используют биомассу в виде древесины как основной источник топлива [62]. Главным источником получения биомассы является лес (87 %), продукты сельского хозяйства составляют 10 % от всей произведенной биомассы, и только 3 % приходится на отходы [63].

Из рисунка 1.2 видно, что биотопливо наиболее широко используется для получения тепловой энергии в частном секторе (8,9 % мирового энергопотребления), в системе централизованного теплоснабжения (1,2 %), а также для отопления помещений промышленного назначения (2,2 %). В меньших масштабах биотопливо используется для выработки электрической энергии (0,4 %) и как альтернатива углеводородному топливу в транспортном секторе (0,8 %) [64].

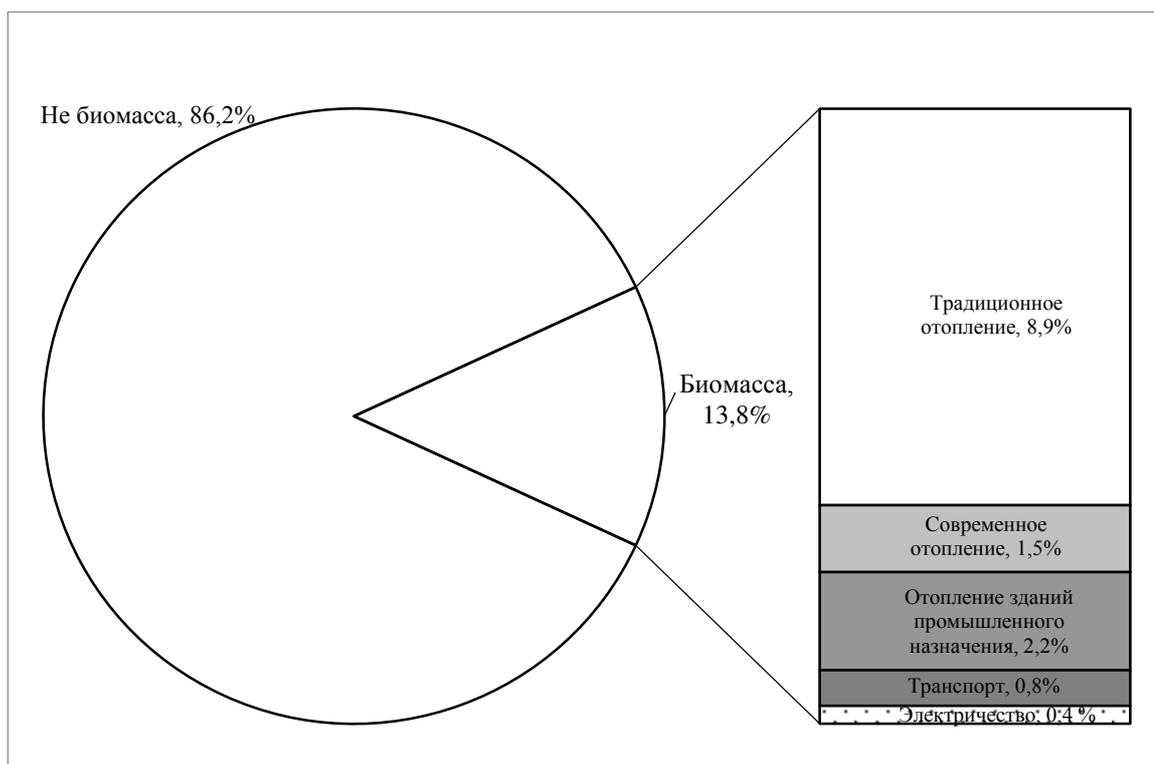


Рисунок 1.2 – Доля биотоплива в глобальном энергопотреблении в 2014 году [64]

Твердая биомасса используется для производства тепла во многих странах мира. В бедных африканских и азиатских странах, преимущественно, способом прямого сжигания. В Америке, Европе, Австралии и развитых азиатских странах применяются современные эффективные технологии сжигания [65].

К преимуществам биоэнергетики следует отнести:

- возобновляемость [66];
- универсальность применения (в теплоснабжении, электроэнергетике, на транспорте);
- замкнутость углеродного цикла (растения после сжигания выделяют столько же вредных веществ, сколько поглощают в процессе роста);
- децентрализация энергообеспечения, снижение зависимости от дальнепривозных невозобновляемых энергоносителей [67].

Биотопливо оказывается особенно эффективным в случаях энергоснабжения населенных пунктов, отдаленных от крупных транспортных магистралей, а также централизованных электрических или тепловых сетей [68]. Использование ВИЭ

на таких территориях может обеспечить их энергетическую независимость, повысить экологическую безопасность и снизить негативное воздействие на окружающую среду.

1.3 Классификация биотоплива

Биомасса для целей энергетики используется с древнейших времен. За счет фотосинтеза на Земле ежегодно образуется около 150 млрд т органического вещества [69]. В процессе фотосинтеза энергия солнца сохраняется в биомассе растений. Выделяют два варианта использования биотоплива – традиционное и современное.

Первый вариант подразумевает прямое сжигание биомассы для целей отопления жилища или приготовления пищи. Несмотря на то, что эффективность такого вида топлива не всегда высока, в отдаленных от основных транспортных магистралей районах (где транспортировка традиционных видов топлива затруднена) оно остается основным источником энергии. Масштабы его использования оценить сложно, однако, по данным отчета Ассоциации биотопливного рынка «ЭНБИО» в 2016 году [64], 8,9 % мирового потребления энергии приходится именно на традиционное использование биотоплива.

Традиционное использование биотоплива часто сопровождается массовыми вырубками лесов и применением неэффективного оборудования для сжигания, однако для многих людей во всем мире оно остается единственным способом получения энергии в силу низкой стоимости и простоты использования.

Второй вариант использования биотоплива (современный) связан с преобразованием биомассы в энергию с использованием современных эффективных технологий конверсии, которые позволяют производить биотопливо в твердой (топливные пеллеты и брикеты), жидкой (биоэтанол, биометанол и биодизель) и газообразной (биогаз) формах. Современное использование биотоплива отличается от традиционной биомассы следующими характеристиками: непрерывность

использования; снижение объема вредных выбросов; более высокая энергетическая эффективность.

Современное использование биотоплива характерно для стран Южной и Северной Америк (жидкое биотопливо [70]), Северной Европы (топливные гранулы и брикеты) [65].

Согласно отчету «World Energy Resources. Bioenergy 2016» [65] в 2010 году в мире доля использования традиционного биотоплива составляла 9,6 % от конечного потребления энергии, современного – 4 %. На рисунке 1.3 видно, что наибольшая часть традиционного использования биомассы приходится на бедные районы Африки и Азии. Особенно высока доля его использования на юге Сахары (65,3 % от конечного потребления энергии в регионе). Биомасса, перерабатываемая с использованием современных технологий, наоборот, используется, преимущественно, в развитых регионах, таких как Северная Америка, Европа, Юго-Восточная Азия, Океания, Латинская Америка.

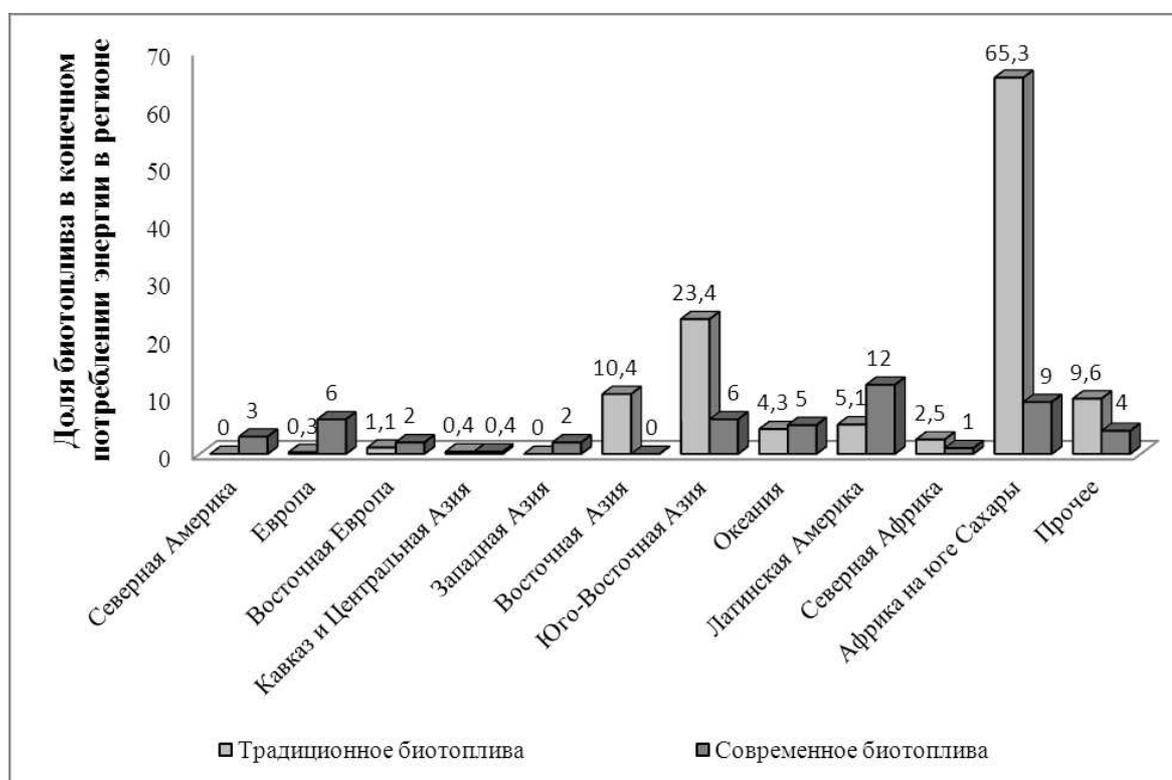


Рисунок 1.3 – Доля традиционного и современного использования биотоплива в конечном потреблении энергии в регионе в 2010 году [65]

Определение «биотопливо» согласно ГОСТ Р 52808-2007 «Нетрадиционные технологии. Энергетика биоотходов. Термины и определения» [71] ложится в основу наиболее распространенной классификации биотоплива – разделению его по агрегатному состоянию на три группы: твердое, жидкое и газообразное.

1.3.1 Твердое биотопливо. Твердая биомасса является наиболее распространенным видом биотоплива. К ней относятся дрова, топливные брикеты и пеллеты, торф, топливная щепа.

1.3.1.1 Дрова. Дрова используются с давних пор. Несмотря на то, что в мире активно разрабатываются и финансируются новые способы переработки биомассы (сжижение, газификация и др.), такие традиционные источники энергии как дрова не теряют своей актуальности. Они остаются самым распространенным видом биотоплива. Удельная теплота сгорания 1 кг свежесрубленных дров (при влажности 50–60 %) составляет около 1900 ккал, сухих дров (при влажности 20 %) – около 3400 ккал.

К преимуществам дров можно отнести их экологичность, общедоступность, низкую стоимость, безопасность эксплуатации (абсолютно не взрывоопасны). Однако есть и недостатки: неудобство транспортировки и хранения и, как следствие, высокая стоимость при большой дальности перевозок, относительно низкий КПД.

1.3.1.2 Топливная щепа. Топливная щепа – это топливо, полученное в результате механического измельчения древесины. Выработка древесной щепы, как правило, производится непосредственно на лесозаготовках или в производственных цехах.

Преимущества и недостатки использования топливной щепы близки к преимуществам и недостаткам дров, но ее эффективность ниже. Удельная теплота сгорания 1 кг топливной щепы довольно низкая – 2600 ккал.

1.3.1.3 Пеллеты и топливные брикеты. На сегодняшний день активно развивается производство топливных брикетов и пеллет. Сырьем для их изготовления могут быть отходы деревообрабатывающего, сельскохозяйственного производства, а также биомасса, полученная со специально созданных энергетиче-

ских плантаций, состоящих из быстрорастущих травянистых или древесных растений. Для изготовления пеллет и топливных брикетов сырьё подается в специальную дробилку, где измельчается до состояния муки, затем полученная масса отправляется в сушильную камеру, из которой поступает в пресс-гранулятор, где измельченную высушенную биомассу сжимают в гранулы. Для производства одной т топливных брикетов или пеллет требуется около 5 м³ древесных отходов. Пеллеты и топливные брикеты используют для теплоснабжения жилых и нежилых помещений, а также в каминных печах. Соотношение пеллет и топливных брикетов в мире составляет примерно 1:20 [72].

Преимуществами топливных брикетов и пеллет среди твердых видов биотоплива являются удобство транспортировки и хранения, стандартизация, автоматизация сжигания. Отличительным качеством является малая зольность – 3 %. Удельная теплота сгорания 1 кг топливных гранул составляет около 4000 ккал.

1.3.1.4 Торф. Торф – биомасса, образовавшаяся из перегнивших остатков болотных растений. Он не является высокоэффективным топливом и характеризуется высокой зольностью. В отличие от сжигания древесины и другой растительности, выбросы, образующиеся при сжигании торфа, не признаются CO₂-нейтральными. Удельная теплота сгорания 1 кг торфа составляет 2900 ккал.

1.3.2 Жидкое биотопливо. Общее мировое производство жидких видов биотоплива с 2000 до 2015 года возросло в 8 раз (с 13,12 до 107,04 млн т у.т.) [56]. Жидкое биотопливо получают в ходе переработки биомассы, чаще всего – сахарного тростника, сахарной свеклы, кукурузы и рапса. Основное применение жидких видов биотоплива – двигатели внутреннего сгорания. Биоэтанол и биодизель являются наиболее эффективными видами жидкого биотоплива.

1.3.2.1 Биоэтанол. Биоэтанол – наиболее распространенный вид жидкого биотоплива. В мире лишь 7 % этанола производится путем химического синтеза, а 93 % – биотехнологическим способом [73]. Из всего производимого в мире биоэтанола 80 % имеет топливное применение, 12 % – техническое и 8 % – пищевое [56]. Для его производства используют следующие виды сырья: сорго, сахарный тростник кукуруза, древесина, сельскохозяйственные отходы.

Как правило, биоэтанол используют в виде смеси с неэтилированным бензином. Это делают для повышения октанового числа и для снижения токсичности отработанных газов. Выделяют две основные марки топлива, в состав которых входит биоэтанол – E10 (смесь 10 % этанола и 90 % неэтилированного бензина) и E85 (смеси 85 % этанола и 15 % неэтилированного бензина). Первая марка топлива (E10) в незначительных количествах уменьшает количество вредных веществ, выделяющихся в окружающую среду, однако альтернативным видом топлива признана вторая марка (E85). С его использованием существенно уменьшаются потребление традиционных источников углеводородов и выброс вредных веществ [67].

По оценкам Международного энергетического агентства (МЭА) ежедневно в мире этанолом замещается более чем 3,8 млн литров нефтяного спроса в день [74].

В настоящее время большая часть биоэтанола производится из зерна, что может способствовать росту цен на зерно. Поэтому во всём мире активно поддерживаются программы, направленные на вовлечение в производство биоэтанола непищевого сырья, например, древесины [74; 75].

К преимуществам использования биоэтанола можно отнести удобство транспортировки и хранения, повышение октанового числа обычного бензина, возможность его использования как основного компонента топлива, устойчивость к низким температурам, низкая взрывоопасность. Однако на этом виде топлива может работать не каждый двигатель.

1.3.2.2 Биодизель. Биодизель – дизельное топливо, полученное из биомассы. Как правило, сырьём для его производства служат пальмовое, соевое, рапсовое масла, отходы пищевой промышленности.

В отличие от биоэтанола, биодизель используют не только в виде смесей с обычным дизельным топливом, но и в чистом виде. Биодизель является экологичным видом топлива, обладает хорошими смазочными свойствами, но имеет и недостатки, например, невозможность применения при низких температурах, короткий срок хранения.

1.3.2.3 Биометанол. Биометанол – метанол, произведенный в результате переработки биомассы (как правило, любых сельскохозяйственных отходов). Основными сферами его применения являются производство формальдегидов, высокооктановых добавок, хлористого метила, уксусной кислоты, лекарственных средств и др.

Одним из наиболее перспективных способов получения биометанола является промышленное разведение морского фитопланктона за счет высокой выработки биомассы (до 110 т фитопланктона в год с 1 га).

В силу невысокой эффективности биометанол пока не выдерживает конкуренции по сравнению с биоэтанолом и биодизелем.

1.3.2 Газообразное биотопливо. Газообразное биотопливо получается посредством частичного окисления биомассы.

Наиболее распространенным видом газообразного биотоплива является биогаз. Одной из разновидностей биогаза является биоводород. Как правило, для получения биогаза используют отходы сельского хозяйства. Из 1 т биомассы получают до 350 м³ биогаза [62].

Биогаз применяют во всех тех же сферах, где используется обычный природный газ. После обогащения биогаза до состояния биометана его возможно использовать как полную замену природному газу. Его преимуществами являются невысокая стоимость, экологичность, доступность практически в любом регионе. Однако есть серьезный недостаток – биогаз взрывоопасен.

Ведущее место по производству биогаза занимает Китай. Биогазовыми установками охвачено 23 % всех крестьянских хозяйств Китая [56].

Преимущества и недостатки перечисленных видов топлива обобщены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Преимущества и недостатки некоторых видов биотоплива

Тип биотоплива	Вид биотоплива	Преимущества	Недостатки
Твердое	Дрова	<ul style="list-style-type: none"> • универсальность применения; • низкая стоимость; • безопасность эксплуатации; • экологичность. 	<ul style="list-style-type: none"> • сравнительно низкий КПД; • высокая стоимость транспортировки, хранения, сжигания.
	Щепа	<ul style="list-style-type: none"> • универсальность применения; • низкая стоимость; • безопасность эксплуатации; • экологичность. 	<ul style="list-style-type: none"> • сравнительно низкий КПД; • высокая стоимость транспортировки, хранения, сжигания.
	Топливные брикеты и пеллеты	<ul style="list-style-type: none"> • удобство транспортировки и хранения; • невысокая стоимость; • безопасность эксплуатации; • низкая зольность; • экологичность. 	<ul style="list-style-type: none"> • относительно высокая стоимость котлов для сжигания.
	Торф	<ul style="list-style-type: none"> • низкая стоимость; • экологичность. 	<ul style="list-style-type: none"> • выбросы при использовании торфа не признаются CO₂-нейтральными; • высокая зольность.
Жидкое	Биоэтанол	<ul style="list-style-type: none"> • удобство транспортировки и хранения; • повышение октанового числа обычного бензина при добавлении; • возможность использования как основного компонента топлива; • устойчивость к низким температурам; • низкая взрывоопасность 	<ul style="list-style-type: none"> • использование только для специальных двигателей; • выделение альдегидов при сгорании; • угроза продовольственной безопасности.
	Биометанол	<ul style="list-style-type: none"> • удобство транспортировки и хранения; • возможность утилизации отходов; • доступность сырья. 	<ul style="list-style-type: none"> • низкий КПД
	Биодизель	<ul style="list-style-type: none"> • хорошие смазочные свойства; • высокое цетановое число; • экологичность; • применение не требует внесения конструктивных из- 	<ul style="list-style-type: none"> • короткий срок хранения; • вымещение сельскохозяйственных угодий; • неустойчивость к низким температурам.

Тип биотоплива	Вид биотоплива	Преимущества	Недостатки
		менений в двигатели.	
Газообразное	Биогаз	<ul style="list-style-type: none"> • невысокая стоимость; • доступность в любом регионе; • возможность утилизации отходов; • экологичность. 	<ul style="list-style-type: none"> • взрывоопасность.

1.4 Экологические преимущества от использования биотоплива

Топливо, получаемое из биомассы, может поступать из различных источников: отходы лесного и сельскохозяйственного производства, естественная растительность и специально выращиваемые энергетические культуры.

Остатки и отходы лесного и сельскохозяйственного производства с экологической точки зрения являются идеальным сырьем для производства биотоплива. Однако в действительности зачастую их использование оказывается экономически неэффективным, например, в силу транспортного фактора.

Использование естественных лесов в качестве источника биомассы нежелательно, так как они являются хранителями биоразнообразия животных и растений, хранителями водных ресурсов, предохраняют почвы от эрозии.

Использование биомассы, собранной с энергетических плантаций, обладает рядом экологических преимуществ [76] перед традиционными источниками энергии:

- смягчение проблемы изменения климата;
- уменьшение эрозии почвы;
- уменьшение загрязнения водоемов;
- поддержание условий существования лесов.

За последние 100 лет средняя температура воздуха на планете выросла на 0,6 °C [77]. Для суточного колебания температуры эта величина незначительна, но для глобальных климатических характеристик это очень много. Сжигание традиционных видов топлива приводит к выбросу в атмосферу большого количества

вредных веществ, в первую очередь двуокиси углерода и метана, которые, как полагают многие ученые и политики, приводят к изменению биосферы [78]. Замена традиционных видов топлива альтернативными снижает этот эффект [79]. При сжигании биомассы растений двуокись углерода выделяется так же, как и при сжигании традиционных видов топлива. Однако растения при сжигании выделяют столько же вредных веществ, сколько поглощают в процессе роста, реализуя, таким образом, замкнутый углеродный цикл [80].

Любые растения, в том числе энергетические культуры, стабилизируют почву, уменьшая ее эрозию [81]. Энергетические плантации могут располагаться на непригодных для ведения сельского хозяйства землях, местах, разделяющих полевые площади, затапливаемых территориях [82].

Энергетические культуры, как и любые растения, уменьшают потери питательных веществ из почвы.

Биомасса является очень распространенным источником теплоэнергии, особенно в сельской местности. Однако ее сбор часто недостаточно хорошо организован, вырубка естественных лесов наносит вред экосистеме. Создание специальных энергетических плантаций может решить эту проблему [83].

1.5 История изучения вопроса эффективности энергетических плантаций

С древних времен древесина была важнейшим источником энергии. Ее использовали для отопления жилищ, приготовления еды, а также и для изготовления оружия и предметов быта. В XIX веке дрова уступили первенство углю, а с середины двадцатого столетия – нефти и природному газу. Интерес к древесине как источнику энергии снова возник в 1970-х годах XX века в результате ценового шока, поразившего мировой рынок нефти [84]. Более фундаментальной причиной возрастания интереса к биотопливу в целом и к использованию в качестве топлива древесины в частности явилось обострение интереса к экологическим проблемам в конце XX века из-за происходящего в этот период потепления, уве-

личения вредных выбросов в окружающую среду в связи с ростом численности населения на Земле и ростом объемов производства в разных секторах экономики.

В связи с ситуацией, породившей энергетический кризис, люди задумались над поиском новых видов первичных энергоресурсов, в том числе возобновляемых. С этого времени стал активно изучаться вопрос использования биомассы и, в частности древесины, для нужд энергетики.

Вопросы экономической эффективности производства биомассы, рассматривались во многих работах зарубежных исследователей, начиная с момента зарождения рынка биотоплива [4–7; 19–43; 50–55; 85–88].

Первым данным вопросом занялся финский математик О. Hellman. В 1980 году он рассматривал ситуацию, когда энергетические плантации состоят из нескольких сегментов [4]. Количество сегментов равно сроку созревания древесины (количеству лет). Каждый год на одном из сегментов весной осуществляются лесозаготовки, а осенью – посадки. Позже такую модель назвали финской моделью. В дальнейшем О. Hellman развивал модель. Он ставил задачу поиска оптимального для вырубki возраста заготавливаемой древесины [5]. В 1982 году О. Hellman рассматривал ту же задачу для энергетической плантации, на которой новые лесопосадки из года в год не требовались, система являлась самовоспроизводимой [6]. Такая модель не может быть жизнеспособной, так как слишком велики риски, связанные с плохой всхожестью семян. Отсутствие целенаправленных посадок предполагает беспорядочное произрастание древесины, которое, несомненно, затруднит вырубку. В 1986 году О. Hellman усложнил модель, рассмотрев возможность произрастания нескольких видов деревьев на одной плантации [7]. Однако в его исследованиях не было учтено влияние на экономическую эффективность дальности грузоперевозок, не изучены возможные случайные колебания в производстве и потребности топлива для обеспечения надежности топливоснабжения с энергетических плантаций.

В Польше, Швеции и Чехии исследования по оценке себестоимости биотоплива, выращенного на энергетических плантациях проводили Е. Krasuska, Н. Rosenqvist, М. Borzecka–Walker, К. Havlickova, М. Nordborg и др. Их работы

[19–27; 36–37] посвящены сравнительной оценке себестоимости биотоплива, произведенного из таких энергетических культур как ива, конопля, мискантус и другие. Результаты исследований подтверждают более высокую экономическую рентабельность ивы, выращенной на энергетических плантациях в условиях Польши и Швеции, по сравнению с другими энергетическими культурами.

Исследованием влияния агротехнических мероприятий (в частности внесением разного количества удобрений) на скорость роста гибридов тополя и ивы в Швеции занимаются L. Christersson и T. Ericsson [46–49; 85; 89–90].

В республике Беларусь с 2006 года, в том числе на основе данных, полученных на специальных экспериментальных участках, проводятся исследования [38–43] по оценке себестоимости производства различных видов биомассы (ивы, зерновых культур, многолетних трав) для целей энергетики. Разработана интерактивная модель, позволяющая рассчитывать экономический эффект от выращивания энергетических культур и проводить оценку выбросов в окружающую среду. Оценка экономической и экологической эффективности производства биотоплива с энергетических плантаций проведена на примере ивы.

В России моделированием процессов выращивания и заготовки биомассы занимаются Е.М. Романов и Е.М. Онучин. Их работы [50–55] посвящены разработке моделей функционирования биоэнергетических комплексов, позволяющих оптимизировать технологические процессы при производстве биотоплива для выбора наиболее эффективных технических решений. Устанавливаются количественные связи между параметрами биоэнергетических комплексов и технологическими параметрами оборудования. Остаются не изученными экономические аспекты производства биотоплива.

До сих пор крайне мало внимания уделялось комплексным исследованиям всей технологической цепочки производства, транспортировки и хранения биотоплива. Недостаточно изученным в научной литературе остается актуальный для России вопрос эффективности топливоснабжения с энергетических плантаций отдаленных населенных пунктов, поставки топлива в которые из традиционных источников сопряжены с большими транспортными затратами.

При анализе эффективности энергетических плантаций для топливоснабжения отдаленных населенных пунктов необходимо учитывать затраты на мероприятия по обеспечению надежности. Ранее в работах не учитывались действия случайных факторов, которые влияли бы на надежность топливообеспечения. Прежде всего, как случайные величины следует рассматривать годовую потребность в топливе, объем производства топлива в каждом конкретном году и переходящие из года в год запасы топлива. В большей или меньшей степени, все три случайные фактора зависят от непредсказуемых природно-метеорологических условий. С начала 60-х годов XX века в исследования многолетних колебаний температур воздуха и связанные с этим проблемы надежности топливоснабжения свой вклад внесли многие советские ученые [8–18]. Масштабные исследования колебаний температур воздуха в зимний период как фактора надежности топливоснабжения проводились под руководством Ю.Я. Мазура. Детальные исследования отклонений потребностей в топливе на отопление показало, что для многих городов европейской части СССР с конца XIX века наиболее холодными были серии зим перед Великой Отечественной войной и в ее начале [14]. Исследования проблем надежности и маневренности топливоснабжения М.А. Великанова базировались на обработке многолетних рядов наблюдений температуры воздуха в отдельных пунктах метеонаблюдений. В качестве таких пунктов-представителей рассматривались: для Восточной Сибири – Иркутск, для Западной Сибири – Барнаул, для Урала – Екатеринбург и т.д. В монографиях [11; 12; 18] представлены результаты исследования влияния колебаний температур воздуха в зимний период и продолжительности отопительных периодов на надежность теплоснабжения на основе среднемесячных температур с 1881 года, усредненных по экономическим районам СССР [17]. Указанные и другие исследования колебаний температур воздуха в зимний период могут служить методической основой для анализа и оптимизации затрат на мероприятия по обеспечению надежности топливоснабжения с энергетических плантаций отдаленных населенных пунктов.

1.6 Устройство энергетических плантаций

Одним из способов получения древесной биомассы является создание искусственных плантаций быстрорастущих растений. Для создания таких плантаций можно использовать безлесные площади, непригодные для выращивания сельскохозяйственных культур и выпаса животных, а также места, оставшиеся после вырубки естественных лесов, разделяющие посевные площади, затапливаемые территории [91].

Плантации энергетических растений представляют собой участки искусственных насаждений, разделенные на сегменты. Количество сегментов равно сроку созревания древесины, выраженному в годах. Посадки на энергетических плантациях на каждом сегменте производятся осенью с помощью специальных посадочных машин. Заготовительные работы производятся в весенний период [44].

Подробных статистических данных (с шагом менее 10 лет) о темпах роста деревьев, в том числе тополя и ивы, в условиях Сибири в настоящее время нет.

Замечание о продуктивности энергетических плантаций. Имеющиеся данные о скорости прироста биомассы в центральной части России [92; 93] и Беларуси [38] свидетельствуют о том, что энергетическая продуктивность тополя и ивы на этих территориях мало отличаются и составляют порядка 6–7 т у.т./га за 3–5 лет.

В Швеции, Польше и некоторых других странах для энергетических целей выводят гибриды растений, обладающие более высокой скоростью роста. Проводимые исследования [89; 90] свидетельствуют о том, что урожайность в Швеции варьируется от 5,9 до 13,2 т сухой древесины с га в год. При низшей теплотворной способности 18 МДж/кг это соответствует величинам от 3,6 до 8,1 т у.т./год. Такая высокая скорость роста обусловлена еще и тщательно подобранным набором агротехнических мероприятий.

Не имея надежных данных о продуктивности энергетических плантаций в условиях Сибири, в диссертационной работе эта величина принята равной

5 т у.т./га за 6 лет (что в 2 раза меньше продуктивности в центральной части России и в Беларуси, и в 6 раз ниже, чем в Швеции). Можно считать, что используемое в диссертации значение продуктивности энергетических плантаций является вполне достижимым в условиях Восточной Сибири.

В настоящее время в Иркутске в СИФИБР СО РАН работают над выведением культур, которым свойственны такие качества как ускоренный рост, устойчивость к вредителям и др. [91]. Однако пока исследования находятся на начальном этапе, и данных о приросте биомассы взрослых деревьев нет. Можно предположить, что развитие работы в этом направлении и применение эффективных агротехнологий должно привести к более высокому значению урожайности, чем используемое в диссертации.

Древесные породы растений для энергетических плантаций [91–94] должны быть быстро растущими, устойчивыми к биотическим и абиотическим стрессам, иметь пригодное для переработки качество древесины [95]. Как правило, для создания энергетических плантаций рекомендуется в зоне умеренного климата использовать растения семейства ивовых (*Salicaceae*), в частности род тополь (*Populus L.*) и род ива (*Salix L.*) [96]. В Сибири – тополь белый (*Populus alba*), тополь черный (*Populus nigra*), тополь душистый (*Populus suaveolens*), тополь лавролистный (*Populus laurifolia*) и широко распространенная во всей России осина (*Populus tremula*).

Большое влияние на эффективность энергетических плантаций оказывают пространственные условия, в частности общая конфигурация расположения плантации (вытянутость, разобщенность участков и т.д.) и расположение населенного пункта (или хозяйственного центра) относительно плантации.

В представленных далее моделях для упрощения в начальном варианте будем считать, что площадь плантаций представляет собой круг с радиусом r и с населенным пунктом в центре. Круг разделен на t равных сегментов. Количество сегментов равно сроку созревания древесины (количеству лет). Каждый год на одном из сегментов весной осуществляются лесозаготовки, а осенью – посадки.

Замечание об организационно-правовых формах предприятий топливоснабжения отдаленных населенных пунктов с энергетических плантаций.

Хотя в цели данной работы не входит задача выбора организационно-правовой формы предприятия, которое будет осуществлять топливообеспечение отдаленного населенного пункта с энергетической плантации, необходимо высказать некоторые пожелания на этот счет.

Для решения проблем топливоснабжения отдаленных населенных пунктов на базе энергетических плантаций представляется возможным и целесообразным создание некоммерческого, но обязательно самокупаемого предприятия, например, муниципального. Это предприятие должно заниматься организацией всего производственного цикла – создания, выращивания, переработки и транспортировки древесины до пунктов складирования биотоплива. Цены на поставляемое населению и предприятиям биотопливо должны покрывать все понесенные затраты. При этом в цели предприятия не должно входить получение прибыли, поскольку оно будет занимать монопольное положение в топливообеспечении данного населенного пункта. Необходимо обеспечивать общественный контроль за деятельностью данного предприятия органами власти этого населенного пункта.

В рассматриваемой модели основным расчетным показателем экономической эффективности биотоплива с энергетических плантаций, отражающим среднегодовые затраты предприятия, является показатель приведенных затрат

$$C = I \cdot E_N + CO, \quad (1.1)$$

где CO – ежегодные текущие затраты на функционирование энергетической плантации, млн руб./год; I – инвестиции в создание энергетической плантации, млн руб.; E_N – коэффициент эффективности капиталовложений (в приводимых ниже примерах равен 0,12).

Как известно, показатель приведенных затрат принято использовать на предварительной, предпроектной стадии сравнительного анализа экономической эффективности вариантов проектов. Этот показатель представляет оценку величины средних ежегодных затрат с учетом капиталовложений (инвестиций). Инве-

стиции учитываются с весовым коэффициентом, который иногда интерпретируют как величину, обратную сроку окупаемости капитальных вложений. Применительно к рыночным условиям, коэффициент эффективности капиталовложений E_N можно рассматривать как процент на кредиты (в случае финансирования капиталовложений из заемных средств) или как ожидаемые дивиденды (в случае финансирования создания предприятия на акционерных принципах).

Замечание об устройстве дорожно-транспортной сети. Дорожно-транспортная сеть представляет собой сочетание грузосборочной магистрали и дорожных веток. Площадь энергетической плантации представляет собой круг с населенным пунктом в центре. Тогда принцип устройства дорожно-транспортной сети проиллюстрирован на рисунке 1.4. Грузосборочная магистраль является медианой сектора. Это главный грузосборочный путь. Дорожные ветки представляют собой дуги, проходящие параллельно окружности энергетической плантации. Если радиус плантации r меньше r_{min} , строительство грузосборочной магистрали нецелесообразно. В этом случае она заменяется дорожной веткой.



Рисунок 1.4 – Расположение дорожной сети на энергетической плантации

Стоимость лесовозных дорог зависит от их грузооборота. Чем больше грузооборот, тем больше ширина дороги, качество подготовки земляного полотна и т.д. Наиболее капиталоемким является строительство магистрали.

Поскольку речь в данной диссертации идет о топливоснабжении отдаленных населенных пунктов, к которым не всегда можно оперативно доставить дополнительный объем топлива, то специального внимания заслуживает проблема

надежности топливоснабжения. Никто заранее не может точно предсказывать потребность в котельно-печном топливе предстоящей зимой. Случайные отклонения возможны и в производстве топлива в данном году с энергетических плантаций. Наконец, случайными величинами являются запасы топлива на конец отопительного периода. Ситуация с нехваткой топлива из-за действия указанных случайных факторов может обходиться очень дорого для жителей данного населенного пункта. Необходимо заранее предусмотреть и оптимизировать состав средств по обеспечению надежности топливоснабжения данного отдаленного населенного пункта.

1.7 Необходимость создания комплекса математических моделей для исследования эффективности и надежности топливоснабжения с энергетических плантаций

Для анализа эффективности топливоснабжения с энергетических плантаций необходимо рассматривать весь производственный цикл – агротехнические мероприятия, посадка, выращивание, заготовка древесины, транспортировка биотоплива, его хранение, выращивание саженцев и иные возможные мероприятия.

Для проведения анализа эффективности и надежности топливоснабжения населенных пунктов биотопливом с энергетических плантаций необходима разработка специального инструментария, включающего комплекс математических моделей и методы. Наличие такого инструментария необходимо для оптимизации затрат на создание и функционирование энергетической плантации и средств обеспечения надежности топливоснабжения.

Разработанный инструментарий должен содержать:

- комплекс моделей, включающий модель исследования эффективности энергетических плантаций в детерминированных условиях и модели анализа надежности топливоснабжения с энергетических плантаций;
- математические методы для описания действий случайных факторов в производстве, потреблении и переходящих запасах топлива;

- программно-вычислительный комплекс для реализации разработанных моделей.

Сформулируем требования к математическим моделям.

Модель исследования эффективности энергетических плантаций в детерминированных условиях должна позволять рассчитывать капитальные и среднегодовые текущие затраты и оптимизировать приведенные затраты на производство биотоплива на основе таких входных параметров как потребность в топливе, продуктивность энергетической плантации, технические характеристики используемого оборудования, цены на привозное топливо, материалы и устройства, необходимые для создания и транспортировки биотоплива, данных о размерах заработных плат, налогов и отчислений в фонды.

В модели анализа и синтеза надежности топливоснабжения с энергетических плантаций должны учитываться действия случайных факторов в потреблении, производстве и переходящих из года в год запасах топлива. Предусматривается создание средств обеспечения надежности – создание резервов мощности в производстве топлива и складов для хранения запасов топлива многолетнего регулирования. Критерий надежности топливоснабжения – минимизация математического ожидания суммы затрат на обеспечение надежности топливоснабжения и ущербов от дефицита.

1.8 Основные итоги главы 1

С древних времен древесина являлась основным видом топлива. В XIX столетии дрова отошли на второй план, уступив свое первенство углю, а с середины XX столетия – нефти и природному газу. Интерес к древесине как источнику энергии снова возник в 1970-х годах XX века в результате ценового шока, поразившего мировой рынок нефти. Другой причиной возрастания интереса к биотопливу стало обострение интереса к экологическим проблемам в конце XX века. Сегодня биомасса в виде древесины является одним из основных источников топлива и занимает почти 14 % мирового энергопотребления.

Использование энергии биомассы обладает важными экологическими преимуществами перед ископаемыми видами топлива. Ее применение способствует смягчению проблемы ухудшения климата, уменьшению эрозии почвы, уменьшению загрязнения водоемов, поддержанию условий существования лесов, улучшению микроклимата, улучшению условий для сельскохозяйственной деятельности.

Для России и других стран с суровым резко-континентальным климатом пригодной для энергетических плантаций древесной породой является тополь. Он является быстрорастущим, устойчивым к абиотическим и биотическим стрессам, имеет удобную для плантаций архитектуру кроны и пригодное для переработки качество древесины.

До сих пор не уделялось внимания комплексным исследованиям всей цепочки биологических и технологических процессов выращивания и заготовки биомассы с энергетических плантаций. Ранее не создавались математические модели для анализа эффективности и оптимизации всей производственной цепочки функционирования энергетических плантаций с учетом действия случайных факторов.

Для исследования эффективности и надежности топливоснабжения конкретных населенных пунктов биотопливом с энергетических плантаций необходима разработка целого комплекса моделей. Комплекс моделей должен включать модель для исследования эффективности топливоснабжения с энергетических плантаций в детерминированных условиях и модели для анализа и синтеза надежности топливоснабжения с энергетических плантаций, учитывающие действия случайных факторов.

При анализе и синтезе надежности топливоснабжения с энергетических плантаций необходимо учитывать три случайных фактора: возможные отклонения от среднеожидаемой величины объемов производства топлива (урожайности), возможные отклонения годовых объемов потребности в топливе, а также неоднозначность объемов переходящих запасов топлива. Это требует разработки и применения специальных методов для описания действия этих факторов. Особые сложности представляет метод формирования третьего случайного фактора, по-

сколько величина переходящих запасов топлива в текущем году зависит от случайных реализаций производства и потребления в текущем году и других параметров, в том числе от переходящих запасов из предыдущих периодов.

Глава 2. Модель комплексного исследования эффективности энергетических плантаций

В данной главе излагается математическая модель, разработанная для анализа эффективности создания и функционирования энергетических плантаций и оптимизации отдельных составляющих всей технологической цепочки [97–101]. Рассматриваемая модель предназначена для комплексного исследования вопросов экономической эффективности в конкретных ситуациях при детерминированных условиях функционирования энергетических плантаций. Вопросы учета действия случайных факторов и обеспечения надежности топливоснабжения с энергетических плантаций будут рассмотрены в следующей главе, в развитие рассматриваемой здесь модели.

Модель реализуется в виде последовательных блоков расчетов (отдельных технико-экономических решений) по определению требуемой площади энергетической плантации, выбору вариантов дорожной сети, видов и количества технических средств, строений, требуемого количества работающих, потребности в моторном топливе и др. В тех блоках, где существуют варианты, выбор осуществляется исходя из минимизации приведенных затрат в целом. Поэтому эти расчеты можно интерпретировать в виде решения задачи оптимизации.

Методики расчетов показателей (в рамках каждого блока), входящих в капитальные и среднегодовые текущие затраты будут изложены в разделах 2.2 и 2.3. При этом более подробно будут рассмотрены параметры, от которых они зависят.

2.1 Модель функционирования энергетических плантаций

Модель функционирования энергетических плантаций охватывает все этапы производства и транспортировки биотоплива, рассматриваемые применительно к конкретным населенным пунктам, характеризующимся заданными объемами годовых потребностей в котельно-печном топливе и конкретными природно-климатическими и ценовыми условиями.

Рассматриваемые в модели показатели можно разделить на два типа. Одни из них являются экзогенными, заданными вне модели (или предварительно рассчитываемыми). Другие показатели являются рассчитываемыми и, при наличии вариантов их значений, оптимизируемыми в рамках модели. Условность этого деления состоит в том, что при решении конкретных частных задач могут рассматриваться в качестве переменных отдельные наборы показателей, соответствующие анализируемой проблеме. Остальные эндогенные показатели можно считать фиксированными.

Одним из основных экзогенных параметров модели является объем годовой потребности данного населенного пункта в котельно-печном топливе. Обозначим его Q . Он будет выражаться в т у.т. Величина потребности в топливе зависит от различных факторов, в том числе природно-метеорологических условий, численности населения, производственной специфики населенного пункта и др. Далее представлен один из возможных вариантов формирования величины потребности в топливе, чтобы задать приблизительную зависимость между объемом годовой потребности и количеством жителей населенного пункта.

В основном потребность в котельно-печном топливе населенных пунктов, особенно в условиях Сибири, связана с задачами отопления помещений. Обозначим объем потребности в котельно-печном топливе на отопление в целом Q_1 . Он состоит из объемов потребностей на отопление жилых Q_2 и нежилых Q_3 помещений:

$$Q_1 = Q_2 + Q_3. \quad (2.1)$$

Обозначим Q_4 потребность в котельно-печном топливе рассматриваемых населенных пунктов на неотопительные (например, санитарно-гигиенические, производственные) нужды. Будем считать, что электроснабжение населенного пункта производится из иных источников.

Отметим, что разделение топливоснабжения на отопительные и неотопительные нужды может быть несколько условно, поскольку нередко во время отопительных периодов потребление котельно-печного топлива на неотопительные

нужды (например, на пищуприготовление) совмещено с процессом отопления помещений.

Объем потребности в топливе Q можно условно связывать с численностью населения в этом населенном пункте, при заданной доле неотапительной потребности в топливе

$$q = \frac{Q_3 + Q_4}{Q}. \quad (2.2)$$

Потребность в топливе на отопление жилых помещений считаем прямо пропорциональной потребности в теплоэнергии

$$Q_2 = kG, \quad (2.3)$$

где k – коэффициент удельных расходов топлива на выработку одной единицы теплоэнергии; G – годовая потребность теплоэнергии на отопление жилья в рассматриваемом населенном пункте, т у.т.

Годовую потребность в теплоэнергии на отопление жилых помещений G в оценочных расчетах будем определять как произведение годового удельного расхода теплоты на отопление 1 м² жилой площади, нормы жилищной обеспеченности (м² общей площади/чел.) и численности населения. Согласно Приказу Минэкономки РФ от 06.05.1999 N 240 «Об утверждении Методических рекомендаций по формированию нормативов потребления услуг жилищно-коммунального хозяйства» [102] она определяется по формуле

$$G = G_g \cdot n \cdot A. \quad (2.4)$$

Здесь G_g – годовой удельный расход теплоты на отопление 1 м² площади, т у.т.; A – норматив жилищной обеспеченности, м²/чел.; n – численность населения, тыс. чел.

Годовой расход теплоты на отопление 1 м² площади жилых зданий определяется по формуле

$$G_g = g_h \cdot \frac{\hat{t} - t_{out}^m}{\hat{t} - t_{out}} 24 \cdot \bar{N}_\tau. \quad (2.5)$$

Здесь g_h – нормативное значение максимального часового расхода теплоэнергии в конкретном населенном пункте на отопление 1 м^2 площади жилых зданий (зависит от типа и этажности строения), т у.т./час; \hat{t} – расчетная температура внутреннего воздуха отапливаемых зданий, $^{\circ}\text{C}$; t_{out}^m – средняя температура наружного воздуха за отопительный период, $^{\circ}\text{C}$; t_{out} – расчетная температура наружного воздуха для проектирования отопления (средняя температура самой холодной пятидневки), $^{\circ}\text{C}$; 24 – продолжительность работы систем отопления в сутки, ч; \bar{N}_τ – средняя продолжительность отопительного периода, сут.

Расход теплоэнергии, необходимой на отопление, пропорционален разнице температур внутри и вне отапливаемого помещения. Температуру вне здания можно узнать из накопленных многолетних данных метеорологических наблюдений. Температура воздуха внутри зданий определяется согласно ГОСТ 30494–96 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях» [103]. Стандарт устанавливает параметры микроклимата в жилых, общественных, административных и бытовых зданиях. Например, согласно ГОСТ 30494–96 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях» оптимальная температура воздуха в разных помещениях жилых зданий варьируется от 16 до 26 $^{\circ}\text{C}$, в детских дошкольных учреждениях – от 19 до 23 $^{\circ}\text{C}$ и т.д. В представленных далее результатах расчетов принято значение температуры воздуха внутри здания равное 18 $^{\circ}\text{C}$. Согласно формуле (2.5), расход топлива на отопление в конкретный день пропорционален разнице между 18 $^{\circ}\text{C}$ и среднесуточной температурой наружного воздуха в этот день [12].

2.1.1 Природно-климатические характеристики, влияющие на расход теплоты на отопление

Согласно формуле (2.5) средний годовой удельный расход теплоты на отопление зависит от средней многолетней интегральной разницы температур за отопительный период внутри и вне здания

$$G_g = y\bar{B}, \quad (2.6)$$

где \bar{B} – средняя многолетняя интегральная разница температур за отопительный период внутри и вне здания;

$$y = \frac{g_h}{\hat{t} - t_{out}} \cdot 24. \quad (2.7)$$

Показатель \bar{B} рассчитывается исходя из располагаемых наблюдений зимних температур. Пусть $\tau = 1, \dots, T$ номера прошлых отопительных периодов с имеющимися по ним данными о среднезимних температурах. Здесь T – количество рассматриваемых отопительных периодов. Обозначим N_τ^j продолжительность в днях отопительного периода τ . В представленных далее расчетах считается, что отопительный период наступает после того, как в течение пяти суток подряд среднесуточная температура воздуха была ниже 8°C . Заканчивается отопительный период после того, как температура воздуха стала выше 8°C в течение пяти суток подряд.

Показатель интегральной разности температур за отопительный период τ соответствует величине

$$B_\tau = \sum_{\chi=1}^{N_\tau} (\hat{t} - t_{\tau\chi}), \quad \tau = 1, \dots, T. \quad (2.8)$$

Здесь \hat{t} – нормативное значение температуры внутри здания; $t_{\tau\chi}$ – средняя температура наружного воздуха в день χ отопительного периода τ .

Важными природно-климатическими характеристиками регионов являются средние за все рассматриваемые отопительные периоды показатели:

- интегральной разности температур

$$\bar{B} = \frac{1}{T} \sum_{\tau=1}^T B_\tau; \quad (2.9)$$

- продолжительности отопительного периода

$$\bar{N} = \frac{1}{T} \sum_{\tau=1}^T N_\tau; \quad (2.10)$$

- среднесуточной разности температур внутри и вне зданий за отопительный период

$$\bar{H} = \frac{\bar{B}}{\bar{N}}. \quad (2.11)$$

Результаты расчета показателей $\bar{B}, \bar{N}, \bar{H}$ по некоторым пунктам метеонаблюдений Урала, Сибири и Дальнего Востока представлены в таблице 2.1. Пункты метеонаблюдений в этой таблице упорядочены по мере убывания средней интегральной разности температур (от самого холодного пункта метеонаблюдений к самому теплему).

В излагаемых здесь расчетах использовались данные суточной температуры воздуха на метеорологических станциях России и бывшего СССР с 1910 по 2010 гг. [104].

Таблица 2.1 – Климатические характеристики отопительного периода по некоторым пунктам метеонаблюдений Урала, Сибири и Дальнего Востока

Пункт метеонаблюдений	Средняя интегральная разность температур, градусо-дни, \bar{B}	Продолжительность отопительного периода, дни, \bar{N}	Среднесуточная за отопительный период разность температур внутри и вне зданий, °С, \bar{H}
Чита	6954,21	236,69	29,40
Иркутск	6147,18	235,69	26,10
Томск	6051,20	232,45	26,07
Красноярск	5759,78	233,36	24,72
Хабаровск	5558,83	206,63	26,92
Екатеринбург	5342,35	225,81	23,69
Барнаул	5315,73	213,11	24,98
Владивосток	4381,55	196,24	22,35

Как видно из последних двух столбцов таблицы 2.1, среднесуточная разность температур внутри и вне здания и продолжительность отопительного периода располагаются почти в том же порядке, что интегральная разность температур. Имеющиеся исключения численно незначительны и относятся к районам с близкими величинами средней интегральной разности температур. Значительным исключением является только продолжительность отопительного периода в Хабаровске. Согласно данным, приведенным в таблице 2.1, средняя продолжитель-

ность отопительного периода в пункте метеонаблюдений с самой высокой средней интегральной разностью температур из рассматриваемых (в Чите) примерно в 1,2 раза превышает продолжительность отопительного периода в пункте метеонаблюдений с самой низкой средней интегральной разностью температур (во Владивостоке). Среднесуточная разность температур внутри и вне зданий в 1,3 раза в Чите выше, чем во Владивостоке. Интегральная разность температур различается почти в 1,6 раза.

Отметим, что рассмотренные три усредненные природно-климатические характеристики могут быть полезны не только для исследуемой здесь проблемы регулирования колебаний расхода топлива на отопление. Они представляют интерес для оптимизации затрат на теплоизоляцию зданий при выборе строительных нормативов, для выработки технических требований к системам теплоснабжения, определения условий проведения их ремонтных работ.

В таблице 2.2 представлены результаты расчетов по формулам (2.4)-(2.5) потребности в теплоэнергии для отопления жилых помещений для некоторых пунктов метеонаблюдений Урала, Сибири и Дальнего Востока.

Таблица 2.2. – Потребность в теплоэнергии для отопления жилых помещений для некоторых пунктов метеонаблюдений Урала, Сибири и Дальнего Востока

Пункт метеонаблюдений	Нормативное значение максимального часового расхода теплоэнергии в населенном пункте на отопление 1 м ² площади жилых зданий, т у.т./ч, g_h	Годовой расход теплоты на отопление 1 м ² площади, т у.т., G_g	Потребность в топливе на отопление поселка численностью населения 5000 человек, т у.т., G
Чита	0,0226	0,07	6058,32
Иркутск	0,0226	0,06	5211,37
Томск	0,0226	0,06	5093,96
Красноярск	0,0226	0,05	4849,08
Хабаровск	0,0213	0,06	5219,32
Екатеринбург	0,0226	0,05	4286,36
Барнаул	0,0216	0,05	4553,38
Владивосток	0,0207	0,05	4672,39

Из таблицы 2.2 видно, что потребность в топливе на отопление изменяется в основном синхронно со средней интегральной разностью температур.

Для определения величины годовой потребности в топливе на отопление населенного пункта Q может использоваться как нормативный подход, так и ретроспективный анализ данных по рассматриваемому населенному пункту. В идеале для получения более точных данных целесообразно использовать оба этих подхода.

2.1.2 Площадь энергетической плантации

Обозначим S как площадь сегмента энергетической плантации, на котором в данном году осуществляются лесозаготовки (выраженная в квадратных километрах). Эта площадь определяется по формуле

$$S = \frac{Q}{\beta}, \quad (2.12)$$

где Q – объем годовой потребности в топливе, т у.т.; β – продуктивность энергетической плантации, т у.т./км² за период времени t . Здесь t – количество сегментов плантации (равно количеству лет выращивания древесины). Площадь всей энергетической плантации определяется по формуле

$$S_{\text{пл}} = St. \quad (2.13)$$

Как отмечалось в главе 1, в качестве стартовой для расчетов ситуации будем рассматривать энергетическую плантацию в форме круга. Тогда средняя дальность грузоперевозок минимальна. Радиус такой плантации определяется по известной формуле:

$$r = \sqrt{\frac{S_{\text{пл}}}{\pi}}. \quad (2.14)$$

2.1.3 Описание базовой модели

Экономическая эффективность энергетических плантаций определяется как разность между стоимостью привозного топлива и стоимостью биотоплива с энергетических плантаций. Стоимость биотоплива, как отмечалось в разделе 1.6, определяется приведенными затратами на его производство, которые при выборе вариантов создания и функционирования энергетической плантации должны быть минимальны. Излагаемая далее в качестве базовой модель предназначена для минимизации приведенных затрат на топливоснабжение населенных пунктов биотопливом с энергетических плантаций.

Приведенные затраты будем рассматривать как функцию от вектора эндогенных параметров

$$C(x) = I(x) \cdot E_N + CO(x) + FC. \quad (2.15)$$

Здесь x – вектор эндогенных параметров модели (количество работников разных профессий, площадь энергетической плантации, длины дорог разных категорий, количества тракторов, автомобилей, специальных механизмов, устройств и строений разных типов, годовой объем потребности в моторном топливе и др.); $I(x)$ – капитальные затраты, млн руб.; $CO(x)$ – среднегодовые текущие затраты, млн руб./год; E_N – коэффициент эффективности капиталовложений; FC – постоянные затраты, не зависящие от объемов производства.

Отметим, что традиционно при экономическом анализе [105; 106] важное значение придается делению приведенных затрат на постоянные FC (минимально необходимые для создания и функционирования энергетической плантации) и переменные затраты VC (зависящие от объема производства). Из (2.15) следует

$$VC(x) = I(x) \cdot E_N + CO(x). \quad (2.16)$$

Базовая модель минимизации приведенных затрат на топливоснабжение населенных пунктов с энергетических плантаций:

$$C(x) \rightarrow \min \quad (2.17)$$

при условиях

$$R(x) = Q, \quad (2.18)$$

$$x \in X, \quad (2.19)$$

где $R(x)$ – функция, характеризующая объем производства биотоплива в зависимости от значений эндогенных параметров модели; X – множество векторов E^n допустимых значений переменных по другим (кроме (2.19)) ограничениям. Здесь E^n – евклидово пространство.

Условие (2.18) задает балансовое ограничение на объем производства топлива (объем производства должен быть равен заданной величине потребности в топливе Q). Балансовое условие (2.18) отдельно выделено среди ограничений модели, поскольку одно из исследований на базе данной модели состоит в изучении влияния объема производства топлива на величину приведенных затрат и других показателей затрат, необходимых для создания и функционирования энергетических плантаций.

Остальные ограничения модели задают множество X . Они включают условие неотрицательности всех значений переменных, условие целочисленности значений некоторых переменных, условие использования только однотипной техники каждого вида (тракторы, грузовые автомобили, оборудование для рубки дров, оборудование для посадки саженцев). Введение последнего ограничения обусловлено необходимостью упрощения и удешевления технического обслуживания. Кроме того, существует набор условий, устанавливающих связи между отдельными эндогенными и экзогенными показателями модели. Используемые в этих условиях функции от переменных модели позволяют получить формулы для последовательного расчета значений всех переменных через значения экзогенных параметров.

Приведем полные перечни экзогенных и эндогенных параметров.

1. Экзогенными параметрами модели являются следующие.

1.1. Базовые показатели, характеризующие энергетическую плантацию:

t – срок созревания древесины, выраженный в годах (равен количеству сегментов), количество лет;

Q – объем годовой потребности в топливе, т у.т.;

β – продуктивность энергетической плантации, т у.т./км².

1.2. Показатели удельных капитальных затрат:

p_m – стоимость строительства 1 км грузосборочной магистрали, млн руб.;

p_{η} – стоимость строительства 1 км дорожных веток, млн руб.;

p_{IL} – цена одной машины для посадки саженцев, млн руб.;

p_{IF} – цена одного процессора для рубки дров, млн руб.;

p_{IT} – цена одного трактора, млн руб.;

p_{IC} – цена одного автомобиля, млн руб.;

p_{IS} – стоимость строительства одного м³ склада, млн руб.;

p_{IG} – стоимость строительства 1 м² парника, млн руб.

1.3. Показатели удельных текущих среднегодовых затрат:

p_{CW} – среднегодовой размер оплаты труда на 1 чел. (включая налоги и отчисления в негосударственные фонды), млн руб.;

p_{KD} – стоимость моторного топлива, млн руб.

1.4. Характеристики технических устройств:

T – ширина колеи трактора, км;

v_{IT} – средняя скорость трактора, км/ч;

w_{IT} – расход топлива трактором с работающим древоколом, л/моточас;

w_{IC} – расход топлива грузовым автомобилем, л/100 км;

v_{IL} – производительность машины для посадки саженцев, шт/ч;

v_{IF} – производительность процессора для рубки дров, м³/ч;

θ – объем кузова автомобиля, м³;

v_{IC} – средняя скорость грузового автомобиля, км/ч.

1.5. Нормативные показатели:

E_N – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений (во всех расчетах в диссертации используется значение $E_N = 0,12$), 1/год.

- ε – расстояние между дорожными ветками, км;
- ν – порядковый номер дорожной ветки (от центра энергетической плантации);
- r_{min} – минимальный радиус плантации, при котором целесообразно строительство грузосборочной магистрали, км;
- χ – плотность посадки саженцев, шт/км²;
- ω_{IL} – количество рабочих часов машины для посадки саженцев за посадочный период, ч;
- ω_{IF} – количество рабочих часов процессора для рубки дров за заготовительный период, ч;
- ω_{IC} – среднее количество часов транспортировки биотоплива, ч;
- k – коэффициент перевода условного топлива (т у.т.) в объем древесного топлива (м³);
- $S_{\text{ч}}$ – удельная площадь парника, необходимая для выращивания черенков, км²/черенок;
- ϑ – коэффициент увеличения (во сколько раз) общего числа работающих относительно количества рабочих основных специальностей (водителей автомобилей и трактористов).

2. Эндогенными параметрами в модели являются следующие.

2.1. Промежуточные показатели:

S – площадь сегмента энергетической плантации, км²;

$S_{\text{шт}}$ – площадь энергетической плантации, км²;

r – радиус энергетической плантации, км;

AL – средняя дальность грузоперевозок, км.

2.2. Количественные показатели для определения капитальных затрат:

l_m – сумма длин грузосборочных магистралей, км;

l_{η} – сумма длин дорожных веток, км;

KL – количество машин для посадки саженцев, ед;

KF – количество процессоров для рубки дров, ед;

KS – объем годового производства топлива, выраженный в m^3 , m^3 ;

KT – количество тракторов, ед;

KC – количество грузовых автомобилей, ед;

KG – площадь парников для выращивания саженцев, km^2 .

2.3. Количественные показатели для определения текущих (среднегодовых) затрат:

CW – количество сотрудников разных специальностей, чел.;

KD – среднегодовое необходимое количество моторного топлива, л.

Отметим, что приведенное выше описание переменных дано применительно к одному типу техники. Выбор типа техники осуществляется путем перебора всех возможных вариантов технических средств. Выбирается такой набор технических средств, при котором приведенные затраты на создание и функционирование энергетической плантации будут минимальны.

Целевая функция $C(x)$ этой модели линейная с неотрицательными коэффициентами. В приводимых далее расчетах приведенные затраты определяются по формуле:

$$C(x) = (p_m l_m + p_\eta l_\eta + p_{IL} KL + p_{IF} KF + p_{IT} KT + p_{IC} KC + p_{IS} KS + p_{IG} KG \cdot E_N + (p_{CW} CW + p_{KD} CD) + FC. \quad (2.20)$$

Определим функцию $R(x)$ как минимум среди объемов биотоплива, который можно произвести на рассматриваемой площади одного сегмента энергетической плантации и который можно разместить в складах

$$R(x) = \min \left(\beta \cdot S, \frac{1}{\kappa} \cdot KS \right). \quad (2.21)$$

Для этой функции условие (2.18) равносильно следующим двум равенствам:

$$S = \frac{1}{\beta} \cdot Q, \quad (2.22)$$

$$KS = \kappa \cdot Q. \quad (2.23)$$

Приведем функциональные связи, которые являются ограничениями, определяющими множество X .

1. Связь площади энергетической плантации с площадью одного сегмента и количеством сегментов (количеством лет, за которое созревает древесина)

$$S_{\text{пл}} - S \cdot t = 0. \quad (2.24)$$

2. Связь радиуса энергетической плантации и ее площади (для исходной ситуации, когда плантация представлена в виде круга)

$$r^2 - \frac{S_{\text{пл}}}{\pi} = 0. \quad (2.25)$$

3. Связь средней дальности грузоперевозок с радиусом энергетической плантации

$$AL - \frac{2}{3}\pi r^3 = 0. \quad (2.26)$$

4. Связь суммы длин грузосборочных магистралей с радиусом энергетической плантации и расстоянием между дорожными ветками

$$l_m - tr = 0. \quad (2.27)$$

5. Связь суммы длин дорожных веток с радиусом энергетической плантации

$$l_{\eta} - \pi \varepsilon d(d+1), d = \left\lfloor \frac{r}{\varepsilon} \right\rfloor \quad (2.28)$$

Здесь и далее выражение $\lfloor \alpha \rfloor$ для вещественного α означает минимальное целое число не меньше α . Для рассматриваемой далее модификации модели с непрерывными переменными используется процедура интерполяции.

6. Количество машин для посадки саженцев зависит от площади сегмента плантации и требуемой плотности посадки, а также от производительности устройства и количества рабочих часов, за которое работа по посадке должна быть выполнена

$$KL - \frac{S \cdot \chi}{v_{IF} \cdot \omega_{IF}} \geq 0. \quad (2.29)$$

Здесь и далее используется знак «больше или равно», так как значения количества единиц техники (количество машин для посадки саженцев в данном случае) обязательно целочисленны (для обсуждаемой далее модификации модели с непрерывными переменными знак неравенства меняется на знак равенства).

7. Связь между количеством процессоров для рубки дров и объемом годового производства топлива (выраженном в м³) с учетом заданных производительности процессора и количеством рабочих часов, за которое древесина должна быть измельчена

$$KF - \frac{KS}{\nu_{IF} \cdot \omega_{IF}} \geq 0. \quad (2.30)$$

8. Приводимое ниже условие означает, что количество тракторов определяется максимальным значением двух потребностей в них: количеством процессоров для рубки дров и количеством устройств для посадки саженцев. Поскольку тракторы необходимы для работы процессоров для рубки дров и машин для посадки саженцев (которые работают в разные сезоны), то количество тракторов должно быть не меньше количества любого из этих двух устройств.

$$KT - \max\left(\frac{S \cdot \chi}{\nu_{IL} \cdot \omega_{IL}}, \frac{KS}{\nu_{IF} \cdot \omega_{IF}}\right) \geq 0. \quad (2.31)$$

9. Связь между количеством грузовых автомобилей, объемом годового производства топлива (выраженном в м³) и средней дальностью грузоперевозок с учетом заданных средней скорости автомобиля, количеством часов, за которое вся собранная биомасса должна быть транспортирована до склада и объемом кузова автомобиля

$$KC - \frac{KS \cdot AL}{\nu_{IC} \cdot \omega_{IC} \cdot \theta} \geq 0. \quad (2.32)$$

10. Связь площади парников для выращивания саженцев с площадью одного сегмента плантации с учетом площади, необходимой для выращивания одного черенка, и плотности посадки саженцев на энергетической плантации

$$KG - S_{\text{ч}} \cdot S \cdot \chi = 0. \quad (2.33)$$

11.Связь общего количества работающих с количеством тракторов и грузовых автомобилей (через необходимое количество водителей) с учетом коэффициента увеличения числа работающих (административный и обслуживающий персонал) относительно количества рабочих основных специальностей (водителей автомобилей и трактористов)

$$KW - \vartheta(KT + KC) = 0. \quad (2.34)$$

12.Связь количества моторного топлива, необходимого для функционирования техники через величины расхода топлива автомобилем и трактором с работающими на нем установками при заданных площади плантации, объеме биотоплива и технических характеристиках трактора

$$KD - \frac{S}{T \cdot \nu_{IT}} w_{IT} - AL \frac{w_{IC}}{100} \frac{KS}{\theta} = 0. \quad (2.35)$$

2.1.4 Свойства базовой модели

Все коэффициенты целевой функции (2.20) неотрицательны. Поэтому оптимальное решение модели будет Парето-оптимальным решением многокритериальной задачи минимизации при условиях (2.18)-(2.19) переменных с положительными коэффициентами в функции (2.21). Из ограничений (2.24)-(2.35) видно, что увеличение переменных, не входящих в целевую функцию (то есть с нулевыми коэффициентами в ней), не позволяет уменьшать (в условиях в виде равенства увеличивать) значения переменных, входящих в целевую функцию (с положительными коэффициентами в ней). Поэтому указанное выше свойство Парето-оптимальности распространяется на все переменные.

Отметим, что в рамках условий (2.18)-(2.19), отсутствует возможность взаимозаменяемости ресурсов, чем обуславливается единственность Парето-оптимального решения в указанной многокритериальной задаче.

Из ограничений (2.24)-(2.35) и указанного свойства Парето-оптимальности вытекают формулы для расчета количественных и стоимостных показателей, приводимых далее в разделах 2.2 и 2.3. Несложно убедиться в справедливости обрат-

ного утверждения: рассчитываемые в разделах 2.2 и 2.3 показатели будут совпадать с оптимальными решениями задачи (2.17)-(2.19) при изложенных здесь ограничениях и целевой функции для одного и того же набора технических средств.

Под оптимизацией понимается выполнение двух процедур для расчетов на модели. Во-первых, процедуры перебора видов технических устройств. Во-вторых, процедуры расчета всех переменных и составляющих целевой функции модели при заданном наборе видов технических устройств. Подробно алгоритм расчета всех переменных и составляющих целевой функции представлен в разделах 2.2 и 2.3. Этот алгоритм учитывает, что все коэффициенты целевой функции неотрицательны, оптимальное решение модели будет Парето-оптимальным для многокритериальной задачи минимизации всех ресурсов.

Некоторые особенности модели.

1. Нелинейность некоторых зависимостей при определении множества X . Среди ограничений (2.24)-(2.35) есть линейные и нелинейные. К линейным ограничениям относятся (2.24), (2.27)-(2.35). К нелинейным – (2.25); (2.26). Отметим, что нелинейность зависимостей не является принципиальным усложнением для реализации базовой модели (2.17)-(2.19), поскольку процесс реализации базовой модели представляется как последовательность расчетов отдельных показателей: расчеты объемов отдельных видов работ, выбора под эти объемы конкретных технических средств из наборов возможных, расчет количества требуемых работников, их суммарной ежегодной заработной платы, требуемого ежегодного объема моторного топлива и т.д.

2. Дискретность некоторых переменных. Таковыми являются количества используемых технических средств (в т.ч. тракторов, автомобилей конкретного типа), количество работников. Дискретность значений переменных в большей мере усложняет исследование и анализ решений получаемых на модели создания и функционирования энергетических плантаций, поскольку это делает невозможным непосредственное применение процедур, применяемых для исследования непрерывных и дифференцируемых функций.

3. Неопределенность значений отдельных экзогенных показателей и необходимых функциональных зависимостей. Можно выделить три вида таких неопределенностей.

Первый вид неопределенностей связан с действием случайных факторов, вызванных, в том числе, меняющимися год от года природно-климатическими условиями. В каждом конкретном году фактическая потребность в топливе может отклоняться от расчетного среднего ожидаемого уровня, в том числе потому, что могут отклоняться от среднего уровня обе составляющие показателя интегральной разности температур – продолжительность отопительного периода и средняя температура воздуха за отопительный период. Случайные отклонения, связанные с воздействием природно-метеорологических, биологических и человеческого факторов, имеют место и в производстве биотоплива. Для противодействия возможным ситуациям возникновения дефицита топлива, необходимо создание специальных мер по обеспечению надежности топливоснабжения с энергетических плантаций. Этот вопрос будет рассмотрен подробно в главе 3.

Второй вид неопределенности связан с недостаточностью изучения некоторых важных зависимостей, например, динамики прироста биомассы в конкретных природных условиях. Необходимо использовать правдоподобные гипотезы в некоторых разумных диапазонах значений параметров.

Третий вид неопределенностей связан с оценкой существующих технико-экономических показателей – характеристик используемого оборудования, цен на оборудование, моторное топливо и др. Необходимо использование прогнозов и экспертных оценок, методов использующих варьирование показателей в заданных диапазонах их ожидаемых значений.

2.1.5 Модификации базовой модели

2.1.5.1 Модель выбора оптимального сочетания биотоплива с энергетических плантаций и привозного топлива. Эта модель имеет вид:

$$C(x) + p_L L \rightarrow \min, \quad (2.36)$$

при ограничениях

$$R(x) + L \geq Q, \quad (2.37)$$

$$L \geq 0 \quad (2.38)$$

и условия (2.19). Здесь L – объем использования альтернативного топлива, т у.т.; p_L – заданная цена привозного топлива, включающая расходы на транспортировку и хранение, млн руб./т у.т.

Данную модель можно рассматривать как развитие модели (2.17)-(2.19) путем добавления новой переменной.

2.1.5.2 Модели с непрерывными переменными. Для преодоления трудностей, связанных с целочисленностью некоторых переменных, используется модификации базовой модели и модели выбора оптимального сочетания биотоплива и привозного топлива, в которых исключаются условия целочисленности. В этих модификациях введенные при задании множества X ограничения неравенств (2.29)-(2.32) заменяются на равенства.

Для оправдания модификации моделей с непрерывными переменными может служить идея частичной загрузки технических средств за счет привлечения на арендных принципах их со стороны (или за счет сдачи в аренду технических средств, принадлежащих предприятию, обслуживающему энергетическую плантацию).

Ниже приводится описание модификации базовой модели (2.17)-(2.19) с непрерывными переменными. На основе этой модификации рассмотрим отдельные аспекты исследования эффективности энергетических плантаций, в том числе выбор оптимального сочетания биотоплива с энергетических плантаций и привозного топлива (на что изначально нацелена модель (2.36)-(2.38)). В этой связи, в рассматриваемой далее модификации вместо используемого в правой части равенства (2.18) параметра объема потребности в топливе Q , будем использовать варьируемый параметр объема производства топлива на энергетической плантации, который обозначим \bar{R} .

Обозначим

$$\bar{\bar{C}}(\bar{\bar{R}}) = C(x(\bar{\bar{R}})) \quad (2.39)$$

зависимость приведенных затрат на энергетической плантации от объемов производства биотоплива на ней при оптимальном функционировании энергетических плантаций. Вектор–функция $x(\bar{\bar{R}})$ является решением задачи

$$C(x) \rightarrow \min \quad (2.40)$$

$$R(x) = \bar{\bar{R}}, \quad (2.41)$$

$$x \in \bar{\bar{X}}, \quad (2.42)$$

В (2.42), в отличие от (2.19), множество X заменено на множество $\bar{\bar{X}}$, что выражает факт отказа от условия целочисленности переменных и произошедших в связи с этим изменений условий неравенств (2.29)-(2.32) на равенства.

Функция $\bar{\bar{C}}(\bar{\bar{R}})$ является возрастающей, так как с увеличением объема производства топлива должны расти практически все составляющие затрат на его производство. Многие составляющие этих затрат, в частности, затраты на оплату труда и моторное топливо возрастают нелинейно при увеличении объема производства $\bar{\bar{R}}$.

В соответствии с (2.15) зависимость приведенных затрат от объемов производства $\bar{\bar{C}}(\bar{\bar{R}})$ разделим на две составляющие

$$\bar{\bar{C}}(\bar{\bar{R}}) = FC + VC(\bar{\bar{R}}). \quad (2.43)$$

Здесь $VC(\bar{\bar{R}})$ – затраты, зависящие от объемов производства, FC – постоянные затраты, не зависящие от объемов производства. Составляющая $VC(\bar{\bar{R}})$ определяется путем вычитания значения $\bar{\bar{C}}(\bar{\bar{R}})$, величины FC .

Важное значение для экономического анализа имеют показатели средних на единицу продукции затрат. Средние приведенные затраты обозначим

$$AC(\bar{\bar{R}}) = \frac{\bar{\bar{C}}(\bar{\bar{R}})}{\bar{\bar{R}}}. \quad (2.44)$$

Соответственно, средними постоянными и средними переменными затратами будут называться величины

$$AFC(\bar{R}) = \frac{FC}{\bar{R}}, \quad (2.45)$$

$$AVC(\bar{R}) = \frac{VC(\bar{R})}{\bar{R}}. \quad (2.46)$$

Из (2.43) следует, что средние приведенные затраты являются суммой средних постоянных и средних переменных затрат

$$AC(\bar{R}) = AFC(\bar{R}) + AVC(\bar{R}). \quad (2.47)$$

Функция средних постоянных затрат является монотонно убывающей. Функция средних переменных затрат сначала убывает, но начиная с некоторого объема производства, начинает возрастать с ростом объема производства. Это обусловлено тем, что с ростом объема производства увеличиваются затраты на единицу продукции.

Важной для экономического анализа характеристикой являются предельные затраты

$$MC(\bar{R}) = \frac{\Delta C(\bar{R})}{\Delta R}. \quad (2.48)$$

Предельные затраты – прирост затрат на производство дополнительной единицы продукции. Поскольку с ростом объема производства возрастают лишь переменные затраты, можно записать

$$MC(\bar{R}) = \frac{\Delta VC(\bar{R})}{\Delta R}. \quad (2.49)$$

На рисунке 2.1 представлена принципиальная зависимость предельных, средних постоянных, средних переменных и приведенных затрат от объема производства. Согласно микроэкономической теории, с ростом объема производства предельные затраты должны сначала снижаться, достигать своего минимума, затем начать возрастать.

Важное значение для экономического анализа имеет точка пересечения кривых средних полных и предельных затрат R_{min} . Эта точка является минимумом средних полных затрат. Средние приведенные затраты в этой точке показывают при какой минимальной цене привозного топлива еще возможно эффективное использование энергетических плантаций. Если цена привозного топлива ниже этого значения, то ни при каких условиях (т.е. при любых объемах производства) энергетические плантации экономически не эффективны.

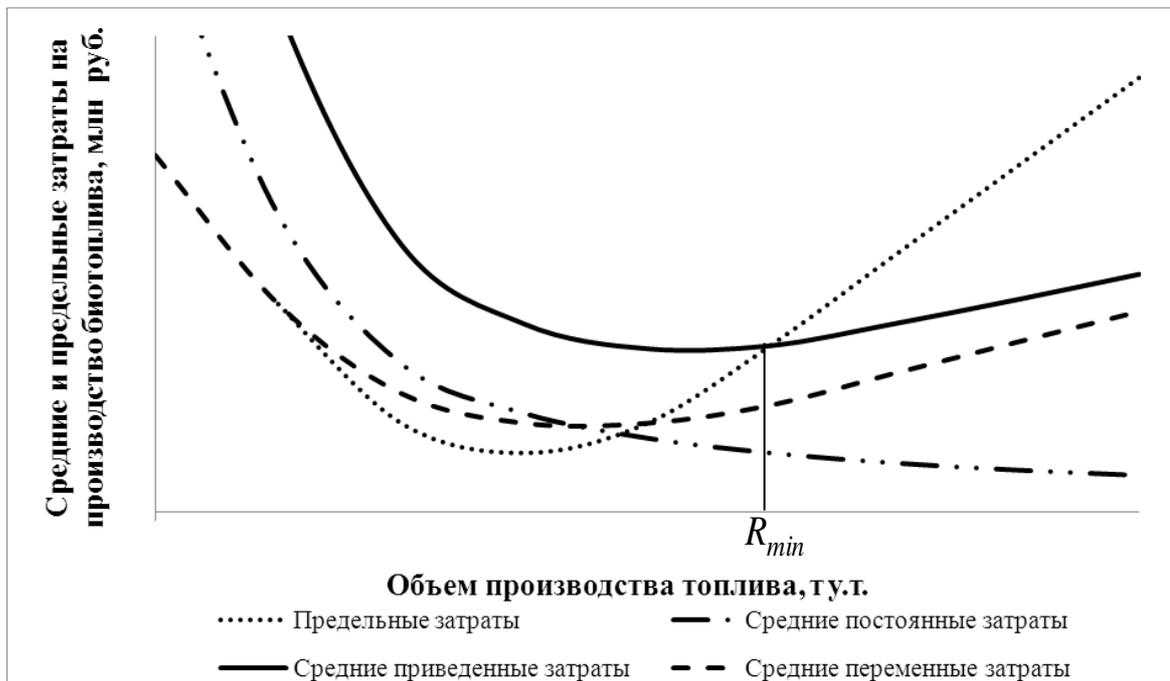


Рисунок 2.1 – Зависимость предельных, средних переменных, средних постоянных и средних полных затрат от объема производства

Для оптимального решения модификации модели (2.36)-(2.38) с непрерывными переменными возможны два случая. Если $L > 0$, то предельные затраты, равны цене альтернативного топлива [106]

$$\overline{MC}(\overline{R}) = P_L. \quad (2.50)$$

Если $L = 0$ (альтернативное топливо не используется), то выполняется неравенство

$$\overline{MC}(\overline{R}) \leq P_L. \quad (2.51)$$

В (2.50), (2.51) \bar{R} – оптимальный объем производства биотоплива на энергетических плантациях для модификации модели (2.36)-(2.38) с непрерывными переменными.

2.1.5.3 На основе модификаций базовой модели могут исследоваться многие частные задачи в организации функционирования энергетических плантаций. Приведем некоторые из них.

Определение оптимального возраста заготавливаемой древесины (количества сегментов). Период прироста биомассы на энергетических плантациях можно разделить на три этапа. На первом этапе происходит увеличение годового прироста биомассы. Он длится до того момента времени, когда прирост биомассы за единицу времени (в год) максимален. До этого момента времени вырубка древесины нецелесообразна. На втором этапе прирост биомассы за единицу времени (в год) снижается, однако остается выше среднегодового. На третьем этапе среднегодовой прирост биомассы снижается. На этом этапе выращивание древесины не имеет смысла.

Вырубка древесины должна происходить в период, когда прирост биомассы за единицу времени (в год) снижается, но остается выше среднегодового. Конкретное значение оптимального срока выращивания древесины в годах должно быть целочисленным и зависеть от конкретных технико-экономических показателей энергетической плантации, т.е. должно рассчитываться с помощью рассматриваемой модели.

От сроков выращивания древесины зависит площадь сегментов энергетической плантации, которая должна обеспечивать потребность в топливе каждый год. С одной стороны, чем больше срок созревания древесины, тем большее количество топлива будет приходиться на единицу площади энергетической плантации, тем меньше потребуется площадь сегмента для обеспечения заданной потребности в топливе. С другой стороны, уменьшение возраста заготавливаемой древесины ведет к уменьшению числа сегментов энергетической плантации.

Выбор видов древесины, при котором заданный объем производства биомассы обеспечивается с минимальными затратами.

Разные деревья, в том числе семейства ивовых (*Salicaceae*), имеют различные динамики прироста биомассы. В зависимости от этих динамик можно определить оптимальные затраты на энергетические плантации разных видов деревьев и сравнить их между собой.

Для решения этой задачи, как и предыдущей, необходимо проведение цикла экспериментальных исследований по определению динамики прироста биомассы разных видов деревьев в конкретных природно-климатических условиях.

2.2 Методика расчета капитальных затрат в создание энергетических плантаций

Из ограничений (2.24)-(2.33) и отмеченных свойств базовой модели вытекает приводимый ниже алгоритм расчета капитальных вложений для создания энергетической плантации.

Капитальные затраты включают следующие составляющие: строительство дорожной сети (грузосборочных магистралей и дорожных веток), складов топлива и парников для выращивания нового посадочного материала, приобретение тракторов, грузовых автомобилей и процессоров для производства дров. Они определяются по формуле:

$$INV = IR + IF + IT + IC + IS + IG + IL, \quad (2.52)$$

где IR – инвестиции в строительство дорожной сети, млн руб.; IF – инвестиции в приобретение процессоров для рубки дров, млн руб.; IT – инвестиции в приобретение тракторов, млн руб.; IC – инвестиции в приобретение грузового автотранспорта, млн руб.; IS – инвестиции в строительство складов, млн руб.; IG – инвестиции в строительство парников, млн руб.; IL – инвестиции в приобретение машин для посадки саженцев, млн руб.

1.1. Строительство дорожной сети.

2.2.1. Размер инвестиций в строительство дорожной сети определяется по формуле

$$IR = p_m l_m + p_\eta l_\eta. \quad (2.53)$$

2.2.1.1. Грузосборочная магистраль представляет собой медиану сектора и существует только в том случае, если $r > r_{min}$, в противном случае она строится по принципу дорожной ветки (соответственно инвестиции в ее строительство снижаются)

$$l_m = tr, \text{ при } r \geq r_{min}. \quad (2.54)$$

2.2.1.2. Сумма длин дорожных веток определяются по формуле

$$l_\eta = \pi \varepsilon d (d + 1), \text{ при } r \geq r_{min}, d = \left\lfloor \frac{r}{\varepsilon} \right\rfloor \quad (2.55)$$

и

$$l_\eta = \pi \varepsilon d (d + 1) + tr, \text{ при } r < r_{min}, d = \left\lfloor \frac{r}{\varepsilon} \right\rfloor \quad (2.56)$$

В случае модификации базовой модели с непрерывными переменными в этих формулах используется вещественное значение $d = r / \varepsilon$.

2.2.2. Строительство складов.

Для хранения заготовленной биомассы требуются склады, которые должны полностью вмещать заготавливаемое биотопливо. Инвестиции в строительство складов определяются по формулам

$$IS = p_{IS} \cdot KS, \quad (2.57)$$

$$KS = \kappa Q. \quad (2.58)$$

2.2.3. Приобретение машин для посадки саженцев. Машины для посадки саженцев должны обладать следующими минимальными свойствами: рабочая скорость должна составлять не менее 3 км/ч, необходимая мощность трактора – не менее 60 кВт, минимальная глубина посадки – 35 см.

При сравнительном анализе машин для этой операции была выбрана машина для посадки саженцев плодовых деревьев и кустарников МПС–2М. Одной машины МПС–2М достаточно для посадки 5000 саженцев в день.

Объем инвестиций, требуемых для приобретения машин для посадки саженцев, определяется по формуле

$$IL = p_{IL} \cdot KL, \quad (2.59)$$

где количество машин для посадки саженцев определяется по правилу

$$KL = \left[\frac{S \cdot \chi}{\iota_{IL} \cdot \omega_{IL}} \right]. \quad (2.60)$$

Здесь и далее для простоты изложения при обозначении количества единиц техники разного типа не указывается индекс.

2.2.4. Процессоры для производства дров. Для измельчения биомассы необходимо специальное оборудование. Оно должно обладать следующими минимальными свойствами: мощность – не менее 10 кВт, необходимая мощность трактора – не менее 60 кВт, минимальный диаметр распиливаемого бревна – 35 см.

При сравнительном анализе рубильных машин для производства дров, был выбран тракторный процессор для производства дров РСА 380 российского производства. Его производительность может достигать 10–12 м³ колотых дров в час.

Объем инвестиций, требуемых для приобретения процессоров для производства дров, определяется по формуле

$$IF = p_{IF} \cdot KF, \quad (2.61)$$

где количество процессоров определяется по правилу

$$KF = \left[\frac{KS}{\iota_{IF} \cdot \omega_{IF}} \right]. \quad (2.62)$$

2.2.5. Для функционирования машин для посадки саженцев и рубильного оборудования необходимы тракторы. При выборе посадочного и рубильного оборудования минимальной необходимой мощностью трактора была установлена 60 кВт. В результате сравнительного анализа в качестве рекомендуемого выбран трактор МТЗ 80.1 Беларусь.

Объем инвестиций, требуемых для приобретения тракторов, определяется по формуле

$$IT = p_{IT} \cdot KT, \quad (2.63)$$

где количество тракторов определяется по правилу

$$KT = \max \left(\left[\frac{S \cdot \chi}{\iota_{IL} \cdot \omega_{IL}} \right], \left[\frac{KS}{\iota_{IF} \cdot \omega_{IF}} \right] \right). \quad (2.64)$$

2.2.6. Автомобильный транспорт. Для транспортировки заготовленной биомассы, а также саженцев, удобрений и прочих необходимых материалов и инструментов необходимы грузовые автомобили.

В результате сравнительного анализа для транспортировки биотоплива был выбран автомобиль «КамАЗ 45143». Это универсальный самосвал активно применяется в сельском хозяйстве, выгодно отличается небольшой стоимостью, высокой степенью надежности и маневренности.

Объем инвестиций, требуемых для приобретения грузовых автомобилей, определяется по формуле

$$IC = p_{IC} \cdot KC, \quad (2.65)$$

где количество грузовых автомобилей определяется по правилу

$$KC = \left[\frac{AL \cdot KS}{\iota_{IC} \cdot \omega_{IC} \cdot \theta} \right]. \quad (2.66)$$

2.2.7. Строительство парников для выращивания нового посадочного материала.

Для выращивания саженцев необходимы парники, которые представляют собой малогабаритное строение для защиты растений от воздействия неблагоприятных погодных условий. Инвестиции в их строительство определяются по формуле

$$IG = p_{IG} \cdot KG, \quad (2.67)$$

где площадь парников определяется по правилу

$$KG = S_{\text{ч}} \cdot S \cdot \chi. \quad (2.68)$$

2.3 Методика расчета ежегодных текущих затрат на функционирование энергетических плантаций

Из ограничений (2.24), (2.26), (2.34), (2.35) и свойств базовой модели вытекает приводимый ниже алгоритм расчета текущих среднегодовых затрат на функционирование энергетической плантации.

Ежегодные текущие затраты состоят из затрат на оплату труда и затрат на моторное топливо

$$CO = CS + CD. \quad (2.69)$$

2.3.1. Затраты на оплату труда зависят от количества тракторов и автомобилей. Рассчитываются по формуле

$$CS = p_{CW} \cdot KW, \quad (2.70)$$

где общее количество работающих определяется по правилу

$$KW = \vartheta(KT + KC). \quad (2.71)$$

2.3.2. Расходы на моторное топливо определяются произведением цены моторного топлива на требуемый объем топлива

$$CD = p_{KD} \cdot KD \quad (2.72)$$

Требуемый объем топлива состоит из расходов на топливо, необходимое для тракторов (с установленными на них машин для посадки саженцев и процессоров для рубки дров) и грузовых автомобилей с учетом порожних пробегов:

$$KD = KD_{IT} + KD_{IC}. \quad (2.73)$$

2.3.2.1. Трактор работает вместе с установленными на него процессором для рубки дров, либо машиной для посадки саженцев. Поэтому расстояние, пройденное трактором за год, равно отношению площади одного сегмента плантации к ширине колеи трактора. Количество дизельного топлива для работы трактора:

$$KD_{IT} = \frac{S}{T \cdot \nu_{IT}} w_{IT}. \quad (2.74)$$

2.3.2.2. Количество моторного топлива для автомобилей рассчитывается на основе количества рейсов, которое должен сделать автомобиль для вывоза всего

биотоплива, собранного за год (исходя из объема кузова автомобиля), и среднего расстояния, которое автомобиль проходит за один рейс

$$KD_{IC} = AL \frac{w_{IC}}{100} \frac{KS}{\theta}. \quad (2.75)$$

2.4 Экспериментальные исследования на модели анализа эффективности энергетических плантаций

В данном разделе будут представлены результаты экспериментальных исследований на описанной выше базовой модели и ее модификациях применительно к ценовым и природно-метеорологическим условиям Иркутской области. Оценим влияние на эффективность энергетических плантаций трех факторов: величины производства топлива, стоимости привозного топлива и дальности грузоперевозок.

Климатические параметры, входящие в формулу (2.4), принимаются на основе данных местных метеорологических служб, либо по СНиП 23–01–99 «Строительная климатология» [107]. Для Иркутской области $t_{out} = -39^{\circ}\text{C}$, $t_{out}^m = -8,06^{\circ}\text{C}$, $\bar{N}^j = 238$ суток [104]. Максимальный расход тепловой энергии на отопление принят на основании Приказа Минэкономки РФ от 06.05.1999 N 240 «Об утверждении Методических рекомендаций по формированию нормативов потребления услуг жилищно-коммунального хозяйства». Для Иркутской области он составляет 158 Ккал/час (или 0,02 т у.т./ч) [102].

Предполагаем, что доля потребности в топливе не связанная с отоплением жилых помещений составляет 0,25. Отметим, что в этом случае согласно формулам (2.3)-(2.6) в природно-метеорологических условиях Иркутской области потребность в топливе для населенного пункта численностью 1000 человек составит около 1300 т у.т., 5000 человек – 6500 т у.т., 10000 человек – 13000 т у.т. Подробные данные о связи между потребностью в топливе (которая в том числе зависит

от численности населения) и размером энергетической плантации представлены в Приложении В.

Для оценки экономической эффективности энергетических плантаций используем следующие входные параметры. Стоимость строительства 1 км грузосборочной магистрали принята равной 0,2 млн руб., дорожных веток – 0,1 млн руб. В расчетах расстояние между постоянными дорожными ветками принято равным 1 км. Средняя стоимость дровокольного комплекса «ЗУБР–ПРО» составляет 0,6 млн руб., машины для посадки саженцев МПС–1 «Ласточка» – 0,2 млн руб., грузового автомобиля КАМАЗ 4310 (самосвал) – 2,9 млн руб. (топливопотребление грузового автомобиля 30 л/100 км., средняя скорость – 50 км/ч, объем кузова – 19 м³), трактора МТЗ 80.1 Беларусь равна 0,8 млн руб. (в расчетах ширина колеи трактора принята равной 2 м, средняя скорость трактора – 10 км/час, топливопотребление трактора с работающим дровоколом – 10 л/моточас). Стоимость строительства складов оценено в 0,0001 млн руб./м³, строительства парников – 0,00005 млн руб./м². В расчетах размер оплаты труда (включая налоги, страховые взносы и другие обязательные платежи) на одного человека принят равным 0,02 млн руб./месяц. Стоимость 1 л дизельного топлива принята равной 0,000035 млн руб.

В качестве привозного топлива рассматривается уголь. Его стоимость в крупнейших месторождений Иркутской области и на сопредельных территориях (Черемховское, Тулунское, Жеронское, Бородинское месторождения) варьируется от 1200 до 1800 руб./т. Цену 1 т у.т. угля с учетом калорийности можно считать равной около 2000 руб. Конечная цена угля складывается из цены самого продукта и его доставки до места использования. Так как стоимость транспортировки угля от места добычи до места использования рассчитать невозможно, не зная полных исходных данных, предполагаем, что стоимость перевозки угля в отдаленные от основных транспортных магистралей населенные пункты составляет не менее четверти стоимости самого угля. Таким образом, конечная цена угля составляет около 2500 руб./т у.т.

В зависимости от климата и микроклимата каждые 6 лет растения достигают высоты 4–5 м и в пересчете на 1 га дают около 10–15 т древесины, что эквивалентно 5 т у.т./га [89; 90; 93].

2.4.1 Влияние объемов производства

Рассмотрим пример энергетической плантации в форме круга, созданной вокруг населенного пункта, состоящего из деревянных одноэтажных домов.

В силу дискретности отдельных переменных (количественных показателей конкретных видов техники), функция $C(R)$ недифференцируема в отдельных точках. Функция предельных затрат в отдельных точках может не существовать. Поэтому рассмотрим модификацию модели с непрерывными переменными. Это позволяет вычислить предельные затраты, но дает оценки затрат только «снизу».

При варьировании объемов производства топлива требуемая площадь энергетической плантации будет изменяться. При этом по нелинейной зависимости будет меняться радиус плантации и, соответственно, средняя дальность и объем перевозок в тонно-километрах. Поэтому объемы требуемых инвестиций и величины текущих ежегодных затрат будут нелинейно зависеть от объемов потребности в топливе.

На основе формул (2.52)-(2.68) произведен расчет требуемых инвестиций для создания энергетической плантации для теплоснабжения населенного пункта с разной величиной потребности в топливе (численностью населения) в природно-метеорологических условиях Иркутской области. Более подробные данные о составе капитальных затрат на производство биотоплива с энергетических плантаций представлены в Приложении С.

На рисунке 2.2 представлен состав инвестиций, необходимых для выращивания, переработки, погрузки, транспортировки и хранения биомассы, полученной с энергетических плантаций. Например, при производстве топлива в 7950 т у.т. наибольшая часть инвестиций приходится на приобретение автотранспорта – 16,2 млн руб., на приобретение тракторов – 6,8 млн руб., на строительство

дорог – 5,9 млн руб., на строительство парников – 6,0 млн руб., на приобретение оборудования для рубки дров – 5,1 млн руб., на строительство складов – 4,3 млн руб., на приобретение оборудования для посадки саженцев – 0,3 млн руб. Причем с ростом производства топлива инвестиции на приобретение автотранспорта и строительство дорог растут значительно быстрее всех остальных.



Рисунок 2.2 – Состав инвестиций в создание энергетической плантации в зависимости от объема производства топлива

На рисунке 2.3 представлен состав среднегодовых текущих затрат, необходимых для функционирования энергетической плантации. Наибольшая доля этих затрат приходится на оплату труда. Например, при объеме производства топлива, равном 7950 т у.т., среднегодовые затраты на функционирование энергетической плантации составляют 6,2 млн руб./год. Из них затраты на оплату труда составляют 4,4 млн руб./год, затраты на приобретение моторного топлива – 1,8 млн руб./год.



Рисунок 2.3 – Состав текущих среднегодовых затрат на функционирование энергетической плантации в зависимости от объема производства топлива

На рисунке 2.4 представлен состав постоянных, переменных и приведенных затрат на создание и функционирование энергетической плантации. Постоянные затраты составили 1,3 млн руб./год. В них вошли приведенные затраты на минимально необходимый набор техники и оборудования и минимально необходимые среднегодовые текущие затраты (заработная плата минимально необходимого количества сотрудников и минимально необходимое количество моторного топлива). Функция переменных и, следовательно, приведенных затрат выпуклая, монотонно возрастающая, что согласуется с общими положениями микроэкономической теории [105; 106].

Сравним как с ростом объема производства биотоплива изменяются приведенные затраты на производство биомассы при условии соблюдения целочисленности показателей и отказа от нее.

Из рисунка 2.5 видно, что приведенные затраты изменяются с ростом объемов производства биотоплива. Как и ожидалось, приведенные затраты в дискретном случае выше приведенных затрат в случае непрерывном. Это легко объяснить возможностью не приобретать дорогостоящие устройства в ситуациях, когда

мощности не будут загружены полностью, а арендовать ее по мере необходимости.



Рисунок 2.4 – Зависимость постоянных, переменных и полных затрат от объема производства топлива



Рисунок 2.5 – Зависимость приведенных затрат от объема производства биотоплива для дискретного и непрерывного случаев

Создание энергетических плантаций оправдано до тех пор, пока цена на альтернативное топливо выше точки пересечения функций предельных и средних приведенных затрат. В рассматриваемой ситуации создание энергетических плантаций рентабельно до тех пор, пока цена на привозное топливо выше 950 руб.

Из рисунка 2.6 видно, что приведенные затраты на производство биотоплива с энергетических плантаций являются возрастающей выпуклой функцией от объемов производства (равным здесь объемам потребления) биотоплива. Затраты на топливоснабжение привозным топливом, поставляемым по фиксированной цене, являются линейной функцией от объемов производства.



Рисунок 2.6 – Зависимость стоимости топливоснабжения из разных источников от объема потребления топлива

При исключении условия целочисленности приведенные затраты на топливоснабжение с энергетических плантаций меньше, чем затраты на топливоснабжение за счет привозного топлива при годовой потребности до 14500 т у.т./год (рисунок 2.6). При больших объемах производства выгоднее осуществлять топливоснабжение привозным топливом. Этот факт справедлив только в рамках стро-

гой альтернативы: либо все топливообеспечение ведется только биотопливом с энергетических плантаций, либо только привозным топливом.

Более эффективным в некоторых условиях является использование обоих источников топливоснабжения. До тех пор пока предельные затраты на производство топлива на энергетических плантациях ниже цены привозного топлива, используется топливоснабжение только с энергетических плантаций. После того как предельные затраты станут равны цене альтернативного топлива, дополнительные объемы целесообразно наращивать за счет привозного топлива. Объем производства топлива на энергетических плантациях, при котором предельные затраты равны цене альтернативного топлива назовем оптимальным для данного значения цены альтернативного топлива. В рассматриваемом примере оптимальный объем производства биотоплива составляет 7950 т у.т./год. Приведенные затраты на производство такого объема биотоплива составляют 11,5 млн руб./год. Если бы этот объем покрывался привозным топливом, то затраты составили бы 19,9 млн руб./год. Разница в 8,4 млн руб./год является максимальным эффектом от энергетической плантации при рассматриваемых условиях, в т.ч. при рассматриваемой цене привозного топлива.

На кривой приведенных затрат на рисунке 2.6 выделен оптимальный объем производства биотоплива.

Более подробные данные о составе приведенных затрат на производство биотоплива и максимальном эффекте от использования энергетических плантаций при рассматриваемых условиях представлены в Приложении Е.

2.4.2 Влияние цены привозного топлива

Большое влияние на эффективность энергетических плантаций оказывает цена привозного топлива. Из рисунка 2.7 видно, что при фиксированном объеме производства топлива с увеличением цены привозного топлива возрастает максимальный экономический эффект от энергетических плантаций. Например, при увеличении цены привозного топлива с 2500 до 3500 руб./т у.т. (в 1,4 раза) мак-

симальный рентабельный объем производства на энергетических плантациях увеличится с 14500 до 20500 т у.т. (в 1,4 раза), а оптимальный объем производства – с 7950 до 11200 т у.т. (в 1,4 раза). Тогда с увеличением цены привозного топлива максимальный эффект от энергетической плантации возрастет с 8,4 до 18,2 млн руб./год (в 2,2 раза).

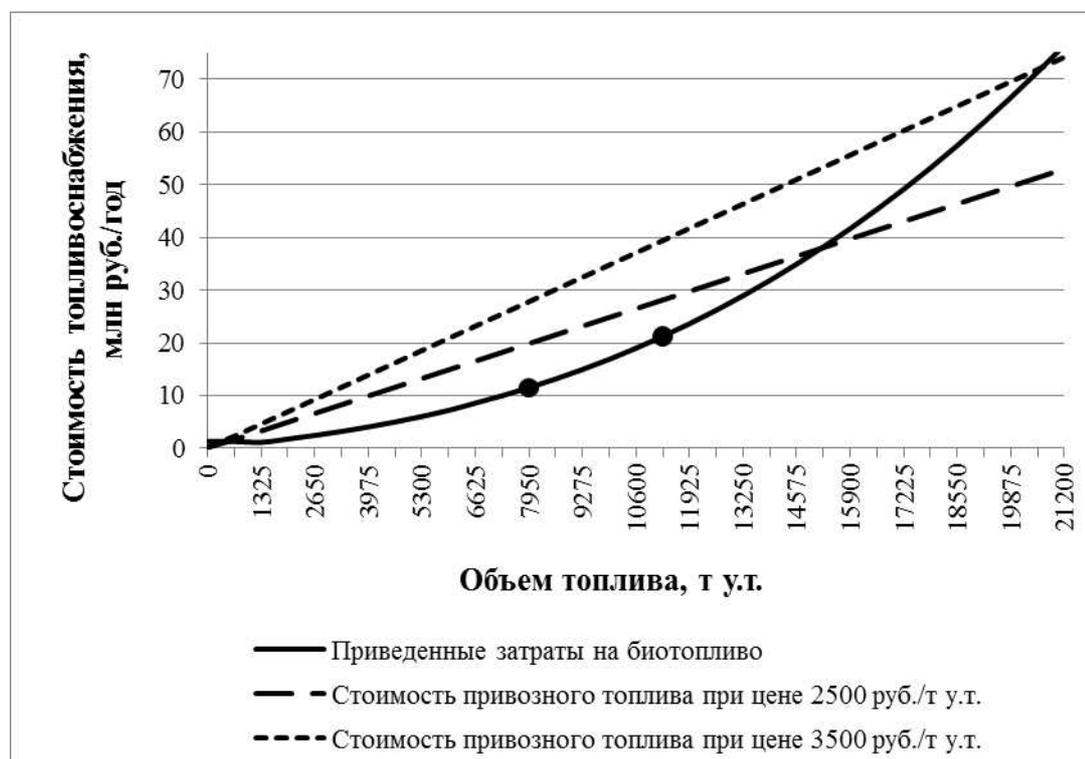


Рисунок 2.7 – Зависимость стоимости топливоснабжения из разных источников от объема потребления топлива при варьировании цен на привозное топливо

2.4.3 Влияние транспортного фактора

Большое влияние на эффективность энергетических плантаций оказывают пространственные условия, в частности общая конфигурация расположения плантации (вытянутость, разобщенность участков и т.д.) и расположение населенного пункта (или хозяйственного центра) относительно плантации. Конфигурация энергетической плантации и расположение относительно нее хозяйственного центра дают характеристику важной величине, влияющей на размер инвестиций в со-

здание энергетической плантации и среднегодовых затрат на ее содержание – средней дальности грузоперевозок.

Плантация в виде круга является идеальным объектом для исследования, однако на практике создание такой плантации не всегда возможно. Например, из-за того, что часто населенные пункты расположены возле реки или недалеко от другого населенного пункта. На рисунке 2.8 в качестве некоторых из возможных примеров представлены две формы энергетических плантаций.

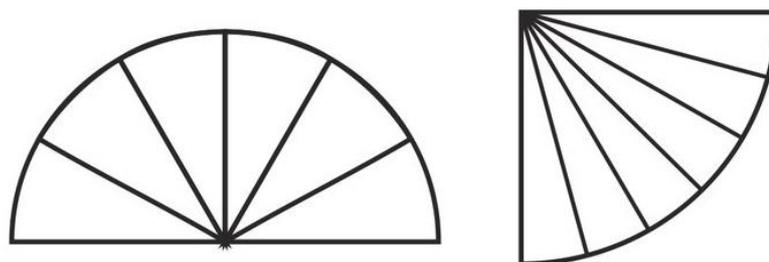


Рисунок 2.8 – Некоторые возможные варианты форм энергетических плантаций

Приведем для примера формулы средней дальности грузоперевозок по радиальному направлению для энергетической плантации в форме круга

$$AL_{\text{кр}} = \frac{2}{3} \pi r^3, \quad (2.76)$$

в форме полукруга

$$AL_{\text{пкр}} = \frac{2\sqrt{2}}{3} \pi r^3, \quad (2.77)$$

в виде четверти круга

$$AL_{\text{чкр}} = \frac{4}{3} \pi r^3. \quad (2.78)$$

Из формул (2.76)-(2.78) видно, что средняя дальность грузоперевозок по радиальному направлению на энергетической плантации в виде полукруга в $\sqrt{2}$ раза больше, чем по плантации в форме круга с населенным пунктом в центре. Средняя дальность грузоперевозок на энергетической плантации в виде сектора (четверти круга) в 2 раза больше, чем по плантации в форме круга. Таким образом, при исследовании влияния транспортного фактора можно предполагать, что

вполне возможно увеличение средней дальности грузоперевозок до 2 раз по сравнению с плантацией в форме круга.

При исследовании влияния транспортного фактора на экономическую эффективность энергетических плантаций вводится поправочный коэффициент $h \geq 1$, показывающий во сколько раз увеличится средняя дальность грузоперевозок. Это приводит к увеличению длин дорог разных категорий, количества грузовых автомобилей, количества работающих и годового расхода моторного топлива. Это, в свою очередь, ведет к увеличению капитальных и среднегодовых текущих затрат.

Рассмотрим, как изменяются показатели эффективности энергетических плантаций с ростом средней дальности грузоперевозок.

Как видно из рисунка 2.9, при потребности в топливе 7950 т у.т. и цене привозного топлива 2500 руб./т у.т. с увеличением средней дальности грузоперевозок в 2 раза инвестиции в создание энергетической плантации увеличатся с 44,5 до 66,5 млн руб. (в 1,5 раза). Инвестиции в строительство дорог увеличатся с 5,9 до 11,7 млн руб. (в 2 раза), инвестиции на приобретение грузовых автомобилей – с 16,2 до 32,4 млн руб. (в 2 раза). Остальные виды капитальных затрат (на оборудование для рубки дров, тракторы, строительство складов и парников, оборудование для посадки саженцев) зависят от площади энергетической плантации или объема выращенной древесины и остаются неизменными.

Из рисунка 2.10 видно, что с увеличением средней дальности грузоперевозок в 2 раза среднегодовые текущие затраты возрастают с 6,2 до 9,4 млн руб./год (в 1,5 раза). Из них затраты на оплату труда возрастают с 4,4 до 6,1 млн руб./год (в 1,4 раза), среднегодовые затраты на приобретение моторного топлива – с 1,8 до 3,2 млн руб./год (в 1,8 раза).

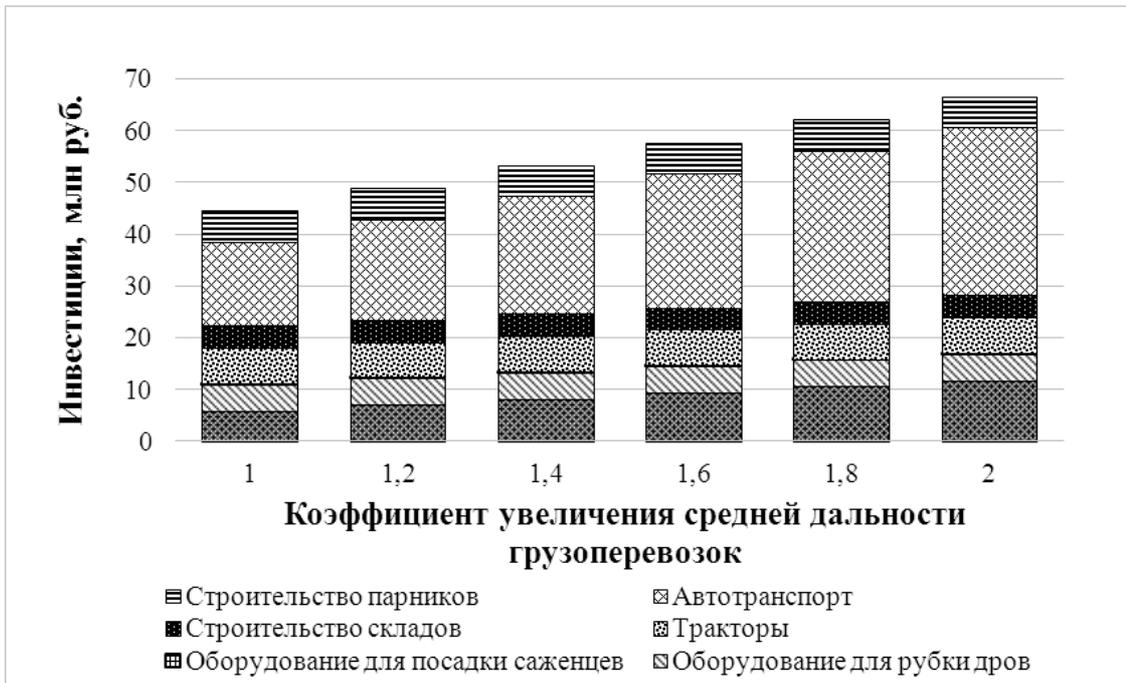


Рисунок 2.9 – Зависимость размера инвестиций в создание энергетической плантации от средней дальности грузоперевозок при потребности в топливе 7950 т у.т.

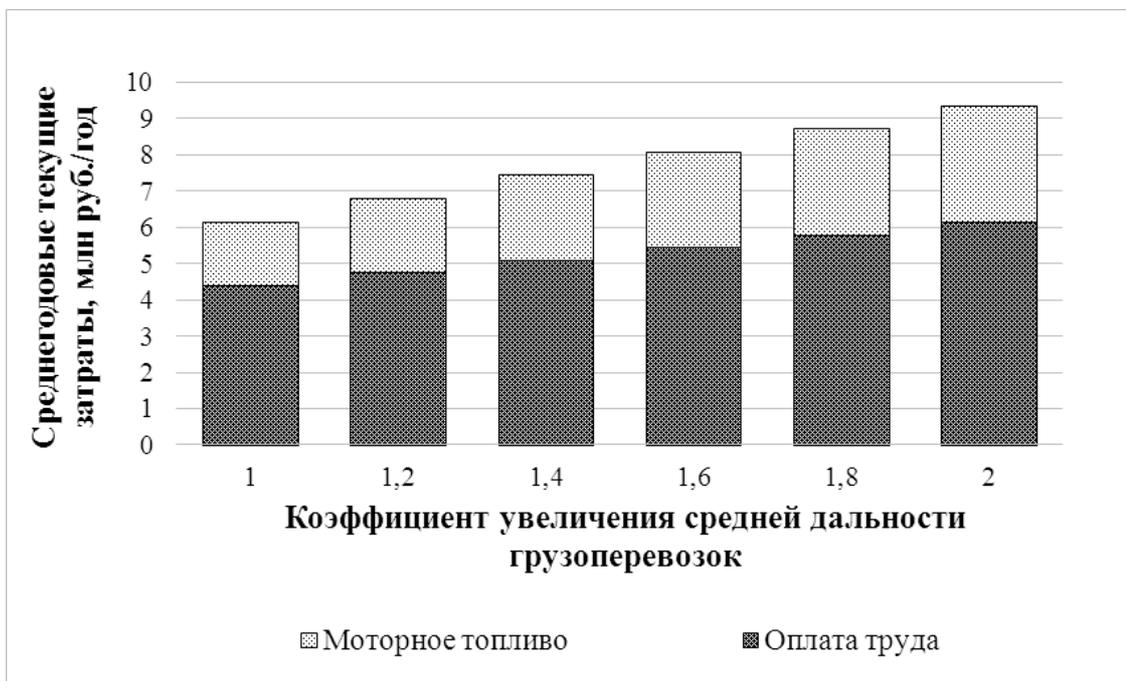


Рисунок 2.10 – Зависимость размера среднегодовых текущих затрат на функционирование энергетической плантации от средней дальности грузоперевозок при потребности в топливе 7950 т у.т.

Из рисунка 2.11 видно, что с ростом средней дальности грузоперевозок при фиксированном объеме производства приведенные затраты на производство биотоплива возрастут с 11,5 до 17,4 млн руб./год (в 1,5 раза). В результате экономический эффект сократится с 8,4 до 2,5 млн руб./год (в 3,4 раза).

Следует отметить, что при увеличении средней дальности грузоперевозок изменится и оптимальный объем производства биотоплива. В представленном примере он снизится с 7950 до 5300 т у.т. (в 1,5 раза). Максимальный экономический эффект при этом снизится с 8,4 только до 4,9 млн руб./год (в 1,7 раза).

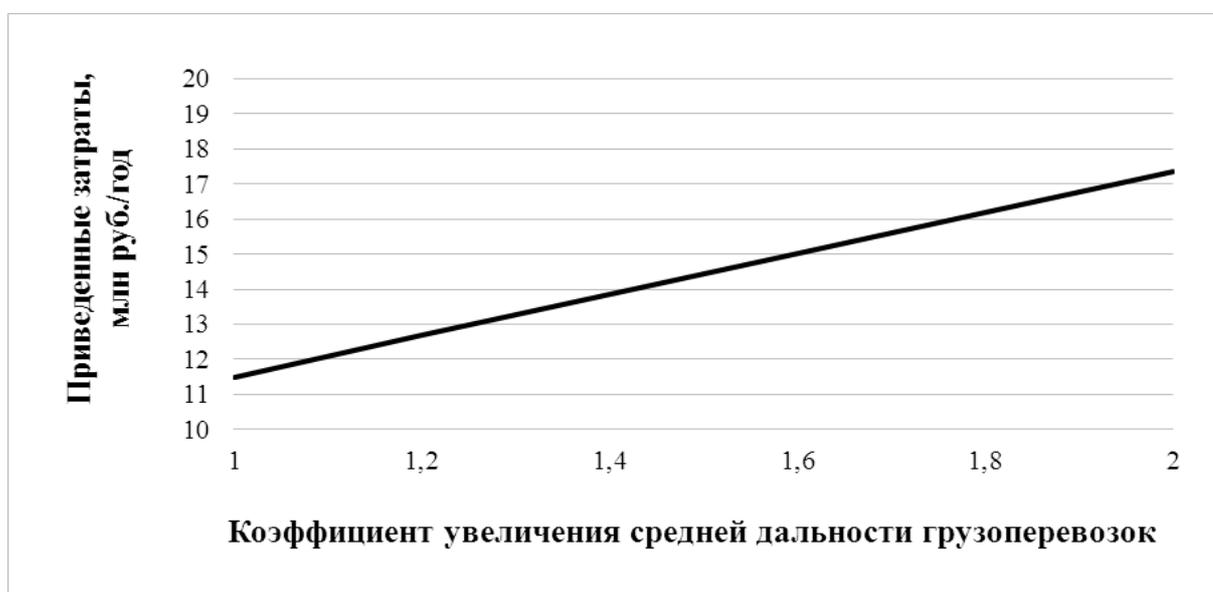


Рисунок 2.11 – Зависимость приведенных затрат от средней дальности грузоперевозок при потребности в топливе 7950 т у.т.

Подробные сведения о влиянии транспортного фактора на размер капитальных затрат, текущих среднегодовых затрат, приведенных затрат и максимального экономического эффекта от использования энергетических плантаций представлены в Приложении F.

Рассмотрим, как изменится эффективность энергетических плантаций при изменении дальности грузоперевозок и изменении цены на привозное топливо. Если при увеличении средней дальности грузоперевозок в 2 раза оптимальный объем производства биотоплива снижается, то при дополнительном условии воз-

растания цены на привозное топливо до 3500 т у.т., оптимальный объем производства возрастет с 5300 до 6600 т у.т. (в 1,4 раза). В этом случае максимальный экономический эффект возрастет с 4,9 до 10,7 млн руб./год (в 2,2 раза).

2.4.4 Влияние выбора набора технических средств на эффективность энергетических плантаций

Как отмечалось выше, выбор оптимального набора технических средств осуществляется путем их перебора и сопоставления по критерию минимизации приведенных затрат. Приведем пример сопоставления двух наборов технических средств, различающихся маркой грузового автомобиля.

Рассмотрим, как повлияет замена грузового автомобиля КАМАЗ 4310 (топливопотребление 30 л/100 км, объем кузова – 19 м³, цена 2,9 млн руб.) на более дешевый автомобиль КАМАЗ 45143 с меньшим расходом топлива, но и с меньшим объемом кузова (топливопотребление 27 л/100 км, объем кузова – 15 м³, цена 2,3 млн руб.). При объеме производства 7950 т у.т. инвестиции на приобретение автотранспорта возрастут с 16,2 до 16,3 млн руб./год, среднегодовые текущие затраты на оплату труда возрастут с 4,4 до 4,9 млн руб./год, на приобретение моторного топлива – с 1,8 до 2,0 млн руб./год. Приведенные затраты в этом случае возрастут с 11,5 до 12,2 млн руб./год, максимальный экономический эффект снизится с 8,4 до 7,7 млн руб./год. Из этих расчетов видно, что при данном объеме производства такая замена экономически нецелесообразна.

Из рисунка 2.12 видно, что с ростом объема производства приведенные затраты в случае выбора грузового автомобиля с меньшим объемом кузова (КАМАЗ 45143) растут значительно быстрее, чем при выборе грузового автомобиля с большим объемом кузова (КАМАЗ 4310).

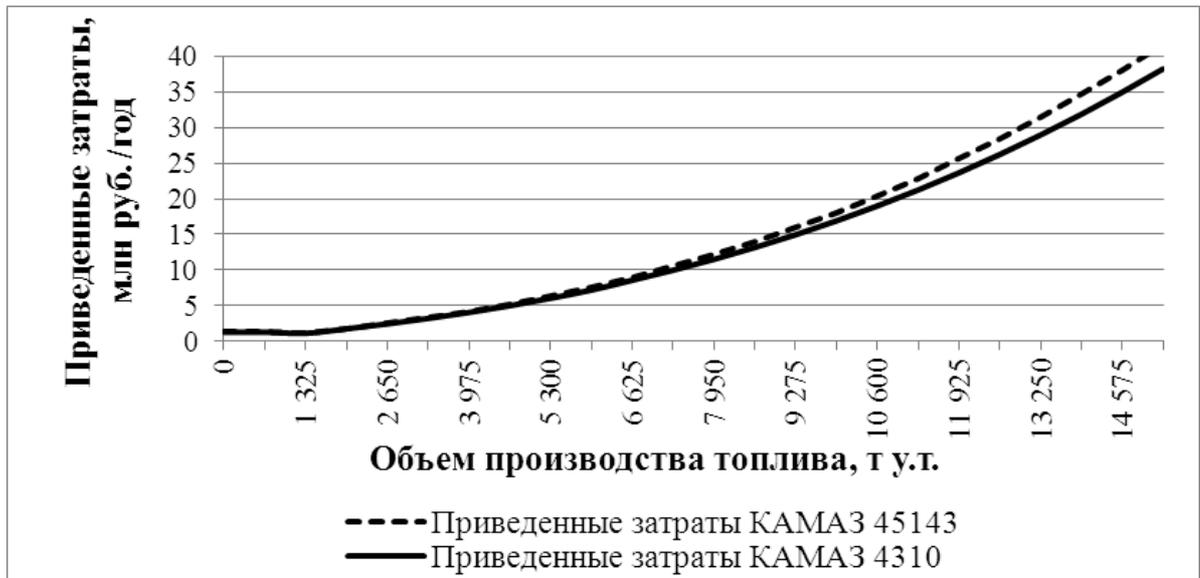


Рисунок 2.12 – Зависимость приведенных затрат от средней дальности грузоперевозок для двух возможных вариантов грузовых автомобилей

Следует отметить, что при малых объемах производства биотоплива (до 1500 т у.т.) небольшое экономическое преимущество имеет КАМАЗ 45143. При больших объемах производства – КАМАЗ 4310.

2.5 Основные итоги главы 2

Представлена математическая модель для комплексного исследования и оптимизации всей технологической цепочки производства, транспортировки и хранения биотоплива с энергетических плантаций в детерминированных условиях.

Изложены методики оценки составляющих капитальных и среднегодовых текущих затрат для создания и функционирования энергетических плантаций.

На примере, близком к природно-метеорологическим условиям Иркутской области, показано, что экономическая эффективность и оптимальные параметры энергетических плантаций существенно зависят от объемов потребностей в топливе отдельных населенных пунктов, от цены привозного топлива и от дальности грузоперевозок (зависящей от конфигурации и расположения плантации).

Приведены примеры возможных подходов к исследованию эффективности энергетических плантаций на представленной модели.

Приведены результаты апробации модели в исследованиях эффективности энергетических плантаций. Экспериментальные исследования показали, что в сложившейся ценовой ситуации топливоснабжение с энергетических плантаций может быть экономически выгодно для отдаленных населенных пунктов России.

Глава 3. Математическая модель анализа надежности топливоснабжения с энергетических плантаций

При анализе эффективности энергетических плантаций необходимо учитывать затраты на мероприятия по обеспечению надежности топливоснабжения из такого источника и возможные ущербы при возникновении дефицитных ситуаций [108]. Данная глава посвящена анализу надежности и оптимизации резервов и запасов топливоснабжения на основе энергетических плантаций.

Проблема надежности имеет особое значение и требует специального исследования. Во-первых, потому, что колебания потребности в топливе и производства биомассы зависят от случайных факторов, что делает необходимым разработку специальных моделей, приспособленных к исследованиям в случайных условиях. Во-вторых, потому, что ущербы в случае возникновения дефицита оказываются гораздо выше, чем на близких к транспортным магистралям территориях. Это обусловлено ограниченностью условий для маневрирования, дальностью транспортировки, в некоторых случаях ограниченностью сроков завоза топлива и плохо развитой транспортной инфраструктурой.

Рассмотренная в предыдущей главе модель осуществляла расчеты при детерминированных условиях. На самом деле топливоснабжение осуществляется при существенных воздействиях случайных факторов. Прежде всего, как случайные величины следует рассматривать годовую потребность в топливе и объем производства топлива в данном году. Заранее нельзя точно оценить потребность в топливе, прежде всего, потому, что неизвестно, какой будет следующая зима, насколько будет продолжительным и холодным отопительный период. Также от непредсказуемых природно-метеорологических условий и других факторов зависит фактическая реализация урожайности энергетических плантаций. Кроме указанных двух случайных экзогенных показателей следует учитывать и третий фактор, который не рассматривался в модели главы 2. Это величина запасов топлива, переходящих из одного отопительного периода в следующий период. Если в очередную зиму расход топлива окажется ниже среднего значения (зима будет теп-

лой) и (или) урожайность на энергетической плантации окажется выше среднеожидаемой, то производство топлива в данном году может превысить потребность. Тогда разница между производством и потреблением останется в качестве переходящего запаса на следующий отопительный период.

Необходимо использовать специальные модели анализа и синтеза надежности. Под синтезом надежности понимается оптимизация состава средств обеспечения надежности. В качестве таких средств будем рассматривать резервы мощности в производстве топлива и емкость складов для хранения переходящих запасов топлива из одного отопительного периода в следующий. В данной главе излагаются модели, разработанные для этих целей, базирующиеся на имитационной модели предыдущей главы. Анализ надежности топливоснабжения для заданного состава средств резервирования производится на базе метода Монте–Карло и упрощенной модели функционирования энергетических плантаций. Оптимизация надежности (выбор оптимального состава средств резервирования) производится на основе оценок эффективности средств обеспечения надежности по критерию минимизации математического ожидания суммы затрат на обеспечение надежности и ущербов от дефицита.

3.1 Случайные факторы в процессах топливоснабжения с энергетических плантаций

Накопленные за многие годы данные метеорологических наблюдений [104] позволяют оценивать вероятность наступления теплых и холодных зим. На основе этой информации можно определять рациональный состав мероприятий для противодействия возможным негативным ситуациям, например, возрастающей потребности в топливе на отопление в холодные или более долгие зимы, что может приводить к ограничениям и перебоям в теплообеспечении [12–16].

Для описания возможных колебаний расхода топлива на теплоснабжение будем использовать показатель отклонения потребности в топливе одного из отопительных периодов от среднеожидаемого уровня

$$b_{\tau} = B_{\tau} / \bar{B}, \tau = 1, \dots, T, \quad (3.1)$$

где B_{τ} – расчетное значение интегральной разности температур внутри и вне зданий за отопительный период τ , рассчитываемое по формуле (2.9); \bar{B} – среднее арифметическое значение показателя интегральной разности температур B_{τ} за прошлые отопительные периоды $\tau = 1, \dots, T$ (рассчитывается по формуле (2.10)).

Если отопительный период τ был относительно теплым ($B_{\tau} < \bar{B}$), то величина b_{τ} меньше единицы. В этом случае значение $(1 - b_{\tau})$ будет характеризовать относительное (выраженное в процентах от среднеожидаемой потребности) снижение потребности в топливе на отопление. Если отопительный период был холодней, чем в среднем ($B_{\tau} > \bar{B}$), то величина b_{τ} – больше единицы. Значение $(b_{\tau} - 1)$ в этом случае характеризует относительное возрастание потребности в топливе на отопление. Использование относительной величины b_{τ} позволяет оценить законы вероятностей отклонений потребности в топливе на отопление.

Интерес также представляют показатели отклонений продолжительности отопительного периода n_{τ} и среднесуточной разности температур внутри и вне зданий от их среднемноголетних значений h_{τ}

$$n_{\tau} = N_{\tau} / \bar{N}, \tau = 1, \dots, T, \quad (3.2)$$

$$h_{\tau} = H_{\tau} / \bar{H}, \tau = 1, \dots, T, \quad (3.3)$$

где N_{τ} – продолжительность отопительного периода τ , дни; H_{τ} – среднесуточная температура внутри и вне зданий за отопительный период τ , $^{\circ}\text{C}$; \bar{N} – средняя продолжительность отопительного сезона, дни; \bar{H} – среднесуточная разность температур внутри и вне зданий за отопительный период, градусо-дни.

На основе значений относительных отклонений расхода топлива на отопление за весь многолетний период рассчитываются следующие показатели:

- максимальное снижение в самые теплые из имевшихся в прошлом отопительных периодов

$$\Delta_{min} = \min\{ (b_{\tau} - 1); \tau = 1, \dots, T \}; \quad (3.4)$$

- максимальное возрастание потребности в топливе на отопление в самые холодные из имевшихся в прошлом отопительных периодов

$$\Delta_{max} = \max \{ b_{\tau} - 1 \}; \tau = 1, \dots, T \}; \quad (3.5)$$

- диапазон вариаций (или размах) относительных отклонений потребности в топливе на отопление

$$\Delta = \Delta_{max} - \Delta_{min}. \quad (3.6)$$

Эти три показателя представлены в первых трех столбцах таблицы 3.1. В четвертом столбце представлены значения показателя средних отклонений (по абсолютной величине) потребности в топливе на отопление за весь рассматриваемый период, рассчитываемый по формуле

$$I = \frac{1}{T} \sum_{\tau=1}^T |b_{\tau} - 1|. \quad (3.7)$$

Таблица 3.1 – Показатели, характеризующие колебания потребности в топливе на отопление по некоторым пунктам метеонаблюдений Урала, Сибири и Дальнего Востока

Пункт метеонаблюдения	Максимальные отклонения от средне-многолетнего в сторону		Диапазон колебаний потребности, Δ	Интенсивность колебаний, I
	уменьшения, Δ_{min}	увеличения, Δ_{max}		
Чита	-0,308	0,152	0,461	0,048
Иркутск	-0,453	0,162	0,615	0,061
Томск	-0,404	0,185	0,590	0,068
Красноярск	-0,276	0,265	0,541	0,063
Хабаровск	-0,248	0,102	0,350	0,049
Екатеринбург	-0,353	0,185	0,539	0,074
Барнаул	-0,321	0,321	0,643	0,063
Владивосток	-0,341	0,179	0,520	0,055

Интенсивность колебаний (отклонений) потребности в топливе показывает, насколько в среднем может отклоняться по абсолютной величине (т.е. в любую сторону) потребность в топливе от среднеожидаемого уровня.

В таблице 3.1 использован такой же порядок расположения пунктов метеонаблюдений, что и в таблице 2.1, т.е. по мере убывания средней интегральной разности температур за отопительный период. В таблице 3.1 представлены дан-

ные, характеризующие диапазоны и интенсивности возможных отклонений потребностей в топливе на отопление, рассчитанные по данным наблюдений температур за период 1910–2010 гг. в некоторых пунктах метеонаблюдений Урала, Сибири и Дальнего Востока. Из этих данных видно, что диапазон колебаний потребности в топливе на отопление составляет до 64 % (в Барнауле), показатель интенсивности колебаний – до 7,4 % (в Екатеринбурге).

Отметим, что в нижней части таблицы 3.1 (пункты метеонаблюдений с более мягким климатом) значения показателей диапазона и интенсивности колебаний потребности в топливе оказались существенно выше. Это означает, что при переходах от более холодных к более теплым районам роль случайного фактора в потреблении топлива на отопление возрастает. Ранее эта закономерность была установлена при сопоставлении диапазонов и интенсивности отклонений потребности в топливе на отопление по экономическим районам СССР [12]. Исключением является Хабаровск, что, вероятно, происходит под влиянием морского муссонного климата [109].

Для оценок возможных отклонений в производстве топлива и вероятности их реализации пока нет необходимых данных. Поскольку случайная величина производства топлива имеет ограниченный интервал возможных значений, случайные отклонения производства топлива описываются в виде усеченного нормального распределения. Диапазон возможных отклонений фактического производства топлива от заданного математического ожидания оценим в $\pm 20\%$. Среднеквадратическое отклонение случайной величины производства топлива будем рассматривать как варьируемый параметр. Одна из задач исследования, представленного в данной главе, состоит в оценке влияния значения показателя среднеквадратического отклонения случайной величины производства топлива на выбор оптимального состава средств резервирования.

Случайная величина запасов топлива на конец отопительного периода имеет эндогенное происхождение. Она зависит от величины остатков топлива на конец предыдущего отопительного периода и от реализации указанных выше двух экзогенных случайных величин для данного отопительного периода – объемов по-

требности и производства топлива. В силу этого реализацию запасов на конец отопительного периода можно рассматривать как марковскую случайную последовательность. В качестве вероятности реализации разных значений запасов топлива на конец отопительного периода можно использовать вероятность реализации для стационарной марковской последовательности. Причем нет необходимости вычислять вероятности реализации для стационарных процессов, поскольку известно, что любое начальное состояние марковской последовательности будет сходиться к стационарной марковской последовательности. Одна из задач, представленных в исследовании, состоит в том, чтобы оценить минимальное число итераций для сходимости с приемлемой точностью.

3.2 Модели анализа и синтеза надежности топливоснабжения с энергетических плантаций

В данном разделе рассматривается система вложенных моделей (рисунок 3.1), разработанная для анализа и оптимизации надежности топливоснабжения с энергетических плантаций. Рассматриваются три последовательно вложенные модели: имитационная модель функционирования систем топливоснабжения в течение года, модель анализа надежности и модель синтеза надежности топливоснабжения с энергетических плантаций. В этих моделях рассматриваются три случайные величины: годовая потребность в топливе, годовой объем производства топлива, переходящие запасы топлива.

Экзогенными для расчетов являются величины: математического ожидания годовой потребности в топливе \bar{Q} , принимаемого равным потребности при средних природно-метеорологических условиях (рассчитываемых по правилам, рассмотренным во второй главе); вероятности относительных отклонений потребности в топливе от математического ожидания, рассчитываемая на основе метеорологических данных прошлых лет; приведенных затрат, рассчитываемых на базе модели предыдущей главы; дисперсии случайной величины отклонений в производстве топлива от математического ожидания объемов производства σ ; удель-

ных ущербов от дефицита топлива μ ; удельных потерь при хранении топлива в течение года α .

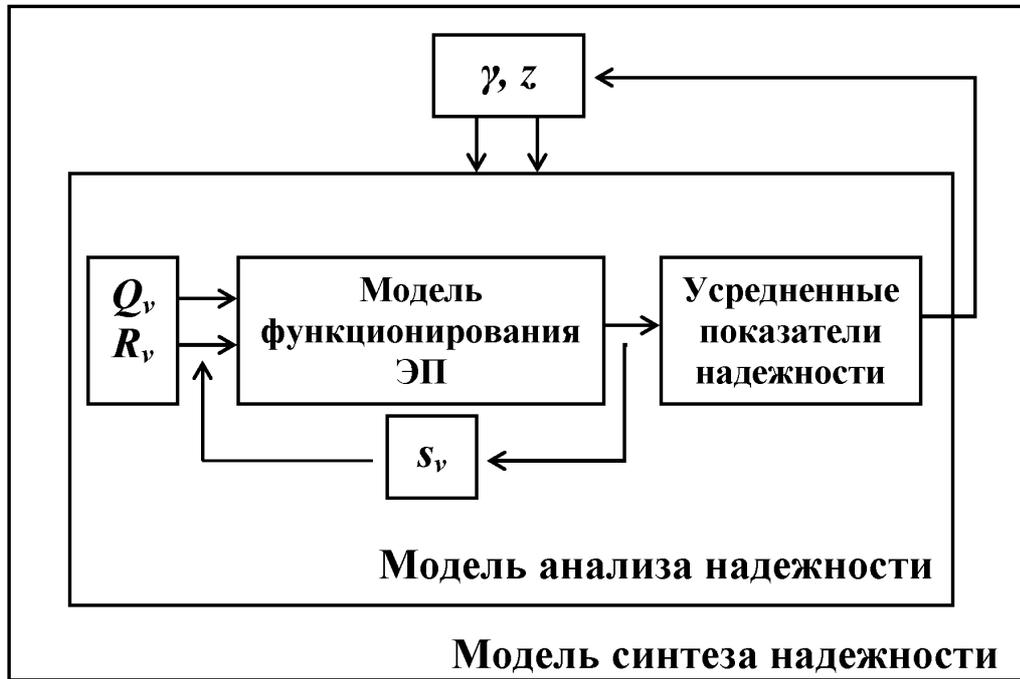


Рисунок 3.1 – Система вложенных моделей анализа и синтеза надежности топливоснабжения с энергетических плантаций (γ – резерв мощности, z – емкость складов, s_v – запасы топлива, R_v – объем производства топлива, Q_v – потребность в топливе, v – номер итерации, где $v=0, \dots, V$)

Случайные отклонения потребности в топливе определяются методом Монте-Карло [110] на основе данных отклонений интегральной разности температур внутри и вне здания за предшествующие годы b_τ , вычисляемых по формуле (3.1).

Случайные отклонения производства топлива описываются в виде усеченного нормального распределения с математическим ожиданием производства топлива \bar{R} , которое является расчетной оптимизируемой величиной. Заданной также является величина среднеквадратического отклонения σ и коэффициенты δ^1, δ^2 , определяющие интервал возможных значений $[R^1, R^2]$ случайной величины производства топлива. Границы этих интервалов задаются по правилам

$$R^1 = \delta^1 \bar{R} \quad (3.8)$$

$$R^2 = \delta^2 \bar{R}. \quad (3.9)$$

Случайная величина переходящих запасов топлива формируется на базе алгоритма, реализующего марковский процесс изменения этих запасов, поскольку вероятностные характеристики запасов топлива s_{v+1} определяются только значением s_v и не зависят от предшествующих значений последовательности.

Верхний уровень системы вложенных моделей представляет **модель оптимизации состава средств обеспечения надежности (синтеза надежности) топливоснабжения**.

В качестве средств обеспечения надежности топливоснабжения с энергетических плантаций рассматриваются создание резервов мощности в производстве топлива γ и создание складов емкостью z для хранения запасов топлива многолетнего регулирования. Величины γ и z являются переменными (оптимизируемыми) показателями. Обе эти переменные будем здесь рассматривать как безразмерные величины. Они определяются относительно значения математического ожидания потребности в топливе.

Под резервом мощностей понимается относительное превышение математического ожидания производства котельно-печного топлива \bar{R} над математическим ожиданием потребности в топливе \bar{Q} :

$$\gamma = \frac{(\bar{R} - \bar{Q})}{\bar{Q}}. \quad (3.10)$$

В модели синтеза надежности исследуется и решается двухпараметрическая задача оптимизации:

$$F(\gamma, z) \rightarrow \min, \quad (3.11)$$

$$\gamma \geq 0, \quad z \geq 0. \quad (3.12)$$

Здесь $F(\gamma, z)$ – функция математического ожидания суммы затрат на обеспечение надежности и ущербов от дефицита. Ее значение определяется с помощью модели анализа надежности топливоснабжения.

Оптимизация осуществляется путем сопоставления значений функции $F(\gamma, z)$ при последовательном варьировании значения каждого из аргументов. Эта итерационная процедура осуществляется до тех пор, пока оптимальные значения

перестанут существенно изменяться по итерациям. В частности, для одномерной оптимизации (только по параметру γ или только по параметру z) может применяться метод золотого сечения.

Модель анализа надежности топливоснабжения биотопливом с энергетических плантаций. Модель основывается на многократной имитации функционирования систем топливоснабжения в течение одного года (рисунок 3.2). Обозначим $v = 0, \dots, V$ номера итераций имитации. Обозначим u_v остатки топлива на конец отопительного периода. Задано значение u_0 на интервале $[0, z]$.



Рисунок 3.2 – Схема анализа надежности топливоснабжения с энергетических плантаций

Имитационная модель функционирования систем топливоснабжения с энергетических плантаций в течение одного года. В этой модели используется датчик случайных чисел. Этот датчик выбирает значения относительных отклонений интегральной разности температур b_τ , рассчитываемые по формуле (3.1). Затем рассчитывает случайную величину потребности в топливе

$$Q_v = b_\tau \cdot \bar{Q}. \quad (3.13)$$

Также на основе метода Монте-Карло определяется величина объема производства топлива R_v при заданных параметрах \bar{R} , σ , δ^1 , δ^2 по усеченному нормальному закону распределения.

Величина запасов топлива, переходящих в следующий отопительный период, определяется исходя из известной величины остатков топлива предыдущего отопительного периода:

$$s_v = \min\{(1 - \alpha)u_{v-1}; z\bar{Q}\}, \quad v = 0, \dots, V. \quad (3.14)$$

В этом выражении учитываются потери при хранении топлива в течение года α и условие, что запасы не могут превышать величину емкости складов $z\bar{Q}$.

Величина располагаемых ресурсов топлива определяется как сумма произведенного биотоплива и запасов, перешедших из предыдущего отопительного периода:

$$RR_v = (R_v + s_v)_+. \quad (3.15)$$

В случае, когда потребность превышает располагаемые ресурсы, образуется дефицит топлива. В противном случае дефицит равен нулю

$$D_v = (Q_v - RR_v)_+. \quad (3.16)$$

Здесь и далее функция $(x)_+$ от вещественного x является неотрицательной срезкой

$$(x)_+ = \max\{0, x\}. \quad (3.17)$$

Остаток топлива образуется в том случае, когда потребность в топливе меньше располагаемых ресурсов:

$$u_v = (RR_v - Q_v)_+. \quad (3.18)$$

В результате работы модели имитирующей функционирование системы топливоснабжения с энергетических плантаций в течение одного года определяется величина прироста затрат, связанных с созданием средств обеспечения надежности на данной итерации v . Обозначим эту величину $\Delta C_v(\gamma, z, R_v, s_v)$. На этом итерация, имитирующая прохождение одного года, завершается.

В рамках модели анализа надежности топливоснабжения с энергетических плантаций осуществляется переход к следующей итерации $v + 1$. Итерационное имитирование завершается при $v = V$.

После прохождения всех итераций рассчитываются показатели надежности топливоснабжения с энергетических плантаций.

1. Математическое ожидание дефицита

$$MD = \frac{1}{V} \sum_{v=1}^V D_v. \quad (3.19)$$

2. Оценка вероятности появления дефицитных ситуаций

$$PD = \frac{TD}{V}, \quad (3.20)$$

где TD – количество испытаний, при которых возникает дефицит, рассчитывается по формуле

$$TD = \sum_{v=1}^V \text{sgn}(D_v). \quad (3.21)$$

Здесь

$$\text{sgn}(D_v) = \begin{cases} 1, & \text{если } D_v > 0 \\ 0, & \text{если } D_v \leq 0. \end{cases} \quad (3.22)$$

3. Математическое ожидание суммы затрат на обеспечение надежности и ущербов от дефицита

$$F(\gamma, z) = MY + \frac{1}{V} \sum_{v=1}^V \Delta C_v(\gamma, z, R_v, s_v). \quad (3.23)$$

Здесь MY – математическое ожидание ущербов от дефицита

$$MY = \mu MD, \quad (3.24)$$

где μ – удельные ущербы, млн руб./т у.т. (состоят из стоимости привозного топлива (например, угля) и стоимости его экстренной транспортировки до места потребления при возникновении дефицита);

$\Delta C_v(\gamma, z, R_v, s_v)$ – сумма затрат на обеспечение надежности топливоснабжения, млн руб./год

$$\Delta C_v(\gamma, z) = \Delta(\gamma, z) + \Delta(R_v, s_v), \quad (3.25)$$

где $\Delta(\gamma, z)$ – затраты, возникшие в связи с увеличением площади энергетической плантации на величину $\bar{R}\gamma$ и созданием складов z ; $\Delta(R_v, s_v)$ – изменение приведенных затрат, связанных с отклонением R_v от \bar{R} .

3.3 Возможность использования алгоритмов покоординатного спуска для определения оптимального состава средств резервирования

Во всех таблицах 3.2 – 3.6 при любых фиксированных резервах мощности с увеличением емкости складов математическое ожидание суммы затрат на обеспечение надежности и ущербов от дефицита сначала снижается, затем начинает возрастать. При фиксированной величине емкости складов с увеличением резервов мощностей математическое ожидание суммы затрат на обеспечение надежности и ущербов от дефицита также сначала снижается, затем возрастает.

Таблица 3.2 – Зависимость математического ожидания суммы затрат на обеспечение надежности и ущербов от дефицита от емкости складов и резервов мощности при среднеквадратическом отклонении случайной величины производства топлива

ва 5 %

Емкость складов	Резерв мощности, доля от математического ожидания потребности в топливе												
	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,11	0,12	0,13
0	1,86	1,77	1,71	1,67	1,66	1,67	1,71	1,76	1,83	1,92	2,03	2,14	2,27
0,1	1,31	1,21	1,15	1,13	1,15	1,21	1,31	1,43	1,57	1,71	1,87	2,03	2,19
0,2	1,24	1,12	1,05	1,03	1,06	1,15	1,27	1,42	1,57	1,74	1,90	2,06	2,23
0,3	1,24	1,12	1,05	1,03	1,06	1,16	1,29	1,45	1,61	1,78	1,94	2,11	2,27
0,4	1,26	1,14	1,07	1,05	1,09	1,19	1,33	1,49	1,65	1,82	1,98	2,15	2,31

Емкость складов	Резерв мощности, доля от математического ожидания потребности в топливе												
	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,11	0,12	0,13
0,5	1,27	1,16	1,09	1,07	1,12	1,22	1,37	1,53	1,69	1,86	2,02	2,19	2,35
0,6	1,29	1,18	1,12	1,10	1,15	1,26	1,41	1,57	1,73	1,90	2,06	2,23	2,39
0,7	1,32	1,21	1,14	1,13	1,19	1,30	1,45	1,61	1,78	1,94	2,11	2,27	2,44
0,8	1,34	1,23	1,17	1,17	1,22	1,34	1,49	1,65	1,82	1,98	2,15	2,31	2,48
0,9	1,38	1,26	1,20	1,20	1,26	1,38	1,53	1,69	1,86	2,02	2,19	2,35	2,52
1	1,41	1,30	1,24	1,24	1,30	1,42	1,57	1,73	1,90	2,06	2,23	2,39	2,56

При величине среднеквадратического отклонения случайной величины производства топлива 5 % от математического ожидания потребности в топливе оптимальный резерв мощности равен 0,04, оптимальная емкость складов – 0,3 от математического ожидания годовой потребности в топливе.

Таблица 3.3 – Зависимость математического ожидания суммы затрат на обеспечение надежности и ущербов от дефицита от емкости складов и резервов мощности при величине среднеквадратического отклонения случайной величины производства топлива 10 %

Емкость складов	Резерв мощности, доля от математического ожидания потребности в топливе												
	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,11	0,12	0,13
0	2,69	2,61	2,55	2,50	2,48	2,46	2,47	2,49	2,52	2,57	2,63	2,70	2,78
0,1	1,89	1,81	1,75	1,73	1,72	1,75	1,79	1,85	1,93	2,02	2,13	2,24	2,37
0,2	1,62	1,53	1,47	1,45	1,46	1,49	1,56	1,64	1,75	1,87	2,00	2,14	2,28
0,3	1,54	1,44	1,38	1,35	1,36	1,41	1,48	1,58	1,70	1,84	1,98	2,13	2,29
0,4	1,53	1,42	1,36	1,33	1,34	1,39	1,47	1,58	1,71	1,85	2,00	2,16	2,32
0,5	1,54	1,43	1,36	1,33	1,35	1,40	1,48	1,60	1,73	1,88	2,03	2,19	2,36
0,6	1,56	1,45	1,38	1,35	1,37	1,42	1,51	1,63	1,76	1,91	2,07	2,23	2,40
0,7	1,58	1,47	1,40	1,38	1,39	1,45	1,54	1,66	1,80	1,95	2,11	2,27	2,44
0,8	1,60	1,50	1,43	1,41	1,42	1,48	1,57	1,70	1,84	1,99	2,15	2,31	2,48
0,9	1,64	1,53	1,46	1,44	1,46	1,52	1,61	1,73	1,88	2,03	2,19	2,35	2,52
1	1,67	1,56	1,49	1,47	1,49	1,55	1,65	1,77	1,92	2,07	2,23	2,39	2,56

При среднеквадратическом отклонении математического ожидания производства топлива 10 % от математического ожидания производства топлива оптимальный резерв мощности равен 0,04, оптимальная емкость складов – 0,4 математического ожидания годовой потребности в топливе.

Таблица 3.4 – Зависимость математического ожидания суммы затрат на обеспечение надежности и ущербов от дефицита от емкости складов и резервов мощности при величине среднеквадратического отклонения случайной величины производства топлива 15 %

Емкость складов	Резерв мощности, доля от математического ожидания потребности в топливе												
	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,11	0,12	0,13
0	3,70	3,63	3,57	3,52	3,49	3,47	3,46	3,46	3,47	3,49	3,52	3,56	3,61
0,1	2,73	2,65	2,60	2,57	2,55	2,55	2,56	2,59	2,64	2,69	2,75	2,83	2,91
0,2	2,25	2,17	2,12	2,09	2,08	2,09	2,12	2,17	2,23	2,31	2,39	2,49	2,60
0,3	2,04	1,95	1,89	1,86	1,86	1,87	1,91	1,97	2,05	2,14	2,24	2,35	2,47
0,4	1,94	1,85	1,79	1,75	1,75	1,77	1,82	1,88	1,97	2,07	2,18	2,30	2,44
0,5	1,91	1,81	1,74	1,71	1,70	1,73	1,78	1,85	1,94	2,04	2,16	2,30	2,43
0,6	1,90	1,80	1,73	1,70	1,69	1,71	1,76	1,84	1,93	2,05	2,17	2,31	2,45
0,7	1,92	1,81	1,74	1,70	1,70	1,72	1,77	1,85	1,95	2,06	2,19	2,33	2,48
0,8	1,94	1,83	1,76	1,72	1,71	1,74	1,79	1,87	1,97	2,09	2,22	2,36	2,51
0,9	1,96	1,86	1,79	1,75	1,74	1,76	1,82	1,89	2,00	2,12	2,25	2,39	2,54
1	1,99	1,89	1,81	1,77	1,77	1,79	1,85	1,93	2,03	2,15	2,29	2,43	2,58

При среднеквадратическом отклонении математического ожидания производства топлива 15 % от математического ожидания производства топлива оптимальный резерв мощности равен 0,05, оптимальная емкость складов – 0,6 математического ожидания годовой потребности в топливе.

Таблица 3.5 – Зависимость математического ожидания суммы затрат на обеспечение надежности и ущербов от дефицита от емкости складов и резервов мощности при величине среднеквадратического отклонения случайной величины производства топлива 20 %

Емкость складов	Резерв мощности, доля от математического ожидания потребности в топливе												
	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,11	0,12	0,13
0	4,76	4,70	4,64	4,60	4,57	4,54	4,53	4,52	4,53	4,54	4,55	4,58	4,61
0,1	3,70	3,63	3,59	3,55	3,53	3,52	3,52	3,53	3,55	3,58	3,62	3,67	3,73
0,2	3,07	3,00	2,95	2,92	2,90	2,90	2,91	2,94	2,97	3,02	3,07	3,14	3,22
0,3	2,71	2,64	2,58	2,55	2,54	2,54	2,55	2,59	2,63	2,69	2,76	2,84	2,93
0,4	2,51	2,43	2,37	2,34	2,32	2,33	2,35	2,39	2,44	2,50	2,58	2,67	2,77
0,5	2,40	2,31	2,25	2,21	2,20	2,21	2,23	2,27	2,33	2,40	2,49	2,59	2,70

Емкость складов	Резерв мощности, доля от математического ожидания потребности в топливе												
	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,11	0,12	0,13
0,6	2,34	2,25	2,19	2,15	2,13	2,14	2,16	2,21	2,27	2,35	2,44	2,55	2,66
0,7	2,32	2,23	2,16	2,12	2,10	2,10	2,13	2,18	2,24	2,32	2,42	2,53	2,65
0,8	2,32	2,23	2,16	2,11	2,09	2,09	2,12	2,17	2,23	2,32	2,42	2,53	2,65
0,9	2,34	2,24	2,16	2,12	2,09	2,10	2,12	2,17	2,24	2,32	2,43	2,54	2,67
1	2,36	2,26	2,18	2,13	2,11	2,11	2,14	2,18	2,25	2,34	2,44	2,56	2,69

При среднеквадратическом отклонении математического ожидания производства топлива 20 % от математического ожидания производства топлива оптимальный резерв мощности равен 0,05, оптимальная емкость складов – 0,8 от математического ожидания годовой потребности в топливе.

Таблица 3.6 – Зависимость математического ожидания суммы затрат на обеспечение надежности и ущербов от дефицита от емкости складов и резервов мощности при величине среднеквадратического отклонения случайной величины производства топлива 25 %

Емкость складов	Резерв мощности, доля от математического ожидания потребности в топливе												
	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13
0	5,82	5,76	5,72	5,68	5,65	5,63	5,62	5,61	5,61	5,62	5,63	5,65	5,67
0,1	4,70	4,65	4,61	4,58	4,55	4,54	4,54	4,54	4,55	4,58	4,61	4,64	4,69
0,2	3,97	3,91	3,87	3,84	3,82	3,81	3,81	3,82	3,85	3,88	3,92	3,97	4,03
0,3	3,49	3,43	3,38	3,35	3,33	3,33	3,33	3,35	3,38	3,42	3,47	3,53	3,60
0,4	3,19	3,13	3,07	3,04	3,02	3,01	3,02	3,04	3,07	3,12	3,17	3,24	3,32
0,5	3,01	2,93	2,87	2,83	2,81	2,81	2,81	2,84	2,87	2,92	2,98	3,06	3,14
0,6	2,89	2,81	2,75	2,70	2,68	2,67	2,68	2,71	2,75	2,80	2,86	2,94	3,03
0,7	2,82	2,74	2,67	2,62	2,59	2,59	2,60	2,62	2,67	2,72	2,79	2,87	2,96
0,8	2,79	2,70	2,63	2,58	2,55	2,54	2,55	2,57	2,62	2,67	2,75	2,83	2,92
0,9	2,78	2,68	2,61	2,55	2,52	2,51	2,52	2,55	2,59	2,65	2,72	2,81	2,91
1	2,78	2,68	2,60	2,55	2,51	2,50	2,51	2,54	2,58	2,64	2,72	2,81	2,91
1,1	2,79	2,69	2,61	2,55	2,52	2,50	2,51	2,54	2,58	2,65	2,72	2,81	2,91
1,2	2,81	2,71	2,63	2,57	2,53	2,52	2,52	2,55	2,60	2,66	2,74	2,83	2,93
1,3	2,84	2,73	2,65	2,59	2,55	2,53	2,54	2,57	2,61	2,68	2,76	2,85	2,95
1,4	2,87	2,76	2,68	2,62	2,58	2,56	2,56	2,59	2,64	2,70	2,78	2,87	2,98
1,5	2,90	2,79	2,71	2,64	2,60	2,59	2,59	2,62	2,66	2,73	2,81	2,90	3,01

При среднеквадратическом отклонении математического ожидания производства топлива 25 % от математического ожидания производства топлива опти-

мальный резерв мощности равен 0,06, оптимальная емкость складов равна математическому ожиданию годовой потребности в топливе.

Указанный характер поведения этих функций означает, что на основе метода покоординатного спуска будут получены локальные оптимальные решения. Из всех таблиц 3.2–3.6 видно, что локальный оптимум решения является одновременно и глобальным оптимумом, который в каждой из таблиц единственен. Это является подтверждением возможности использования алгоритмов покоординатного спуска для определения оптимального состава средств резервирования.

Представленные результаты расчетов не могут рассматриваться как безусловные доказательства унимодальности функции $F(\gamma, z)$ и возможности поиска ее минимума методом покоординатного спуска. В конкретных случаях полезно на основе численных расчетов исследовать характер поведения этой функции.

3.4 Экспериментальные исследования на модели анализа надежности топливоснабжения с энергетических плантаций

Представим результаты некоторых исследований на модели анализа надежности теплоснабжения на примере, близком к природно-метеорологическим условиям Иркутской области.

Пусть математическое ожидание потребности в топливе \bar{Q} составляет 6350 т у.т. (соответствует потребности в топливе для отопления населенного пункта с примерной численности населения в 6000 человек). Применим коэффициент потерь при хранении топлива, равный 0,1. Пусть предельные затраты на производство биотоплива – 0,0026 млн руб./т у.т. [111].

В приводимыми ниже расчетах удельные ущербы от дефицита приняты равными 9 тыс. руб./т у.т. Их величина зависит от конкретных условий. Для примера рассмотрим проблему топливообеспечения отдаленных населенных пунктов Байкальской природной территории с энергетических плантаций, при которой дефицит топлива покрывается углем. Его стоимость состоит из цены угля в ме-

стах добычи и затрат на его транспортировку к месту использования. Стоимость угля крупнейших месторождений Иркутской области и ближайших территорий (Черемховское, Тулунское, Жеронское, Бородинское) варьируется от 1,2 до 1,8 тыс. руб./т, т.е. не менее 2 тыс. руб./т у.т. Считаем, что в рамках рассматриваемой модели, ситуация дефицита топлива возникает в зимний период, поэтому транспортировка топлива в отдаленные районы возможна только автомобильным транспортом. Например, средняя стоимость транспортировки угля из Иркутска в Ольхонский район (п. Еланцы) составляет около 7 тыс. руб./т у.т.¹ Таким образом, средняя стоимость угля при его экстренных поставках в Ольхонский район составит 9 тыс. руб./т у.т.

В случае, когда остатки топлива не сохраняются для использования в следующих отопительных периодах, вероятность ситуации дефицита составляет 50 %. В ситуации, когда остаток ресурсов прошлых лет переносится на следующие годы, вероятность возникновения дефицита снижается и зависит от таких параметров, как коэффициент потерь при хранении топлива α , емкость складов для хранения топлива z , а также от величины среднеквадратического отклонения случайной величины производства топлива σ .

3.4.1 Влияние интенсивности колебаний урожайности на оптимальные значения состава средств резервирования

Влияние интенсивности колебаний урожайности на оптимальные значения состава средств резервирования продемонстрировано в таблицах 3.2–3.6. В этих таблицах показано, как изменяется математическое ожидание суммы затрат на обеспечение надежности и ущербов от дефицита $F(\gamma, z)$ в зависимости от емкости складов и резерва мощности при возможных величинах среднеквадратического отклонения случайной величины производства биотоплива 5–25 %. Полужирным шрифтом выделены минимальные значения математического ожидания суммы

¹ По данным транспортно-экспедиционных компаний «Инком-Карго», «Транспортная компания Север».

затрат на обеспечение надежности и ущербов от дефицита при фиксированных значениях емкости складов z .

Два крайних случая (среднеквадратическое отклонение математического ожидания производства топлива на 5 и 25 %) маловероятны. Тогда при среднеквадратическом отклонении математического ожидания производства топлива на 10–20 % оптимальный состав средств резервирования следующий: резерв мощности – 0,04–0,05, емкость склада – 0,4–0,8 от среднегодового потребления.

3.4.2 Верификация модели

Представленные в таблице 3.2–3.6 результаты исследований являются интерпретируемыми и, можно сказать, естественными. Это является важным подтверждением «правильности» работы модели анализа надежности топливоснабжения населенных пунктов с энергетических плантаций.

Из представленных результатов видно, что при фиксированном составе средств обеспечения надежности с увеличением среднеквадратического отклонения случайной величины производства топлива математическое ожидание суммы затрат на обеспечение надежности и ущербов от дефицита возрастает. Например, при фиксированных показателях емкости складов для хранения топлива $z = 0,6$ и резерве мощности $\gamma = 0,05$ с ростом величины среднеквадратического отклонения случайной величины производства топлива математическое ожидание суммы затрат на обеспечение надежности и ущербов от дефицита возрастают с 1,15 до 2,68 млн руб./год (таблица 3.7). Это происходит в силу увеличения действия случайного фактора. Вероятность дефицита в этом случае возрастает от 0,03 до 0,16.

Таблица 3.7 – Значения показателей надежности топливоснабжения при варьировании среднеквадратического отклонения случайной величины производства топлива при фиксированных показателях емкости складов для хранения топлива

$$z = 0,6 \text{ и резерва мощности } \gamma = 0,05$$

Среднеквадратическое отклонение случайной величины производства топлива, %	5	10	15	20	25
Математическое ожидание суммы затрат на обеспечение надежности и ущербов от дефицита, млн руб./год	1,15	1,37	1,69	2,13	2,68
Вероятность дефицита, %	0,03	0,07	0,10	0,13	0,16

Данные таблиц 3.2–3.6 также демонстрируют взаимозаменяемость двух рассматриваемых средств обеспечения надежности. Например, снижение емкости складов может быть компенсировано увеличением резервов мощности в производстве топлива. Это, в частности, иллюстрируют выделенные полужирным шрифтом данные об оптимальных резервах мощности при варьируемых емкостях складов.

3.4.3 Влияние величины резерва мощности на показатели надежности топливоснабжения

На базе изложенной модели анализа надежности топливоснабжения с энергетических плантаций возможно и необходимо детальное исследование изменения некоторых показателей надежности при варьировании объемов средств резервирования. При этом остальные показатели могут рассматриваться как фиксированные.

В таблице 3.8 представлены основные показатели надежности топливоснабжения при резервах мощности от 0 до 0,08 от математического ожидания потребности в топливе, емкости складов – 0,6, величине среднеквадратического отклонения случайной величины производства топлива 15 %.

Таблица 3.8 – Зависимость основных показателей надежности топливоснабжения от величины резерва мощности при емкости складов 0,6 и величине среднеквадратического отклонения в производстве топлива 15 %

	Резерв мощности, доля от математического ожидания потребности в топливе									
	Без запасов	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08
Математическое ожидание затрат на создание резервов мощности, млн руб./год	0,00	0,00	0,42	0,58	0,75	0,91	1,03	1,24	1,39	1,57
Математическое ожидание ущербов от дефицита, млн руб./год	3,78	1,79	1,49	1,22	0,99	0,79	0,62	0,48	0,36	0,27
Математическое ожидание суммы затрат на обеспечение надежности и ущербов от дефицита, млн руб./год	3,78	2,04	1,90	1,80	1,73	1,70	1,69	1,71	1,76	1,84
Вероятность дефицита	50,0	0,25	0,22	0,18	0,15	0,12	0,10	0,08	0,06	0,05
Математическое ожидание запасов, т у.т.	0	1304	1452	1610	1773	1941	2111	2277	2436	2585
Математическое ожидание располагаемых ресурсов, т у.т.	6350	7654	7866	8087	8314	8546	8779	9008	9231	9444

С увеличением резерва мощности повышается надежность теплоснабжения. Вероятность дефицита снижается с 0,25 до 0,05. С увеличением резерва мощности математическое ожидание ущербов от ситуации дефицита снижается, затраты на обеспечение надежности топливоснабжения возрастают (рисунок 3.3).

С ростом резерва мощности сначала происходит сокращение математического ожидания суммы затрат на обеспечение надежности и математического ожидания ущербов от дефицита за счет снижения последней составляющей. Затем математическое ожидание суммы затрат на обеспечение надежности и ущербов от дефицита начинает возрастать вследствие превалирования в ней затрат на обеспечение надежности топливоснабжения (рисунок 3.4). Как видно из рисунка 3.4, в точке минимума суммы двух функций (математического ожидания затрат на обеспечение надежности и математического ожидания ущербов от дефицита) резерв мощности составляет 0,05. С ростом резерва мощности математическое ожи-

дание запасов и, следовательно, располагаемых ресурсов топлива возрастает [112].

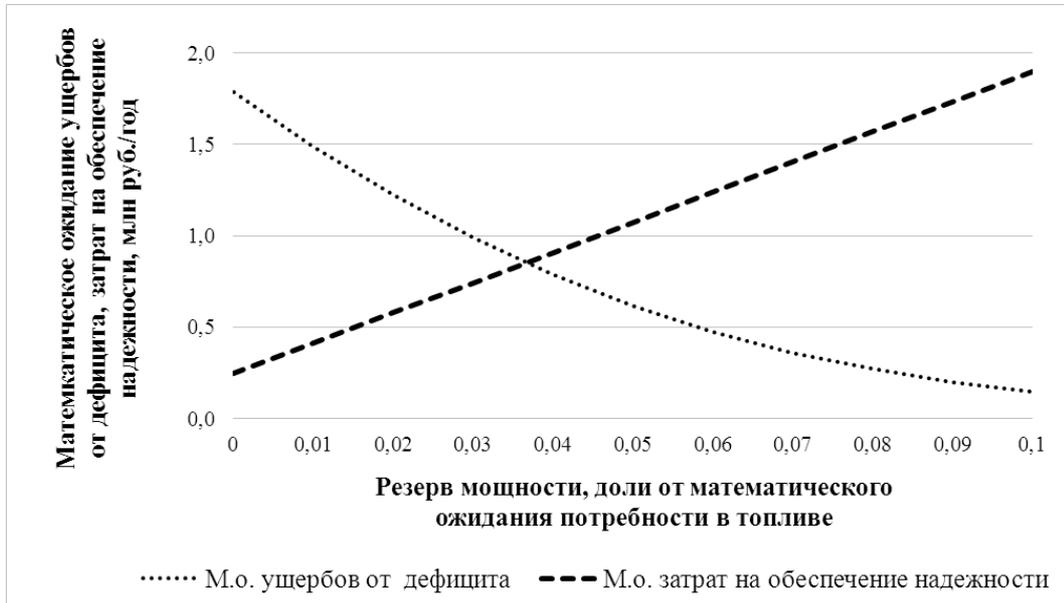


Рисунок 3.3 – Зависимость математического ожидания ущерба от дефицита и математического ожидания затрат на обеспечение надежности топливоснабжения от величины резерва мощности

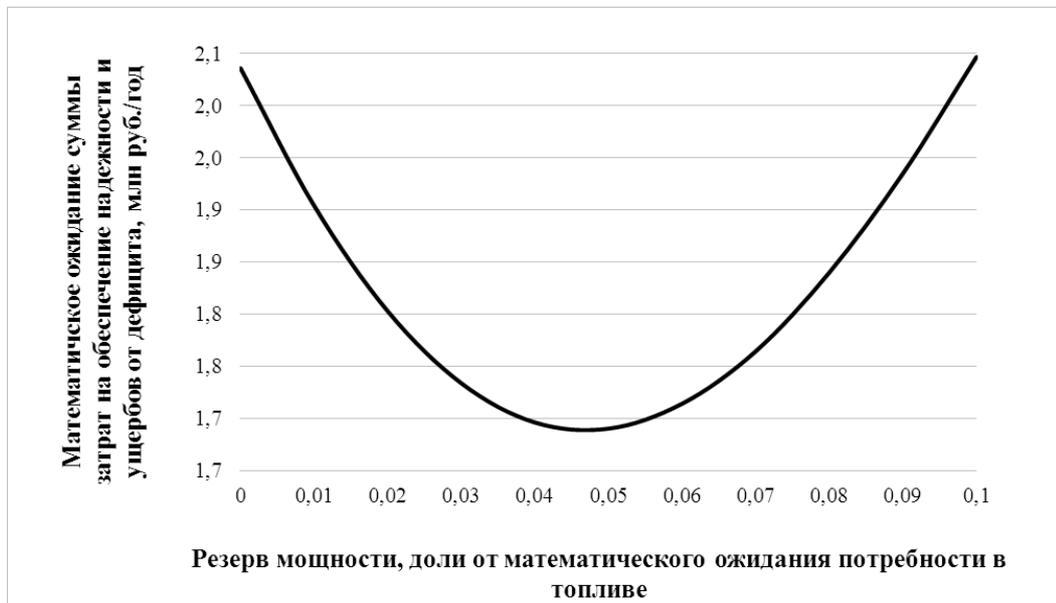


Рисунок 3.4 – Зависимость математического ожидания суммы затрат на обеспечение надежности и ущерба от дефицита от величины резерва мощности

Оптимальный резерв мощности составляет 0,05 от математического ожидания потребности в топливе, вероятность дефицита – 0,1, математическое ожидание запасов – 2111 т у.т., математическое ожидание располагаемых ресурсов – 8779 т у.т. При предельных затратах на производство биотоплива, произведенное на энергетических плантациях, равных 2,6 тыс. руб./т у.т. (рассчитано на основе модели, представленной в главе 2 для населенного пункта в Иркутской области с потребностью 7950 т у.т.) математическое ожидание суммы затрат на обеспечение надежности и ущербов от дефицита составляет 1,69 млн руб./год, из них затраты на создание резервов мощности – 0,83 млн руб./год.

С ростом величины удельных ущербов от дефицита математическое ожидание суммы затрат на обеспечение надежности и ущербов от дефицита возрастает. Поэтому оптимальный резерв мощности возрастает при увеличении удельных ущербов от дефицита (рисунок 3.5). При изменении величины удельных ущербов от дефицита от 9 до 20 тыс. руб./т у.т. (в 2,2 раза), величина оптимального резерва мощности изменяется диапазоне от 0,05 до 0,08 от математического ожидания годовой потребности в топливе (в 1,6 раза).

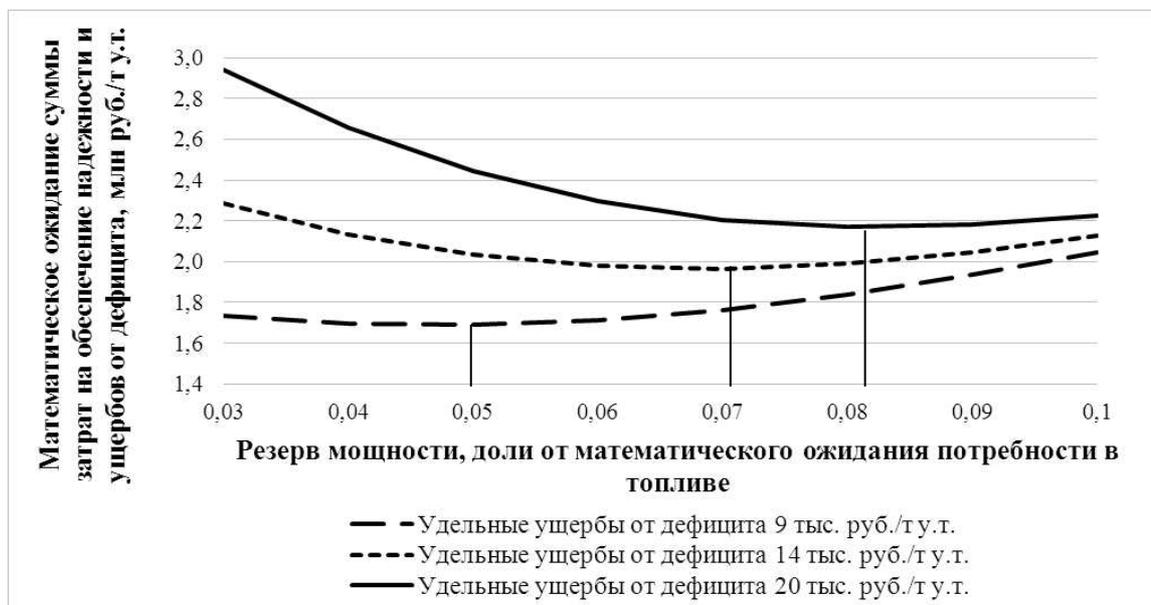


Рисунок 3.5 – Влияние величины резерва мощности на математическое ожидание суммы затрат на обеспечение надежности топливоснабжения и ущербов от дефицита при разных значениях ущербов от дефицита

3.5 Метод формирования переходящих запасов топлива

Случайные величины потребности и производства биотоплива при имитации функционирования системы топливоснабжения формируются непосредственно методом Монте-Карло. Величины объемов потребности в топливе – в результате использования случайной выборки из имеющегося набора отклонений показателя интегральной разницы температур внутри и вне зданий за отопительные периоды прошлых зим от среднегодового значения. Величины объемов производства биотоплива определяются как выборка методом статистических испытаний случайной величины с заданным законом распределения вероятностей. Случайная величина переходящих запасов топлива в модели анализа надежности топливоснабжения формируется по специальному методу внутри самого процесса многократной имитации функционирования системы топливоснабжения в течение года.

Следует отметить, что разработанный метод формирования переходящих запасов топлива является основой для осуществляемой в настоящее время разработки общего метода исследования эффективности и оптимизации энергоснабжения в условиях сильного действия случайных факторов в производстве и потреблении энергоресурсов. Совместно с В.И. Зоркальцевым, С.М. Пержабинским, Д.В. Карамовым, осуществляется разработка вычислительных методов и методики выбора оптимального сочетания мощностей солнечных или ветровых электростанций, накопителей электроэнергии и резервных источников электроснабжения (например, дизельных электростанций) при решении задач электроснабжения отдаленных населенных пунктов. Разрабатываемый метод основывается на формировании и исследовании стационарных эргодических последовательностей изменения запасов электроэнергии в накопителях (аккумуляторах).

Случайная величина переходящих запасов топлива имеет существенное значение. Как видно из представленных выше расчетов, оптимальная емкость складов под запасы многолетнего регулирования превышает половину величины среднегодовой потребности в топливе. Это означает, что переходящие запасы в

некоторые годы могут достигать величины полугодовой потребности в топливе данного населенного пункта.

Чтобы быть уверенными в использовании метода формирования переходящих запасов топлива и в результатах расчетов на моделях анализа и синтеза надежности топливоснабжения необходимо ответить на ряд вопросов. Что выражает (означает) используемый алгоритм формирования переходящих запасов топлива? Какими свойствами он обладает? Насколько оправдано (правильно) его использование? Как влияет заданный начальный уровень запасов многолетнего регулирования на полученные результаты?

Задание начального уровня запасов многолетнего регулирования произвольное. В данной работе использовалось нулевое значение этих запасов. На самом деле это могла быть любая другая величина из интервала $[0, z]$. Влияет ли выбор этой величины на процесс изменения запасов по результатам расчетов в целом?

Исследования свойств метода формирования запасов топлива необходимы для того, чтобы понять и обосновать свойства всех вычисляемых показателей в изложенной выше модели анализа топливоснабжения. Это исследование необходимо, в частности, для того, чтобы определить условия, при которых рассматриваемая модель вырабатывает однозначные статистически устойчивые результаты.

Однородная марковская последовательность. Изменения по итерациям $v = 0, 1, \dots, V$ переходящих запасов топлива можно представить в виде следующего правила:

$$s_{v+1} = \min\{(1 - \alpha)(L_v + s_v)_+; z\}, \quad v = 0, \dots, V, \quad (3.26)$$

Здесь $L_v = R_v - Q_v$ – случайная величина, равная разнице случайных величин объема производства и объема потребления топлива на данной итерации. Случайная величина L принимает значения из интервала $[L^1; L^2]$, где $L^1 = R^1 - Q^2$, $L^2 = R^2 - Q^1$, при $Q^1 = \min_{\tau} b^{\tau} \bar{Q}$, $Q^2 = \max_{\tau} b^{\tau} \bar{Q}$.

Для любого v случайная величина s_v может принимать значения на интервале $[0; z]$ с некоторыми плотностями вероятности. Последовательность случайных величин $s_0, s_1, \dots, s_v, s_{v+1}$ традиционно [113; 114] определяется как **однородная марковская последовательность**, если плотность вероятности реализации случайной величины s_{v+1} зависит только от плотности вероятности величины s_v и от заданной и неизменной по итерациям плотности вероятности перехода от s_v к s_{v+1} . Поскольку согласно (3.26) значение s_{v+1} зависит только от реализации случайной величины L_v с заданными неизменными по итерациям плотностями вероятности и от уровней запасов только на предыдущей итерации s_v , то вырабатываемая алгоритмом последовательность $s_0, s_1, \dots, s_v, s_{v+1}$ является однородной марковской.

Динамика изменения плотности вероятности запасов. Обозначим $P(s)$ некоторую функцию плотности вероятности запасов $s \in [0; z]$. Считаем, что эта функция интегрируема и обладает следующими свойствами:

$$\int_0^z P(s) ds = 1, \quad P(s) \geq 0, \quad s \in [0; z]. \quad (3.27)$$

Конкретные функции плотности вероятности будем обозначать с помощью дополнительных индексов или других символов. В частности, плотность вероятности запасов s_v на итерации v будем обозначать $P_v(s_v)$. Отметим, что начальная величина запасов топлива s_0 в рассматриваемом алгоритме является фиксированной. Это означает, что вероятность данного значения запасов равна единице. Остальные значения запасов имеют нулевую плотность вероятности.

Обозначим $\varphi(s_v, s_{v+1})$ плотность вероятности перехода за одну итерацию от уровня запасов $s_v \in [0; z]$ к уровню запасов $s_{v+1} \in [0; z]$. Тот факт, что алгоритм вырабатывает однородную марковскую последовательность, означает неизменность функции φ по итерациям. Эта функция определяется исходя из (3.26) и плотности вероятности случайной величины L_v .

Обозначим $\Psi(P)$ преобразование функции плотности вероятности на одной итерации, соответствующей рассматриваемому нами алгоритму. Пусть P_v – функция плотности вероятности, удовлетворяющая условиям (3.27). Тогда

$$P_{v+1} = \Psi(P_v) \quad (3.28)$$

также функция плотности вероятности, удовлетворяющая (3.27). Значения функции P_{v+1} определяется через значения функции P_v по правилу

$$P_{v+1}(s_{v+1}) = \int_0^z \varphi(s_v, s_{v+1}) P_v(s_v) ds_v \quad (3.29)$$

Это правило и определяет отображение Ψ .

Отметим, что каждое значение s_v вырабатываемой последовательности объемов запасов топлива можно считать реализацией случайной величины с плотностью вероятности P_v , определяемой по правилу (3.28).

Стационарный процесс. Для однородной марковской последовательности существует такая плотность вероятности ее реализации, которая не меняется в результате итеративного перехода [113; 114]. Обозначим эту плотность вероятности \bar{P} . $\bar{P}(s)$ удовлетворяет (3.26) и при этом

$$\bar{P} = \Psi(\bar{P}). \quad (3.30)$$

Известно, что марковская однородная последовательность обладает свойством сходимости к стационарному процессу [113; 114]. Каковы бы ни были начальные состояния (плотность вероятности P_0) с ростом числа итераций, при $v \rightarrow \infty$ плотности вероятности сходятся к плотности вероятности стационарного состояния $P_v \rightarrow \bar{P}$. В силу этого свойства стационарные состояния называют также финитными (предельными).

Достаточное условие единственности стационарного состояния. У однородной марковской последовательности может быть несколько стационарных состояний. Из-за этого может возникнуть неоднозначность в оценках показателей, рассчитываемых на модели анализа надежности топливоснабжения с энергетических плантаций.

Для того чтобы у рассматриваемого алгоритма формирования переходящих запасов топлива было единственное стационарное состояние, достаточно, чтобы от любого значения $\underline{s} \in [0; z]$ можно было перейти с положительным значением плотности вероятности в любое состояние $\bar{s} \in [0; z]$ за некоторое конечное число итераций. То есть для любых значений $\underline{s} \in [0; z]$, $\bar{s} \in [0; z]$ либо $\varphi(\underline{s}, \bar{s})$ имеет положительное значение, либо существует целое $k \geq 1$ и величины $s^r \in [0; z]$, $r = 1, \dots, k-1$ такие, что $\varphi(\underline{s}, s^1), \varphi(s^k, \bar{s}), \varphi(s^r, s^{r+1}), r = 1, \dots, k-1$ положительные. Для достижения указанных свойств достаточно выполнения следующих двух условий:

1) внутри интервала $[L^1, L^2]$ должно находиться нулевое значение

$$L^1 < 0 < L^2; \quad (3.31)$$

2) плотность вероятности реализации случайной величины L на всем интервале $[L^1, L^2]$ должна быть положительной.

Для выполнения второго условия достаточно, чтобы дискретный набор величин $b^\tau \bar{Q}$, $\tau = 1, \dots, T$ был распределен настолько плотно, чтобы максимальная разность между их соседними значениями была меньше длины интервала $[R^1, R^2]$.

Невыполнение неравенства (3.31) будет приводить к стационарным вырожденным ситуациям, где уровень запасов по всем итерациям имеет одно и то же детерминированное значение. Так, если $0 < L^1 \leq L^2$, то уровень запасов будет возрастать по итерациям, пока не примет значение равное z . Если $L^1 \leq L^2 < 0$, то уровень запасов будет снижаться по итерациям пока не примет стационарное нулевое значение. Случай $L^1 = L^2 = 0$ означает, что запасы не изменяются по итерациям, на всех итерациях они равны s_0 .

Экспериментальная оценка числа итераций, необходимых для достижения ситуации, близкой к стационарной. Для того, чтобы можно было сказать, что получаемые оценки не зависят от выбора начального уровня запасов,

необходимо использовать такое число итераций, которое бы приводило к значению плотности вероятностей близкой к финитной.

На рисунках 3.6 и 3.7 представлены результаты расчета двух показателей рассматриваемой однородной марковской последовательности – среднеарифметического значения уровня запасов и стандартного отклонения от среднеарифметического значения. Здесь приведены три разные случайные реализации процесса с использованием разных начальных значений запасов. Согласно рисунку 3.6 уже на итерации $\nu = 6000$ среднеарифметическое значение уровней запасов расходятся не более чем на 2 %. Стандартные отклонения расходятся менее, чем на 2 %, после итерации $\nu = 4000$. Обоснованно можно сделать вывод о том, что использованных итераций $\nu = 65000$ вполне достаточно для получения достоверных результатов.



Рисунок 3.6 – Изменение по итерациям среднеарифметического значения для трех реализаций случайного процесса изменения запасов многолетнего регулирования



Рисунок 3.7 – Изменение по итерациям среднеквадратического отклонения от среднеарифметического значения для трех реализаций случайного процесса изменения запасов многолетнего регулирования

Вид функции плотности вероятности запасов для стационарного состояния. На рисунке 3.8 представлена гистограмма распределения запасов топлива многолетнего регулирования для одного из вариантов расчетов на модели анализа надежности топливоснабжения. Максимальный запас топлива равен емкости складов и составляет в данном случае 3811 т у.т. Весь интервал распределения запасов многолетнего регулирования разделен на 10 равных подынтервалов. Значения по оси абсцисс соответствуют правым границам подынтервалов. Из рисунка 3.8 видно, что повышенные вероятности запасов наблюдаются в первом и последнем подынтервале. Повышенная вероятность запасов в первом подынтервале связана с возникновением ситуаций дефицита в некоторых случаях. Повышенная вероятность запасов в последнем подынтервале связана с возникновением ситуаций, когда образуются излишки топлива. Центральная часть гистограммы достаточно однородна, имеет унимодальный характер.

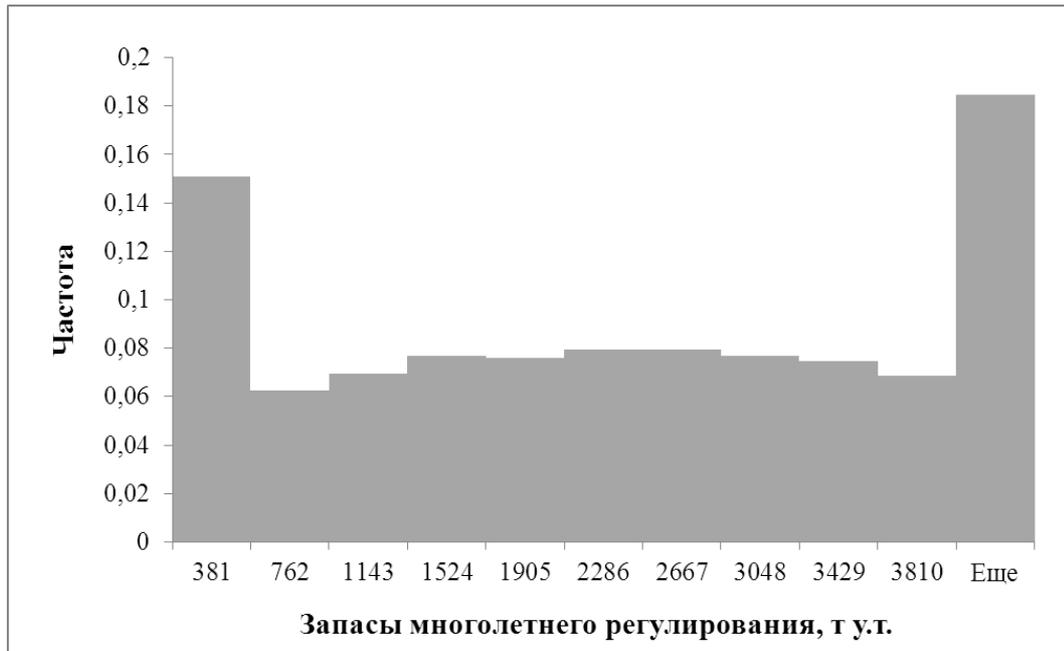


Рисунок 3.8 – Гистограмма распределения запасов топлива многолетнего регулирования

Следует отметить, что при одних и тех же вероятностях потребности и производства топлива, после расчетов на модели, распределение вероятностей разных уровней запасов топлива многолетнего регулирования может изменяться в зависимости от рассматриваемых значений резерва мощности и емкости складов.

Эргодичность. Стационарная однородная марковская последовательность обладает, как известно [114–115], свойством эргодичности, согласно которому итеративно вырабатываемая случайная последовательность эквивалентна набору рассматриваемых случайных величин. Это свойство позволяет использовать процедуры усреднения значений по итерациям при расчете показателей на базе модели анализа надежности топливоснабжения с энергетических плантаций.

Для того чтобы получить стабильные результаты, необходимо использовать довольно большую выборку, то есть необходимо провести достаточно большое количество итераций для последовательности в стационарном состоянии. В представленных в данной главе расчетах использовалось 65000 итераций, что, как показали экспериментальные расчеты, может гарантировать хорошие стабильные результаты.

3.6 Выводы главы 3

Проведен анализ накопленных многолетних метеорологических наблюдений для оценки надежности теплоснабжения населенных пунктов биотопливом с энергетических плантаций. На основе многолетних метеорологических данных произведена оценка диапазонов и интенсивностей отклонений потребностей в топливе на теплоснабжение от среднеожидаемой величины по ряду пунктов метеонаблюдений Урала, Сибири и Дальнего Востока. Выявлено, что при переходах от более холодных к более теплым районам, роль случайного фактора в потреблении топлива на отопление возрастает.

Разработаны методы анализа и синтеза надежности топливоснабжения с энергетических плантаций отдаленных населенных пунктов. Эти методы базируются на созданной системе вложенных моделей, которая включает:

- имитационную модель функционирования системы топливоснабжения в течение одного года (от начала одного отопительного периода до начала следующего);
- модель анализа надежности топливоснабжения при заданном составе средств резервирования, базирующаяся на многократном использовании имитационной модели функционирования;
- модель синтеза надежности топливоснабжения, основанная на варьировании средств резервирования в модели анализа надежности.

При анализе и синтезе надежности топливоснабжения учитываются действия случайных факторов в производстве, потреблении и переходящих запасах топлива. Реализации случайных величин производства и потребления при имитации функционирования системы в течение года определяются методом Монте-Карло. Случайная величина переходящих запасов топлива формируется методом, который, как было показано, реализует дискретный марковский стационарный процесс.

Проведены экспериментальные исследования на модели. Согласно проведенным оценкам, в ценовых и природно-метеорологических условиях Иркутской

области оптимальным составом средств обеспечения надежности отдаленных населенных пунктов является следующий: резерв мощности – 0,05 математического ожидания потребности в топливе и емкость складов, равная 0,6 математического ожидания потребности топлива. Вероятность ситуации дефицита в этом случае составляет 0,1.

Исследованы влияния различных случайных факторов на надежность топливоснабжения и оптимальный состав средств резервирования. Установлено, что с возрастанием интенсивности колебаний в производстве топлива, вероятность дефицита и математическое ожидание суммы затрат на обеспечение надежности топливоснабжения и ущербов от дефицита возрастают.

Экспериментальные вычисления показали, что для получения достоверных результатов исследования достаточно 6000 итераций.

Достаточным условием единственности стационарного состояния последовательности запасов топлива является возможность перехода из любого состояния запасов топлива в любое другое состояние за конечное число итераций с положительным значением плотности вероятности.

Для получения надежных результатов необходимо использовать большое количество итераций для последовательности в стационарном состоянии. Экспериментальные расчеты показали, что использование 65000 итераций может гарантировать стабильные результаты.

Глава 4. Программно-вычислительный комплекс для анализа эффективности и надежности топливоснабжения с энергетических плантаций

В данной главе рассматривается программно-вычислительный комплекс «Анализ эффективности и надежности топливоснабжения с энергетических плантаций». Этот программно-вычислительный комплекс предназначен для реализации комплекса математических моделей, представленных в главах 2 и 3.

8 сентября 2017 года в Федеральной службе по интеллектуальной собственности зарегистрирована программа для ЭВМ «Анализ надежности топливоснабжения с энергетических плантаций», входящая в данный программно-вычислительный комплекс. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017619882 (Приложение G). Язык программирования: Visual Basic for Applications.

4.1 Описание программно-вычислительного комплекса «Анализ эффективности и надежности топливоснабжения с энергетических плантаций»

Программно-вычислительный комплекс «Анализ эффективности и надежности топливоснабжения с энергетических плантаций» (рисунок 4.1) включает в себя семь последовательных блоков.

Первый – блок обработки метеоданных. Далее следует блок расчета затрат в детерминированных усредненных условиях, который реализует модель анализа эффективности функционирования энергетических плантаций. В рамках блока расчета затрат в случайно меняющихся условиях происходит расчет стоимостных показателей для модели анализа надежности топливоснабжения. Последние 4 блока вместе реализуют систему вложенных моделей анализа и синтеза надежности топливоснабжения с энергетических плантаций (рисунок 3.1). Блок генерации случайных данных потребности и производства топлива и блок имитации функционирования энергетических плантаций в течение года реализуют модель функ-

ционирования энергетических плантаций в течение одного года, блок обработки результатов расчетов на всех итерациях – модель анализа надежности топливоснабжения, блок оптимизации состава средств обеспечения надежности – модель синтеза надежности топливоснабжения с энергетических плантаций.

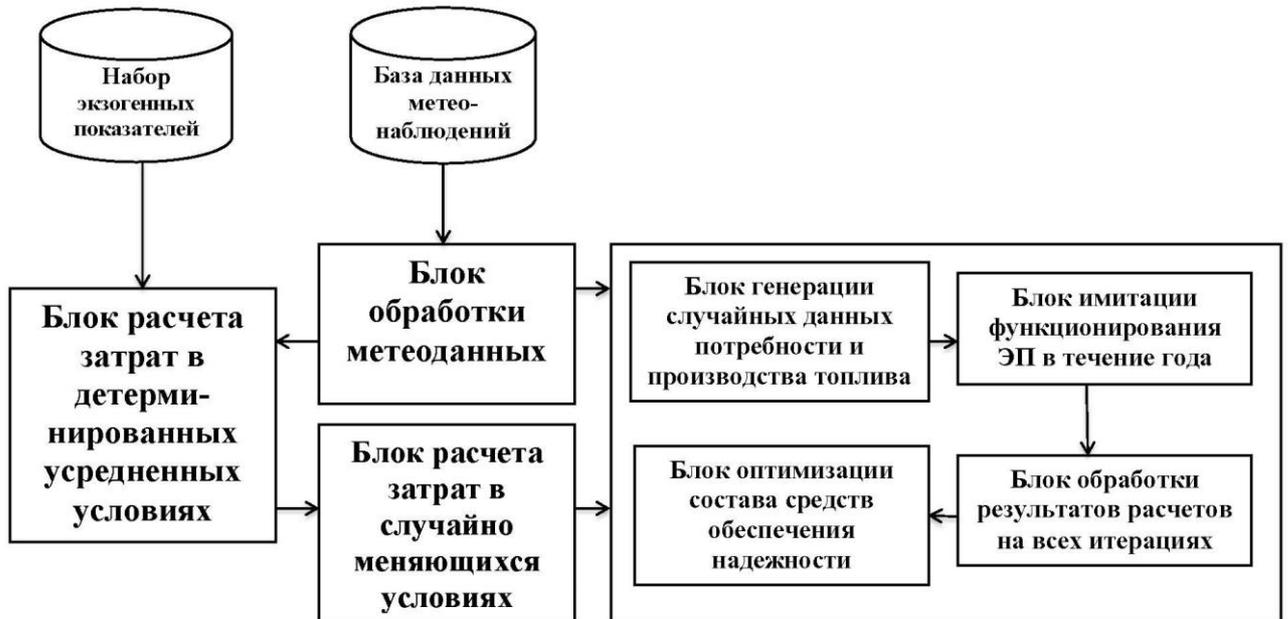


Рисунок 4.1 – Архитектура ПК «Анализ надежности топливоснабжения с энергетических плантаций»

Блок обработки метеорологических данных. В качестве исходного материала используются многолетние данные о среднесуточных температурах наружного воздуха [104] в конкретном регионе. В рамках этого блока производятся следующие действия: расчет продолжительностей отопительных периодов, расчет показателя среднесуточной разности температур, расчет интегральной разности температур за все рассматриваемые отопительные периоды, расчет среднемноголетнего значения интегральной разности температур, расчет отклонений интегральной разности температур внутри и вне здания от среднемноголетнего значения. Эти показатели необходимы для расчета средней величины потребности в топливе и для генерации случайных величин потребности в топливе.

Блок расчета затрат в детерминированных усредненных условиях. Этот блок реализует рассмотренную во 2 главе модель для исследования эффективности энергетических плантаций в детерминированных условиях.

Блок расчета затрат в случайно меняющихся условиях. В рамках этого блока происходит формирование затратных показателей (объема инвестиций, среднегодовых текущих затрат, приведенных затрат, предельных затрат и др.) по производству и транспортировке биотоплива в конкретном году для модели анализа надежности топливоснабжения. Случайность связана с фактической реализацией величины производства топлива (зависит от продуктивности энергетических плантаций).

Блок генерации случайных данных потребностей в топливе и объемов производства в отдельном году. Этот блок реализует алгоритмы выбора случайных реализаций методом Монте-Карло объемов потребности и производства. Эти алгоритмы отражены в главе 3 при описании модели анализа надежности топливоснабжения с энергетических плантаций. Относительно автономное существование этих блоков позволяет заменять, в случае необходимости, их на другие алгоритмы формирования указанных случайных величин.

Блок имитации функционирования энергетических плантаций в течение года. На основе сгенерированных случайных значений потребности и производства топлива рассчитываются величины переходящих запасов топлива, располагаемых ресурсов дефицита, остатков топлива, величины прироста затрат, связанных с созданием средств обеспечения надежности на данной итерации ν . Осуществляется переход к следующей итерации $\nu + 1$. Итерационное имитирование завершается при $\nu = V$, после чего происходит обработка полученных результатов.

Блок обработки результатов расчетов на всех итерациях. После завершения итерационного процесса осуществляется обработка полученных результатов для расчета показателей надежности топливоснабжения, обобщенно характеризующих особенности функционирования изучаемой системы в случайных условиях в т.ч. математического ожидания дефицита, вероятности появления де-

фицитных ситуаций, математического ожидания суммы затрат на обеспечение надежности и ущербов от дефицита.

Блок оптимизации состава средств обеспечения надежности. Для оптимизации показателей резерва мощности и емкости складов используются алгоритмы варьирования уровней резерва мощности и емкости складов. Критерием выбора оптимального состава средств обеспечения надежности топливоснабжения является минимум математического ожидания затрат на обеспечение надежности топливоснабжения и ущербов от дефицита.

4.2 Проведение исследования эффективности топливоснабжения с энергетических плантаций

Для расчета приведенных затрат на топливоснабжение с энергетических плантаций пользователь должен ввести в соответствующие поля (рисунок 4.2) значения экзогенных показателей (перечисленных в разделе 2.1.3): базовых параметров модели, удельных капитальных и текущих затрат, технических характеристик устройств для каждого из рассматриваемых наборов технических средств.

1	116	117
2	1. Набор 1	
3		
4	1.1. Базовые показатели	
5	Кол-во секторов (t)	6
6	Продуктивность ЭП	500
7	Цена альтернативного топлива	0,0025
8		
9	1.2. Показатели удельных капитальных затрат	
10	Стоимость устройства для посадки саженцев	0,2
11	Стоимость грузового автомобиля	2,9
12	Стоимость опроцессора для рубки дров	0,6
13	Стоимость одного трактора	0,8
14	Стоимость строительства 1 км грузосборочной магистрали	0,2
15	Стоимость строительства 1 км постоянных дорожных веток	0,1
16	Стоимость строительства 1 м ³ склада	0,0001
17	Стоимость строительства 1 м ² парника	0,00005
18		
19	1.3. Показатели удельных текущих затрат	
20	Среднегодовой размер оплаты труда	0,02
21	Стоимость моторного топлива	0,000035
22		
23	1.4. Характеристики технических устройств	
24	Ширина колеи трактора	0,002
25	Средняя скорость трактора	10
26	Расход топлива трактором	10
27	Расход топлива грузовым автомобилем	30
28	Производительность машины для посадки саженцев	6000
29	Производительность процессора для рубки дров	10
30	Объем кузова автомобиля	19
31	Средняя скорость грузового автомобиля	50
32		
33	1.5. Нормативные показатели	
34	Нормативный к-т эффективности капиталовложений	0,12
35	Расстояние между дорожными ветками	1
36	Минимальный радиус ЭП, при котором нет грузосборочной магистрали	5
37	Плотность посадки саженцев	150000
38	Количество рабочих часов машины для посадки саженцев за посадочный период	336
39	Количество рабочих часов процессора для рубки дров зазаготовительный период	504
40	К-т перевода условного топлива в объем древесного топлива	0,18
41	Количество рабочих часов по транспортировке биотоплива	504
42	Удельная площадь парника	0,05
43	К-т увеличения общего числа работающих	1,3
44		
45	Климатические характеристики	
46	Температура в помещении	18
47	Средняя температура за отопительный период	-8,06
48	Расчетна температура наружного воздуха	-39
49	Продолжительность отопительного периода	237,77

Рисунок 4.2 – Ввод экзогенных показателей для расчета на модели анализа эффективности топливоснабжения с энергетических плантаций

После ввода данных в рамках блока расчета затрат в детерминированных усредненных условиях (рисунок 4.3), автоматически производится расчет инве-

стиций, текущих среднегодовых затрат, стоимость альтернативного привозного топлива, приведенных затрат и максимального экономического эффекта от использования энергетических плантаций.

4	1	2	5	6	15	22	26	103
	Численность населения, тыс.чел.	Потребность в топливе, т.у.т.	Площадь плантации, кв.км.	Радиус плантации, км.	Инвестиции в создание ЭП	Среднегодовые затраты на функционирование ЭП	Максимальный экономический эффект от использования ЭП	Приведенные затраты
1								
2	0,05	0,00	0,60	0,44	0,20	0,02	0,12	1,30
3	0,50	662,49	7,95	1,59	2,68	0,25	0,36	1,30
4	1,00	1324,98	15,90	2,25	5,16	0,53	2,17	1,15
5	1,50	1987,46	23,85	2,76	7,77	0,84	3,20	1,77
6	2,00	2649,95	31,80	3,18	10,56	1,19	4,17	2,46
7	2,50	3312,44	39,75	3,56	13,58	1,59	5,06	3,22
8	3,00	3974,93	47,70	3,90	16,86	2,04	5,87	4,06
9	3,50	4637,41	55,65	4,21	20,43	2,55	6,59	5,01
10	4,00	5299,90	63,60	4,50	24,31	3,13	7,20	6,05
11	4,50	5962,39	71,55	4,77	28,54	3,78	7,71	7,20
12	5,00	6624,88	79,50	5,03	34,12	4,49	7,97	8,59
13	5,50	7287,36	87,45	5,28	39,14	5,29	8,23	9,98
14	6,00	7949,85	95,40	5,51	44,55	6,16	8,37	11,51
15	6,50	8612,34	103,35	5,74	50,37	7,12	8,37	13,17
16	7,00	9274,83	111,30	5,95	56,63	8,17	8,22	14,96
17	7,50	9937,31	119,25	6,16	63,35	9,30	7,94	16,90
18	8,00	10599,80	127,20	6,36	70,53	10,53	7,50	18,99
19	8,50	11262,29	135,15	6,56	78,19	11,86	6,92	21,24
20	9,00	11924,78	143,10	6,75	86,35	13,28	6,17	23,65

Рисунок 4.3 – Расчет затрат на создание и функционирование энергетической плантации

После расчета приведенных затрат по каждому набору технических средств на листе «Результаты» в столбце «Оптимальный набор» появляется название варианта, при котором приведенные затраты на топливоснабжение минимальны (рисунок 4.4).

В представленном выше примере (рисунки 4.2–4.4) все расчеты производятся для различных объемов производства. В случае необходимости поиска оптимального значения объема производства биотоплива с энергетических плантаций, на листе «Результаты» в соответствующей таблице отображается его оптимальное значение (рисунок 4.5).

	5	6	7	8	9
1	Максимальный экономический эффект			Наибольший максимальный экономический эффект	Оптимальный набор
2	Набор 1	Набор 2	Набор 3		
3	0,12	0,09	0,09	0,12	Набор 1
4	0,36	1,02	1,02	1,02	Набор 1
5	2,17	2,03	2,02	2,17	Набор 1
6	3,20	2,97	2,95	3,20	Набор 1
7	4,17	3,84	3,79	4,17	Набор 1
8	5,06	4,62	4,53	5,06	Набор 1
9	5,87	5,29	5,16	5,87	Набор 1
10	6,59	5,85	5,65	6,59	Набор 1
11	7,20	6,29	6,01	7,20	Набор 1
12	7,71	6,59	6,22	7,71	Набор 1
13	7,97	6,75	6,27	7,97	Набор 1
14	8,23	6,77	6,15	8,23	Набор 1
15	8,37	6,63	5,86	8,37	Набор 1
16	8,37	6,32	5,39	8,37	Набор 1
17	8,22	5,85	4,73	8,22	Набор 1
18	7,94	5,20	3,87	7,94	Набор 1
19	7,50	4,37	2,81	7,50	Набор 1
20	6,92	3,36	1,53	6,92	Набор 1

Рисунок 4.4 – Выбор оптимального состава средств производства

	10	11
10	Оптимальный объем производства:	7950

Рисунок 4.5 – Выбор оптимального объема производства биотоплива с энергетических плантаций

4.3 Проведение исследования надежности топливоснабжения с энергетических плантаций

Для анализа надежности топливоснабжения с энергетических плантаций пользователь должен ввести значения входных параметров модели (рисунок 4.6): нормативное значение максимального часового расхода теплоэнергии в конкретном населенном пункте на отопление 1 м^2 площади жилых зданий g_h , расчетная температура внутреннего воздуха отапливаемых зданий \hat{t} , расчетная температура

наружного воздуха для проектирования отопления t_{out} , норматив жилищной обеспеченности A , численность населения n , при среднеквадратическое отклонение случайной величины производства топлива σ , величина запасов топлива на начало первого отопительного периода u_0 , коэффициент потерь при хранении топлива α , затраты на создание резерва мощности $\Delta C_v(\gamma, z, R_v, s_v)$, удельные ущербы от дефицита μ .

	13	14
	Входные параметры	
1		
2	Максимальный часовой расход теплоэнергии на отопление	158
3	Расчетная температура внутреннего воздуха отопительного периода	18
4	Расчетная температура наружного воздуха для проектирования отопления	-39
5	Норматив жилищной обеспеченности, количество ватт на квадратный метр	18
6	Численность населения	6000
7	Ср.кв.ад.откл производства топлива	952,5
8	Величина запасов, оставшихся с момента времени t_0	0
9	Коэффициент потерь при хранении	0,1
10	Затраты на создание резерва мощности	0,0026
11	Ущерб от дефицита	0,009
12		
13	Оптимизируемые переменные	
14	К-т емкости склада для обеспечения надежности	0,6
15	Резерв мощности	0,05

Рисунок 4.6 – Ввод входных параметров в модели анализа надежности топливоснабжения с энергетических плантаций

После ввода экзогенных показателей в рамках имитационной модели функционирования системы топливоснабжения с энергетических плантаций в течение одного года будут сгенерированы случайные величины потребления Q_v и производства топлива R_v на каждой итерации. Далее производится расчет значений следующих показателей: располагаемые ресурсы RR_v , переходящие запасы топ-

лива s_v , остаток топлива на конец отопительного периода u_v , величина дефицита D_v . (рисунок 4.7).

1	5	6	7	8	9	11	
Потребность в топливе, т.т.	Производство топлива, т.т.	Располагаемые ресурсы, т.т.	Переходящие запасы топлива, т.т.	Остаток топлива на конец отопительного периода, т.т.	Наличие дефицита	Величина дефицита	
2	6502,2	6431,3	6752,8	0,0	250,7	0	0,0
3	6614,6	5715,1	6226,4	225,6	0,0	1	388,2
4	6234,2	7952,9	8350,5	0,0	2116,4	0	0,0
5	7042,0	6154,8	8367,3	1904,7	1325,3	0	0,0
6	6620,3	5259,0	6714,7	1192,8	94,4	0	0,0
7	6639,8	6676,7	7095,5	85,0	455,7	0	0,0
8	6669,9	6045,2	6757,6	410,1	87,7	0	0,0
9	6707,5	5748,3	6114,6	78,9	0,0	1	592,8
10	6893,2	6089,4	6393,9	0,0	0,0	1	499,3
11	6926,8	7000,8	7350,8	0,0	424,0	0	0,0
12	6657,8	6224,3	6917,1	381,6	259,3	0	0,0
13	6222,6	6064,6	6601,3	233,4	378,7	0	0,0
14	6964,8	9985,0	10825,0	340,8	3860,3	0	0,0
15	6010,1	6865,1	10682,6	3474,2	4672,5	0	0,0
16	6750,6	6764,8	10913,1	3810,0	4162,5	0	0,0
17	6905,0	6471,0	10540,8	3746,3	3635,8	0	0,0
18	6804,9	6484,8	10081,2	3272,2	3276,3	0	0,0
19	6671,4	5736,7	8972,2	2948,7	2300,8	0	0,0
20	6817,3	7760,1	10218,8	2070,7	3401,5	0	0,0

Рисунок 4.7 – Расчеты на модели функционирования системы топливоснабжения с энергетических плантаций в течение одного года

Далее на модели анализа надежности топливоснабжения рассчитываются обобщающие показатели надежности и усредненных затрат топливоснабжения с энергетических плантаций, такие как математическое ожидание математическое ожидание дефицита MD , оценка вероятности появления дефицита PD , математическое ожидание суммы затрат на обеспечение надежности и ущербов от дефицита $F(\gamma, z)$ (рисунок 4.8).

	13	14
17	Промежуточные значения	
18	Математическое ожидание потребности в топливе	6350
19	Математическое ожидание производства топлива	6350
20		
21	Выходные параметры	
22	Математическое ожидание располагаемых ресурсов	8778
23	Математическое ожидание остатков топлива на конец периода	2110
24	Вероятность дефицита	0,1
25	Математическое ожидание дефицита	68,5
26	Математическое ожидание суммы затрат на обеспечение надежности	1,69

Рисунок 4.8 – Расчет основных показателей надежности топливоснабжения на модели анализа надежности топливоснабжения с энергетических плантаций

На верхнем уровне системы вложенных моделей, представленной на рисунке 3.1, в рамках модели синтеза надежности топливоснабжения осуществляется выбор оптимального состава средств обеспечения надежности – значений резерва мощности γ и емкости склада z (рисунок 4.9).

	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
18	Поиск оптимального состава средств обеспечения надежности										
19		0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
20	0	3,698	3,626	3,568	3,522	3,489	3,468	3,458	3,459	3,471	3,493
21	0,1	2,726	2,654	2,601	2,567	2,550	2,550	2,565	2,594	2,636	2,689
22	0,2	2,252	2,174	2,120	2,090	2,081	2,092	2,123	2,169	2,231	2,306
23	0,3	2,037	1,952	1,893	1,862	1,856	1,875	1,914	1,973	2,049	2,138
24	0,4	1,943	1,850	1,787	1,754	1,750	1,773	1,818	1,884	1,968	2,067
25	0,5	1,908	1,810	1,743	1,708	1,703	1,727	1,776	1,848	1,938	2,045
26	0,6	1,904	1,803	1,734	1,696	1,690	1,714	1,764	1,840	1,935	2,047
27	0,7	1,916	1,813	1,742	1,703	1,696	1,720	1,772	1,849	1,947	2,063
28	0,8	1,937	1,833	1,761	1,721	1,714	1,738	1,790	1,868	1,968	2,087
29	0,9	1,963	1,858	1,786	1,746	1,739	1,763	1,816	1,895	1,996	2,117
30	1	1,993	1,887	1,814	1,774	1,768	1,793	1,846	1,925	2,028	2,150

Рисунок 4.9 – Поиск оптимального состава средств обеспечения надежности топливоснабжения с энергетических плантаций

Каждый раз после изменения экзогенных параметров оптимальные значения резерва мощности γ и емкости склада z рассчитываются заново и отображаются в соответствующей таблице (рисунок 4.10).

	13	14
32	Оптимальные значения средств обеспечения надежности	
33	К-т емкости склада для обеспечения надежности	0,6
34	Резерв мощности	0,05

Рисунок 4.10 – Поиск оптимальных значений средств обеспечения надежности топливоснабжения с энергетических плантаций

4.3.1 Экспериментальная оценка числа итераций, необходимых для получения достоверных результатов

Для того чтобы можно было утверждать, что используемое количество итераций достаточно для получения достоверных результатов, на листе «Эргодичность» рассчитываются среднеарифметическое значение уровня запасов и среднеквадратическое отклонение от среднеарифметического значения запасов для трех случайных реализаций процесса с использованием разных начальных уровней запасов (рисунок 4.11) и автоматически строятся графики, представленные на рисунках 3.6 и 3.7.

	I	J	K	L	M	N	O
4	Кол-во итераций	Среднее арифметическое значение (реализация 1)	Среднее арифметическое значение (реализация 2)	Среднее арифметическое значение (реализация 3)	Стандартное отклонение (реализация 1)	Стандартное отклонение (реализация 2)	Стандартное отклонение (реализация 3)
5	500	2227	1998	1935	1280	1389	1369
6	1000	2141	2048	2096	1339	1370	1324
7	2000	2140	2028	2165	1310	1356	1305
8	3000	2168	2093	2169	1300	1351	1322
9	4000	2132	2101	2186	1316	1328	1316
10	5000	2104	2102	2155	1324	1333	1324
11	6000	2101	2117	2139	1329	1324	1326
12	7000	2104	2120	2125	1327	1325	1326
13	8000	2111	2137	2110	1327	1324	1325
14	9000	2128	2132	2105	1327	1325	1329
15	10000	2120	2138	2108	1324	1325	1325
16	11000	2123	2127	2116	1324	1327	1325
17	12000	2121	2150	2110	1320	1321	1326
18	13000	2123	2149	2121	1321	1323	1326
19	14000	2124	2139	2111	1322	1323	1329
20	15000	2123	2138	2108	1324	1325	1331
21	16000	2132	2133	2110	1327	1327	1329
22	17000	2127	2129	2106	1326	1330	1331
23	18000	2137	2129	2111	1325	1329	1330
24	19000	2130	2129	2113	1326	1330	1329
25	20000	2129	2127	2119	1327	1332	1330
26	21000	2125	2134	2116	1325	1332	1331
27	22000	2131	2131	2112	1323	1331	1333
28	23000	2131	2133	2110	1324	1331	1333

Рисунок 4.11 – Расчет среднеарифметического значения уровня запасов и стандартного отклонения от среднеарифметического значения для трех случайных реализаций

4.4 Выводы главы 4

Представлена архитектура программно-вычислительного комплекса, разработанного для реализации моделей анализа эффективности и надежности топливоснабжения с энергетических плантаций.

Изложены основные этапы проведения вычислительных экспериментов при исследованиях эффективности и надежности топливоснабжения на базе программно-вычислительного комплекса.

Заключение

Биотопливо является наиболее распространенным среди всех возобновляемых источников энергии. За счет организованного процесса посадок, сбора, транспортировки и хранения биомассы, его экономическая эффективность гораздо выше в тех регионах, где практикуется специальное выращивание древесины на энергетических плантациях с целью ее использования для получения энергии.

Использование биотоплива имеет целый ряд преимуществ: диверсификация производства энергии, снижение стоимости энергии в населенных пунктах, отдаленных от основных магистралей, сокращение выбросов парниковых газов в атмосферу и др.

В диссертационной работе впервые представлен комплекс моделей для анализа эффективности и надежности топливоснабжения с энергетических плантаций.

Разработана математическая модель исследования экономической эффективности производства биотоплива, получаемого с энергетических плантаций для обеспечения заданного потребления в топливе с минимальными издержками. Исследована вся технологическая цепочка производства и транспортировки биотоплива. Модель анализа эффективности энергетических плантаций апробирована на примере, близком к природно-метеорологическим условиям Иркутской области. Дана оценка оптимального объема использования биотоплива с энергетических плантаций в зависимости от цены традиционно используемого в населенном пункте топлива.

Для обеспечения надежности теплоснабжения проведен анализ накопленных за 100 лет метеорологических наблюдений по ряду пунктов метеонаблюдений Урала, Сибири и Дальнего Востока. На основе данных метеорологических наблюдений оценены интенсивности и диапазоны отклонений потребности в топливе на теплоснабжение от среднеожидаемых величин.

Построена математическая модель анализа надежности топливоснабжения с энергетических плантаций. Представлены модели анализа и синтеза надежности

топливоснабжения с энергетических плантаций и экономико-математический метод расчета оптимального резерва мощности. Модель апробирована на примере, близком к природно-метеорологическим условиям Иркутской области. Дана оценка оптимального состава средств резервирования для обеспечения надежного снабжения котельно-печным топливом отдаленных населенных пунктов.

Разработан программно-вычислительный комплекс для реализации моделей для анализа эффективности и надежности топливоснабжения с энергетических плантаций.

Согласно представленным оценкам, создание энергетических плантаций является рентабельным при потребности в топливе до 14500 т у.т. Максимальный экономический эффект достигается при потребности в топливе 7950 т у.т. (что примерно соответствует населенному пункту с численностью населения 6000 человек). Площадь такой плантации составляет 95,4 км², радиус – 5,5 км.

Анализ эффективности энергетической плантации при годовом объеме производства биотоплива, равном 7950 т у.т., показал, что оптимальный резерв мощности – 0,05, оптимальная емкость складов – 0,6 от среднегодового потребления топлива. Вероятность дефицита в этом случае составляет 0,1.

Представленные результаты исследований показывают, что в рассмотренных ценовых и природно-метеорологических условиях экономически может быть очень выгодно создание энергетических плантаций для обеспечения топливом отдаленных населенных пунктов. Экономическая эффективность, оптимальные параметры энергетических плантаций существенно зависят от конкретных условий, в том числе от объемов потребностей отдельных населенных пунктов, конфигурации и степени удаленности территорий отводимых под энергетические плантации, от цены привозного топлива. Огромные дополнительные выгоды может дать учет в денежной форме экологических достоинств энергетических плантаций, что делает целесообразным проведение дальнейших более углубленных исследований экономической эффективности и организационно-технических проблем в создании энергетических плантаций.

Список литературы

1. Ващук, Л. Н. Как живут леса в России: от Петра I до наших дней / Л. Н. Ващук, Е. В. Губий, В. И. Зоркальцев // Эко. – 2013. – № 5. – С. 81-94.
2. О создании на территории муниципального образования «Прибайкальский район» Республики Бурятия особой экономической зоны туристско-рекреационного типа: Постановление Правительства РФ от 03.02.2007 г. N 68 // Собрание законодательства РФ. – 2007. – N 7. – ст. 889.
3. Вопросы создания особых экономических зон туристско-рекреационного типа на территории Иркутской области и Кабардино-Балкарской Республики. Постановление Правительства РФ от 29.09.2016 г. N 980 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201610030008>. – (Дата обращения: 24.07.2018).
4. Hellman, O. A special problem of large scale forest management / O. Hellman // European Journal of Operational Research. –1980. – Vol. 4(1). – P. 16-18.
5. Hellman, O. On the optimal control of the growth of a forest in a special case / O. Hellman // Journal of Optimization Theory and Applications. – 1981. – Vol. 34(4). – P. 579-591.
6. Hellman, O. A Mathematical Model for an Energy Forest / O. Hellman // Management Science. –1982. – Vol. 28(11). – P. 1247-1257.
7. Hellman, O. On the optimal control of a forest which consists of several species of trees / O. Hellman // TIMS Studies in the management sciences. – 1986. – Vol. 21. – P. 429-437.
8. Зоркальцев, В. И. Анализ интенсивности и синхронности колебаний потребности в топливе на отопление / В. И. Зоркальцев, Е. Н. Иванова Сыктывкар: Коми научный центр УрО Ан СССР, 1989. – 24 с.
9. Некрасов, А. С. Многолетнее регулирование расходов топлива на отопление и вентиляцию / А. С. Некрасов // Достижения и перспективы. Сер. «Энергетика». – 1986. – № 46. – С. 85-98.

10. Вопросы регулирования топливоснабжения: сборник научных трудов / под ред. А. С. Некрасова. – М.: ЦЭМИ, 1972.
11. Зоркальцев, В. И. Методы прогнозирования и анализа эффективности функционирования системы топливоснабжения / В. И. Зоркальцев. – М.: Наука, 1988. – 144 с.
12. Зоркальцев В. И. Многолетние колебания температур и проблемы надежности топливоснабжения / В. И. Зоркальцев. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2015. – 84 с.
13. Великанов, М. А. Основы многолетнего регулирования топливоснабжения с учетом изменчивости гидрометеорологических условий: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01 / Великанов Михаил Александрович – М., 1997. – 270 с.
14. Мазур, Ю. А. Проблемы маневренности в развитии энергетики / Ю. А. Мазур // М.: Наука, 1986. – 94 с.
15. Хрилев, Л. С. О влиянии климатического фактора на перспективную структуру топливно-энергетического баланса / Л. С. Хрилев // Теплоэнергетика. – 1960. – № 2. – С. 16-20.
16. Великанов, М.А. Оценка асинхронности многолетних колебаний расхода топлива под действием геофизических факторов / М. А. Великанов, А. С. Некрасов, А. Ш. Резниковский // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1988. – № 2. – С. 151-157.
17. Гневко, Г.Т. Среднемесячная температура воздуха и продолжительность отопительного периода с температурой воздуха ниже 8°С для экономических районов СССР. (ч.1, ч.2) / Г. Т. Гневко. – Обнинск: ВНИИТМИ – МИД, 1981. – 29 с.
18. Зоркальцев, В. И. Не последняя холодная зима / В. И. Зоркальцев, Ю. А. Шарапов // ЭКО. – 1986. – № 5. – С. 63-72.
19. Helby, P. Retreat from Salix – Swedish experience with energy crops in the 1990s / P. Helby, H. Rosenqvist, A. Roos // Biomass and Bioenergy. –2006. – Vol. 30(5). –P. 422-427.

20. Rosenqvist, H. A Profile and Analysis of Willow Growers in Sweden / H. Rosenqvist , A. Roos, E. Ling, B. Hektor // Biomass conference of the Americas von Elsevier Science. – 1999. – P. 11-16.
21. Rosenqvist, H. Willow growers in Sweden / H. Rosenqvist , A. Roos, E. Ling, B. Hektor // Biomass and Bioenergy. – 2000. – Vol. 18. – P. 137-145.
22. Nordborg, M. Energy analysis of poplar production for bioenergy in Sweden / M. Nordborg, G. Berndes, I. Dimitriou, A. Henriksson, B. Mola-Yudego // Biomass and Bioenergy. – 2018. – Vol. 112. – P. 110-120.
23. Robledo-Abad, C. Bioenergy production and sustainable development: science base for policymaking remains limited / C. Robledo-Abad C., H. Althaus, G. Berndes, S. Bolwig, E. Corbera // GCB Bioenergy. – 2007. – Vol. 9(3). – P. 541-556.
24. Rosenqvist, H. Economics of willow growing in Northern Ireland / H. Rosenqvist, M. Dawson // Biomass and Bioenergy. – 2005. – Vol. 28(1). – P. 7–14.
25. Krasuska, E. Potential land availability for energy crops production in Europe / E. Krasuska, C. Cadorniga, J. L. Tenorio, G. Testa, D. Scordia // Biofuels Bioproducts and Biorefining. – 2010. – Vol. 4. – P. 658-673.
26. Faber, A. Economic potential of perennial energy crops in Poland / A. Faber, R. Pudelko, R. Borek, M. Borzęcka–Walker, A. Syp, E. Krasuska, P. J. Mathiou // Journal of Food, Agriculture & Environment. – 2012. – Vol. 10. P. – 1178-1182.
27. Krasuska, E. Economics of energy crops in Poland today and in the future / E. Krasuska, H. Rosenqvist // Biomass and Bioenergy. – 2012. – Vol. 38. – P. 23-33.
28. Borzęcka-Walker, M. Life cycle assessment (LCA) of crops for energy production / M. Borzęcka-Walker, A. Faber, R. Pudelko, J. Kozura, A. Syp, R. Borek // Food Agriculture Environment. – 2011. – Vol. 9. – P. 698-700.
29. Stolarski, M. J. Economic efficiency of willow, poplar and black locust production using different soil amendments / M. J. Stolarski, E. Olba-Zięty, H. Rosenqvist, M. Krzyzaniak // Biomass and Bioenergy. – 2017. – Vol. 106. – P. 74-82.
30. Stolarski, M. J. Willow biomass production under conditions of low-input agriculture on marginal soils / M. J. Stolarski, S. Szczukowski, J. Tworkowski, A. Klasa // Fuel and Energy Abstracts. – 2011. – Vol. 262(8). – P. 1558-1566.

31. Stolarski, M.J. Short rotation woody crops grown on marginal soil for biomass energy / M. J. Stolarski, M. Krzyzaniak, S. Szczukowski, J. Tworkowski, A. Bieniek // Polish Journal of Environmental Studies. – 2014. – Vol. 23(5). – P. 1727-1739.
32. Iglinski, B. Bioenergy in Poland / B. Iglinski, A. Iglinska, W. Kujawski, R. Buczkowski, M. Cichosz // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2011. – Vol. 15(6). – P. 2999-3007.
33. Jezierska-Thole, A. Development of energy crops cultivation for biomass production in Poland / A. Jezierska-Thole, R. Rudnicki, M. Kluba // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – Vol. 62. – P. 534-545.
34. Stolarski, M.J. Analysis of the energy efficiency of short rotation woody crops biomass as affected by different methods of soil enrichment / M. J. Stolarski, M. Krzyżaniak, J. Tworkowski, S. Szczukowski, D. Niksa // Energy. – 2016. – Vol. 113. – P. 748-761.
35. Guidi Nissim, W. Long-term biomass productivity of willow bioenergy plantations maintained in southern Quebec, Canada / W. Guidi Nissim, F.E. Pitre, T. I. Teodorescu, M. Labrecque // Biomass and Bioenergy. – 2013. – Vol. – 56. – P. 361-369.
36. Havlickova, K. Short Rotation Coppice for Energy Purposes / K. Havlickova, J. Weger, I. Zanova // Economy Conditions and Landscape Functions in the Czech Republic. Proceedings of ISES World Congress, 2007. – Vol. 1. – P. 2482-2487.
37. Havlickova, K. Development model for energy crop plantations in the Czech Republic for the years 2008-2030 / K. Havlickova, J. Suchy // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2010. – Vol. 14(7). – P. 1925-1936.
38. Родькин, О. И. Планирование производства биотоплива из древесины быстрорастущей ивы на основе интерактивной модели / О. И. Родькин, В. А. Иванюкович, А. А. Шабанов // Вестник Витебского аграрного университета. – 2014. – № 2(80). – С. 39-44.
39. Родькин, О. И. Эколого-экономическое обоснование использования соломы в качестве биотоплива на основе интерактивной модели / О. И. Родькин, А.

А. Бутько, В. А. Пашинский, А. А. Шабанов // Экологический вестник. – 2014. – № 2(28). – С. 115-121.

40. Бутько, А. А. Оценка экологических и технологических аспектов использования растительных остатков зерновых и технических культур для получения энергии / А. А. Бутько, О. И. Родькин, В. А. Пашинский, Б. Крстич // Вестник Витебского аграрного университета. – 2015. – № 2-3(86-87). – С. 41-46.

41. Родькин, О. И. Энергетическое использование клона ивы корзиночной *Salix viminalis valetas gigantea* (Turbo) / О. И. Родькин, В. А. Пашинский, А. А. Бутько, Е. В. Иванова // Энергоэффективность. – 2014. – № 5. – С. 14-19.

42. Ледницкий, А. В. Формирование инфраструктуры для заготовки, производства, транспортировки и хранения древесного топлива в Республике / А. В. Ледницкий // Труды БГТУ. Сер. VII. Экономика и управление. – 2007. – Вып. XV. – С. 217-221.

43. Перспективы использования быстрорастущих древесных насаждений на загрязненных землях сельскохозяйственного назначения и лесного фонда для развития возобновляемой энергетики. Экологическая антропология: ежегодник / О. И. Родькин [и др.]. – Минск, 2007. – С. 36-39.

44. Усольцев, В. А. Фитомасса лесов Северной Евразии: предельная продуктивность и география / В. А. Усольцев. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 406 с.

45. Усольцев, В. А. Моделирование структуры и динамики фитомассы древостоев / В. А. Усольцев. – Красноярск: Изд-во Красноярского университета, 1985. – 191 с.

46. Christersson, L. Wood production potential in poplar plantations in Sweden / L. Christersson, K. Perttu, S. Ledin, S. Elowson // Biomass & Bioenergy. – 2010. – Vol. 34(9). – P. 1289-1299.

47. Christersson, L. Poplar plantations for paper and energy in the South of Sweden / L. Christersson // Biomass & Bioenergy. – 1998. – Vol. 32(11). – P. 997-1000.

48. Ericsson, T. Effect of varied nitrogen stress on growth and nutrition in three *Salix* clones / T. Ericsson // Physiologia Plantarum. – 2006. – Vol. 51(4). – P. 423-429.

49. Ericsson, T. Growth and nutrition of three *Salix* clones in low conductivity solutions / T. Ericsson // *Physiologia Plantarum*. – 2006. – Vol. 52(2). – P. 239–244.

50. Медяков, А. А. Математическая модель развития и накопления биомассы деревьев на примере сосны обыкновенной [Электронный ресурс] / А. А. Медяков, Е. М. Онучин, П. А. Перетягин // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2012. – № 82. – С. 371–388. – Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskaya-model-razvitiya-i-nakopleniya-biomassy-dereviev-na-primere-sosny-obyknovennoy>. – (Дата обращения 4.06.2017).

51. Романов, Е. М. Моделирование роста искусственных энергетических лесов [Электронный ресурс] / Е. М. Романов, Е. М. Онучин, Т. В. Нуреева // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2012. – № 82. – С. 317–331. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-rosta-iskusstvennyh-energeticheskikh-lesov>. – (Дата обращения 4.06.2017).

52. Онучин, Е. М. Моделирование процессов выращивания и заготовки энергетической биомассы в лесном комплексе [Электронный ресурс] / Е. М. Онучин, А. А. Семенов, А. Э. Алексеев // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2012. – № 82. – С. 481–496. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2012/08/pdf/16.pdf>. – (Дата обращения 4.06.2017).

53. Онучин, Е. М. Подходы к разработке и исследованию инновационной системы эффективного устойчивого лесопользования и лесовосстановления / Е. М. Онучин, Е. М. Романов // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия «Лес. Экология. Природопользование». – 2011. – № 3. – С. 3–9.

54. Романов, Е. М. Подходы к моделированию территориальных агролесоводственных биоэнергетических комплексов / Е. М. Онучин, Е. М. Романов, А. А. Семенов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубан-

ского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ). – 2012. – № 82(08). – С. 236-245.

55. Онучин, Е. М. Адаптивно-модульные машинно-технологические комплексы для интенсивного лесопользования / Е. М. Онучин // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ). – 2012. – № 82(08). – С. 259-272.

56. Панцхава, Е. С. Биоэнергетика в современном и будущем сельскохозяйственном производстве. Продовольственная безопасность. Гелиоэнергетика – новая научно-техническая революция XXI века / Е. С. Панцхава. – Москва: РУСАЙНС, 2017. – 306 с.

57. WBA Global Bioenergy Statistics 2016 [Электронный ресурс] // World Bioenergy Association, 2016. – 80 р. – Режим доступа: <http://www.worldbioenergy.org/uploads/WBA%20Global%20Bioenergy%20Statistics%202016.pdf>. – (Дата обращения 15.05.2017).

58. Об электроэнергетике (с изменениями на 25 ноября 2013 года). Федеральный закон от 26.03.2003 № 35-ФЗ. – Спб: ЦОТПБСППО, 2015. – 132 с.

59. Попель, О. С. Возобновляемые источники энергии: состояние и перспективы развития / О. С. Попель, В. С. Туманов // Альтернативная энергетика и экология. – 2007. – № 2(46). – С. 135-148.

60. Фортов, В. Е. Направления инновационного развития энергетики мира и России / В. Е. Фортов, А. А. Макаров // Успехи физических наук. – 2009. – Т. 168 – № 11. – С. 5-19.

61. Городов, Р. В. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 294 с.

62. Панцхава Е. С. Биоэнергетика. Мир и Россия. Биогаз: Теория и практика. / Е. С. Панцхава. – Москва: Русайнс, 2014. – 972 с.

63. WBA Global Bioenergy Statistics 2015 [Электронный ресурс] // World Bioenergy Association, 2015. – 64 р. – Режим доступа: <http://www.worldbioenergy.org/uploads/WBA%20Global%20Bioenergy%20Statistics%202015.pdf>. – (Дата обращения 5.06.2017).

64. Состояние биотопливной отрасли по итогам 2016 года. Рынки и перспективы [Электронный ресурс] // Ассоциация участников биотопливного рынка «ЭНБИО», 2016. – 41 с. – Режим доступа: <http://enbio.ru/files/%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%87%D0%B0%D1%82%D1%8C%20%D0%B0%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B8%CC%86%20%D0%BE%D1%82%D1%87%D0%B5%D1%82%20.pdf>. – (Дата обращения 15.05.2017).

65. World Energy Resources Bioenergy 2016 [Электронный ресурс] // World Energy Council, 2016. – 62 р. – Режим доступа: https://www.worldenergy.org/wpcontent/uploads/2017/03/WEResources_Bioenergy_2016.pdf. – (Дата обращения 5.06.2017).

66. Починков, С. В. Экономические основы устойчивого лесопользования: эффективное усвоение и воспроизводство лесных ресурсов / С. В. Починков. – СПб.: ПрофиКС, 2007. – 112 с.

67. Купцов, Н.С. Энергоплантации: Справочное пособие по использованию энергетических растений / Н. С. Купцов, Е. Г. Попов. – Минск: «Конфидо», 2015. – 128 с.

68. Холодков, В.С. Анализ развития биоэнергетики в северозападном регионе Российской Федерации. Шведско-российское сотрудничество / В. С. Холодков, Т. Штерн // PROnes. – 2006. – № 1. – С. 76-94.

69. Цыганов, А. Р. Биоэнергетика: энергетические возможности биомассы / А. Р. Цыганов, А. В. Клочков. – Минск: Беларус. Навука, 2012. – 143 с.

70. Da Costa, A.C.A. The situation of biofuels in Brazil: new generation technologies / A. C. A. Da Costa, D. A. G Aranda // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2010. – Vol. 14(9). – P. 3041-3049.

71. ГОСТ Р 52808-2007 Нетрадиционные технологии. Энергетика биоотходов. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2008. – 25 с.

72. Родионов, В. Г. Энергетика: проблемы настоящего и возможности будущего / В. Г. Родионов. – М.: ЭНАС, 2010. – 352 с.

73. Варфоломеев, С. Д. Биотоплива / С. Д. Варфоломеев, Е. Н. Ефременко, Л. П. Крылова Л.П // Успехи химии. – 2010. – Т. 79. – № 6. – С. 544-564.
74. Гельфанд, Е. Д. Технология биотоплив: учебное пособие для магистрантов, обучающихся по направлению 240700.68 «Биотехнология» / Е. Д. Гельфанд. – Архангельск: САФУ, 2012. – 60 с.
75. Квинт, В. Л. Станет ли этанол альтернативой бензину? / В. Л. Квинт // Экология и жизнь. – 2007. – № 6. – С. 40-45.
76. Lowe, A. T. Environmental guidelines for developing sustainable energy output from biomass / A. T. Lowe // Biomass and Bioenergy. – 1997. – № 13. – P. 187-328.
77. Пугач, Л. И. Нетрадиционная энергетика – возобновляемые источники, использование биомассы, термохимическая подготовка, экологическая безопасность: учебное пособие / Л. И. Пугач, Ф. А. Серант, Д. Ф. Серант. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 347 с.
78. The science of climate change: Questions and answers [Электронный ресурс] // Australian Academy of Science, Canberra, 2015. – 44 p. – Режим доступа: <https://www.science.org.au/files/userfiles/learning/documents/climate-change-r.pdf>. – (Дата обращения: 25.12.2017).
79. Moomaw, W. Renewable energy in a carbon limited world / W. Moomaw, A. Serchuk, G. Unruh, J. Sawin, F. Sverrison // Advances in Solar Energy 3. American Solar Energy Society, 1999. – P. 68-137.
80. Зинченко, В. Энергия мискантуса. Дешевой нефти не будет! / В. Зинченко, М. Яшин // Леспроектинформ. – 2011. – № 6. – С. 134-140.
81. Скоропанов, С.Г. Избранные труды / С. Г. Скоропанов. – Минск: Белорусская наука, 2010. – 468 с.
82. Djordjevich, S.J. Assessment of Conditions and Experience for Plantation of Agro-Energy Crops on Degraded Agricultural Land in Serbia / S. J. Djordjevich, S. B. Djordjevich-Miloshevich, S. M. Miloshevich // World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Agricultural and Biosystems Engineering. – 2016. – Vol. 10(7). – P. 447-50.

83. Использование древесной биомассы в энергетических целях: научный обзор / С. П. Кундас [и др.]. Минск: МГЭУ им А.Д. Сахарова, 2008. – 85 с.
84. Станис, Е.В. Комплексная оценка природных и производственных потенциалов территории: учеб. Пособие / Е. В. Станис, М. Г. Макарова. – М.: РУДН, 2008. – 356 с.
85. Mola-Yudego, B. Regional potential yields of short rotation willow plantations on agricultural land in Northern Europe / B. Mola-Yudego // *Silva Fennica*. – 2010. – 44(1). – P. 63-76.
86. Namsaraev, Z.B. Current status and potential of bioenergy in the Russian Federation / Z. B. Namsaraev, P. M. Gotovtsev, A. V. Komova, R. G. Vasilov // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2018. – Vol. 81. – P. 625–634.
87. Despres, J. Modelling the impacts of variable renewable sources on the power sector: reconsidering the typology of energy modelling tools / J. Despres, N. Hadjsaid, P. Criqui, I. Noirot // *Energy*. – 2015. – Vol. 80. – P. 486-495.
88. Connolly, D. A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems / D. Connolly, H. Lund, B. V. Mathiesen, M. Leahy // *Applied energy*. – 2010. – Vol. 87(4). – P. 1059-1082.
89. Aronsson, P. Impact of nitrogen fertilization to short rotation willow coppice plantations grown in Sweden on yield and economy / P. Aronsson, H. Rosenqvist, I. Dimitriou // *Bioenergy Research*. – 2014. – Vol. 7(3). – P. 993-1001.
90. Prade, T. Biomass and energy yield of industrial hemp grown for biogas and solid fuel / T. Prade, S. Svensson, A. Andersson, J. Mattsson // *Biomass and Bioenergy*. – 2011. – Vol. 35(7). – P. 3040-3049.
91. Павличенко, В.В. Генно-инженерный подход к созданию быстрорастущих форм древесных растений / В. В. Павличенко, М. В. Протопопова, К. З. Гамбург, Э. М. Байрамова, А. В. Рудых, В. К. Войников // *Экосистемы озера Байкал и Восточной Азии: Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием*. Иркутск, 2014. – С. 72-75.

92. Цивенкова, Н. М. Быстрорастущие плантации тополя – новая энергетическая сырьевая база / Н. М. Цивенкова, А. А. Самылин // Леспромформ. – 2005. – № 8(30). – С. 58-63.

93. Энциклопедия систем жизнеобеспечения. Знания об устойчивом развитии / под ред. Е. Е. Демидова [и др.]. – М.: МАГИСТР-ПРЕСС, 2005. – Том 2. – 1208 с.

94. Kuzevanov, V. Botanic gardens as world ecological resources for innovative technological development / V. Kuzevanov, E. Gubiy // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Биология. Экология. – 2014. – Т. 10. – С. 73-81.

95. Волович, П. И. О лесовыращивании быстрорастущих древесных пород в энергетических целях: проблемы и перспективы / П. И. Волович, В. А. Стригаловская // Сб. науч. Трудов Института леса НАН Беларуси. – 2007 – № 57. – С. 27–32.

96. Voinikov, V. K. Application of somaclonal variability to production of fast-growing trees as a raw material for biofuel / V. Kю Voinikov, K. Z. Gamburg // Journal of stress physiology & biochemistry. – 2012. – Vol. 8. – № 3. – P. 24.

97. Губий, Е. В. Анализ надежности топливоснабжения с энергетических плантаций / Е. В. Губий, В. И. Зоркальцев // Материалы 3-ей международной научно-практической конференции «Климат, экология, сельское хозяйство Евразии». Иркутск, 2014. – Т. 2. – С. 145-152.

98. Губий, Е. В. Анализ эффективности энергетических плантаций / Е. В. Губий, В. И. Зоркальцев // Анализ, моделирование, управление, развитие экономических систем: сборник научных трудов VIII Международной школы-симпозиума АМУР-2014. Севастополь, 2014г. – С. 102-105.

99. Губий, Е. В. Создание математической модели для анализа эффективности энергетических лесов / Е. В. Губий, В. И. Зоркальцев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2012. – № 2(34). – С. 80-83.

100. Губий, Е. В. Энергетические плантации: иностранный опыт и оценка применимости в России / Е. В. Губий // Вестник ИрГСХА. – 2013. – № 56. – С. 106–112.

101. Губий, Е. В. Создание энергетических плантаций для развития био-теплоэнергетики в России / Е. В. Губий // Охрана и рациональное использование животных и растительных ресурсов: Материалы международной научно-практической конференции. Иркутск, 2012г. – С. 146-150.

102. Методические рекомендации по формированию нормативов потребления услуг жилищно-коммунального хозяйства [Электронный ресурс]: Приказ Минэкономки РФ от 06.05.1999 N 240 «Об утверждении Методических рекомендаций по формированию нормативов потребления услуг жилищно-коммунального хозяйства». – Режим доступа: <https://www.consultant.ru>. – (Дата обращения 15.03.2018).

103. ГОСТ 30494–96. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. – М.: МНТКС, 1996. – 9 с.

104. Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (ТТТТ): база данных, свидетельство о государственной регистрации № 2014620942 [Электронный ресурс] / О. Н. Булыгина, В. Н. Разуваев, Т. М. Александрова. Режим доступа: <http://meteo.ru/it/178-aisori>. – (Дата обращения 4.06.2017).

105. Пиндайк, Р. Микроэкономика: Сокр. пер. с англ. / Р. Пиндайк, Д. Рабенфельд, под науч. ред.: В.Т. Борисов, В.М. Полтерович, В.И. Данилов и др. – М.: «Экономика», «Дело», 1992. – 510 с.

106. Вэриан, Х. Р. Микроэкономика. Промежуточный уровень. Современный подход: Учебник для вузов / Х. Р. Вэриан; пер. с англ. под ред. Н. Л. Фроловой. – М.: ЮНИТИ, 1997. – 767 с.

107. СНиП 23-01-99 «Строительная климатология» Госстрой России. – М.: Стройиздат, 2000. – 57 с.

108. Прохоров, Д. В. Энергетическая безопасность населённых пунктов в условиях Крайнего Севера / Д. В. Прохоров // Энергобезопасность и охрана труда. – 2014. – № 3(57). – С. 5-7.

109. Gubiy, E. V. Analysis long-term of variation of air temperature for the purpose of energy reliability / E. V. Gubiy, V. I. Zorkaltsev, I. I. Khazheev // Materials of international conference «Advanced mathematics, computations and applications – 2014». Novosibirsk, 2014. – P. 56-57.

110. Губий, Е. В. Метод Монте-Карло в моделях анализа надежности энергосбережения / Е. В. Губий, В. И. Зоркальцев, С. М. Пержабинский // Марчуковские научные чтения – 2017. Тезисы. Новосибирск, 2017. – С. 73.

111. Губий, Е. В. Оценка эффективности энергетических плантаций для теплоснабжения отдаленных населенных пунктов / Е. В. Губий, В. И. Зоркальцев // Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири». Иркутск, 2017. – С. 100-105.

112. Губий, Е. В. Анализ надежности топливоснабжения населенных пунктов биотопливом с энергетических плантаций / Е. В. Губий, В. И. Зоркальцев // Сборник трудов Международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики». Иркутск, 2014. – С. 267-274.

113. Гихман, И. И. Теория случайных процессов. Том 1 / И. И. Гихман, А. В. Скороход. – М.: Наука, 1971. – 666 с.

114. Бендат, Дж. Измерение и анализ случайных процессов / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1971. – 408 с.

115. Феллер, В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. Т. 1. / В. Феллер; пер. с англ. – М.: Издательство «Мир», 1984. – 528 с.

Акт о внедрении (использовании) НИР

Согласовано:

Ректор ФГБОУ ВО «Иркутский
государственный аграрный
университет имени А.А. Ежевского»

Ю.Е. Вашукевич

2018 г.

Акт

о внедрении (использовании) НИР

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертационного исследования Губий Е.В. на тему «Методы анализа эффективности и надежности использования энергетических плантаций для топливоснабжения отдаленных населенных пунктов» актуальны, представляют практический интерес и были использованы для анализа возможностей создания и оценки экономической эффективности функционирования энергетической плантации в УООХ «Голоустное имени О.В. Жарова» Института управления природными ресурсами – факультета охотоведения имени В.Н. Скалона.

Директор УООХ «Голоустное имени О.В. Жарова»
Института управления природными
ресурсами – факультета охотоведения
имени В.Н. Скалона

Дианов И.С.

Объем потребности в топливе, площадь и радиус энергетической плантации в зависимости от численности населения

Потребность в топливе, т у.т.	Численность населения, тыс. человек	Площадь плантации, км², при t=6	Радиус плантации, км
662	0,5	7,95	1,59
1 325	1,0	15,90	2,25
1 987	1,5	23,85	2,76
2 650	2,0	31,80	3,18
3 312	2,5	39,75	3,56
3 975	3,0	47,70	3,90
4 637	3,5	55,65	4,21
5 300	4,0	63,60	4,50
5 962	4,5	71,55	4,77
6 625	5,0	79,50	5,03
7 287	5,5	87,45	5,28
7 950	6,0	95,40	5,51
8 612	6,5	103,35	5,74
9 275	7,0	111,30	5,95
9 937	7,5	119,25	6,16
10 600	8,0	127,20	6,36
11 262	8,5	135,15	6,56
11 925	9,0	143,10	6,75
12 587	9,5	151,05	6,93
13 250	10,0	159,00	7,11
13 912	10,5	166,95	7,29
14 575	11,0	174,90	7,46
15 237	11,5	182,85	7,63
15 900	12,0	190,80	7,79
16 562	12,5	198,75	7,95
17 225	13,0	206,70	8,11
17 887	13,5	214,65	8,27
18 550	14,0	222,60	8,42
19 212	14,5	230,55	8,57
19 875	15,0	238,50	8,71
20 537	15,5	246,45	8,86

Зависимость инвестиций на создание энергетических плантаций (млн руб.) от объема производимого топлива

Объем топлива, т у.т.	Инвестиции в строительство дорог	Инвестиции в оборудование для рубки дров	Инвестиции в тракторы	Инвестиции в строительство складов	Инвестиции в автотранспорт	Инвестиции в парники	Инвестиции в оборудование для посадки саженцев	Сумма инвестиций
662	0,8	0,4	0,6	0,4	0,0	0,5	0,0	2,7
1 325	1,2	0,9	1,1	0,7	0,2	1,0	0,1	5,2
1 987	1,6	1,3	1,7	1,1	0,5	1,5	0,1	7,8
2 650	2,0	1,7	2,3	1,4	1,0	2,0	0,1	10,6
3 312	2,4	2,1	2,8	1,8	1,8	2,5	0,1	13,6
3 975	2,7	2,6	3,4	2,2	2,9	3,0	0,1	16,9
4 637	3,1	3,0	4,0	2,5	4,2	3,5	0,2	20,4
5 300	3,4	3,4	4,6	2,9	5,9	4,0	0,2	24,3
5 962	3,8	3,8	5,1	3,2	7,9	4,5	0,2	28,5
6 625	5,1	4,3	5,7	3,6	10,3	5,0	0,2	34,1
7 287	5,5	4,7	6,3	3,9	13,0	5,5	0,2	39,1
7 950	5,9	5,1	6,8	4,3	16,2	6,0	0,3	44,5
8 612	6,2	5,6	7,4	4,7	19,8	6,5	0,3	50,4
9 275	6,6	6,0	8,0	5,0	23,8	7,0	0,3	56,6
9 937	7,0	6,4	8,5	5,4	28,3	7,5	0,3	63,3
10 600	7,3	6,8	9,1	5,7	33,2	7,9	0,3	70,5
11 262	7,7	7,3	9,7	6,1	38,7	8,4	0,4	78,2
11 925	8,0	7,7	10,3	6,5	44,6	8,9	0,4	86,3
12 587	8,4	8,1	10,8	6,8	51,0	9,4	0,4	95,0
13 250	8,7	8,5	11,4	7,2	58,0	9,9	0,4	104,2
13 912	9,1	9,0	12,0	7,5	65,6	10,4	0,4	114,0
14 575	9,4	9,4	12,5	7,9	73,6	10,9	0,5	124,3
15 237	9,7	9,8	13,1	8,3	82,3	11,4	0,5	135,1
15 900	10,1	10,3	13,7	8,6	91,5	11,9	0,5	146,6
16 562	10,4	10,7	14,2	9,0	101,4	12,4	0,5	158,6
17 225	10,7	11,1	14,8	9,3	111,8	12,9	0,5	171,3
17 887	11,1	11,5	15,4	9,7	122,9	13,4	0,6	184,5
18 550	11,4	12,0	16,0	10,1	134,6	13,9	0,6	198,4
19 212	11,7	12,4	16,5	10,4	146,9	14,4	0,6	213,0
19 875	12,1	12,8	17,1	10,8	159,9	14,9	0,6	228,2
20 537	12,4	13,3	17,7	11,1	173,6	15,4	0,6	244,0

Зависимость среднегодовых затрат на функционирование энергетических
плантаций (млн руб./год) от потребности в топливе

Объем топлива, т у.т.	Среднегодовые затра- ты на моторное топли- во	Среднегодовые за- траты на оплату труда	Суммарные средне- годовые затраты
662	0,2	0,0	0,3
1 325	0,5	0,1	0,5
1 987	0,7	0,1	0,8
2 650	1,0	0,2	1,2
3 312	1,3	0,3	1,6
3 975	1,6	0,4	2,0
4 637	2,0	0,5	2,6
5 300	2,4	0,7	3,1
5 962	2,8	0,9	3,8
6 625	3,3	1,2	4,5
7 287	3,8	1,4	5,3
7 950	4,4	1,8	6,2
8 612	5,0	2,1	7,1
9 275	5,7	2,5	8,2
9 937	6,4	2,9	9,3
10 600	7,1	3,4	10,5
11 262	7,9	3,9	11,9
11 925	8,8	4,5	13,3
12 587	9,7	5,1	14,8
13 250	10,7	5,8	16,4
13 912	11,7	6,5	18,2
14 575	12,8	7,2	20,0
15 237	14,0	8,0	22,0
15 900	15,2	8,9	24,1
16 562	16,5	9,8	26,3
17 225	17,8	10,8	28,6
17 887	19,2	11,8	31,1
18 550	20,7	12,9	33,6
19 212	22,3	14,1	36,3
19 875	23,9	15,3	39,2
20 537	25,6	16,6	42,1

Зависимость приведенных затрат и максимального экономического эффекта от использования энергетических плантаций от объема производимого топлива

Объем топлива, т у.т.	Приведенные затраты, млн руб.	Максимальный экономиче- ский эффект от использования энергетических плантаций, млн руб.
662	1,3	0,4
1 325	1,1	2,2
1 987	1,8	3,2
2 650	2,5	4,2
3 312	3,2	5,1
3 975	4,1	5,9
4 637	5,0	6,6
5 300	6,0	7,2
5 962	7,2	7,7
6 625	8,6	8,0
7 287	10,0	8,2
7 950	11,5	8,4
8 612	13,2	8,4
9 275	15,0	8,2
9 937	16,9	7,9
10 600	19,0	7,5
11 262	21,2	6,9
11 925	23,6	6,2
12 587	26,2	5,3
13 250	29,0	4,2
13 912	31,9	2,9
14 575	35,0	1,5
15 237	38,2	-0,1
15 900	41,7	-1,9
16 562	45,3	-3,9
17 225	49,2	-6,1
17 887	53,2	-8,5
18 550	57,4	-11,1
19 212	61,9	-13,9
19 875	66,5	-16,9
20 537	71,4	-20,1

Влияние средней дальности грузоперевозок на размер инвестиций, среднегодовых текущих затрат, приведенных затрат, максимального экономического эффекта от использования энергетических плантаций

Коэффициент увеличения средней дальности грузоперевозок	Инвестиции, млн руб.	Среднегодовые текущие затраты, млн руб./год	Приведенные затраты, млн руб./год	Максимальный экономический эффект от использования энергетических плантаций, млн руб./год
1	44,5	6,2	11,5	8,4
1,2	48,9	6,8	12,7	7,2
1,4	53,3	7,4	13,8	6,0
1,6	57,7	8,1	15,0	4,9
1,8	62,1	8,7	16,2	3,7
2	66,5	9,4	17,4	2,5

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017619882

**«Анализ надежности топливоснабжения с энергетических
плантаций»**

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А.
Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук
(RU)**

Авторы: **Зоркальцев Валерий Иванович (RU),
Губий Елена Валерьевна (RU)**



Заявка № 2017616822

Дата поступления 11 июля 2017 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 08 сентября 2017 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев