

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ИЖЕВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М.Т. КАЛАШНИКОВА»

На правах рукописи



НЕФЕДОВ ДЕНИС ГЕННАДЬЕВИЧ

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ
РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ
РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ**

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Специальность:

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

Научный руководитель:
докт. техн. наук, проф. И.Г. Русяк

Ижевск – 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	4
ВВЕДЕНИЕ	6
1. ЗАДАЧА ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ	14
1.1 Обзор математических моделей и методов теории размещения производства	14
1.2 Организация производства древесного топлива и биогаза как задачи оптимального размещения элементов распределенной производственной структуры	20
1.3 Методика расчета себестоимости промежуточной продукции и конечного продукта	24
2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ	30
2.1 Математическая модель задачи размещения элементов распределенной производственной структуры	30
2.2 Разновидности модели	38
2.3 Административные ограничения	43
3. МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ	45
3.1 Алгоритм численного решения задачи	45
3.2 Тестирование и исследование сходимости алгоритма	51
3.3 Программно-вычислительный комплекс	58
3.4 Аналитическое решение	63

4. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ РАЗМЕЩЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА НА ТЕРРИТОРИИ УДМУРТСКОЙ РЕСПУБЛИКИ.....	72
4.1 Задача о размещении производства древесного топлива	72
4.1.1 Энергетический потенциал древесных отходов.....	72
4.1.2 Оптимальная схема размещения производства топлива из древесных отходов	75
4.1.3 Влияние административных ограничений на оптимальное размещение производства.....	78
4.1.4 Экономическая эффективность организации производства топлива из древесных отходов	81
4.1.5 Аналитический расчет оптимальных параметров размещения производства топлива из древесных отходов	92
4.2 Задача о размещении производства биогаза	99
4.2.1 Энергетический потенциал отходов животноводства	99
4.2.2 Оптимальная схема размещения биогазовых комплексов	101
4.2.3 Экономическая эффективность комплексного использования продуктов производства биогаза.....	104
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	106
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	108
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	119
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	120

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

Обозначения:

I – количество пунктов накопления сырья;

J – количество потенциальных пунктов производства промежуточной продукции;

K – количество пунктов производства конечного продукта;

M – количество видов промежуточной продукции;

C^m – совокупные затраты на производство конечного продукта на m -м виде промежуточной продукции, $m = \overline{1, M}$;

a_j^m – условно-постоянные затраты на выпуск единицы m -го вида промежуточной продукции в j -м пункте ее производства, $j = \overline{1, J}$;

b_j^m – условно-постоянные затраты на весь выпуск m -го вида промежуточной продукции в j -м пункте ее производства;

$\tilde{a}_k^m$ – условно-постоянные затраты на выпуск единицы конечного продукта в k -м пункте на m -м виде промежуточной продукции, $k = \overline{1, K}$;

$\tilde{b}_k^m$ – условно-постоянные затраты на весь выпуск конечного продукта в k -м пункте его производства на m -м виде промежуточной продукции;

D_k^m – объем выпуска конечного продукта в k -м пункте его производства на m -м виде промежуточной продукции;

V_j^m – объем выпуска m -го вида промежуточной продукции в j -м пункте ее производства;

W_i^m – объем сырья в i -м пункте его накопления, используемый для производства m -го вида промежуточной продукции, $i = \overline{1, I}$;

g_{ij}^m – затраты на транспортировку единицы сырья, используемого для производства m -го вида промежуточной продукции, между i -м пунктом накопления сырья и j -м пунктом ее производства;

g_{jk}^m – затраты на транспортировку единицы m -го вида промежуточной продукции между j -м пунктом производства промежуточной продукции и k -м пунктом производства конечного продукта;

x_{ijk}^m – доля конечного продукта k -го пункта его выпуска, производимая на m -м виде промежуточной продукции j -го пункта ее производства при потреблении сырья i -го пункта накопления;

L_c^m – расстояние транспортировки сырья до пункта производства m -го вида промежуточной продукции;

L_T^m – расстояние транспортировки m -го вида промежуточной продукции до пункта производства конечного продукта;

N^m – количество пунктов производства m -го вида промежуточной продукции;

τ^m – коэффициент расхода единиц m -го вида промежуточной продукции для производства единицы конечного продукта;

α^m – коэффициент расхода единиц сырья для производства единицы m -го вида промежуточной продукции.

Сокращения:

УР – Удмуртская Республика;

ед. – единица;

к.п. – конечный продукт;

п.п. – промежуточная продукция;

с. – сырье;

т у.т. – тонна условного топлива.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы. Распределенная производственная структура характерна для многих отраслей промышленности и сельского хозяйства, связанных с добычей и переработкой различных видов сырья и полезных ископаемых. К данным отраслям относится и производство различных видов топлива из древесных отходов (щепы, пеллет и др.), а также производство биогаза из отходов животноводства.

В этой связи необходимо отметить важность переоценки роли местных возобновляемых источников энергии в развитии энергетики, которая зафиксирована в Концепции долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года и определена Указом Президента Российской Федерации от 04.06.2008 № 889 “О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической эффективности российской экономики”. Использование местных возобновляемых источников энергии позволит получить положительный экономический эффект, обеспечит энергетическую безопасность и снижение негативного воздействия на экологическую систему территории, а также будет способствовать появлению новых видов промышленного производства. В УР развиты сельское хозяйство, лесозаготовительная и деревообрабатывающая промышленность. Как показывают расчеты, энергетический потенциал древесных отходов и отходов животноводства достаточен для удовлетворения потребностей распределенной системы теплоснабжения региона.

Масштаб производства данных видов топлива определяется различными факторами: обеспеченностью сырьем, возможностями сбыта, технологическими и логистическими схемами, трудовыми и материальными ресурсами. От масштаба зависят затраты на производимую продукцию, и эта зависимость имеет нелинейный характер. Построение математических моделей и инструментария для расчета оптимальной структуры производства и размещения предприятий по переработке исходного сырья в продукцию позволяет

наиболее рационально использовать имеющиеся ресурсные возможности и, соответственно, достигнуть наилучших значений показателя результативности размещения, заключающегося в минимизации затрат или максимизации прибыли.

Степень разработанности тематики. Вопросы математического моделирования размещения производства, впервые описанные в трудах немецких ученых И. Тюнена, А. Вебера и впоследствии В. Кристаллера и А. Леша [1] еще в середине 19 века, в настоящее время направлены на более детальное формулирование задач оптимального размещения производства и методов их решения с реализацией на ЭВМ. Математическому моделированию задач размещения производства на современном уровне уделено внимание в работах зарубежных ученых М. Даскина, З. Дрезнера, С. Хакими, Р. Черча и др. [2-7]. В своих трудах они описывают различные модели размещения, учитывающие многоуровневый и многономенклатурный характер производства, временные и вероятностные параметры производственного процесса, ограничения на объем производства.

Развитию теории размещения способствовали труды отечественных ученых, таких как: В. Черенин, В. Хачатуров, В. Трубин, В. Береснев, Э. Ги-мади, В. Дементьев и др. [8-11].

Методы решения задач оптимального размещения производства описаны в работах М. Фишера, Р. Гальвао, С. Ревия, Б. Боцкой, Ж. Жанга, Е. Эркута, Ж. Брамелла, Е. Роланда, К. Росинга [12-21], а также в трудах отечественных ученых И. Вознюка, Н. Рубановой, М. Лореша [22-24].

Вопросу энергетического использования древесных отходов и отходов животноводства посвящены работы Е. Трунова, Н. Подкопаевой, Н. Тимербаева и др. [25-28]. В них оцениваются затраты на переработку исходного сырья в топливо, на основе чего определяется целесообразность и эффективность его использования. Но проблема оптимизации затрат за счет более тщательной организации производства с учетом специфики распределения сырья на территории в литературе рассматривается недостаточно пол-

но. В этой связи необходима разработка более полных математических моделей для решения задач оптимизации размещения элементов распределенной производственной структуры топливообеспечения на основе возобновляемых ресурсов и уменьшения себестоимости производства тепловой энергии системой теплоснабжения.

Объектом исследования является распределенная производственная структура, включающая пункты накопления сырья, пункты производства и пункты потребления продукции.

Предметом исследования являются математические модели и численные методы решения задач оптимального размещения элементов распределенной производственной структуры.

Целью диссертационной работы является разработка математических моделей и инструментария для оптимизации размещения элементов распределенной производственной структуры при различных ограничениях на взаимосвязи поставщиков и потребителей.

Для достижения цели решаются следующие **задачи**.

1. Разработка математических моделей оптимального размещения элементов распределенной производственной структуры, учитывающих различные виды ограничений на взаимосвязи поставщиков и потребителей.
2. Разработка эффективного метода решения задачи оптимального размещения элементов распределенной производственной структуры.
3. Разработка программно-вычислительного комплекса, реализующего решение задачи оптимального размещения элементов распределенной производственной структуры.
4. Решение задачи оптимального размещения элементов распределенной производственной структуры на примере организации производства различных видов топлива из древесных отходов и отходов животноводства на территории Удмуртской Республики (УР).

Методы исследования. Исследование проводится с использованием методов теории размещения производства, исследования операций, матема-

тического моделирования, математического анализа, теории оптимального управления и оптимизации.

Достоверность и обоснованность полученных результатов. Обоснованность результатов обеспечена применением научной методологии, использованием современных достижений теории размещения, теории оптимизации и технико-экономического анализа. Достоверность используемых методов обеспечена исследованием их сходимости. В практических расчетах использованы реальные статистические данные по Удмуртской Республике.

На защиту выносятся:

- 1) математические модели оптимального размещения элементов распределенной производственной структуры;
- 2) методы решения задачи оптимального размещения элементов распределенной производственной структуры;
- 3) программно-вычислительный комплекс, реализующий решение задачи размещения элементов распределенной производственной структуры;
- 4) результаты решения задач оптимального размещения предприятий по производству различных видов топлива из древесных отходов, а также биогазовых комплексов на территории Удмуртской Республики.

Научная новизна.

1. Сформулирована нелинейная задача оптимального размещения элементов распределенной производственной структуры, учитывающая многопродуктовый характер производства и различные виды ограничений на взаимосвязи поставщиков сырья, производителей и потребителей продукции.
2. Разработан и реализован метод решения нелинейной задачи оптимального размещения элементов распределенной производственной структуры большой размерности. Более высокая эффективность данного метода обеспечивается за счет введения новой системы кодирования элементов вектора искомых решений и возможности распараллеливания работы алгоритма на многопроцессорных системах.

3. Получено аналитическое решение задачи оптимального размещения элементов распределенной производственной структуры при равномерном на территории расположении поставщиков сырья и потребителей продукции.
4. Разработан программно-вычислительный комплекс, позволяющий рассчитывать оптимальное размещение элементов распределенной системы топливообеспечения региона на основе возобновляемых источников энергии.

Значение результатов для теории и для практики.

Разработанные в диссертации модели и методы являются вкладом в математический инструментарий решения задач оптимального размещения производства.

Созданный программно-вычислительный комплекс позволяет решать задачу обеспечения региональной системы теплоснабжения различными возобновляемыми видами топлива из древесных отходов и отходов животноводства.

Результаты работы внедрены в Министерстве промышленности и энергетики УР. Имеется акт внедрения (см. приложение 1).

Апробация работы.

Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих научных конференциях, выставках и совещаниях различных уровней.

1. Региональная научно-практическая конференция «Математическое и компьютерное моделирование технических и социально-экономических систем» (Ижевск, ИжГТУ, май 2010 г.).
2. Научно-практическая конференция молодых инженеров подсекции «Математическое моделирование и информационные технологии» (Ижевск, ОАО «Ижевский радиозавод», май 2010 г.).
3. IX Выставка-сессия инновационных проектов I Республиканского молодежного инновационного форума (Ижевск, ИжГТУ, май 2010 г.).

4. X Выставка-сессия инновационных проектов II Республиканского молодежного инновационного форума (Ижевск, ИжГТУ, ноябрь 2010 г.).
5. Всероссийский конкурс выпускных квалификационных работ по специальности «Математические методы в экономике» (Уфа, декабрь 2010 г.).
6. IV Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы науки» (Тамбов, март 2011 г.).
7. VII Всероссийская научная конференция «Математическое моделирование развивающейся экономики, экологии и биотехнологий», ЭКОМОД-2012 (Киров, июль 2012 г.).
8. Региональный форум по вопросам повышения энергоэффективности и энергосбережения в Удмуртской Республике (Ижевск, декабрь 2012 г.).
9. XIV Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты» (Новосибирск, октябрь 2014 г.).
10. Полностью работа докладывалась на научном семинаре д.ф.-м.н., профессора Кетовой К.В. на кафедре «Математическое моделирование процессов и технологий» Ижевского государственного технического университета имени М.Т. Калашникова (Ижевск, май 2014 г.) и на научном семинаре д.ф.-м.н., профессора Свиридюка Г.А. на кафедре «Уравнения математической физики» Южно-Уральского государственного университета (Челябинск, сентябрь 2014 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ [29-35], в т.ч. 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК для публикации основных научных результатов диссертационного исследования, получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013611274 от 9 января 2013 г. (см. приложение 2).

Результаты диссертационного исследования отражены в отчетах научно-исследовательских работ по государственным контрактам по темам: «Разработка Концепции республиканской целевой программы «Снабжение Удмуртской Республики местными возобновляемыми видами топлива» (РЦП ГК №

МТЭС/Р-09, 2010 г.), «Исследование и разработка технологии получения возобновляемого энергетического ресурса из биологической массы для удовлетворения потребностей распределенной системы энергоснабжения региона» (ФЦП ГК № П235, 2011 г.), «Совершенствование технологии получения топлива и энергии из органического сырья для удовлетворения потребностей распределенной системы энергоснабжения региона» (ФЦП ГК № П556, 2011 г.).

Личный вклад автора. Математическая постановка задачи оптимального размещения элементов распределенной производственной структуры, разработка программно-вычислительного комплекса и анализ результатов, полученных в диссертации, осуществлены совместно с научным руководителем. Самостоятельно разработаны аналитическая модель оптимального размещения элементов распределенной производственной структуры и получено ее решение, а также численный метод решения задачи оптимизации и его реализация в программно-вычислительном комплексе.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка. Объем диссертации составляет 120 страниц, включая 28 рисунков, 28 таблиц и список литературы из 115 наименований.

Во **введении** обосновывается актуальность темы, определены цель и задачи диссертационной работы, сформулированы научная новизна и основные положения, выносимые на защиту, а также методы исследования, используемые в работе.

В **первой главе** содержится обзор подходов к решению задач оптимального размещения производства. Показана область применения задач размещения производства. Приводится математическая постановка данных задач и описаны методы их решения.

Вторая глава посвящена разработке математических моделей оптимального размещения элементов распределенной производственной структуры, включающей пункты накопления сырья, пункты производства взаимоза-

меняемых видов промежуточной продукции и пункты потребления этой продукции, которые, в свою очередь, являются пунктами производства конечного продукта. Приводится постановка целевой функции и ограничений модели при различных условиях, накладываемых на взаимосвязи поставщиков и потребителей.

Третья глава посвящена разработке методов решения задачи оптимального размещения элементов распределенной производственной структуры. Приведены аналитический и численный методы решения поставленной задачи. Численный метод решения задачи размещения элементов распределенной производственной структуры основан на использовании генетического алгоритма с применением параллельных вычислений. Приведена структура программно-вычислительного комплекса содержащего программную реализацию предложенного метода.

В **четвертой главе** приведено решение задачи оптимального размещения элементов распределенной производственной структуры на примере организации предприятий по производству различных видов топлива из древесных отходов, а также биогазовых комплексов на территории Удмуртской Республики. Проведен анализ возможных сценариев и условий организации производства данных видов топлива в регионе. Приведено сравнение результатов численного и аналитического решения задачи. Показана экономическая эффективность организации производства топлива из древесных отходов и отходов животноводства на территории УР.

В **заключении** приводятся основные результаты и формулируются выводы по диссертационной работе.

В **приложении 1** содержится копия акта о внедрении результатов диссертационного исследования.

В **приложении 2** содержится копия свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

1. ЗАДАЧА ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ

1.1 Обзор математических моделей и методов теории размещения производства

Задача размещения производства состоит в выборе варианта расположения объектов, при котором оптимизируется некоторый показатель, характеризующий результативность размещения. Задача размещения предприятий и распределения потребителей составляет основу проектирования распределенной системы. От расположения фирм, пунктов подготовки и переработки продуктов, складов во многом зависит себестоимость производимых товаров и предоставляемых услуг.

Моделирование размещения производства позволяет устанавливать закономерности в соотношении между производственными затратами и ресурсным потенциалом территории, удаленностью потребителей от производственных предприятий, потребностью населения в продукции и многими другими факторами.

Одной из первых работ по теории размещения производства принято считать вышедшую в 1826 г. книгу немецкого экономиста Йогана фон Тюнена «Изолированное государство в его отношении к сельскому хозяйству и национальной экономии». В ней он показывает, что различные отрасли сельского хозяйства будут располагаться вокруг города в виде кругов (поясов) разного диаметра. Продуктивность того или иного производства зависит от его удаленности от города.

Впервые метод нахождения пункта оптимального размещения отдельного промышленного предприятия относительно источников сырья и рынка сбыта продукции описал в работе 1882 г. немецкий ученый В. Лаунхардт. Дальнейшее развитие теории связано с рассмотрением новых факторов размещения производства, описанных в работах А. Вебера, а также В. Кристал-

лера и А. Леша [1], которые рассматривали уже не отдельное предприятие, а совокупность населенных пунктов.

В настоящее время работы по теории размещения производства характеризуются более строгим обоснованием наиболее эффективного распределения предприятий и их размеров, а также использованием современных методов математического моделирования. Формулировка моделей и алгоритмы решения существенно отличаются по фундаментальным предположениям, математической сложности и вычислительному представлению.

Математические модели размещения производства.

Наибольшее развитие получили дискретные математические модели размещения [2], в рамках которых потребители и поставщики рассматриваются как точечные объекты.

Базовой моделью, которая зачастую служит отправной точкой при разработке дискретных математических моделей и методов решения задач размещения производства, выступает так называемая задача p -медиан [6, 36]. Ее суть состоит в том, чтобы среди всех потенциальных пунктов размещения производства выбрать p предприятий, так чтобы суммарные затраты на транспортировку продукции между выбранными предприятиями и пунктами спроса были минимальными.

Если данную задачу дополнить затратами на открытие производства, то задачу размещения производства можно сформулировать следующим образом.

Для заданного множества потребителей $K = \{1, \dots, K'\}$ известны затраты $g_{jk} \geq 0$ на доставку продукции k -му потребителю из j -го пункта производства. Совокупность возможных пунктов размещения производства $J = \{1, \dots, J'\}$ является конечной. Для каждого $j \in J$ известна стоимость $f_j \geq 0$ открытия предприятия в этом пункте. Задача состоит в выборе подмножества

$S \subseteq J$, которое позволяет обслужить всех клиентов с минимальными суммарными затратами, т.е. найти

$$\sum_{j \in S} f_j + \sum_{k \in K} \min_{j \in S} g_{jk} \xrightarrow{S \subseteq J} \min. \quad (1.1)$$

Данная целевая функция задает суммарные затраты, связанные с затратами на открытие предприятий и транспортными расходами [5].

При моделировании размещения объектов определенной отрасли общий вид модели усложняется, целевая функция и ограничения модели дополняются параметрами, учитывающими специфику решаемой задачи.

Так, склады имеют ограниченные резервы, в результате чего модель дополняется ограничениями, определяющими баланс между спросом потребителей и запасами необходимого сырья.

При моделировании многоуровневого производства, когда ресурсы проходят несколько промежуточных этапов переработки, в модель добавляются затраты на переработку и транспортировку ресурсов на предыдущих этапах. Ограничения модели дополняются условиями, накладываемыми на перерабатываемые на каждом этапе производства объемы ресурсов [37, 38].

Состояние складов, перевалочных пунктов с течением времени претерпевает изменение – будь то изменение запасов или износ оборудования. Изменениям подвержен и спрос потребителей. В этом случае, когда параметры модели изменяются с течением времени, рассматриваются динамические модели размещения [4, 39-40].

Также в литературе встречается описание стохастических [15, 41, 42], многоцелевых [18, 43, 44] моделей размещения. Другие виды моделей включают в себя элементы задач маршрутизации [45-47], управления запасами [48-49] и т.д.

Математические модели нашли широкое применение при решении задач размещения различных объектов: транспортных узлов, центров социального обслуживания, банковских счетов, мест утилизации опасных отходов, элек-

тростанций, центров телекоммуникаций, спутниковых орбит, ресторанов быстрого питания, складов и др. [5, 14, 17, 50-60].

Кроме определения оптимального размещения предприятий математические модели также можно использовать при расчете взаимосвязей параметров решаемой задачи. В этом случае используют аналитические модели размещения производства. При их формулировке часто пренебрегают характером распределения пунктов спроса на продукцию или источников ресурсов на территории, используя лишь их суммарные объемы. Размещаемое предприятие при этом располагается внутри рассматриваемой территории. В [3] приведена простейшая аналитическая модель размещения монопродуктового производства, целевая функция затрат в которой имеет вид

$$TC(N) = fN + \left(\frac{2}{3} \sqrt{\frac{\sigma}{2N}} \right) g v \sigma \rightarrow \min. \quad (1.2)$$

Здесь первое слагаемое представляет затраты на открытие N предприятий со стоимостью каждого, равной f . Второе слагаемое определяет транспортные затраты, зависящие от плотности спроса v на территории площадью σ и от удельных затрат на транспортировку единицы спроса на единицу расстояния g . Выражение $\left(\frac{2}{3} \sqrt{\frac{\sigma}{2N}} \right)$ определяет расстояние, на которое необходимо перевозить продукцию от ближайшего из N предприятий до произвольным образом выбранного пункта спроса.

Решением задачи, таким образом, будет определение не конкретного расположения предприятий на территории, а нахождение их общего количества N , минимизирующего целевую функцию, которое может быть выражено через параметры модели.

Методы решения задач размещения производства.

Простейшие модели размещения относятся к задачам линейного программирования. Соответственно, для их решения может быть применен широко распространенный симплекс-метод [61-64]. Данный метод основан на

выборе опорного решения, которое впоследствии улучшается путем движения итерационного процесса по угловым точкам области допустимого решения до тех пор, пока целевая функция не достигнет оптимального решения.

Если на некоторые переменные наложены условия целочисленности, то рассматривается задача смешанного целочисленного программирования. Для ее решения часто используют метод ветвей и границ и его модификации [65-68]: метод ветвей и отсечений, метод ветвей, отсечений и оценок. Метод ветвей и границ заключается в замене полного перебора множества допустимых решений сокращенным, за счет удаления из рассмотрения неперспективных (заведомо не являющихся оптимальными) решений. Процесс заканчивается, когда на каждом подмножестве найдено лучшее решение либо не найдено ни одного лучшего по сравнению с имеющимся решением.

Задачи размещения производства, как правило, содержат большое количество переменных и ограничений, что сильно усложняет процесс поиска оптимального решения с использованием перечисленных выше методов. Поэтому для решения задач размещения производства возникает необходимость применять другие методы, в частности эвристические. Данные методы за гораздо меньшее время позволяют находить решения, достаточно близкие к оптимальному, но получение самого оптимального решения они не гарантируют. К ним относятся жадные алгоритмы, метод ближайшего соседа, эволюционные алгоритмы, методы локального поиска и поиска с запретами и др.

Жадные алгоритмы основываются на выборе локально-оптимальных решений на каждом шаге, предполагая, что итоговое решение также будет оптимальным [69-70]. В частности, для задачи размещения с известным количеством p размещаемых предприятий среди всевозможных вариантов выбирается расположение первого предприятия, которое в большей мере влияет на значение целевой функции. Расположение следующего предприятия определяется аналогично: из оставшихся пунктов размещения производства выбирается наиболее значимое с точки зрения влияния на целевую функцию.

Процесс продолжается до тех пор, пока не будет определено расположение всех p предприятий.

Для решения приведенной задачи методом ближайшего соседа определяется первоначальное расположение p предприятий, а потребители распределяются в зависимости от того, к какому предприятию они расположены ближе. Путем простого перебора в каждой из образовавшихся групп определяется оптимальное расположение одного предприятия. Получается новое расположение предприятий. Процесс поиска оптимального решения продолжается до тех пор, пока не перестанет изменяться расположение предприятий или групп снабжаемых ими потребителей [71].

В последнее время при решении различных задач оптимизации используют эволюционные алгоритмы, моделирующие процессы естественного отбора. Данные алгоритмы работают с некоторой совокупностью начальных векторов решений – популяцией особей, которая на каждом итерационном шаге подвергается действию операторов алгоритма, приводящему к ее постепенному улучшению. Среди них выделяются генетические алгоритмы, определяющие искомые решения с использованием генетических операторов [72, 73]. Также применяется алгоритм дифференциальной эволюции [74], в котором новая популяция создается с использованием комбинации векторов из предыдущего поколения. В данном алгоритме для каждого вектора решений $\mathbf{x}$ выбираются три случайных вектора решений предыдущего поколения, из комбинации которых по определенному правилу [75] создается мутантный вектор $\mathbf{x}'$, некоторые координаты которого впоследствии замещаются соответствующими координатами исходного вектора $\mathbf{x}$. Полученный вектор $\mathbf{x}'$ сравнивается с вектором $\mathbf{x}$, и лучший из них переходит в новую популяцию.

Описание методов локального поиска, поиска с запретами и некоторых других методов можно найти в [20, 21, 76, 77]. В данной литературе большинство алгоритмов рассматривается на примере решения задачи p -медиан. Применяемые при решении данной задачи методы являются отправной точ-

кой при разработке эвристических методов, используемых для решения более общих задач размещения производства.

1.2 Организация производства древесного топлива и биогаза как задачи оптимального размещения элементов распределенной производственной структуры

Использование местных возобновляемых источников энергии является эффективным решением задачи обеспечения региона дешевыми топливно-энергетическими ресурсами. Одним из этих ресурсов являются древесные отходы и отходы животноводства.

Производство топлива из древесных отходов.

Древесные отходы, образующиеся при проведении лесозаготовок и на предприятиях деревопереработки, имеют малую насыпную плотность и неудобны для непосредственного сжигания. Для этого их необходимо переработать в более энергоконцентрированные виды топлива – щепу, пеллеты и брикеты, которые удобны для транспортировки, хранения и сжигания на теплоисточниках.

Технологическая схема производства щепы состоит из двух основных операций: сбор лесосечного сырья и его измельчение в щепу [78]. Лесосечное сырье, основу которого составляет валежник, свозится с помощью трелевочной техники в пункты накопления сырья (ПНС). Оборудование ПНС осуществляется вблизи мест скопления сырья. В ПНС происходит естественная сушка древесной массы, продолжающаяся несколько месяцев в теплое время года. По мере достижения влажности сырья 30-40%, при первоначальной влажности 50-60%, осуществляется его транспортировка в пункты подготовки топлива (ППТ). Пункты подготовки топлива снабжены рубительными машинами [79-81], которые перерабатывают древесную массу до фракции щепы. Выбор рубительной машины осуществляется исходя из того, где про-

водится измельчение сырья в щепу и какая производительность должна быть обеспечена. Осуществлять измельчение сырья в щепу на ПНС или в каждом пункте конечного пользования (теплоисточнике) нерационально с точки зрения затрат на единицу продукции. Достаточный ресурсный потенциал обеспечивается в случае организации ППТ вблизи населенных пунктов при доставке сырья из нескольких ПНС и снабжении одним ППТ нескольких потребителей.

Для производства пеллет и брикетов необходимо оборудование, комплектующее в линии различной производительности [82-84].

Оборудование, входящее в состав линий по производству пеллет, и выполняемые им операции состоят в следующем [85]. Сырье, основу которого составляют отходы деревопереработки – опил, щепа, горбыль, – загружается в барабанную сушилку, где продувается горячим воздухом, нагреваемым в твердотопливном теплогенераторе. Сырье высушивается до влажности 8-15%. Высушенные опилки перемещаются в дробилку, где измельчаются до стадии древесной муки, и скребковым транспортером подаются в пресс-гранулятор. Его питающее устройство направляет измельченное и высушенное сырье во внутреннюю полость вращающейся матрицы, имеющей отверстия диаметром 7 мм, в которых происходит формирование гранул давлением. При нагревании и прессовании из древесины начинает выделяться связующее вещество – лигнин, который позволяет гранулам после охлаждения сохранить образуемую форму и приобрести необходимую прочность, что делает их пригодными для хранения и транспортировки.

Состав оборудования для производства древесных брикетов аналогичен, только вместо пресса-гранулятора располагается брикетирующий пресс [86, 87]. Формируемые в нем брикеты имеют диаметр порядка 50-70 мм и длину до 350 мм.

Основные характеристики топлива из древесных отходов (см. рисунок 1), а также другого вида древесного топлива – дров – представлены в таблице 1.1 [88].



Пеллеты



Брикеты



Щепа



Дрова

Рисунок 1 – Виды древесного топлива

Таблица 1.1 – Характеристики древесных видов топлива

Параметр	Пеллеты	Брикеты	Щепа	Дрова
Диаметр, мм	6-14	50-70	7-50	40-150
Длина, мм	14-35	до 350	7-20	300-500
Влажность, %	7-12	12	20-30	20-30
Насыпная плотность, т/м ³	0,63	до 0,65	0,15-0,35	0,3
Удельная плотность, т/м ³	1,2	до 1,25	0,38-0,88	0,75
Теплотворность, Гкал/т	3,8-4,5	4,2	2,4-2,9	2,4-2,9

Наилучшие показатели теплотворной способности и насыпной плотности имеют пеллеты и брикеты. При этом брикеты, как и дрова, имеют относительно большие размеры и более удобны для частного использования, чем для автоматического сжигания в топках теплоисточников. Несмотря на то что дрова также являются возобновляемым ресурсом, объем их использования и стоимость жестко регламентируются административными ограничениями.

Переработка топлива из древесных отходов в тепловую энергию осуществляется путем непосредственного сжигания в топках теплоисточников. Кроме прямого сжигания также развиваются такие направления энергетического использования древесных отходов, как их газификация и пиролиз [89].

Газификация определяется как термическая деструкция в присутствии подаваемого снаружи окисляющего вещества (воздуха или кислорода) [90, 91]. В результате деструкции выделяются топливный газ (содержащий CO, CO₂, H₂O, H₂, N₂ и др.) и минеральная зола. Пиролиз отличается тем, что термическое разложение органических соединений осуществляется без доступа кислорода [92]. В результате разложения образуются топливная жидкость (жидкий пиролизат), газы, различные химические продукты и твердое угли-

стое вещество (древесный уголь). От внешних параметров процесса (температура, давление, катализаторы и др.) зависит соотношение получаемых продуктов. В частности, в работе [93] приводится описание технологии, направленной на максимальное получение топливного газа путем переработки остаточных продуктов (пиролизная регенерация).

Энергетическая эффективность применения газификации и пиролиза в большей степени определяется значениями технологических параметров соответствующего оборудования. Поэтому дальнейшее исследование ограничивается вопросами использования твердых видов древесного топлива. При этом практические вопросы организации производства топлива из древесных отходов рассматриваются на примере щепы и пеллет, как более перспективных с точки зрения использования для обеспечения топливом системы теплоснабжения региона.

Организация биогазовых комплексов.

Биогаз вырабатывается в результате анаэробного метанового сбраживания органического сырья [94]. Состав биогаза: 55-75% метана, 25-45% углекислого газа. После очистки биогаза от углекислого газа получается биометан, являющийся полным аналогом природного газа и отличающийся от него только происхождением.

Технологическая схема по производству биогаза состоит в следующем [95]. Жидкие биоотходы перекачиваются насосами в емкость сбора и гомогенизации сырья. Твердые отходы доставляются по транспортной ленте, грузовиками или другим способом в специальный шнековый загрузчик. Из емкости гомогенизации и загрузчика твердых отходов биомасса поступает в реактор (ферментатор). Внутри реактора поддерживается фиксированная для микроорганизмов температура. Метанообразующие бактерии в бескислородных условиях могут выделять газ в температурном интервале от 0°C до 70°C. Внутри реактора биомасса постоянно перемешивается механическим или гидравлическим способом.

Среднее время сбраживания внутри реактора (в зависимости от субстратов) – 20-40 дней. На протяжении этого времени органические вещества внутри биомассы метаболизируются (преобразовываются) микроорганизмами. На выходе получают два продукта: биогаз и биоудобрения (компостированный и жидкий субстрат).

Наиболее эффективно организовывать производство биогаза из влажной и жидкой биомассы, большие объемы которой образуются на предприятиях животноводства [96]. К ним, в частности, относятся птицефабрики, свинокомплексы, фермы крупного рогатого скота (КРС), которые и будут в дальнейшем рассматриваться в качестве пунктов накопления сырья для производства биогаза. Биогазовые комплексы рациональнее всего располагать вблизи предприятий животноводства и при помощи газопроводной сети снабжать расположенные в окрестности теплоисточники.

В случае обеспечения топливом распределенной системы теплоснабжения региона вопросы организации производства топлива из древесных отходов и отходов животноводства рассматриваются в комплексе с сопутствующими мероприятиями [25-28]. В частности, оптимизация размещения предприятий и баз по производству топлива и заготовке сырья осуществляется с учетом затрат по переоборудованию теплоисточников на использование топлива из древесных или животноводческих отходов.

1.3 Методика расчета себестоимости промежуточной продукции и конечного продукта

Рассмотрим расчет себестоимости производства конечного продукта на основе M взаимозаменяемых видов промежуточной продукции. Для этого выделим в составе себестоимости конечного продукта затраты на производство промежуточной продукции и на ее переработку в конечный продукт.

Затраты на промежуточную продукцию складываются из затрат на транспортировку сырья и его переработку в промежуточную продукцию, а также из затрат на ее доставку до пункта производства конечного продукта.

Переработка сырья в m -й вид промежуточной продукции (топлива) на предприятии характеризуется затратами

$$c_{\tau}^m = F^m(V^m), \quad m = \overline{1, M}, \quad (1.3)$$

где

c_{τ}^m – затраты на производство m -го вида промежуточной продукции на предприятии, руб./год;

V^m – объем производства m -го вида промежуточной продукции на предприятии, ед.п.п./год (ед.п.п. – единица промежуточной продукции).

Затраты на переработку сырья в промежуточную продукцию $F^m(V^m)$ определяются с использованием общей методики расчета затрат хозяйственной деятельности. Данную зависимость можно представить в виде

$$F^m(V^m) = a^m V^m + b^m, \quad m = \overline{1, M}, \quad (1.4)$$

где

a^m – условно-постоянные затраты на выпуск единицы промежуточной продукции m -го вида, руб./ед.п.п.;

b^m – условно-постоянные затраты на весь выпуск промежуточной продукции m -го вида, руб./год.

К условно-постоянным затратам на единицу продукции a^m относятся расходы на потребляемые топливно-энергетические ресурсы, оплату труда производственных рабочих, прочие ресурсы, затраты на которые напрямую связаны с объемом выпуска продукции. Условно-постоянные затраты на весь объем производства b^m включают амортизацию зданий и оборудования, оплату труда управленческого персонала. Методика расчета затрат a^m и b^m приведена в [97]. В частности, в случае производства щепы и пеллет расчет-

ные значения затрат a^m и b^m при различных объемах выпуска топлива определяются величинами, представленными в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Значения коэффициентов затрат на производство щепы и пеллет

Вид топлива	Производительность линии V^m , т у.т./год	a^m , руб. /т у.т.	b^m , руб./год
Щепа	до 1 596	610,9	332 636,6
	1 597 – 4 256	473,3	780 031,4
	4 257 – 6 916	407,1	1 222 717,0
Пеллеты	до 3 840	2 348,6	1 399 698,4
	3 841 – 7 680	2 141,8	1 533 793,8
	7 681 – 11 520	1 966,8	2 073 710,0

В случае производства биогаза значения затрат a^m и b^m определяются объемом выпуска топлива и видом используемого сырья (см. таблицу 1.3).

Таблица 1.3 – Значения коэффициентов затрат на производство биогаза

Тип предприятия	Производительность биогазового комплекса V^m , тыс. м ³ /год	a^m , руб. /тыс. м ³	b^m , руб./год
Птицефабрики	до 1 137	216,1	1 900 000
	1 138 – 2 275	108,1	2 744 000
	2 276 – 2 844	147,6	3 220 000
	2 845 – 5 688	73,8	5 990 000
	5 689 – 11 376	36,9	11 600 000
Свинокомплексы	до 706	348,4	1 144 000
	707 – 1 764	238,0	1 594 000
	1 765 – 3 528	119,0	2 649 000
	3 529 – 7 056	59,5	4 514 000
	7 057 – 14 112	42,1	8 179 000
Фермы КРС	до 418	588,8	1 144 000
	419 – 1 044	402,1	1 594 000
	1 045 – 2 088	201,0	2 649 000
	2 089 – 4 176	100,5	4 514 000
	4 177 – 8 352	71,1	8 179 000

Таким образом, значения затрат a^m и b^m определяются некоторыми расчетными табличными, в общем случае нелинейными, зависимостями $a^m = f_a^m(V^m)$ и $b^m = f_b^m(V^m)$, которые ставят с соответствие объему выпуска V^m значения a^m и b^m соответственно.

Затраты на переработку m -го вида промежуточной продукции в конечный продукт (тепловую энергию) в пункте его производства определяются зависимостью

$$c_{\text{тэ}}^m = E^m(D^m), \quad m = \overline{1, M}, \quad (1.5)$$

где

$c_{\text{тэ}}^m$ – затраты на производство конечного продукта на m -м виде промежуточной продукции, руб./год;

D^m – объем производства конечного продукта на m -м виде промежуточной продукции, ед.к.п./год (ед.к.п. – единица конечного продукта).

Аналогично формуле расчета затрат на производство промежуточной продукции, зависимость $E^m(D^m)$ можно представить в виде

$$E^m(D^m) = \tilde{a}^m D^m + \tilde{b}^m, \quad m = \overline{1, M}, \quad (1.6)$$

где

$\tilde{a}^m$ – условно-постоянные затраты на выпуск единицы конечного продукта на m -м виде промежуточной продукции, руб./ед.к.п.;

$\tilde{b}^m$ – условно-постоянные затраты на весь выпуск конечного продукта на m -м виде промежуточной продукции, руб./год.

Статьи затрат, включаемых в величины $\tilde{a}^m$ и $\tilde{b}^m$, аналогичны статьям затрат, включаемых в a^m и b^m . Для их расчета используется общая методика учета затрат при хозяйственной деятельности. В частности, для определения затрат на производство тепловой энергии используются методические материалы по расчету тарифов на электрическую и тепловую энергию [98-99]. Значения затрат $\tilde{a}^m$ и $\tilde{b}^m$ также определяются расчетными табличными, в общем случае нелинейными, зависимостями $\tilde{a}^m = \tilde{f}_a^m(D^m)$ и $\tilde{b}^m = \tilde{f}_b^m(D^m)$, которые ставят с соответствие объему выпуска D^m значения $\tilde{a}^m$ и $\tilde{b}^m$ соответственно. В случае производства тепловой энергии расчетные значения ко-

эфициентов затрат $\tilde{a}^m$ и $\tilde{b}^m$ принимались постоянными, независимо от объема ее выработки (см. таблицу 1.4).

Таблица 1.4 – Значения коэффициентов затрат на производство тепловой энергии на теплоисточнике

Вид используемого топлива	$\tilde{a}^m$, руб. /Гкал	$\tilde{b}^m$, руб./год
Щепа	294,3	286 775,4
Пеллеты	289,4	299 582,8
Биогаз	278,9	296 625,1

Для учета связи объемов производства промежуточной продукции и вырабатываемого на его основе конечного продукта используется коэффициент τ^m , ед.п.п./ед.к.п; для учета соотношений между объемом производства промежуточной продукции и необходимым объемом сырья применяется коэффициент α^m , ед.с./ед.п.п. (ед.с. – единица сырья). В случае организации производства топлива из древесных или животноводческих отходов коэффициент τ^m определяется выражением

$$\tau^m = \tau \eta^m, \quad m = \overline{1, M},$$

где

τ – калорийный эквивалент, т у.т./Гкал (т у.т. – тонна условного топлива);

η^m – коэффициент отношения общего объема производимой тепловой энергии к ее полезному выходу на топливе m -го вида η^m ,

$$\eta^m = \frac{100 + \lambda^m}{\kappa^m}, \quad m = \overline{1, M}; \quad (1.7)$$

λ^m – коэффициент расхода тепловой энергии на собственные нужды теплоисточника при использовании m -го вида топлива, %;

κ^m – коэффициент полезного действия теплоисточника на m -м виде топлива, %.

Значение параметра κ^m для теплоисточников на различных видах топлива составляет 85-90% (см. таблицу 1.5). Расходы тепла на собственные нужды согласно нормативам для теплоисточников на твердом топливе (щепа, пеллеты, уголь) составляют 4,76%, для теплоисточников на газообразном топливе (природный газ, биогаз) – 2,26% от выработки тепловой энергии [98].

Таблица 1.5 – Значения параметров κ^m и ω^m для теплоисточников на различных видах топлива

№ п/п	Вид топлива	κ^m , %	λ^m , %
1	Уголь	85	4,76
2	Пеллеты	90	4,76
3	Щепа	85	4,76
4	Природный газ	90	2,26
5	Биогаз	90	2,76

При организации предприятий по производству топлива следует учитывать, что объем сырья определяется его концентрацией на данной территории и ее размером, а объем производства топлива – потребностями котельных в энергоносителях. Большое количество пунктов производства топлива приводит к высоким затратам на их организацию. С другой стороны, большая удаленность от мест сбора сырья и потребителей приводит к значительным затратам на транспортировку ресурсов. В этой связи возникает задача определения оптимальной производительности пунктов производства топлива, при которой будет обеспечена минимальная стоимость энергоресурсов.

2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ

2.1 Математическая модель задачи размещения элементов распределенной производственной структуры

Содержательная постановка задачи размещения элементов распределенной производственной структуры состоит в следующем.

Имеется некоторое количество K пунктов производства конечного продукта (см. рисунок 2). Для его выработки используется M взаимозаменяемых видов промежуточной продукции. Для ее производства используется сырье, подготавливаемое в пунктах накопления сырья, общее количество которых равно I . Требуется найти объемы выпуска промежуточной продукции в каждом из J потенциальных пунктов ее производства. Возможные положения пунктов производства промежуточной продукции определяются заранее, при этом они могут совпадать или не совпадать с положениями пунктов накопления сырья и пунктов производства конечного продукта. Целевой функцией задачи является минимизация совокупных затрат на производство конечного продукта с учетом затрат на производство и поставку промежуточной продукции.

Математическая модель данной задачи строится на основании методики расчета себестоимости промежуточной продукции и конечного продукта, приведенной в предыдущей главе.

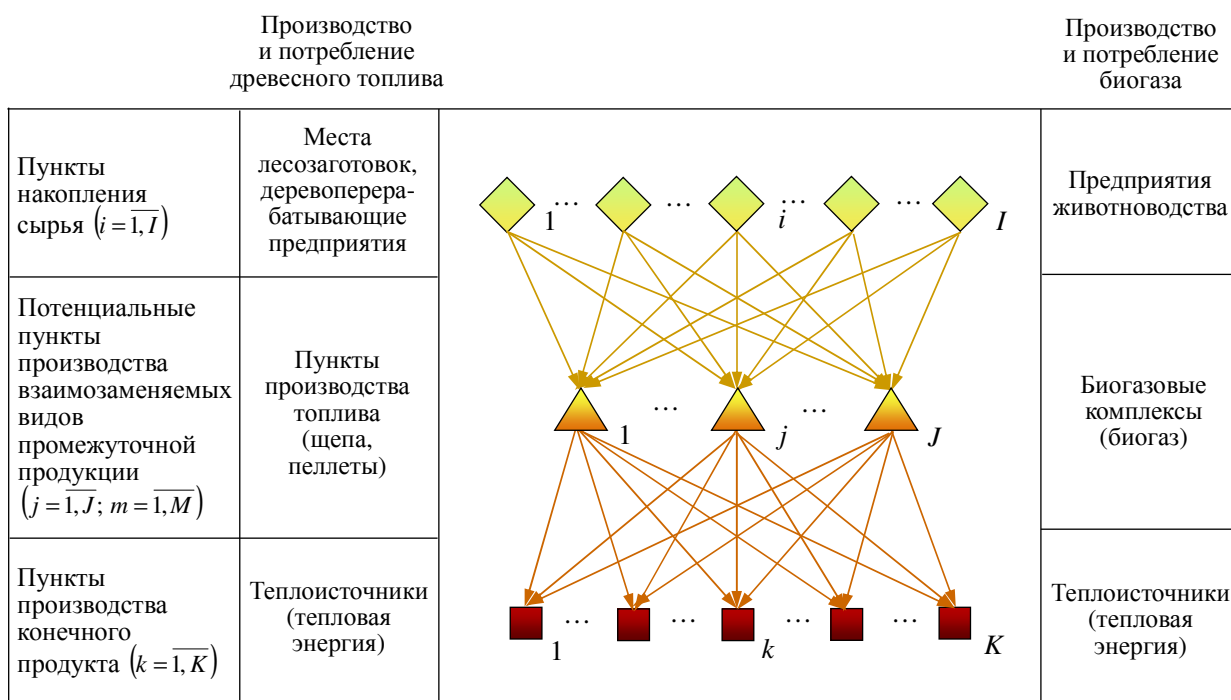


Рисунок 2 – Схема взаимосвязи пунктов накопления сырья, пунктов производства промежуточной продукции и пунктов производства конечного продукта

Целевая функция затрат решаемой задачи имеет вид

$$C = C^{\text{ПП}} + C^{\text{КП}} \rightarrow \min, \quad (2.1)$$

где первое слагаемое определяет затраты на производство промежуточной продукции, включая транспортные расходы,

$$C^{\text{ПП}} = \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M F_j^m(V_j^m) + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \tau^m (\alpha^m g_{ij}^m + g_{jk}^m) x_{ijk}^m D_k, \quad (2.2)$$

второе слагаемое определяет затраты на переработку промежуточной продукции в конечный продукт

$$C^{\text{КП}} = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M E_k^m(D_k^m). \quad (2.3)$$

Здесь

C – совокупные затраты на производство промежуточной продукции и конечного продукта, руб./год;

$C^{\text{ПП}}$ – затраты на транспортировку сырья, производство промежуточной продукции и ее доставку до пунктов производства конечного продукта, руб./год;

$C^{\text{КП}}$ – затраты на переработку промежуточной продукции в конечный продукт в пунктах его производства, руб./год;

V_j^m – объем выпуска m -го вида промежуточной продукции в j -м пункте ее производства, ед.п.п./год;

D_k – объем выпуска конечного продукта в k -м пункте его производства, ед.к.п./год;

D_k^m – объем выпуска конечного продукта в k -м пункте его производства на m -м виде промежуточной продукции, ед.к.п./год;

$F_j^m(V_j^m)$ – затраты на переработку сырья в m -й вид промежуточной продукции в j -м пункте ее производства, руб./год;

$E_k^m(D_k^m)$ – затраты на переработку m -го вида промежуточной продукции в конечный продукт в k -м пункте его производства, руб./год;

g_{ij}^m – затраты на транспортировку единицы сырья, используемого для производства m -го вида промежуточной продукции, между i -м пунктом накопления сырья и j -м пунктом ее производства, руб./ед.с.;

g_{jk}^m – затраты на транспортировку единицы m -го вида промежуточной продукции между j -м пунктом производства промежуточной продукции и k -м пунктом производства конечного продукта, руб./ед.п.п.;

x_{ijk}^m – доля конечного продукта k -го пункта его выпуска, производимая на m -м виде промежуточной продукции j -го пункта ее производства при потреблении сырья i -го пункта накопления.

Затраты на переработку сырья в промежуточную продукцию $F_j^m(V_j^m)$ определяются на основе технико-экономических расчетов. В большинстве случаев эту зависимость можно представить в виде

$$F_j^m(V_j^m) = a_j^m V_j^m + b_j^m \Theta(V_j^m), \quad j = \overline{1, J}, \quad m = \overline{1, M}, \quad (2.4)$$

где

a_j^m – условно-постоянные затраты на выпуск единицы m -го вида промежуточной продукции в j -м пункте ее производства, руб./ед.п.п.; определяются расчетной табличной, в общем случае нелинейной, зависимостью $a_j^m = f_{a,j}^m(V_j^m)$, ставящей в соответствие объему выпуска V_j^m значение затрат a_j^m ;

b_j^m – условно-постоянные затраты на весь выпуск m -го вида промежуточной продукции в j -м пункте ее производства, руб./год; определяются расчетной табличной, в общем случае нелинейной, зависимостью $b_j^m = f_{b,j}^m(V_j^m)$, ставящей в соответствие объему выпуска V_j^m значение затрат b_j^m ;

$\Theta(\chi)$ – функция Хевисайда, принимающая значения

$$\Theta(\chi) = \begin{cases} 1, & \chi > 0; \\ 0, & \chi \leq 0. \end{cases}$$

Аналогично затраты на переработку промежуточной продукции в конечный продукт можно представить в виде

$$E_k^m(D_k^m) = \tilde{a}_k^m D_k^m + \tilde{b}_k^m \Theta(D_k^m), \quad k = \overline{1, K}, \quad m = \overline{1, M}, \quad (2.5)$$

где

$\tilde{a}_k^m$ – условно-постоянные затраты на выпуск единицы конечного продукта в k -м пункте его производства на m -м виде промежуточной продукции, руб./ед.к.п.; определяются расчетной табличной, в общем случае нелинейной, зависимостью $\tilde{a}_k^m = \tilde{f}_{a,k}^m(D_k^m)$, ставящей в соответствие объему выпуска D_k^m значение затрат $\tilde{a}_k^m$;

$\tilde{b}_k^m$ – условно-постоянные затраты на весь выпуск конечного продукта в k -м пункте его производства на m -м виде промежуточной продукции, руб./год; определяются расчетной табличной, в общем случае нелиней-

ной, зависимостью $\tilde{b}_k^m = \tilde{f}_{b,k}^m(D_k^m)$, ставящей в соответствие объему выпуска D_k^m значение затрат $\tilde{b}_k^m$.

В качестве ограничений приняты соотношения:

$$V_j^m = \tau^m \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K x_{ijk}^m D_k, \quad j = \overline{1, J}, \quad m = \overline{1, M}; \quad (2.6)$$

$$D_k^m = D_k \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J x_{ijk}^m, \quad k = \overline{1, K}, \quad m = \overline{1, M}; \quad (2.7)$$

$$\alpha^m \tau^m \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K x_{ijk}^m D_k \leq W_i^m, \quad i = \overline{1, I}, \quad m = \overline{1, M}; \quad (2.8)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M x_{ijk}^m = 1, \quad k = \overline{1, K}; \quad (2.9)$$

$$x_{ijk}^m \in [0; 1], \quad i = \overline{1, I}, \quad j = \overline{1, J}, \quad k = \overline{1, K}, \quad m = \overline{1, M}. \quad (2.10)$$

Здесь W_i^m – объем сырья в i -м пункте его накопления, используемый для производства m -го вида промежуточной продукции, ед.с./год.

Соотношения (2.6), (2.7) устанавливают баланс между объемом выпуска промежуточной продукции в пунктах ее производства и потребностью в ней пунктов производства конечного продукта. Выражение (2.8) определяет баланс между требуемым объемом сырья и потенциалом сырьевой базы в пунктах его накопления. В ограничении (2.9) отражено условие удовлетворения промежуточной продукцией всех рассматриваемых пунктов производства конечного продукта. Ограничение (2.10) показывает область определения искомого решения.

Искомая переменная x_{ijk}^m , определяющая долю участия j -го пункта производства промежуточной продукции в удовлетворении спроса k -го пункта производства конечного продукта, может содержать решение, при котором один и тот же пункт производства конечного продукта обеспечивается промежуточной продукцией нескольких пунктов ее производства. В более об-

щем случае, когда количество пунктов производства промежуточной продукции, снабжающих какой-либо пункт производства конечного продукта, равно J^0 ($J^0 \leq J$), возникает необходимость ввести новые булевы переменные

$$X_{jk} = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M x_{ijk}^m > 0; \\ 0, & \text{если } \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M x_{ijk}^m = 0; \end{cases} \quad j = \overline{1, J}, k = \overline{1, K}.$$

При этом ограничение на количество пунктов производства промежуточной продукции записывается в виде

$$\sum_{j=1}^J X_{jk} \leq J^0, \quad k = \overline{1, K}.$$

Аналогично рассматриваются случаи, когда количество видов промежуточной продукции, которыми снабжается один пункт производства конечного продукта, определяется величиной M^0 ($M^0 \leq M$), а количество пунктов накопления сырья, потенциала которых достаточно для удовлетворения в промежуточной продукции одного пункта производства конечного продукта, – величиной I^0 ($I^0 \leq I$). Таким образом, можно ввести новые булевы переменные, определяемые выражениями:

$$X_{ik}^1 = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M x_{ijk}^m > 0; \\ 0, & \text{если } \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M x_{ijk}^m = 0; \end{cases} \quad i = \overline{1, I}, k = \overline{1, K}; \quad (2.11)$$

$$X_{jk}^2 = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M x_{ijk}^m > 0; \\ 0, & \text{если } \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M x_{ijk}^m = 0; \end{cases} \quad j = \overline{1, J}, k = \overline{1, K}; \quad (2.12)$$

$$X_{mk}^3 = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J x_{ijk}^m > 0; \\ 0, & \text{если } \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J x_{ijk}^m = 0; \end{cases} \quad m = \overline{1, M}, k = \overline{1, K}. \quad (2.13)$$

Данные выражения используются для задания ограничений соответственно на количество пунктов накопления сырья, пунктов производства промежуточной продукции и количество видов промежуточной продукции. Сами ограничения записываются в следующем виде:

$$\sum_{i=1}^I X_{ik}^1 \leq I^0, \quad k = \overline{1, K}; \quad (2.14)$$

$$\sum_{j=1}^J X_{jk}^2 \leq J^0, \quad k = \overline{1, K}; \quad (2.15)$$

$$\sum_{m=1}^M X_{mk}^3 \leq M^0, \quad k = \overline{1, K}. \quad (2.16)$$

Постановка задачи в виде (2.1)-(2.16) содержит большое количество искоемых переменных, что усложняет поиск оптимального решения даже при небольшой размерности исходных данных. Количество искоемых переменных можно существенно сократить, если перейти от переменной x_{ijk}^m к новой переменной $y_{i^0 j^0 k}^{m^0} \in [0; 1]$, $i^0 = \overline{1, I^0}$, $j^0 = \overline{1, J^0}$, $k = \overline{1, K}$, $m^0 = \overline{1, M^0}$. В этом случае номера i^0 -го пункта накопления сырья, j^0 -го пункта производства промежуточной продукции и m^0 -го вида промежуточной продукции записываются соответственно в переменные $z_{i^0 k}^1$, $z_{j^0 k}^2$, $z_{m^0 k}^3$, принимающие значения

$$z_{i^0 k}^1 \in \{1, 2, \dots, I\}, \quad i^0 = \overline{1, I^0}, \quad k = \overline{1, K};$$

$$z_{j^0 k}^2 \in \{1, 2, \dots, J\}, \quad j^0 = \overline{1, J^0}, \quad k = \overline{1, K};$$

$$z_{m^0 k}^3 \in \{1, 2, \dots, M\}, \quad m^0 = \overline{1, M^0}, \quad k = \overline{1, K}.$$

Переход к исходной переменной x_{ijk}^m может быть выполнен по формуле

$$x_{ijk}^m = \sum_{i^0=1}^{I^0} \sum_{j^0=1}^{J^0} \sum_{m^0=1}^{M^0} y_{i^0 j^0 k}^{m^0} U(i = z_{i^0 k}^1, j = z_{j^0 k}^2, m = z_{m^0 k}^3),$$

$$i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}, k = \overline{1, K}, m = \overline{1, M}, \quad (2.17)$$

где $U(\varphi)$ – логическая функция, задаваемая выражением

$$U(\varphi) = \begin{cases} 1, & \text{если } \varphi \text{ – истина;} \\ 0, & \text{если } \varphi \text{ – ложь.} \end{cases} \quad (2.18)$$

Использование $y_{i^0 j^0 k}^{m^0}$, $z_{i^0 k}^1$, $z_{j^0 k}^2$, $z_{m^0 k}^3$ вместо x_{ijk}^m позволяет сократить размерность искомого вектора решений и за счет этого ускорить процесс его поиска при требуемых ограничениях. Таким образом, математическая модель оптимального размещения элементов производственной структуры, отражающей организацию производства и поставок промежуточной продукции для выработки конечного продукта распределенной системой, примет вид

$$C = C^{\text{ПП}} + C^{\text{КП}} \rightarrow \min, \quad (2.19)$$

где

$$C^{\text{ПП}} = \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M F_j^m(V_j^m) +$$

$$+ \sum_{i^0=1}^{I^0} \sum_{j^0=1}^{J^0} \sum_{k=1}^K \sum_{m^0=1}^{M^0} \tau^m (\alpha^m g_{ij}^m + g_{jk}^m) y_{i^0 j^0 k}^{m^0} U(i = z_{i^0 k}^1, j = z_{j^0 k}^2, m = z_{m^0 k}^3) D_k, \quad (2.20)$$

$$C^{\text{КП}} = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M E_k^m(D_k^m); \quad (2.21)$$

при ограничениях:

$$V_j^m = \tau^m \sum_{i^0=1}^{I^0} \sum_{j^0=1}^{J^0} \sum_{k=1}^K \sum_{m^0=1}^{M^0} y_{i^0 j^0 k}^{m^0} U(j = z_{j^0 k}^2, m = z_{m^0 k}^3) D_k, j = \overline{1, J}, m = \overline{1, M}; \quad (2.22)$$

$$D_k^m = D_k \sum_{i^0=1}^{I^0} \sum_{j^0=1}^{J^0} \sum_{m^0=1}^{M^0} y_{i^0 j^0 k}^{m^0} U(m = z_{m^0 k}^3), k = \overline{1, K}, m = \overline{1, M}; \quad (2.23)$$

$$\alpha^m \tau^m \sum_{i^0=1}^{I^0} \sum_{j^0=1}^{J^0} \sum_{k=1}^K \sum_{m^0=1}^{M^0} y_{i^0 j^0 k}^{m^0} U(i = z_{i^0 k}^1, m = z_{m^0 k}^3) D_k \leq W_i^m, i = \overline{1, I}, m = \overline{1, M}; \quad (2.24)$$

$$\sum_{i^0=1}^{I^0} \sum_{j^0=1}^{J^0} \sum_{m^0=1}^{M^0} y_{i^0 j^0 k}^{m^0} = 1, k = \overline{1, K}; \quad (2.25)$$

$$y_{i^0 j^0 k}^{m^0} \in [0; 1], i^0 = \overline{1, I^0}, j^0 = \overline{1, J^0}, k = \overline{1, K}, m^0 = \overline{1, M^0}; \quad (2.26)$$

$$z_{i^0 k}^1 \in \{1, I\}, i^0 = \overline{1, I^0}, k = \overline{1, K}; \quad (2.27)$$

$$z_{j^0 k}^2 \in \{1, J\}, j^0 = \overline{1, J^0}, k = \overline{1, K}; \quad (2.28)$$

$$z_{m^0 k}^3 \in \{1, M\}, k = \overline{1, K}, m^0 = \overline{1, M^0}. \quad (2.29)$$

2.2 Разновидности модели

Рассмотренная выше задача поставлена при условии удовлетворения промежуточной продукцией всех рассматриваемых пунктов производства конечного продукта. Аналогично можно сформулировать задачу с условием полного использования потенциала сырья (его утилизации) или с условием обеспечения требуемого объема выпуска промежуточной продукции каждого вида во всех пунктах ее производства.

Условие полного использования сырья может быть поставлено, когда объем сырья не превышает необходимого объема реализации промежуточной продукции, производимой на его основе. В этом случае определяются не только объемы выработки промежуточной продукции в каждом из потенциальных пунктов ее производства, но и отбираются пункты производства конечного продукта из общего их количества, которые будут переведены на производимую промежуточную продукцию. Таким образом, количество снабжаемых рассматриваемой промежуточной продукцией пунктов производства конечного продукта может быть меньше их общего количества.

При построении математической модели задачи учитывается ситуация, когда количество пунктов производства промежуточной продукции, снабжаемых каким-либо одним пунктом накопления сырья, ограничено величиной J^0 . Также ограничивается количество пунктов производства конечного продукта, для снабжения промежуточной продукцией которых используется сырье одного пункта накопления, величиной K^0 ($K^0 \leq K$). В этом случае доля сырья i -го пункта накопления для производства m -го вида промежуточной продукции в j^0 -м пункте ее производства для удовлетворения в ней k^0 -го пункта производства конечного продукта будет определяться переменной $y_{ij^0k^0}^m$. Номера для идентификации k^0 -го пункта производства конечного продукта и j^0 -го пункта производства промежуточной продукции по каждому i -му пункту накопления сырья определяются переменными $z_{k^0i}^1$ и $z_{j^0i}^2$ соответственно. Таким образом, математическая модель оптимального размещения элементов распределенной производственной структуры с минимальными совокупными затратами на производство конечного продукта при условии полного использования сырья примет вид

$$C = C^{\text{ПП}} + C^{\text{КП}} \rightarrow \min, \quad (2.30)$$

где

$$C^{\text{ПП}} = \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M F_j^m(V_j^m) + \sum_{i=1}^I \sum_{j^0=1}^{J^0} \sum_{k^0=1}^{K^0} \sum_{m=1}^M \left(g_{ij}^m + \frac{1}{\alpha^m} g_{jk}^m \right) y_{ij^0k^0}^m U(k = z_{k^0i}^1, j = z_{j^0i}^2) W_i^m, \quad (2.31)$$

$$C^{\text{КП}} = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M E_k^m(D_k^m); \quad (2.32)$$

при ограничениях:

$$V_j^m = \frac{1}{\alpha^m} \sum_{i=1}^I \sum_{j^0=1}^{J^0} \sum_{k^0=1}^{K^0} y_{ij^0k^0}^m U(j = z_{j^0i}^2) W_i^m, \quad j = \overline{1, J}, \quad m = \overline{1, M}; \quad (2.33)$$

$$D_k^m = \frac{1}{\alpha^m \tau^m} \sum_{i=1}^I \sum_{j^0=1}^{J^0} \sum_{k^0=1}^{K^0} y_{ij^0k^0}^m U(k = z_{k^0i}^1) W_i^m, k = \overline{1, K}, m = \overline{1, M}; \quad (2.34)$$

$$\sum_{m=1}^M D_k^m \leq D_k, k = \overline{1, K}; \quad (2.35)$$

$$\sum_{j^0=1}^{J^0} \sum_{k^0=1}^{K^0} y_{ij^0k^0}^m = 1, i = \overline{1, I}, m = \overline{1, M}; \quad (2.36)$$

$$y_{ij^0k^0}^m \in [0; 1], i = \overline{1, I}, j^0 = \overline{1, J^0}, k^0 = \overline{1, K^0}, m = \overline{1, M}; \quad (2.37)$$

$$z_{k^0i}^1 \in \{1, K\}, k^0 = \overline{1, K^0}, i = \overline{1, I}; \quad (2.38)$$

$$z_{j^0i}^2 \in \{1, J\}, j^0 = \overline{1, J^0}, i = \overline{1, I}. \quad (2.39)$$

Как и в предыдущей модели (2.19)-(2.29), выражения (2.30)-(2.32) определяют совокупные затраты на производство промежуточной продукции и конечного продукта, а соотношения (2.33)-(2.35) отражают баланс между объемом выпуска промежуточной продукции и конечного продукта в пунктах их производства и сопоставимым объемом сырья в пунктах его накопления. В ограничении (2.36) отражено условие полного использования потенциала сырья, а выражения (2.37)-(2.39) показывают область определения искоемых переменных.

В модели (2.30)-(2.39) не учтены ограничения, связанные с использованием промежуточной продукции в пунктах производства конечного продукта: пункт производства конечного продукта следует перевести на производимую промежуточную продукцию либо в полном объеме, либо не переводить совсем. В этом случае ограничение (2.35) необходимо заменить выражением

$$\sum_{m=1}^M D_k^m = D_k B, k = \overline{1, K}, \quad (2.40)$$

где B – булева переменная, $B \in \{0; 1\}$.

Дополнительные ограничения на использование промежуточной продукции в пунктах производства конечного продукта, в частности на количе-

ство используемых видов промежуточной продукции M^0 , могут быть заданы следующим образом. Вводятся новые булевы переменные

$$X_{mk} = \begin{cases} 1, D_k^m > 0; \\ 0, D_k^m = 0; \end{cases} \quad m = \overline{1, M}, k = \overline{1, K}, \quad (2.41)$$

определяющие, обеспечивается ли m -м видом промежуточной продукции k -й пункт производства конечного продукта или нет. Тогда ограничение на количество видов промежуточной продукции, используемой одним пунктом производства конечного продукта, можно задать выражением

$$\sum_{m=1}^M X_{mk} \leq M^0, \quad k = \overline{1, K}. \quad (2.42)$$

Условие обеспечения требуемого объема выпуска промежуточной продукции каждого вида во всех пунктах ее производства выполняется в случае, если этот объем не превышает сопоставимого объема сырья и потребностей пунктов производства конечного продукта в соответствующих видах промежуточной продукции. Поскольку объемы производства промежуточной продукции уже заданы, то остается лишь отобрать из рассматриваемой совокупности пунктов производства конечного продукта те, которые будут использовать производимую промежуточную продукцию.

При построении математической модели задачи учитывается ситуация, когда количество пунктов накопления сырья, обеспечивающих сырьем какой-либо пункт производства промежуточной продукции, и количество снабжаемых им пунктов производства конечного продукта ограничено соответственно значениями I^0 и K^0 . В этом случае доля m -го вида промежуточной продукции j -го пункта ее производства в обеспечении ею k^0 -го пункта производства конечного продукта и при использовании сырья i^0 -го пункта его накопления будет определяться переменной $y_{i^0 j k^0}^m$. Номера для идентификации i^0 -го пункта накопления сырья и k^0 -го пункта производства конечного продукта для каждого j -го пункта производства промежуточной про-

дукции определяются переменными $z_{i^0 j}^1$ и $z_{k^0 j}^2$ соответственно. Математическая модель оптимального размещения элементов распределенной производственной структуры с минимальными совокупными затратами на производство конечного продукта в данном случае принимает вид

$$C = C^{\text{ПП}} + C^{\text{КП}} \rightarrow \min, \quad (2.43)$$

где

$$C^{\text{ПП}} = \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M F_j^m(V_j^m) + \sum_{i^0=1}^{I^0} \sum_{j=1}^J \sum_{k^0=1}^{K^0} \sum_{m=1}^M (\alpha^m g_{ij}^m + g_{jk}^m) y_{i^0 j k^0}^m U(i = z_{i^0 j}^1, k = z_{k^0 j}^2) V_j^m, \quad (2.44)$$

$$C^{\text{КП}} = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M E_k^m(D_k^m); \quad (2.45)$$

при ограничениях:

$$\alpha^m \sum_{i^0=1}^{I^0} \sum_{j=1}^J \sum_{k^0=1}^{K^0} y_{i^0 j k^0}^m U(i = z_{i^0 j}^1) V_j^m \leq W_i^m, i = \overline{1, I}, m = \overline{1, M}; \quad (2.46)$$

$$D_k^m = \frac{1}{\tau^m} \sum_{i^0=1}^{I^0} \sum_{j=1}^J \sum_{k^0=1}^{K^0} y_{i^0 j k^0}^m U(k = z_{k^0 j}^1) V_j^m, k = \overline{1, K}, m = \overline{1, M}; \quad (2.47)$$

$$\sum_{m=1}^M D_k^m \leq D_k, k = \overline{1, K}; \quad (2.48)$$

$$\sum_{i^0=1}^{I^0} \sum_{k^0=1}^{K^0} y_{i^0 j k^0}^m = 1, j = \overline{1, J}, m = \overline{1, M}; \quad (2.49)$$

$$y_{i^0 j k^0}^m \in [0; 1], i^0 = \overline{1, I^0}, j = \overline{1, J}, k^0 = \overline{1, K^0}, m = \overline{1, M}; \quad (2.50)$$

$$z_{i^0 j}^1 \in \{1, I\}, i^0 = \overline{1, I^0}, j = \overline{1, J}; \quad (2.51)$$

$$z_{k^0 j}^2 \in \{1, K\}, k^0 = \overline{1, K^0}, j = \overline{1, J}. \quad (2.52)$$

Как и в предыдущих моделях (2.19)-(2.29) и (2.30)-(2.39), выражения (2.43)-(2.45) определяют совокупные затраты на производство промежуточ-

ной продукции и конечного продукта, а (2.46)-(2.48) отражают баланс между объемом выпуска промежуточной продукции и конечного продукта в пунктах их производства и сопоставимым объемом сырья в пунктах его накопления. В ограничении (2.49) отражено условие обеспечения выпуска промежуточной продукции каждого вида во всех пунктах ее производства и в полном объеме, а выражения (2.50)-(2.52) показывают область определения искомых переменных.

Как и в модели (2.30)-(2.39), для необходимости учета ограничений на использование промежуточной продукции в пунктах производства конечного продукта модель (2.43)-(2.52) следует дополнить выражениями (2.40)-(2.42).

2.3 Административные ограничения

Еще один вид ограничений, оказывающий существенное влияние на выбор оптимального варианта размещения элементов распределенной производственной структуры, связан с административными регуляторами: тарифами и квотами. Использование данных регуляторов увеличивает затраты на транспортируемые ресурсы, что связано с ограничениями их перемещения между пограничными территориями.

Если ввести тариф на транспортировку сырья для производства m -го вида промежуточной продукции между i -м пунктом накопления сырья и j -м пунктом производства промежуточной продукции в размере t_{ij}^m , а тариф на транспортировку m -го вида промежуточной продукции между j -м пунктом ее производства и k -м пунктом производства конечного продукта в размере t_{jk}^m , то тарифицированные значения затрат на транспортировку сырья $(g_{ij}^m)^*$, руб./ед.с., и затрат на транспортировку промежуточной продукции $(g_{jk}^m)^*$, руб./ед.п.п., будут вычисляться по формулам

$$(g_{ij}^m)^* = (1 + t_{ij}^m) g_{ij}^m, \quad i = \overline{1, I}, \quad j = \overline{1, J}, \quad m = \overline{1, M}; \quad (2.53)$$

$$(g_{jk}^m)^* = (1 + t_{jk}^m) g_{jk}^m, \quad j = \overline{1, J}, \quad k = \overline{1, K}, \quad m = \overline{1, M}. \quad (2.54)$$

Введем квоты на объем транспортировки сырья между i -м пунктом накопления сырья и j -м пунктом производства m -го вида промежуточной продукции в размере w_{ij}^m , ед.с./год, и квоты на объем транспортировки m -го вида промежуточной продукции между j -м пунктом ее производства и k -м пунктом производства конечного продукта в размере v_{jk}^m , ед.п.п./год. В этом случае в модель оптимального размещения элементов распределенной производственной структуры (2.19)-(2.29) необходимо дополнительно ввести ограничения

$$\alpha^m \tau^m \sum_{i^0=1}^{I^0} \sum_{j^0=1}^{J^0} \sum_{k=1}^K \sum_{m^0=1}^{M^0} y_{i^0 j^0 k}^{m^0} U(i = z_{i^0 k}^1, j = z_{j^0 k}^2, m = z_{m^0 k}^3) D_k \leq w_{ij}^m, \\ i = \overline{1, I}, \quad j = \overline{1, J}, \quad m = \overline{1, M}; \quad (2.55)$$

$$\tau^m \sum_{i^0=1}^{I^0} \sum_{j^0=1}^{J^0} \sum_{m^0=1}^{M^0} y_{i^0 j^0 k}^{m^0} U(j = z_{j^0 k}^2, m = z_{m^0 k}^3) D_k \leq v_{jk}^m, \\ j = \overline{1, J}, \quad k = \overline{1, K}, \quad m = \overline{1, M}. \quad (2.56)$$

Административное регулирование также может выражаться, например, в ограничении объемов производства определенных видов промежуточной продукции. В частности, если задан минимально допустимый совокупный объем производства m -го вида промежуточной продукции $V_{\min}^m$, ед.п.п./год, или максимально допустимый – $V_{\max}^m$, ед.п.п./год, то исходная модель (2.19)-(2.29) дополняется условием

$$V_{\min}^m \leq \tau^m \sum_{i^0=1}^{I^0} \sum_{j^0=1}^{J^0} \sum_{k=1}^K \sum_{m^0=1}^{M^0} y_{i^0 j^0 k}^{m^0} U(m = z_{m^0 k}^3) D_k \leq V_{\max}^m, \quad m = \overline{1, M}. \quad (2.57)$$

3. МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ

3.1 Алгоритм численного решения задачи

Сформулированная выше задача размещения элементов распределенной производственной структуры относится к классу задач нелинейной оптимизации. Поиск оптимального решения в данном случае осложнен большой размерностью вектора искомых решений. Например, для условий Удмуртской Республики, описанных далее в главе 4, размерность исходного вектора, образуемого переменными x_{ijk}^m , $i = \overline{1, I}$, $j = \overline{1, J}$, $k = \overline{1, K}$, $m = \overline{1, M}$, составляет 46 607 472 элемента, а при использовании переменных $y_{i^0 j^0 k}^{m^0}$, $z_{i^0 k}^1$, $z_{j^0 k}^2$, $z_{m^0 k}^3$, где $i^0 = \overline{1, I^0}$, $j^0 = \overline{1, J^0}$, $k = \overline{1, K}$, $m = \overline{1, M^0}$ – уже только 10 428 элементов.

Спецификой задачи (2.19)-(2.29) является невозможность дифференцирования целевой функции [100, 101]. Поэтому основной проблемой является выбор соответствующего метода численного решения оптимизационной задачи.

Для решения задач нелинейной оптимизации в последнее время широко применяются генетические алгоритмы [102-105]. Данные алгоритмы позволяют получать достаточно близкие к оптимальному решения. Принцип их работы состоит в генерации начальной совокупности вариантов решения задачи и их последующем улучшении с использованием генетических операторов, имитирующих механизмы естественного отбора в природе. Вариант решения представляет собой вектор генов (генотип), в котором каждый ген чаще всего кодируется некоторым числом – бинарным или вещественным. Каждая особь характеризуется своим уникальным генотипом. При этом работа генетического алгоритма осуществляется с некоторой совокупностью особей, называемой популяцией. Работа генетического алгоритма может быть

легко распараллелена. В частности, обработка всей популяции решений может быть разбита на несколько отдельных потоков, которые будут развиваться отдельно, периодически обмениваясь своими особями.

Метод решения поставленной задачи основывается на генетическом алгоритме с вещественным кодированием. Блок-схема данного алгоритма с использованием параллельных вычислений [106-108] представлена на рисунке 3.1.

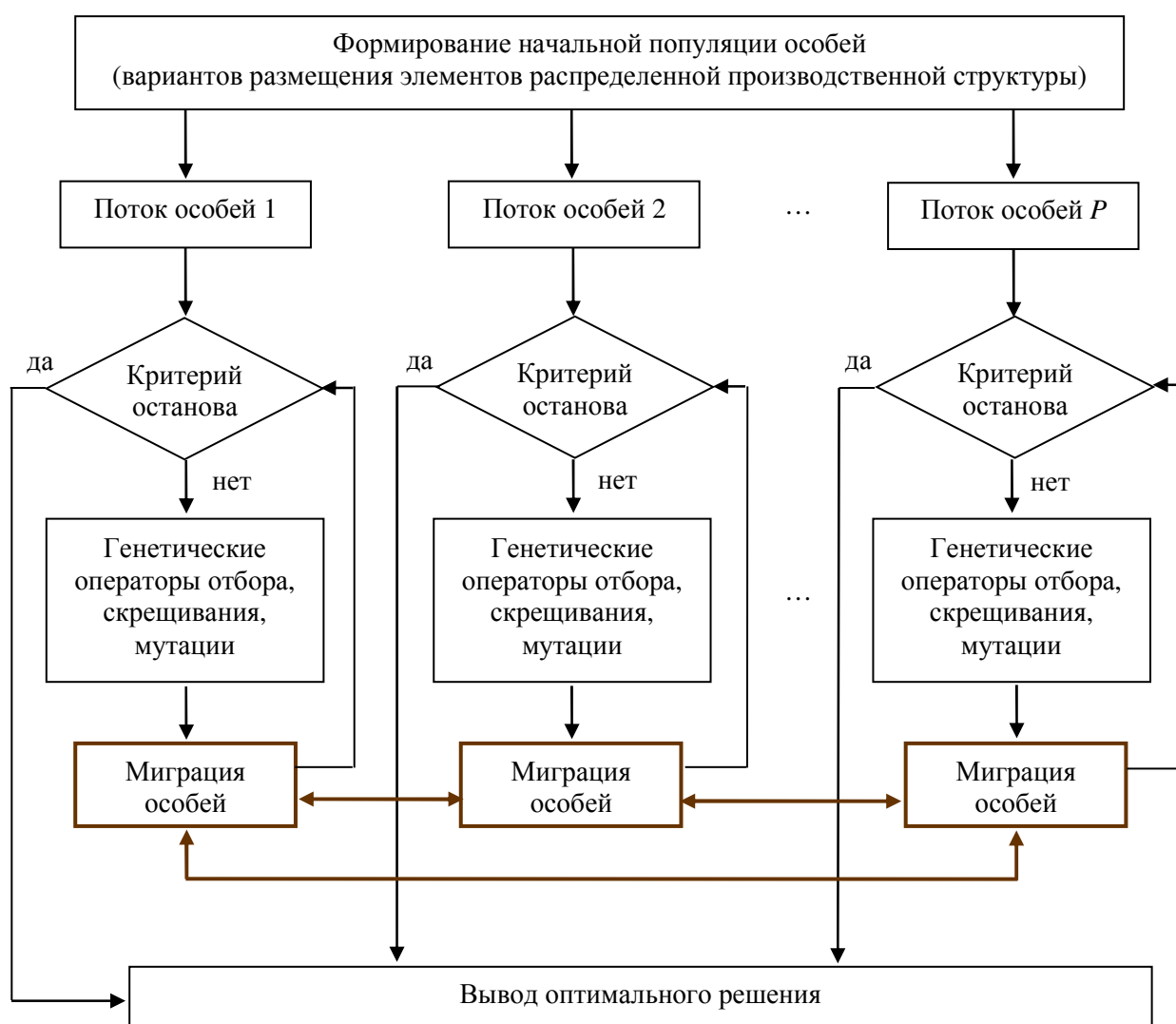


Рисунок 3.1 – Блок-схема генетического алгоритма с использованием параллельных вычислений

Поиск решения задачи включает в себя несколько этапов.

1. Формирование начальной популяции особей.

Особь представляет собой одно из решений задачи – вариант размещения элементов распределенной производственной структуры. Каждая особь задается совокупностью массивов $\left(y_{i^0 j^0 k}^{m^0}\right)^r, \left(z_{i^0 k}^1\right)^r, \left(z_{j^0 k}^2\right)^r, \left(z_{m^0 k}^3\right)^r$, где $y_{i^0 j^0 k}^{m^0}, z_{i^0 k}^1, z_{j^0 k}^2, z_{m^0 k}^3$ удовлетворяют условиям (2.25)-(2.29), $r = \overline{1, R}$, R – количество особей в потоке. При использовании параллельных вычислений популяции особей создаются в нескольких потоках P (подпопуляциях), а особи одного потока будут развиваться отдельно от особей другого.

2. Оценка приспособленности особей.

Каждая особь внутри потока оценивается на приспособленность: рассчитывается значение целевой функции для данного варианта размещения элементов распределенной производственной структуры.

При создании особей могут получиться такие, которые не удовлетворяют требуемым ограничениям. В этом случае особь штрафуются [75, 109]: значение целевой функции r -й штрафующей особи увеличивается на величину, пропорциональную значению отклонения от соответствующего ограничения в области недопустимых значений:

$$\left(C^r\right)^* = C^r + \sum_{h=1}^H Z_h G_h^r. \quad (3.1)$$

Здесь

$\left(C^r\right)^*$ – значение целевой функции r -й штрафующей особи, руб./год;

C^r – значение целевой функции r -й особи без учета штрафа, руб./год;

Z_h – величина штрафа (большое положительное число) за отклонение по h -му ограничению, руб. за единицу;

G_h^r – отклонение по h -му ограничению в области недопустимых решений в абсолютном значении, единиц в год;

H – количество ограничений.

Чем более значимым является то или иное ограничение, тем больший штраф добавляется к значению целевой функции штрафуемой по этому ограничению особи. Штрафуемые особи сохраняют возможность участия в дальнейшей работе алгоритма, но с гораздо меньшим шансом.

Особь, целевая функция которой удовлетворяет требованию обеспечения минимума совокупных затрат, становится решением задачи, и процесс его поиска прекращается.

Поскольку минимум значения целевой функции, как правило, заранее не известен, то для каждой особи определяется относительное уменьшение значения целевой функции $C(q)$ на q -й итерации по сравнению с $C(q-l)$ на $(q-l)$ -й итерации. Если это уменьшение не превышает заданного числа ε на протяжении ряда L итераций, то процесс поиска оптимального решения завершается. Это условие записывается выражением

$$\max_{l \in \{1; L\}} \left| \frac{C(q) - C(q-l)}{C(q)} \right| < \varepsilon, l = \overline{1, L}. \quad (3.2)$$

Таким образом, если особь удовлетворяет условию (3.2) при заданных ограничениях, то осуществляется переход к п. 5.

3. Применение генетических операторов.

Внутри каждого потока над особями осуществляется действие генетических операторов: операции отбора, скрещивания и мутации. Отбор особей заключается в выборе особей, участвующих в создании новой популяции. Различают несколько методов отбора особей: турнирный отбор, отбор с усечением, пропорциональная, ранговая, элитарная селекция и др. В работе используется турнирный отбор с 2-мя особями, который наиболее прост в реализации и эффективен в расчетах. Его действие заключается в следующем. Выбираются две особи, которые сравниваются по своим значениям приспособленности. Особь с лучшим значением отбирается для участия в скрещивании. Вторая особь, необходимая для скрещивания, выбирается произвольно из общего числа особей потока.

При скрещивании создаются новые особи, составленные из генов скрещиваемых особей. В случае с массивом $z_{i^0 k}^1$, $i^0 = \overline{1, I^0}$, $k = \overline{1, K}$, скрещивание осуществляется следующим образом: берутся элементы $(z_{i^0 k}^1)^1$ из первой особи и $(z_{i^0 k}^1)^2$ из второй особи, которые в произвольном порядке записываются в элементы $(z_{i^0 k}^1)^{1*}$ и $(z_{i^0 k}^1)^{2*}$ новых особей (см. рисунок 3.2).

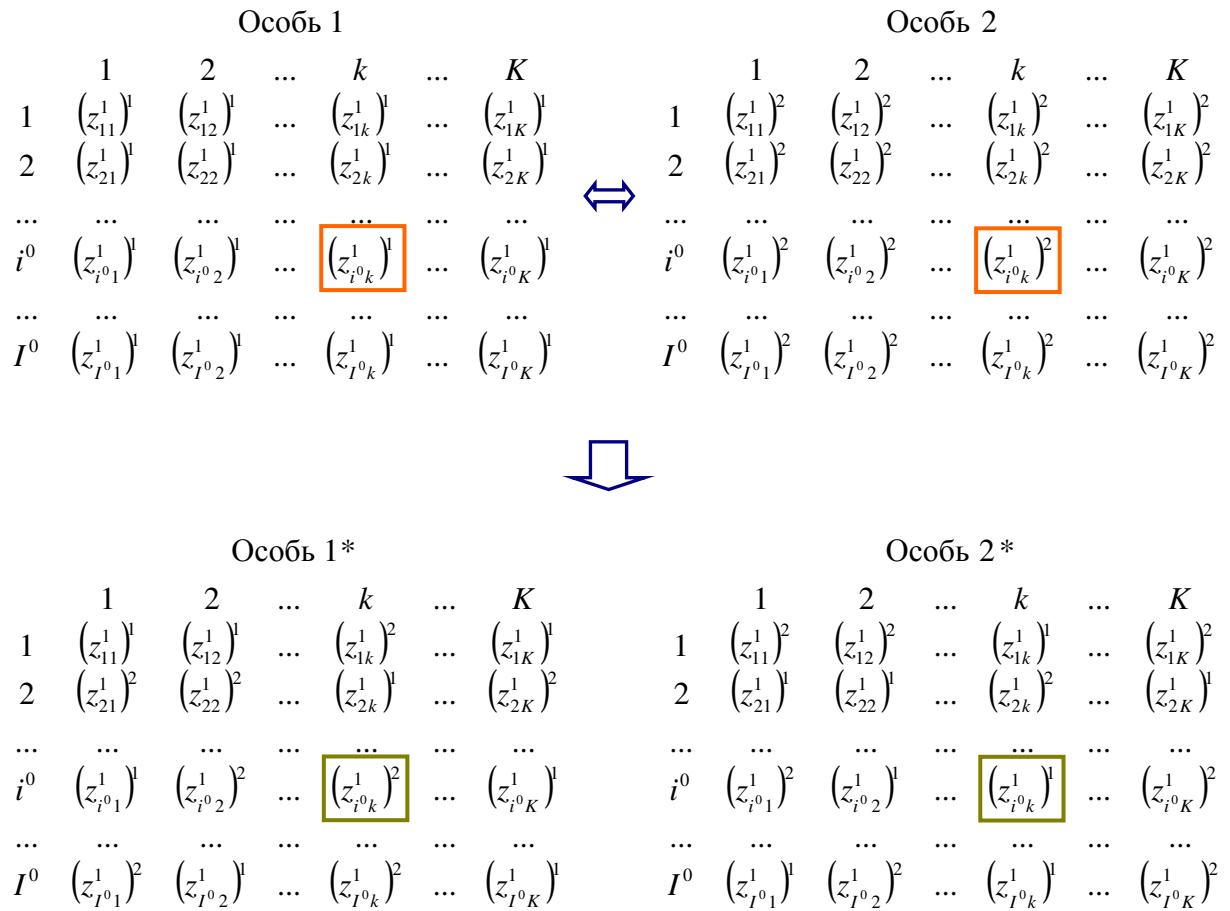


Рисунок 3.2 – Скрещивание особей

Операция скрещивания для массивов $z_{j^0 k}^2$ и $z_{m^0 k}^3$, $j^0 = \overline{1, I^0}$, $m^0 = \overline{1, M^0}$, $k = \overline{1, K}$, осуществляется аналогично.

Элементы $\left(y_{i^0 j^0 k}^{m^0}\right)^{1*}$ и $\left(y_{i^0 j^0 k}^{m^0}\right)^{2*}$ новых особей создаются из комбинации элементов $\left(y_{i^0 j^0 k}^{m^0}\right)^1$ и $\left(y_{i^0 j^0 k}^{m^0}\right)^2$ скрещиваемых особей в соответствии с выражениями

$$\begin{aligned}\left(y_{i^0 j^0 k}^{m^0}\right)^{1*} &= \delta \left(y_{i^0 j^0 k}^{m^0}\right)^1 + (1 - \delta) \left(y_{i^0 j^0 k}^{m^0}\right)^2, \\ \left(y_{i^0 j^0 k}^{m^0}\right)^{2*} &= \delta \left(y_{i^0 j^0 k}^{m^0}\right)^2 + (1 - \delta) \left(y_{i^0 j^0 k}^{m^0}\right)^1, \\ i^0 &= \overline{1, I^0}, j^0 = \overline{1, J^0}, k = \overline{1, K}, m^0 = \overline{1, M^0},\end{aligned}\tag{3.3}$$

где δ – некоторое число, $\delta \in [0; 1]$.

Для поддержания разнообразия особей используется оператор мутации. Данный оператор вносит изменения в значения генов в случайном порядке, в результате вместо старой особи создается новая. Мутация особей, как и скрещивание, имеет вероятностный характер и осуществляется с заранее определенной вероятностью.

4. Миграция особей.

На данном этапе происходит перемещение особей из одного потока в другой – проводится миграция. Данная операция осуществляется для того, чтобы поддержать многообразие особей в подпопуляции, тем самым улучшая ее за счет использования особей другого потока. Для этого произвольно выбирается часть особей текущего потока и заменяется произвольными особями другого потока в том же количестве. Миграция особей выполняется раз в несколько смен поколений, когда старые особи заменяются новыми.

Далее особи снова проверяются на приспособленность (переход к п. 2).

5. Вывод оптимального решения задачи.

Лучшая особь данного потока сравнивается с лучшими особями остальных потоков, и победитель становится решением задачи.

При реализации рассмотренного метода на вычислительных устройствах обработка потоков особей может осуществляться последовательно или па-

параллельно. Параллельная обработка возможна на многопроцессорных устройствах. Разбиение популяции на несколько потоков и выполнение внутривариационных операций отдельными процессорами вычислительного устройства может привести к значительному увеличению общей скорости поиска оптимального решения.

Также необходимо отметить, что в используемом методе генетические алгоритмы применяются к числовым значениям переменных в их исходном вещественном представлении, что исключает необходимость дополнительных затрат на кодирование и декодирование чисел.

3.2 Тестирование и исследование сходимости алгоритма

Тестирование программной реализации генетического алгоритма проводилось на стандартных мультимодальных функциях Розенброка, Растригина и Шеффера [110].

Исследование эффективности используемого метода проводилось на основании сравнения полученного значения целевой функции с его эталонной величиной. Производительность алгоритма характеризуется скоростью поиска оптимального решения задачи до требуемой точности.

Для примера рассматривается задача организации производства топлива из древесных отходов для обеспечения им $K = 24$ теплоисточников (Красногорский и Селтинский районы УР). Количество потенциальных пунктов размещения производства составляет $J = 24$, количество пунктов накопления сырья для производства щепы – $I = 11$, деревоперерабатывающих предприятий на рассматриваемой территории нет.

Оптимизационными параметрами являются вероятности скрещивания P_s и мутации P_m особей в работе генетического алгоритма. Исходная популяция особей создается в нескольких потоках, поэтому необходимо определить оптимальное количество потоков особей P и число особей в каждом из них R , а также частоту миграции особей между потоками: вероятность ми-

грации P_{mg} и долю мигрирующих особей T_{mg} от их общего количества в потоке.

Оптимальное значение целевой функции для рассматриваемой задачи составляет $C^{opt} = 14\,365,1$ тыс. руб./год. Данное значение получено путем нескольких запусков расчетного алгоритма при ограничении количества итераций L , на протяжении которого дальнейшее изменение целевой функции не превышает $\varepsilon = 0,01\%$, равном 10 000. Среднее время, затраченное на поиск решения, составило 9 минут.

При оценке оптимальных параметров алгоритма поиск решения ограничивался временем, равным одной минуте. Параметры изменялись попарно для учета их взаимного влияния на производительность алгоритма.

Пусть количество потоков особей и число особей в каждом из них зафиксированы в значениях $P = 1$, $R = 20$. Определим влияние значений вероятностей скрещивания и мутации на производительность генетического алгоритма.

В таблице 3.1 указаны средние (по 3-м запускам) значения отклонений целевой функции от эталонной величины при различных значениях вероятностей скрещивания и мутации, тестируемых в диапазонах $P_s \in [0,5; 1,0]$, $P_m \in [0,05; 0,30]$.

Таблица 3.1 – Отклонение значения целевой функции от эталонного (в тыс. руб./год) при различных вероятностях мутации и скрещивания

$\begin{matrix} & P_s \\ P_m \end{matrix}$		0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	Итого	
								$\Delta C(P_m)$	$f(P_m), \%$
0,05		432,4	379,2	302,4	299,4	325,3	629,6	299,4	2,1
0,10		455,3	412,3	289,6	257,1	299,6	539,1	257,1	1,8
0,15		430,3	362,3	299,7	301,0	345,1	587,7	299,7	2,1
0,20		460,3	435,2	456,2	435,2	429,8	577,4	429,8	3,0
0,25		540,2	492,4	506,4	495,3	490,1	526,5	490,1	3,4
0,30		572,4	589,1	625,7	559,3	550,2	562,4	550,2	3,9
Итого	$\Delta C(P_s)$	430,3	362,3	289,6	257,1	299,6	526,5	257,1	–
	$f(P_s), \%$	3,0	2,5	2,0	1,8	2,1	3,7	–	1,8

В итоговых столбцах и строках таблицы приведены наименьшие (в строке и столбце соответственно) значения отклонений целевой функции от эталонной величины $\Delta C(P_m)$ и $\Delta C(P_s)$, а также относительные погрешности

$$f(P_m) = \frac{\Delta C(P_m)}{C^{opt}} \cdot 100, f(P_s) = \frac{\Delta C(P_s)}{C^{opt}} \cdot 100, \%.$$

Данные зависимости отражены на рисунке 3.3, из которого видно, что наилучшие результаты обеспечиваются при значениях параметров $P_s = 0,8$ и $P_m = 0,10$.

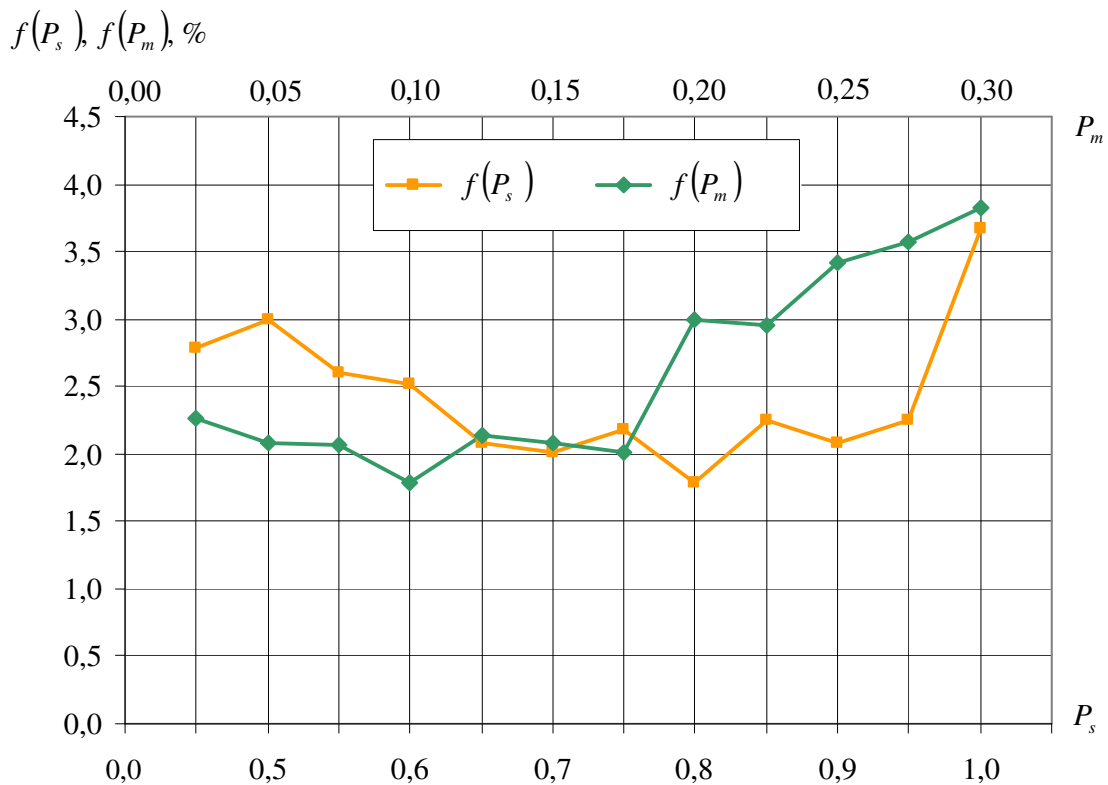


Рисунок 3.3 – Зависимость производительности расчетного алгоритма от значений параметров P_s , P_m

Зафиксируем полученные оптимальные значения параметров и определим влияние количества особей в потоке и количества потоков на производительность расчетного алгоритма. При этом во всех случаях потоки будут обрабатываться последовательно (задействуется 1 ядро центрального процессора). Миграция особей будет осуществляться раз в 1000 итераций по 10% осо-

бей потока. Интервал изменения количества особей в потоке составляет $R \in [5; 100]$, интервал изменения количества потоков – $P \in [1; 20]$. Отклонения значений целевой функции от эталонного приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Отклонение значения целевой функции от эталонного (в тыс. руб./год) при различном количестве потоков и числа особей в них

$R \backslash P$		1	2	4	8	12	20	Итого	
								$\Delta C(R)$	$f(R), \%$
5		357,9	397,2	294,6	306,4	329,2	312,3	294,6	2,1
10		402,7	390,3	357,1	357,1	340,2	430,2	340,2	2,4
20		257,1	356,7	259,5	239,2	260,6	280,1	239,2	1,7
30		381,2	282,3	295,3	279,8	321,8	329,9	279,8	2,0
40		345,3	362,7	290,1	290,8	406,2	357,7	290,1	2,0
50		382,9	407,8	350,2	361,6	370,8	408,2	350,2	2,5
70		377,2	397,2	340,2	359,8	463,3	507,9	340,2	2,4
100		345,3	357,7	406,4	462,1	445,2	539,6	345,3	2,4
Итого	$\Delta C(P)$	257,1	282,3	259,5	239,2	260,6	280,1	239,2	–
	$f(P), \%$	1,8	2,0	1,8	1,7	1,8	2,0	–	1,7

Аналогично таблице 3.1, в последних столбцах и строках таблицы 3.2 указаны минимальные значения отклонений целевой функции от эталонной величины при различном числе особей в потоках $\Delta C(R)$ и их количестве $\Delta C(P)$, а также относительные погрешности

$$f(R) = \frac{\Delta C(R)}{C^{opt}} \cdot 100, f(P) = \frac{\Delta C(P)}{C^{opt}} \cdot 100, \%$$

Зависимости $f(R)$ и $f(P)$ отображены на рисунке 3.4.

Увеличение количества особей в потоке увеличивает внутривидовые операции, увеличение количества потоков – межвидовые. С другой стороны, при малом количестве потоков и числа особей в них не обеспечивается достаточное для эффективной работы генетического алгоритма многообразие особей. Рисунок 3.4 показывает, что лучшая производительность обеспечивается при значениях параметров $R = 20, P = 8$.

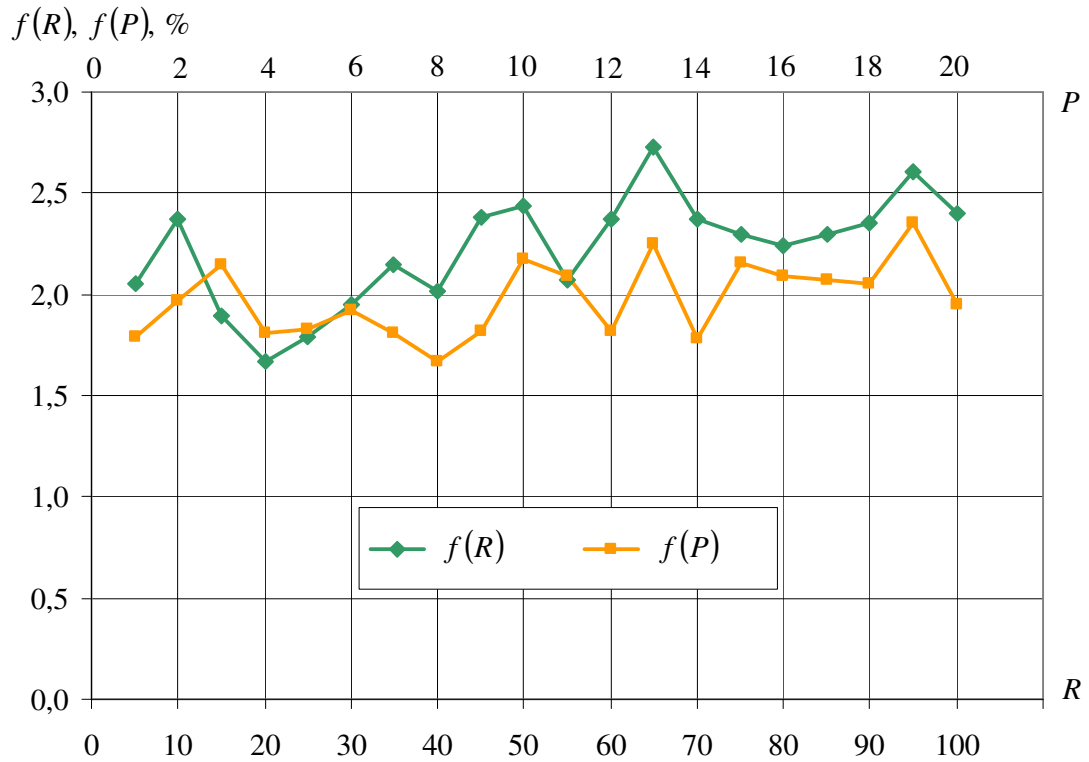


Рисунок 3.4 – Зависимость производительности расчетного алгоритма от значений параметров R , P

Определим оптимальную частоту миграции особей между потоками. Для этого зафиксируем ранее найденные оптимальные параметры генетического алгоритма в значениях $R = 20$, $P_s = 0,8$, $P_m = 0,1$, количество потоков $P = 8$. Рассматриваемый диапазон вероятности миграции особей составляет $P_{mg} \in [10^{-4}; 10^{-3}]$, диапазон доли мигрирующих особей от их общего количества в потоке – $T_{mg} \in [0,05; 0,50]$. Отклонения значений целевой функции от эталонного приведены в таблице 3.3.

Аналогично таблицам 3.1 и 3.2, величины $\Delta C(T_{mg})$ и $\Delta C(P_{mg})$ определяют минимальные значения отклонений целевой функции от эталонного значения при различной вероятности миграции особей и проценте мигрирующих особей, а относительные погрешности задаются формулами

$$f(T_{mg}) = \frac{\Delta C(T_{mg})}{C^{opt}} \cdot 100, \quad f(P_{mg}) = \frac{\Delta C(P_{mg})}{C^{opt}} \cdot 100, \quad \%. \quad$$

Таблица 3.3 – Отклонение значения целевой функции от эталонного (в тыс. руб./год) при различной вероятности миграции и проценте мигрирующих особей

$P_{mg}, 10^{-4}$ $T_{mg}, \%$		1	2	4	6	8	10	Итого	
								$\Delta C(T_{mg})$	$f(T_{mg}), \%$
5		249,8	205,5	257,9	289,5	306,2	349,2	205,5	1,5
10		239,2	202,8	237,9	285,3	304,9	323,8	202,8	1,4
15		228,0	247,4	259,3	310,4	300,3	320,2	228,0	1,6
20		309,2	312,9	307,3	314,8	387,1	342,8	307,3	2,2
25		311,8	325,9	300,4	358,0	327,3	359,4	300,4	2,1
30		391,3	388,7	391,2	399,8	422,9	447,2	388,7	2,7
40		390,2	375,2	397,1	423,1	481,3	407,9	375,2	2,6
50		449,2	406,1	443,8	402,7	497,8	499,2	402,7	2,8
Итого	$\Delta C(P_{mg})$	228,0	202,8	237,9	285,3	300,3	320,2	202,8	–
	$f(P_{mg}), \%$	1,6	1,4	1,9	2,0	2,1	2,3	–	1,4

Данные зависимости отображены на рисунке 3.5. Из рисунка видно, что оптимальными параметрами являются $P_{mg} = 2 \cdot 10^{-4}$, $T_{mg} = 10\%$. Таким образом, для достижения наилучшей производительности миграцию особей следует осуществлять примерно раз в 2 000 итераций (смен поколений) по 2 особи из 20.

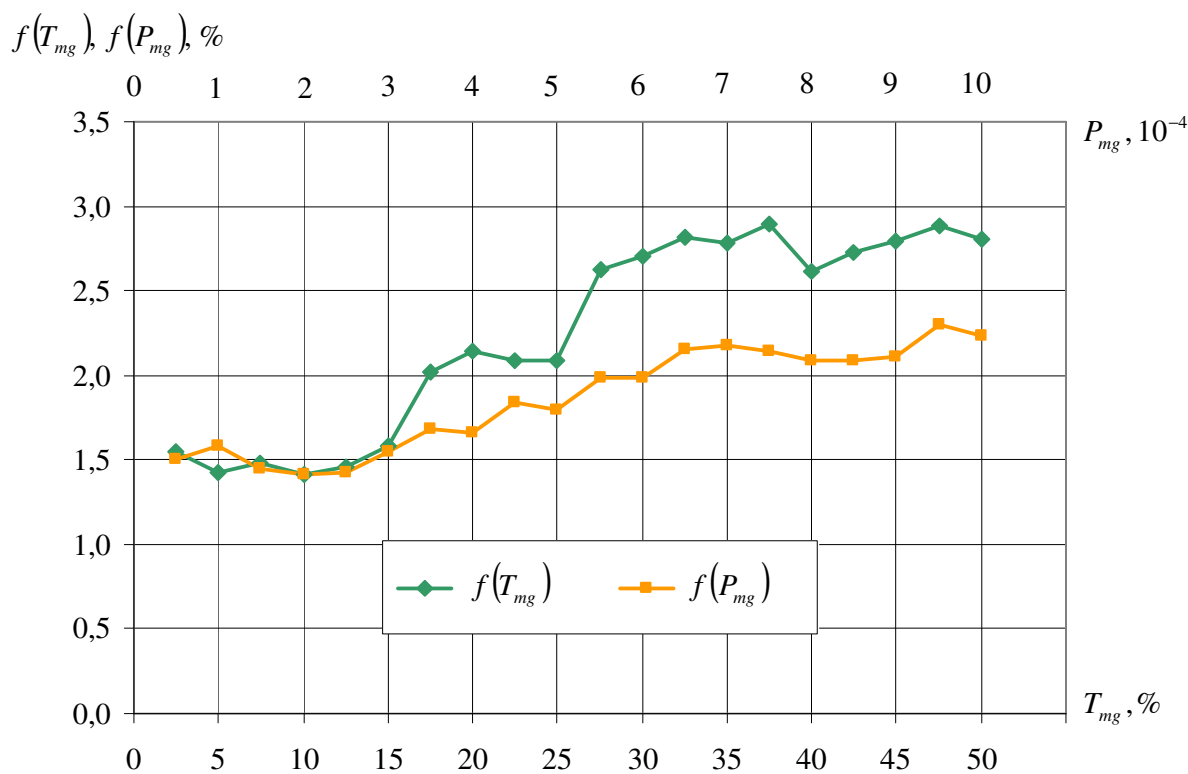


Рисунок 3.5 – Зависимость производительности расчетного алгоритма от значений параметров T_{mg} , P_{mg}

Полученные оптимальные значения параметров алгоритма использованы в дальнейших расчетах.

Использование многоядерных процессоров при проведении расчетов приводит к более очевидному преимуществу многопоточной обработки популяции особей. На рисунке 3.6 приведены графики сходимости целевой функции C (млн. руб./год) к оптимальному решению по времени t (с) при количестве параллельно обрабатываемых вычислительным устройством потоков особей, равном $n \in \{1, 2, 4, 8\}$, и значении параметров $R = 20$, $P = 8$.

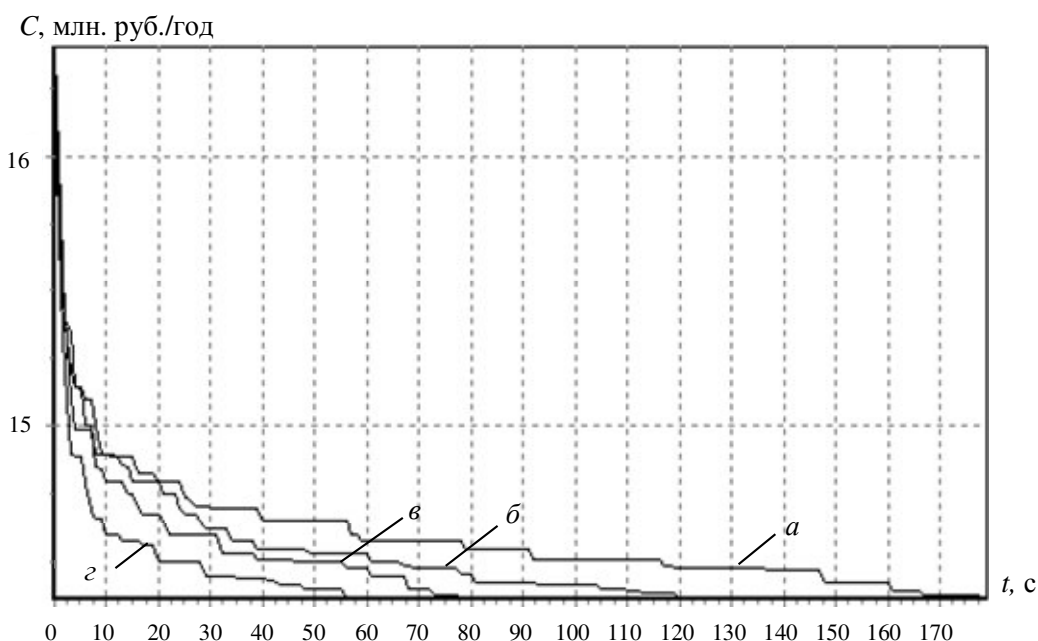


Рисунок 3.6 – Сходимость расчетного алгоритма в зависимости от числа задействованных ядер центрального процессора, равного
а) 1, б) 2, в) 4, г) 8

Расчеты проведены с использованием ЭВМ на базе процессора Intel Core i7, позволяющего параллельно обрабатывать до 8-ми вычислительных потоков. В таблице 3.4 показаны результаты оценки производительности поиска оптимального решения как отношения времени расчета при использовании одного ядра вычислительного устройства (t_1) ко времени расчета при z ядрах (t_z).

Таблица 3.4 – Производительность поиска оптимального решения при параллельной обработке потоков особей

Количество ядер, z	1	2	4	8
t_1 / t_z	1,0	1,5	2	3,1

Согласно данным, представленным в таблице 3.4, на ЭВМ, обеспечивающей параллельную обработку до 8-ми вычислительных процессов, скорость получения оптимального решения задачи возрастает более чем в 3 раза.

3.3 Программно-вычислительный комплекс

Компьютерная поддержка решения задачи оптимального размещения элементов распределенной производственной структуры реализована в программно-вычислительном комплексе (ПВК) «Оптимальное размещение предприятий». Данный ПВК позволяет решать задачу оптимального размещения производства топлива из древесных отходов на территории региона. Программный комплекс разработан в среде программирования Delphi [111] на языке Object Pascal. Для ввода-вывода информации в программе реализовано взаимодействие с системой управления базами данных MS SQL Server [112] и геоинформационной системой Mapinfo [113].

Интерфейс разработанного ПВК содержит вкладки с таблицами для ввода исходных данных и вывода результатов, а также расчетный блок для управления параметрами поиска оптимального решения (см. рисунок 3.7).

Блок ввода исходных данных содержит таблицы для заполнения расстояний между объектами решаемой задачи, указания параметров рассматриваемых видов продукции, а также затрат на производство промежуточной продукции и конечного продукта.

Оптимальное размещение предприятий

Проект

Исходные данные | Расчетный блок | Результаты расчета

Количество объектов

Пункт производства конечного продукта (ПКП) Пункт накопления сырья (ПНС)

Пункт производства промежуточной продукции (ППП) Вид промежуточной продукции

Расположение объектов

Расстояние между ППП и ПНС (км) Расстояние между ППП и ПКП (км)

ППП \ ПНС	1
1	

Экономические характеристики

Общие параметры | Затраты на производство ПП | Затраты на переработку ПП в КП (руб./год)

№ диап	№ вида ПП	Годовой объем выпуска (min)	Годовой объем выпуска (max)	Переменные затраты (руб./ед.изм. ПП)	Постоянные затраты (руб./год)
1					

Число диапазонов

Ограничения

Запасы сырья | Потребности | Объемы производства | Тарифы | Квоты

Параметр \ ПКП	1
Отпуск КП (в год)	

Рисунок 3.7 – Интерфейс ПВК «Оптимальное размещение предприятий»

Пример заполнения исходных данных представлен на рисунке 3.8.

Ограничения задаются потребностями пунктов производства конечного продукта в продукции и запасами сырья в пунктах его накопления. Дополнительно можно задать ограничения на совокупные объемы производства каждого вида продукции либо объемов ее выпуска в конкретных пунктах размещения производства, ввести квоты и тарифы на использование ресурсов.

Расположение объектов

Расстояние между ППП и ПНС (км) Расстояние между ППП и ПКП (км)

ППП \ ПНС	ПНС №1	ПНС №2	ПНС №3	ПНС №4	ПНС №5	ПНС №6	ПНС №7	ПНС №8
Камбарка, г.(1)	245,62	250,447	294,16	299,511	198,847	230,5	237,635	214,76
Камбарка, г.(2)	245,62	250,447	294,16	299,511	198,847	230,5	237,635	214,76
Балаки, с.	257,258	262,085	305,798	311,15	202,039	233,692	240,826	217,951
Кама, с.(1)	252,998	257,825	301,538	306,89	197,779	229,432	236,566	213,691
Кама, с.(2)	252,998	257,825	301,538	306,89	197,779	229,432	236,566	213,691

Экономические характеристики

Общие параметры Затраты на производство ПП Затраты на переработку ПП в КП (руб./год)

№ диап	№ вида ПП	Годовой объем выпуска (min)	Годовой объем выпуска (max)	Переменные затраты (руб./ед.изм. ПП)	Постоянные затраты (руб./год)
1	1	0	1596	610,9	332636,6
2	1	1596	4256	473,3	780031,4
3	1	4256	6916	407,1	1222717

Число диапазонов: 3

Ограничения

Запасы сырья Потребности Объемы производства Тарифы Квоты

Параметр \ ПКП	Камбарка, г.(1)	Камбарка, г.(2)	Балаки, с.	Кама, с.(1)	Кама, с.(2)
Отпуск КП (в год)	368,94	740,74	1884,74	108,68	652,08

Рисунок 3.8 – Заполнение исходных данных ПВК

После заполнения необходимых данных осуществляется переход к расчетному блоку (см. рисунок 3.9). Здесь, по графику, можно отслеживать сходимость решения задачи и, при необходимости, корректировать параметры используемого алгоритма, в частности нагрузку на центральный процессор (указывается число задействованных ядер или потоков), параметры генетического алгоритма, ограничения на поиск решения.

Также необходимо указать ограничения, накладываемые на пункты производства конечного продукта: количество пунктов производства промежуточной продукции, пунктов накопления сырья и видов промежуточной продукции, которыми может обеспечиваться отдельный пункт производства конечного продукта. Если данные ограничения на заданы условием решаемой

задачи, то их можно ввести дополнительно для ускорения поиска оптимального решения.

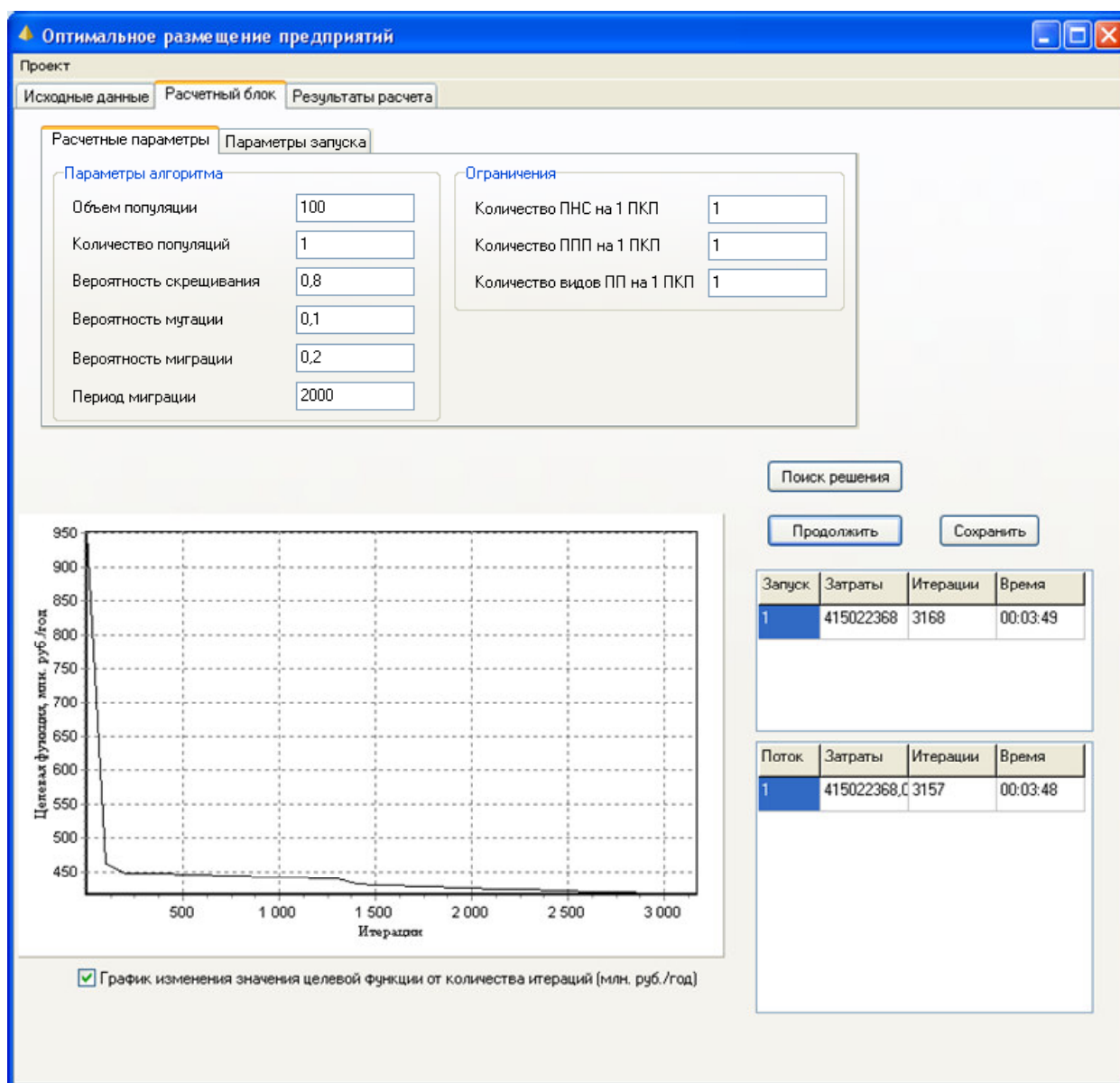


Рисунок 3.9 – Расчетный блок ПКВ

Блок вывода результатов содержит итоговую информацию по каждому потребителю, в частности себестоимость и объем вырабатываемого конечного продукта, себестоимость и объем используемой промежуточной продукции, затраты на ее транспортировку и т.д. (см. рисунок 3.10).

Также приводятся объемы производства продукции каждого вида во всех пунктах размещения производства, данные по распределению сырья и промежуточной продукции (см. рисунок 3.11).

Себестоимость производства КП						
Объем производства ПП и затраты сырья						
Распределение пунктов производства ПП и КП						
Статистика						
Себестоимость производства конечного продукта						
ПКП \ параметр	Себестоимость единицы КП (руб.)	Выпуск КП (в год)	Общие затраты (руб./год)	Себестоимость единицы ПП (руб.)	Затраты ПП (в год)	До
Камбарка, г.(1)	1648,88	368,94	608337,69	2970,75	61,61	39678,
Камбарка, г.(2)	1197,13	740,74	886762,06	2970,75	123,7	79658,
Балаки, с.	931,84	1884,74	1756273,25	3011,48	314,75	21550,
Кама, с.(1)	3559,36	108,68	386830,81	1427,67	19,13	5421,4
Кама, с.(2)	1262,39	652,08	823180,63	2996,57	108,9	72936,
Кама, с.(3)	1000,20	1344,20	1344463,13	2996,57	224,48	15035,
Кама, с.(4)	1159,12	817,96	948116,06	2996,57	136,6	91490,
Кама, с.(5)	970,59	1527,24	1482322,88	2996,57	255,05	17082,
Михайловка, с.	1066,47	1043,90	1113285,38	2967,88	174,33	111760,
Ариково, д.	1428,46	348,92	498418,75	1273,05	61,41	0
Большая Кизня, д.(1)	2432,30	174,46	424338,31	1569,46	30,7	7509
Большая Кизня, д.(2)	5796,39	62,92	364708,66	1512,67	11,07	2708,1
Заречная Медла, д.	665,22	2070,64	1377428	1432,47	364,43	43653,
Нижняя Пыхта, д.	694,66	1595,88	1108591,63	1328,68	280,87	18278,

Рисунок 3.10 – Результаты расчета себестоимости конечного продукта в каждом пункте его производства

Себестоимость производства КП						
Объем производства ПП и затраты сырья						
Распределение пунктов производства ПП и КП						
Статистика						
Объем производства ПП (в год)			Затраты сырья (в год)			
ППП \ ПП	Щепа	Пеллеты	ППП \ ПНС	ПНС №2	ПНС №3	ПНС №4
Камбарка, г.(1)	0	0	Камбарка, г.(1)	0	0	0
Камбарка, г.(2)	0	0	Камбарка, г.(2)	0	0	0
Балаки, с.	0	0	Балаки, с.	0	0	0
Кама, с.(1)	0	0	Кама, с.(1)	0	0	0
Кама, с.(2)	0	0	Кама, с.(2)	0	0	0
Кама, с.(3)	0	0	Кама, с.(3)	0	0	0
Кама, с.(4)	0	0	Кама, с.(4)	0	0	0
Кама, с.(5)	0	0	Кама, с.(5)	0	0	0
Михайловка, с.	0	0	Михайловка, с.	0	0	0
Ариково, д.	923,15	0	Ариково, д.	0	0	345,7
Большая Кизня, д.(1)	0	0	Большая Кизня, д.(1)	0	0	0
Большая Кизня, д.(2)	0	0	Большая Кизня, д.(2)	0	0	0
Заречная Медла, д.	0	0	Заречная Медла, д.	0	0	0
Нижняя Пыхта, д.	0	0	Нижняя Пыхта, д.	0	0	0
Удмуртский Лем, д.	0	0	Удмуртский Лем, д.	0	0	0

Рисунок 3.11 – Результаты расчета объемов производства промежуточной продукции и объемов использования сырья в пунктах его накопления

3.4 Аналитическое решение

Расчеты в данном случае осуществляются на основе аналитических преобразований и вычислений. Аналитический подход к исследованию параметров оптимального размещения элементов распределенной производственной структуры становится возможным при допущении равномерного по территории распределения запасов сырья и потребностей в продукции. Проведенные аналитические расчеты, с одной стороны, дают приближенную оценку решения оптимизационной задачи, с другой, позволяют проводить тестирование численных алгоритмов более общей задачи оптимизации, рассмотренной в главе 2. Используемый подход позволяет определить соотношения между параметрами оптимального размещения элементов распределенной производственной структуры и является вкладом в развитие аналитических методов решения задачи размещения производства, рассмотренных в [3].

Аналитический метод решения задачи оптимального размещения элементов распределенной производственной структуры основывается на следующих допущениях.

1. Равномерное распределение сырья для производства каждого вида промежуточной продукции:

$$\rho_c^m = \frac{W^m}{S_T} = \text{const}, m = \overline{1, M}. \quad (3.4)$$

Здесь

ρ_c^m – удельные запасы сырья для производства m -го вида промежуточной продукции, ед.с./год/км²;

W^m – объем сырья для производства m -го вида промежуточной продукции на территории S_T , ед.с./год;

S_T – площадь территории, на которой расположены пункты производства конечного продукта, км².

2. Равномерное распределение потребности в конечном продукте:

$$\rho_{\tau} = \frac{D}{S_{\tau}} = \frac{D^m}{S_{\tau}^m} = const, m = \overline{1, M}. \quad (3.5)$$

Здесь

ρ_{τ} – удельный объем выработки конечного продукта в пунктах его производства, ед.к.п./год/км²;

D – суммарный объем конечного продукта в пунктах его производства, ед.к.п./год;

S_{τ}^m – площадь территории, обеспечиваемой m -м видом промежуточной продукции, км².

3. Мощности пунктов производства m -го вида промежуточной продукции одинаковы:

$$V^m = const, N^m = \frac{\tau^m D^m}{V^m}, m = \overline{1, M}, \quad (3.6)$$

где N^m – количество пунктов производства m -го вида промежуточной продукции.

4. Объемы выпуска конечного продукта в пунктах его производства одинаковы:

$$u = \frac{D}{K} = const, \quad (3.7)$$

где u – объем выработки конечного продукта в одном пункте его производства, ед.к.п./год.

5. Затраты на доставку сырья и промежуточной продукции пропорциональны расстояниям их транспортировки:

$$g_c^m = h_c^m L_c^m, g_{\tau}^m = h_{\tau}^m L_{\tau}^m, m = \overline{1, M}. \quad (3.8)$$

Здесь

g_c^m – затраты на транспортировку сырья для производства m -го вида промежуточной продукции, руб./ед.с.;

g_t^m – затраты на транспортировку m -го вида промежуточной продукции, руб./ед.п.п.;

h_c^m – удельные затраты на транспортировку сырья для производства m -го вида промежуточной продукции, руб./ед.с./км;

h_t^m – удельные затраты на транспортировку m -го вида промежуточной продукции, руб./ед.п.п./км;

L_c^m – расстояние транспортировки сырья до пункта производства m -го вида промежуточной продукции, км;

L_t^m – расстояние транспортировки m -го вида промежуточной продукции до пункта производства конечного продукта, км.

6. Условно-постоянные затраты на производство промежуточной продукции, а также условно-постоянные затраты на производство конечного продукта не зависят от объема производства на предприятии:

$$a^m, b^m, \tilde{a}^m, \tilde{b}^m = \text{const}, m = \overline{1, M}. \quad (3.9)$$

С учетом допущений 1-6 критерий оптимизации размещения элементов распределенной производственной структуры можно записать в виде

$$C = C^{\text{ПП}} + C^{\text{КП}} \rightarrow \min, \quad (3.10)$$

$$C^{\text{ПП}} = \sum_{m=1}^M \left(a^m + \frac{b^m}{V^m} + \alpha^m h_c^m L_c^m + h_t^m L_t^m \right) \tau^m D^m, \quad (3.11)$$

$$C^{\text{КП}} = \sum_{m=1}^M \left(\tilde{a}^m + \frac{\tilde{b}^m}{u} \right) D^m. \quad (3.12)$$

Ограничения, отражающие баланс между потребностью в конечном продукте и потенциалом сырья в пунктах его накопления, задаются соотношениями

$$\sum_{m=1}^M D^m = D; \quad (3.13)$$

$$\alpha^m \tau^m D^m \leq W^m, m = \overline{1, M}. \quad (3.14)$$

Пусть σ_t^m – площадь территории обеспечения пунктов производства конечного продукта m -м видом промежуточной продукции одного пункта ее производства, км². Данный параметр может быть связан с расстоянием транспортировки промежуточной продукции до пунктов производства конечного продукта по формуле

$$\sigma_t^m = \left(\frac{1}{\gamma \beta} L_t^m \right)^2, m = \overline{1, M}, \quad (3.15)$$

где

γ – коэффициент кривизны дорог ($\gamma \geq 1$);

β – коэффициент согласования, зависящий от геометрии рассматриваемой территории.

Коэффициент кривизны дорог γ показывает, во сколько раз расстояние транспортировки продукции по дороге между пунктами накопления сырья, пунктами производства промежуточной продукции и пунктами производства конечного продукта превышает удаленность объектов друг от друга по прямой. Этот показатель рассчитывается на основе статистических данных по дорогам на рассматриваемой территории.

Для определения коэффициента β рассчитаем средневзвешенное расстояние транспортировки промежуточной продукции по прямой от центра территории площадью σ до произвольного ее участка

$$L' = \frac{\iint \sigma l' d\sigma}{\sigma}, \quad (3.16)$$

где l' – переменное расстояние доставки промежуточной продукции от пункта ее производства до пункта производства конечного продукта.

Возьмем правильный n -угольник и введем декартову систему координат (x, y) с центром, совпадающим с центром окружности радиуса $R_{\text{окр}}$, описывающей данный n -угольник. Рассмотрим случай $n = 3$. Для простоты рас-

четов разделим треугольник на 6 равновеликих частей и выделим штриховкой ту, которая будет лежать в плоскости положительных координат (x, y) (см. рисунок 3.12).

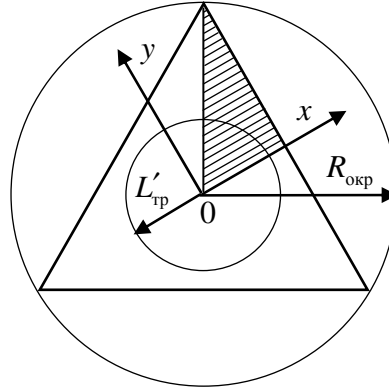


Рисунок 3.12 – Расчет средневзвешенной удаленности каждой точки n -угольника от его центра

Тогда средневзвешенное расстояние до центра в треугольном участке можно определить по формуле

$$L'_{\text{тр}} = \frac{\int_0^{0,5R_{\text{окр}}} dx \int_0^{\sqrt{3}x} \sqrt{x^2 + y^2} dy}{\int_0^{0,5R_{\text{окр}}} \int_0^{\sqrt{3}x} dx dy}. \quad (3.17)$$

В результате расчета получим $L'_{\text{тр}} = 0,460R_{\text{окр}}$, или $L'_{\text{тр}} = 0,404\sqrt{\sigma_{\text{тр}}}$, где $\sigma_{\text{тр}}$ – площадь правильного треугольника. Таким образом, для средневзвешенного расстояния транспортировки в пределах треугольного участка, определяемого формулой

$$L_{\text{тр}} = \gamma L'_{\text{тр}} = \gamma \beta \sqrt{\sigma_{\text{тр}}},$$

коэффициент β равен 0,404.

Аналогично осуществляется расчет в случае $n > 3$. При этом для круга (обозначим для него $n = \infty$) радиуса $R_{\text{кр}}$ и площадью $\sigma_{\text{кр}}$ формулу расчета можно легко получить с использованием полярной системы координат (ρ, φ) :

$$L'_{кр} = \frac{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{R_{кр}} \rho \cdot \rho d\rho}{\sigma_{кр}} = \frac{2}{3\sqrt{\pi}} \sqrt{\sigma_{кр}}. \quad (3.18)$$

Значения коэффициента β при различных n представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Значение коэффициента β для различных типов n -угольников

n	3	4	5	6	7	8	...	∞
β	0,404	0,383	0,379	0,377	0,377	0,376	...	0,376

Таким образом, форма территории размещения элементов распределенной производственной структуры оказывает определенное влияние на расстояние транспортировки используемых ресурсов и, соответственно, на себестоимость конечного продукта. Степень этого влияния подробно описана в [1, 34].

Количество пунктов производства m -го вида промежуточной продукции N^m может быть рассчитано по формуле

$$N^m = \frac{S_{\tau}^m}{\sigma_{\tau}^m}, m = \overline{1, M}. \quad (3.19)$$

Из формул (3.5), (3.7), (3.15), (3.19) вытекает зависимость между объемом производства m -го вида промежуточной продукции на предприятии и расстоянием ее транспортировки до пункта производства конечного продукта

$$V^m = \tau^m \rho_{\tau} \left(\frac{1}{\gamma \beta} L_{\tau}^m \right)^2, m = \overline{1, M}. \quad (3.20)$$

Определим зависимость между расстояниями транспортировки сырья и промежуточной продукции. Потенциал сырья и потребность в нем определяют соотношение между площадями территорий сбора сырья и снабжения промежуточной продукцией

$$S_{\tau}^m = S_{\tau}^m \frac{\alpha^m \tau^m D}{W^m}, m = \overline{1, M}, \quad (3.21)$$

где S_c^m – площадь территории сбора сырья для производства m -го вида промежуточной продукции, км^2 ($S_c^m \leq S_T^m$).

Определим площадь территории сбора сырья одним пунктом производства промежуточной продукции σ_c^m , км^2 , выражением

$$\sigma_c^m = \left(\frac{1}{\gamma\beta} L_c^m \right)^2. \quad (3.22)$$

Используя формулы (3.15), (3.22) и предполагая, что

$$S_T^m = N^m \sigma_T^m, \quad S_c^m = N^m \sigma_c^m,$$

выражение (3.21) можно свести к зависимости между расстояниями транспортировки сырья и промежуточной продукции

$$L_c^m = L_T^m \sqrt{\alpha^m \tau^m \frac{D}{W^m}} = L_T^m \sqrt{\alpha^m \tau^m \frac{\rho_T}{\rho_c^m}}, \quad m = \overline{1, M}. \quad (3.23)$$

Подстановка правых частей равенств (3.20) и (3.23) в выражение (3.11) вместо величин V^m и L_c^m соответственно приводит к следующему виду целевой функции (3.10) – (3.12):

$$C = \sum_{m=1}^M \left(a^m + \frac{b^m}{\tau^m \rho_T \left(\frac{1}{\gamma\beta} L_T^m \right)^2} + \left(\alpha^m h_c^m \sqrt{\alpha^m \tau^m \frac{\rho_T}{\rho_c^m}} + h_T^m \right) L_T^m \right) \tau^m D^m + \\ + \sum_{m=1}^M \left(\tilde{a}^m + \frac{\tilde{b}^m}{u} \right) D^m \rightarrow \min. \quad (3.24)$$

Таким образом, формула расчета совокупных затрат сведена к зависимости от расстояния транспортировки промежуточной продукции и объемов производства конечного продукта на каждом виде промежуточной продукции:

$$C = F(L_T^1, \dots, L_T^M; D^1, \dots, D^M). \quad (3.25)$$

Неизвестные L_T^m определяются из условия

$$\frac{\partial C}{\partial L_T^m} = \left(-\frac{2b^m}{\tau^m \rho_T \left(\frac{1}{\gamma\beta} \right)^2 (L_T^m)^3} + \left(\alpha^m h_c^m \sqrt{\alpha^m \tau^m \frac{\rho_T}{\rho_c^m}} + h_T^m \right) \right) \tau^m D^m = 0, \quad m = \overline{1, M}. \quad (3.26)$$

Откуда рассчитывается не зависящее от D^m оптимальное расстояние транспортировки каждого вида топлива

$$\bar{L}_T^m = \sqrt[3]{\frac{2b^m}{\tau^m \rho_T \left(\frac{1}{\gamma\beta} \right)^2 \left(\alpha^m h_c^m \sqrt{\alpha^m \tau^m \frac{\rho_T}{\rho_c^m}} + h_T^m \right)}}, \quad m = \overline{1, M}. \quad (3.27)$$

Поскольку матрица Гессе

$$H = \left[\frac{\partial^2 C}{\partial L_T^{m_1} \partial L_T^{m_2}} \right]_{m_1, m_2=1}^M$$

положительно определена для решения $\bar{L}_T = [\bar{L}_T^m]_{m=1}^M$ при любых фиксированных D^m , то расстояния $\bar{L}_T^m$, рассчитанные по формуле (3.27), обеспечивают минимум функции (3.24). В частном случае, когда весь объем тепловой энергии производится на одном топливе m -го вида ($D^m = D$), оптимальность расстояния $\bar{L}_T^m$ обеспечивается условием

$$\frac{d^2 C(\bar{L}_T^m)}{d(L_T^m)^2} > 0.$$

Сделаем замену

$$A^m = \tau^m \left(a^m + \frac{b^m}{\tau^m \rho_T \left(\frac{1}{\gamma\beta} \bar{L}_T^m \right)^2} + \left(\alpha^m h_c^m \sqrt{\alpha^m \tau^m \frac{\rho_T}{\rho_c^m}} + h_T^m \right) \bar{L}_T^m \right) +$$

$$+ \left(\tilde{a}^m + \frac{\tilde{b}^m}{u} \right), m = \overline{1, M}. \quad (3.28)$$

Оптимальные объемы производства тепловой энергии на m -м виде топлива $(\bar{D}^m)$ определяются из решения сформулированной задачи с линейной целевой функцией

$$C = \sum_{m=1}^M A^m D^m \rightarrow \min \quad (3.29)$$

при ограничениях (3.13), (3.14).

Полученная задача решается с использованием стандартных методов решения линейных задач, в частности симплекс-методом.

4. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ РАЗМЕЩЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА НА ТЕРРИТОРИИ УДМУРТСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

4.1 Задача о размещении производства древесного топлива

4.1.1 Энергетический потенциал древесных отходов

Приведем результаты решения задачи размещения элементов распределенной производственной структуры на примере организации производства топлива из древесных отходов для снабжения им теплоисточников Удмуртской Республики.

По данным Министерства промышленности и энергетики УР в районах республики отпуск тепловой энергии осуществляют более 1 400 теплоисточников. Наибольшее количество из них работают на угле (33,7 %) и природном газе (28,8 %). На дровах (18,4 %) и электроэнергии (19,1 %) работают в основном наиболее мелкие теплоисточники.

Использование древесного сырья выступает альтернативой газификации отдаленных районов УР, и в дальнейшем будут рассматриваться теплоисточники, которые не переведены на газ и имеют расчетную тепловую нагрузку более 0,02 Гкал/ч. Их количество составляет 474 единицы, объем отпуска тепловой энергии на теплоисточниках равен 310,00 тыс. Гкал/год.

Пункты накопления сырья для производства щепы, количество которых составляет 94 единицы с общим потенциалом 382,29 тыс. м³/год, расположены вне населенных пунктов – рядом с местами вырубki леса. Сырьевая база для пеллет определяется величиной отходов деревоперерабатывающих предприятий. Расположение предприятий и объем используемой ими древесины приведены в таблице 4.1. Потенциал данных пунктов накопления сырья определяется объемом древесных отходов, которые составляют 50 % от объема использования древесины.

Таблица 4.1 –Потенциал древесных отходов деревоперерабатывающих предприятий

№ п/п	Наименование предприятия	Использование древесины, тыс. м ³ /год
1	ООО «Балезинский ДОК», п. Балезино, Балезинский район	101,42
2	ООО «Игринский ЛПХ», п. Игра, Игринский район	22,00
3	ООО «Темп», п. Игра, Игринский район	8,46
4	ЗАО МДНП «Красная Звезда», г. Можга, Можгинский район	35,04
5	ОАО «Увадрев-Холдинг», п. Ува, Увинский район	240,00
6	ООО «Леспромбаза», с. Якшур-Бодья, Як.-Бодьинский район	15,06
7	ОАО «Ижмебель», Лынгинский леспромхоз, ст. Лынга, Як.-Бодьинский район	16,00
8	ООО «Харви-Яр, ИНК», п. Дизьмино, Ярский район	32,48
Итого по УР		470,46

Совокупные данные по потенциалу отходов лесозаготовительных и деревоперерабатывающих предприятий, а также объемы выработки тепловой энергии на теплоисточниках по районам УР приведены в таблице 4.2 [114]. Диаграмма распределения запасов сырья и требуемого объема выработки тепловой энергии отображена на рисунке 4.1. На диаграмме видно, что распределение сырья и требуемого объема выработки тепловой энергии на территории неравномерно, при этом энергетический потенциал топлива из древесных отходов превышает потребность в нем рассматриваемых теплоисточников.

Таблица 4.2 – Годовые значения потенциала древесных отходов и отпуска тепловой энергии на теплоисточниках

№ п/п	Район	Потенциал отходов лесозаготовки		Потенциал отходов деревопереработки		Выработка тепловой энергии, тыс. Гкал
		тыс. м ³	тыс. Гкал	тыс. м ³	тыс. Гкал	
1	Алнашский	2,29	3,46	0,00	0,00	6,41
2	Балезинский	30,34	45,81	50,71	64,82	10,51
3	Вавожский	15,72	23,73	0,00	0,00	11,22
4	Воткинский	16,31	24,63	0,00	0,00	1,92
5	Глазовский	17,97	27,13	0,00	0,00	23,48

№ п/п	Район	Потенциал отходов лесозаготовки		Потенциал отходов деревопереработки		Выработка тепловой энергии, тыс. Гкал
		тыс. м ³	тыс. Гкал	тыс. м ³	тыс. Гкал	
6	Граховский	6,21	9,37	0,00	0,00	2,91
7	Дебесский	9,10	13,74	0,00	0,00	13,17
8	Завьяловский	23,12	34,91	0,00	0,00	7,48
9	Игринский	18,57	28,04	15,23	19,47	50,75
10	Камбарский	4,59	6,93	0,00	0,00	18,88
11	Каракулинский	0,49	0,74	0,00	0,00	7,33
12	Кезский	21,05	31,79	0,00	0,00	12,11
13	Кизнерский	19,29	29,12	0,00	0,00	19,45
14	Киясовский	3,83	5,79	0,00	0,00	9,08
15	Красногорский	16,09	24,30	0,00	0,00	4,93
16	Малопургинский	10,71	16,18	0,00	0,00	3,80
17	Можгинский	12,59	19,02	17,52	22,39	14,23
18	Сарапульский	8,50	12,83	0,00	0,00	0,35
19	Селтинский	16,50	24,92	0,00	0,00	8,27
20	Сюмсинский	29,55	44,62	0,00	0,00	17,78
21	Увинский	49,47	74,71	120,00	153,39	8,58
22	Шарканский	8,01	12,09	0,00	0,00	20,23
23	Юкаменский	4,66	7,04	0,00	0,00	14,55
24	Як-Бодьинский	20,41	30,82	15,53	19,85	4,59
25	Ярский	16,92	25,55	16,24	20,76	17,99
Итого по УР		382,29	577,27	235,23	300,68	310,00



Рисунок 4.1 – Сравнение энергетического потенциала древесных отходов и требуемой выработки тепловой энергии по районам Удмуртской Республики

Коэффициент, определяющий количество сырья, необходимого для производства топлива, для щепы (щ) составляет $\alpha^{\text{щ}} = 3,759 \text{ м}^3/\text{т у.т.}$, для пеллет (п) – $\alpha^{\text{п}} = 4,700 \text{ м}^3/\text{т у.т.}$ Коэффициент соотношения выработанной тепловой энергии к ее полезному отпуску для щепы составляет $\eta^{\text{щ}} = 1,232$, для пеллет – $\eta^{\text{п}} = 1,164$. Калорийный эквивалент $\tau = 0,143 \text{ т у.т./Гкал.}$

4.1.2 Оптимальная схема размещения производства топлива из древесных отходов

При решении задачи предполагается, что потенциальными пунктами размещения производства топлива из древесных отходов являются места расположения рассматриваемых теплоисточников, а также места расположения деревоперерабатывающих предприятий. В сумме имеем 482 потенциальных пункта размещения производства, 102 пункта накопления сырья и 2 вида топлива из древесных отходов, в результате чего количество неизвестных в векторе искомых переменных составит 46 607 472 элемента. При допущении о том, что каждый теплоисточник может быть снабжен топливом одного вида и от одного пункта производства топлива, и при этом сырья 10-ти любых пунктов его накопления достаточно для производства топлива в объеме, превышающем потребность каждого теплоисточника, искомый вектор решений может быть сокращен до 10 428 элементов.

В результате решения задачи (2.19)-(2.29) получен оптимальный вариант размещения производства, при котором необходимо организовать 23 пункта подготовки щепы и 4 пеллетных завода, обеспечивающих топливом все теплоисточники (см. рисунок 4.2).

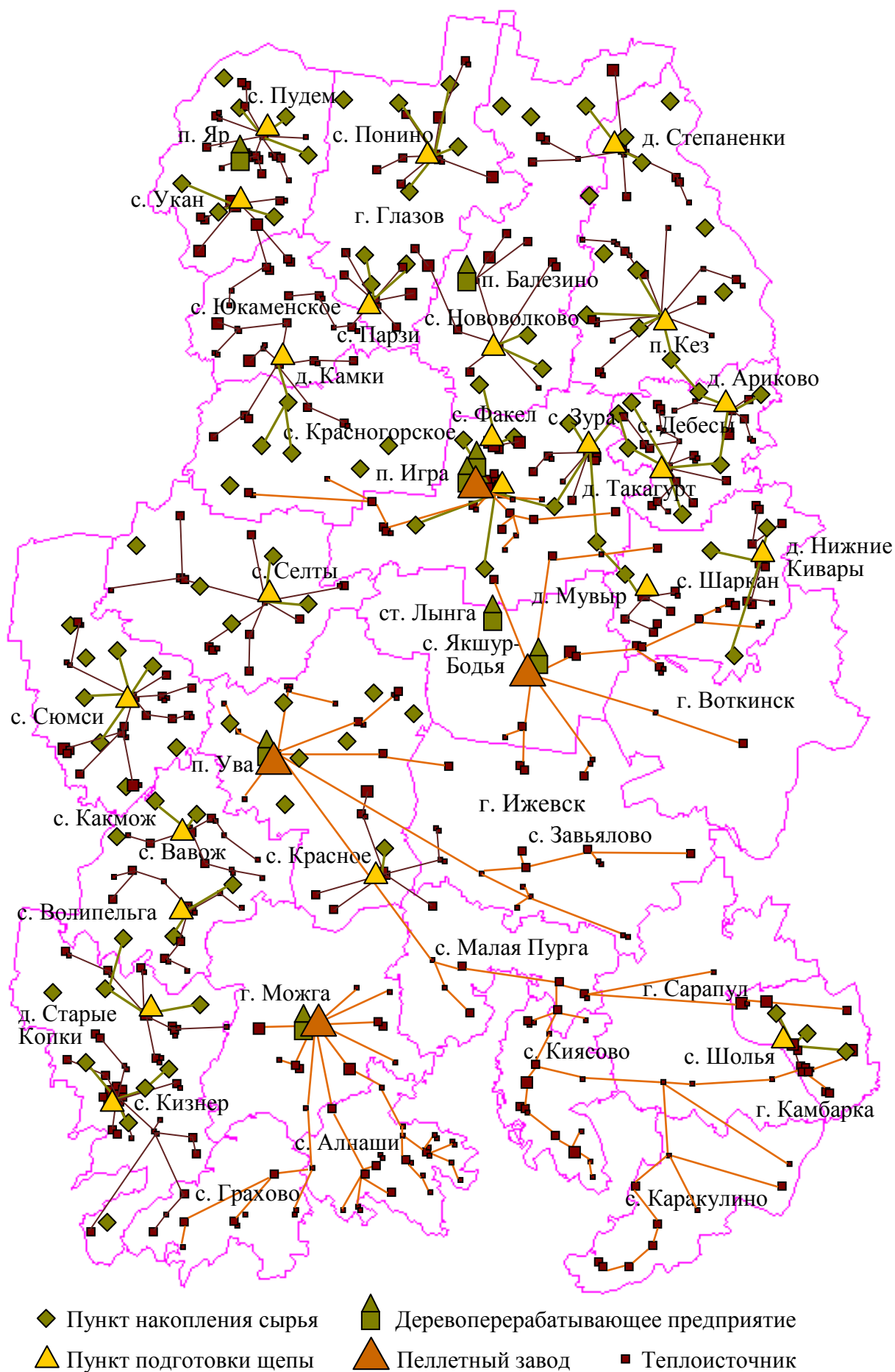


Рисунок 4.2 – Оптимальная схема размещения производства топлива из древесных отходов

Объемы производства топлива в пунктах подготовки щепы и пеллетных заводах указаны в таблицах 4.3-4.4.

Таблица 4.3 – Пункты подготовки щепы на территории УР

№ п/п	Расположение пункта подготовки щепы	Объем производства щепы, т у.т./год	Количество снабжаемых теплоисточников
1	с. Сюмси	3 132	24
2	п. Игра	2 789	5
3	п. Кизнер	2 265	29
4	с. Понино	2 139	11
5	с. Нововолково	2 094	12
6	с. Укан	1 985	14
7	д. Камки	1 952	19
8	с. Парзи	1 889	13
9	с. Пудем	1 690	20
10	с. Селты	1 655	16
11	с. Зура	1 617	10
12	п. Кез	1 514	19
13	д. Нижние Кивары	1 514	8
14	с. Факел	1 405	4
15	д. Такагурт	1 394	19
16	д. Старые Копки	1 370	15
17	д. Степаненки	1 217	12
18	д. Мувыр	1 212	7
19	с. Шолья	1 206	4
20	с. Красное	1 092	12
21	с. Волипельга	1 013	13
22	с. Какмож	963	12
23	д. Ариково	923	8
Всего		38 030	306

Таблица 4.4 – Пеллетные заводы на территории УР

№ п/п	Расположение пеллетного завода	Объем производства пеллет, т у.т./год	Количество снабжаемых теплоисточников
1	п. Ува	6 678	74
2	г. Можга	3 731	45
3	п. Игра	2 777	22
4	с. Якшур-Бодья	2 503	27
Всего		15 689	168

Суммарный объем производства щепы равен 38 030 т у.т./год, пеллет – 15 689 т у.т./год. Среднее расстояние транспортировки щепы от пунктов ее производства до теплоисточников составляет 15 км, среднее расстояние транспортировки пеллет – 72 км.

Значение целевой функции составляет 328,70 млн. руб./год. График зависимости значения целевой функции C от количества итераций q приведен на рисунке 4.3. Средняя себестоимость производства тепловой энергии на топливе из древесных отходов по всем рассматриваемым теплоисточникам составила 1 060 руб./Гкал.

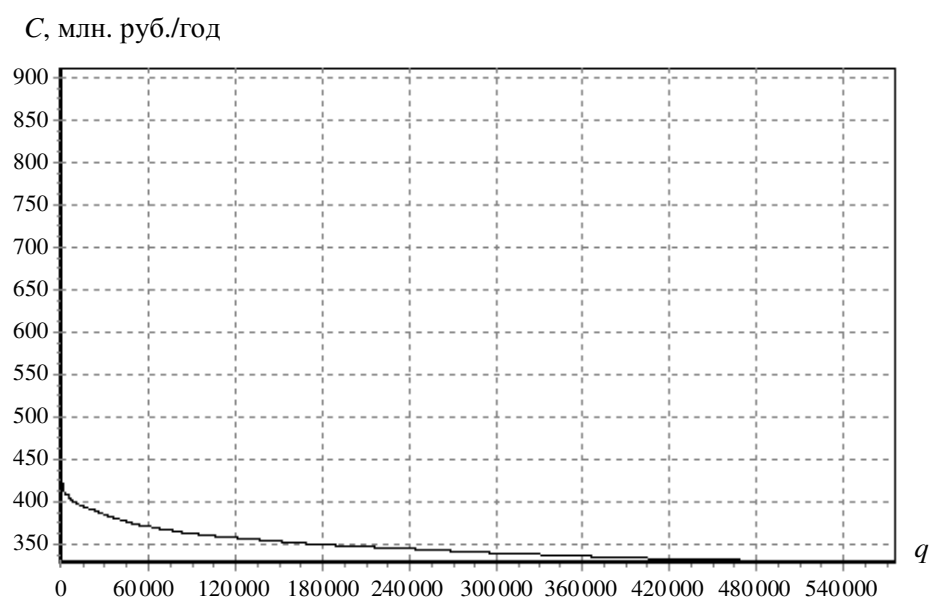


Рисунок 4.3 – Зависимость значения целевой функции от количества итераций

4.1.3 Влияние административных ограничений на оптимальное размещение производства

В приведенных выше расчетах предполагается отсутствие каких-либо ограничений на транспортировку сырья и продукции между различными частями рассматриваемого региона. На практике транспортировка ресурсов может быть ограничена административными или иными регуляторами. Квоты или пошлины приводят к изменению затрат на транспортируемые ресур-

сы, в результате чего оптимальная схема размещения элементов распределенной производственной структуры принимает другой вид.

Оценим влияние ограничений на поставки сырья и топлива на решение оптимизационной задачи. Предположим, что введены административные ограничения, заключающиеся в исключении поставок щепы и сырья для ее производства между районами Удмуртской Республики. В результате решения полученной задачи оптимальная схема размещения производства топлива из древесных отходов примет вид, представленный на рисунке 4.4.

Значение суммарных затрат на производство тепловой энергии составит 356,40 млн. руб./год. Для обеспечения теплоисточников топливом необходимо организовать 22 пункта подготовки щепы с суммарным объемом ее производства, равным 31 524 тыс. т у.т./год, и 5 пеллетных заводов с суммарным объемом производства пеллет, равным 21 862 тыс. т у.т./год. Средняя себестоимость производства тепловой энергии на топливе из древесных отходов по всем рассматриваемым теплоисточникам составит 1 150 руб./Гкал, т.е. вырастет на 8%.

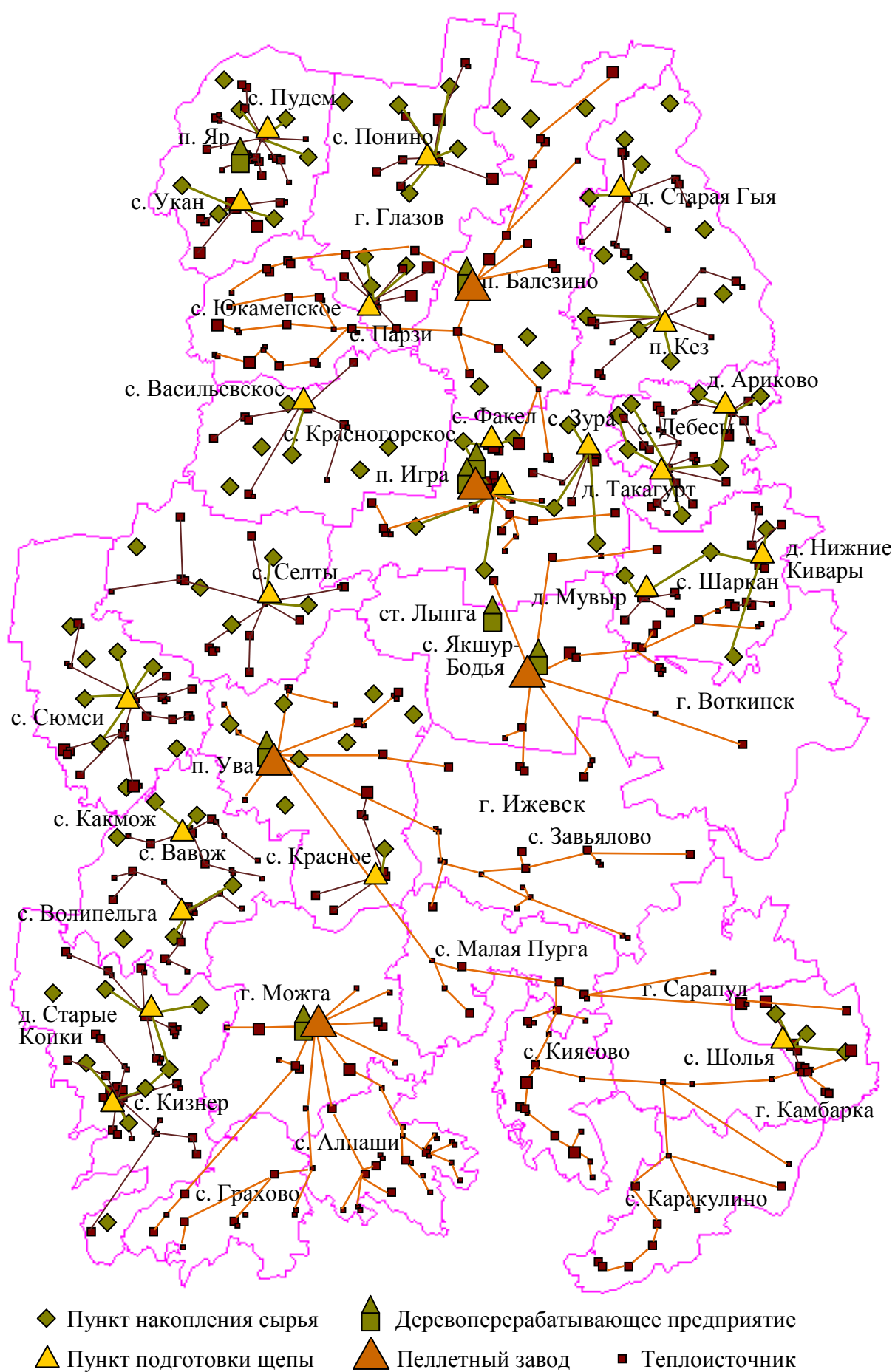


Рисунок 4.4 – Размещение производства с учетом административных ограничений

4.1.4 Экономическая эффективность организации производства топлива из древесных отходов

Сравнение себестоимости производства тепловой энергии на различных видах топлива.

В пункте 4.1.2 получено, что при оптимальном размещении производства топлива из древесных отходов рациональнее всего организовать 23 пункта подготовки щепы и 4 пеллетных завода для снабжения топливом теплоисточников региона. Совокупная себестоимость тепловой энергии при этом составляет 328,70 млн. руб./год, или 1060 руб./Гкал, со средним отпуском тепловой энергии на теплоисточнике, равным 654 Гкал/год, соответствующим расчетной нагрузке 0,23 Гкал/ч.

В таблице 4.5 приведено сравнение себестоимости производства тепловой энергии на традиционных видах топлива (природный газ, уголь) [97] и на топливе из древесных отходов для различных расчетных тепловых нагрузок теплоисточников.

Таблица 4.5 – Себестоимость тепловой энергии на теплоисточниках для различных видов используемого топлива

Расчетная тепловая нагрузка, Гкал/ч	Себестоимость тепловой энергии, руб./Гкал			
	газ	уголь	щепа	пеллеты
0,1	1 611	2 797	1 537	1 812
0,2	1 129	1 902	1 067	1 322
0,3	966	1 584	890	1 172
0,4	889	1 421	796	1 067
0,5	831	1 336	752	1 017
0,6	803	1 281	720	980
0,7	782	1 231	696	953
0,8	756	1 177	674	921
0,9	732	1 130	656	893
1,0	712	1 085	633	867
1,1	692	1 048	613	846
1,2	675	1 017	597	828

Зависимости себестоимости тепловой энергии c_u от тепловой нагрузки теплоисточника u и вида используемого топлива представлены на рисун-

ке 4.5. Пунктирной линией отображено среднее значение тепловой нагрузки по всем рассматриваемым теплоисточникам региона.

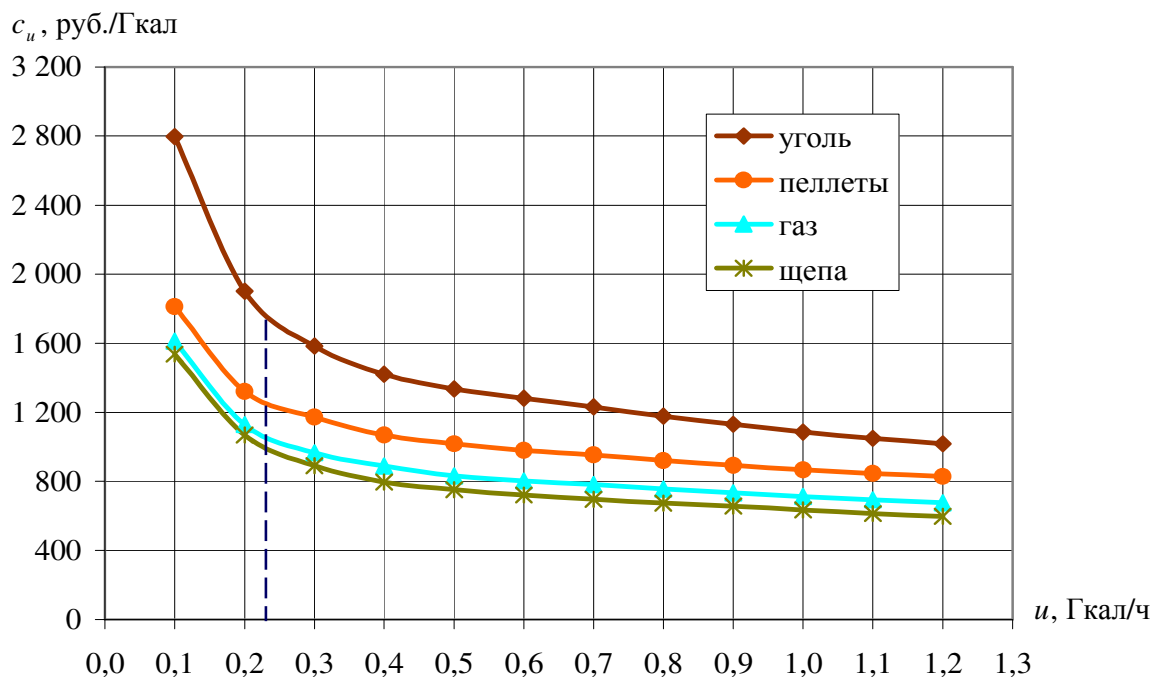


Рисунок 4.5 – Зависимость себестоимости тепловой энергии от расчетной тепловой нагрузки для различных видов топлива

Анализ представленных данных показывает, что с ростом нагрузки теплоисточника себестоимость производства тепловой энергии уменьшается. При этом для теплоисточников на щепе себестоимость тепловой энергии имеет наименьшие значения по сравнению с другими видами топлива.

Затраты на топливо в составе себестоимости тепловой энергии составляют 25 % в случае использования щепы и 35 % в случае использования пеллет. Средняя себестоимость топлива с учетом его доставки до пунктов потребления составляет 1 320 руб./т у.т. для щепы и 2 723 руб./т у.т. для пеллет.

При реализации данных видов топлива с учетом 10 % нормы прибыли и НДС 18 % их стоимость в сравнении с традиционными энергоресурсами составит значения, представленные в таблице 4.6. На рисунке 4.6 дано графическое сравнение стоимости различных видов топлива.

Таблица 4.6 – Стоимость различных видов топлива

№ п/п	Вид топлива	Единица измерения (ед. изм.)	Стоимость, руб./ед. изм.	Калорийный эквивалент, т у.т./ед. изм.	Стоимость, руб./т у.т.
1	Уголь	т	2 423	0,768	3 155
2	Пеллеты	т	1 634	0,600	2 723
3	Газ	тыс. м ³	2 712	1,154	2 350
4	Щепа	м ³	351	0,266	1 320

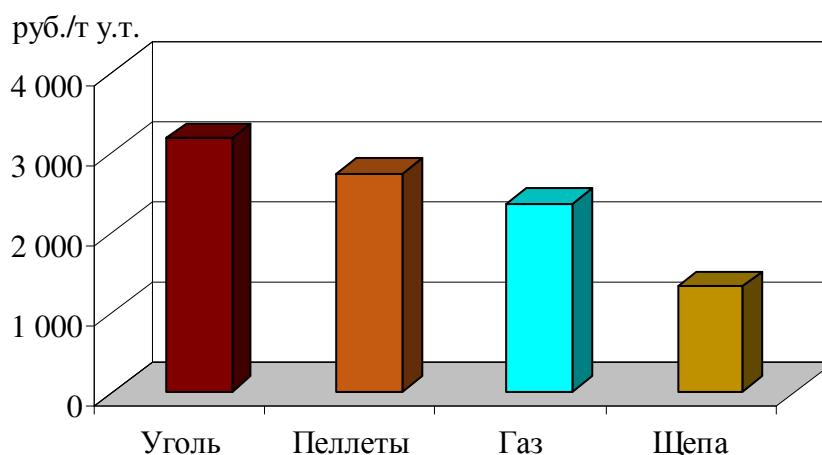


Рисунок 4.6 – Сравнение стоимости различных видов топлива

Сравнение стоимости различных видов топлива показывает, что наиболее дешевым видом топлива является щепа, стоимость которой ниже сложившихся цен на традиционные энергетические ресурсы. Стоимость производства пеллет из древесных отходов сопоставима со стоимостью привозного каменного угля.

Изменение себестоимости производства тепловой энергии на различных видах топлива рассчитывается с учетом темпов роста стоимости различных видов энергоносителей, а также оплаты труда и расходов на техническое обслуживание оборудования. Динамика изменения себестоимости тепловой энергии по годам представлена в [115], согласно которой самой дешевой в перспективе до 2020 года остается тепловая энергия, произведенная на щепе. Большая доля затрат на оплату труда на теплоисточниках с ручной загрузкой топлива (в случае использования угля) приводит к опережающему росту се-

бестоимости производимой тепловой энергии. Опережающий рост стоимости природного газа также приводит к тому, что использование топлива из древесных отходов становится более рентабельным, чем использование традиционных энергоресурсов.

Окупаемость мероприятий по переводу теплоисточников на топливо из древесных отходов.

Комплекс мероприятий по переводу объектов системы теплоснабжения региона на топливо из древесных отходов включает:

- создание пунктов накопления сырья;
- строительство пунктов переработки древесного сырья в щепу;
- строительство пеллетных заводов;
- реконструкцию теплоисточников, переводимых на щепу;
- реконструкцию теплоисточников, переводимых на пеллеты.

По результатам решения задачи оптимального размещения производства топлива из древесных отходов было определено расположение 23-х пунктов производства щепы и 4-х пеллетных заводов. Оценочная стоимость техники и оборудования, а также производственных и складских помещений в расчете на один пункт производства щепы и пеллетный завод зависит от производительности данных предприятий в соответствии со значениями, представленными в таблицах 4.7 и 4.8. На основании данных таблиц рассчитаны инвестиции, необходимые для строительства предприятий по производству щепы и пеллетных заводов в выбранных населенных пунктах (см. таблицу 4.9).

Таблица 4.7 – Стоимость основных средств пункта производства щепы, тыс. руб.

№ п/п	Основные средства	Объем производства топлива, т у.т./год		
		1 596	4 256	6 916
1	Грузовая техника	5 300,0	9 600,0	13 700,0
2	Технологическое оборудование	840,0	1 355,6	1 832,4
3	Производственные и складские помещения	1 800,0	4 800,0	7 800,0
Всего		7 940,0	15 755,6	23 332,4

Таблица 4.8 – Стоимость основных средств пеллетного завода, тыс. руб.

№ п/п	Основные средства	Объем производства топлива, т у.т./год		
		3 840	7 680	11 520
1	Грузовая техника	3 200,0	6 400,0	9 600,0
2	Технологическое оборудование	24 237,2	31 042,4	35 908,4
3	Производственные и складские помещения	1 680,0	3 360,0	5 040,0
Всего		29 117,2	40 802,4	50 548,4

Таблица 4.9 – Инвестиции на строительство пунктов подготовки щепы и пеллетных заводов

№ п/п	Расположение	Объем производства, т у.т./год	Инвестиции, тыс. руб.
<i>Пункты подготовки щепы</i>			
1	с. Сюмси	3 132	12 604
2	п. Игра	2 789	12 423
3	п. Кизнер	2 265	12 147
4	с. Понино	2 139	12 081
5	с. Нововолково	2 094	12 058
6	с. Укан	1 985	12 000
7	д. Камки	1 952	11 983
8	с. Парзи	1 889	11 950
9	с. Пудем	1 690	11 845
10	с. Селты	1 655	11 827
11	с. Зура	1 617	11 807
12	п. Кез	1 514	6 937
13	д. Нижние Кивары	1 514	6 937
14	с. Факел	1 405	6 879
15	д. Такагурт	1 394	6 874
16	д. Старые Копки	1 370	6 861
17	д. Степаненки	1 217	6 780
18	д. Мувыр	1 212	6 778
19	с. Шолья	1 206	6 775
20	с. Красное	1 092	6 715
21	с. Волипельга	1 013	6 673
22	с. Какмож	963	6 647
23	д. Ариково	923	6 626
Всего		38 030	214 207

№ п/п	Расположение	Объем производства, т у.т./год	Инвестиции, тыс. руб.
<i>Пеллетные заводы</i>			
24	п. Ува	6 678	40 364
25	г. Можга	3 731	29 070
26	п. Игра	2 777	28 652
27	с. Якшур-Бодья	2 503	28 532
Всего		15 689	126 618
Итого		53 719	340 825

Таким образом, суммарные инвестиции на строительство пунктов производства щепы и пеллетных заводов составляют 340,83 млн. руб.

В рамках реализации мероприятий «Реконструкция теплоисточников, переводимых на щепу» и «Реконструкция теплоисточников, переводимых на пеллеты» планируется перевести 474 теплоисточника. Затраты на реконструкцию определяются мощностью устанавливаемого на теплоисточнике оборудования (см. таблицу 4.10).

Таблица 4.10 – Затраты на реконструкцию теплоисточников при переводе на топливо из древесных отходов

Установленная мощность теплоисточника, кВт	Стоимость реконструкции, тыс. руб.	
	Щепа	Пеллеты
0-99	1 332	1 309
100-199	2 568	2 674
200-399	3 995	3 698
400-599	4 883	7 965
600-799	5 422	8 875
800-1000	6 817	9 672
1000-1200	9 777	11 948

В соответствии с найденным оптимальным решением необходимо перевести 306 теплоисточников на щепу, затраты на реконструкцию которых составляют 1 338,42 млн. руб., и 168 теплоисточников на пеллеты со стоимостью реконструкции, равной 729,60 млн. руб. Суммарные затраты на реконструкцию теплоисточников региона составляют 2 068,02 млн. руб.

Таким образом, общие затраты на организацию производства топлива из древесных отходов с учетом реконструкции теплоисточников составляют 2 408,85 млн. руб.

Последовательность реализации мероприятий определяется из таких характеристик, как момент начала и период реализации, объем финансирования по годам и ряда других экономических характеристик, которые могут меняться в зависимости от финансовых условий. В таблице 4.11 представлен перечень мероприятий по строительству пунктов подготовки щепы (ПЩ) и пеллетных заводов (ПЗ) с указанием объемов финансовых ресурсов при выборе 2014 года в качестве базового и периоде инвестирования 5 лет.

Таблица 4.11 – План реализации мероприятий

№ п/п	Расположение ПЩ и ПЗ	Мероприятие	Затраты на мероприятие, тыс. руб.	Год	Суммарные инвестиции, тыс. руб.
1	с. Сюмси	Строительство ПЩ	12 604	2014	451 210
		Реконструкция теплоисточников	107 684		
2	п. Кизнер	Строительство ПЩ	12 147		
		Реконструкция теплоисточников	100 806		
3	д. Старые Копки	Строительство ПЩ	6 861		
		Реконструкция теплоисточников	48 660		
4	с. Понино	Строительство ПЩ	12 081		
		Реконструкция теплоисточников	68 871		
5	с. Парзи	Строительство ПЩ	11 950		
		Реконструкция теплоисточников	69 546		
6	с. Нововолково	Строительство ПЩ	12 058	2015	478 702
		Реконструкция теплоисточников	66 589		
7	с. Укан	Строительство ПЩ	12 000		
		Реконструкция теплоисточников	68 965		
8	с. Пудем	Строительство ПЩ	11 845		
		Реконструкция теплоисточников	66 206		
9	п. Игра	Строительство ПЩ	12 423		
		Реконструкция теплоисточников	62 622		
10	с. Зура	Строительство ПЩ	11 807		
		Реконструкция теплоисточников	56 284		
11	с. Факел	Строительство ПЩ	6 879		
		Реконструкция теплоисточников	41 272		
12	с. Красное	Строительство ПЩ	6 715		
		Реконструкция теплоисточников	43 037		

Продолжение таблицы 4.11

№ п/п	Располо- жение ПЩ и ПЗ	Мероприятие	Затраты на меро- приятие, тыс. руб.	Год	Суммарные инвестиции, тыс. руб.
13	д. Камки	Строительство ПЩ	11 983	2016	490 429
		Реконструкция теплоисточников	74 293		
14	с. Селты	Строительство ПЩ	11 827		
		Реконструкция теплоисточников	63 191		
15	п. Кез	Строительство ПЩ	6 937		
		Реконструкция теплоисточников	58 247		
16	д. Степа- ненки	Строительство ПЩ	6 780		
		Реконструкция теплоисточников	47 857		
17	д. Нижние Кивары	Строительство ПЩ	6 937		
		Реконструкция теплоисточников	47 490		
18	д. Мувыр	Строительство ПЩ	6 778		
		Реконструкция теплоисточников	38 451		
19	с. Красное	Строительство ПЩ	6 715		
		Реконструкция теплоисточников	43 037		
20	д. Така- гурт	Строительство ПЩ	6 874		
		Реконструкция теплоисточников	60 815		
21	д. Ариково	Строительство ПЩ	6 626		
		Реконструкция теплоисточников	35 343		
22	с. Воли- пельга	Строительство ПЩ	6 673	2017	473 647
		Реконструкция теплоисточников	41 093		
23	с. Какмож	Строительство ПЩ	6 647		
		Реконструкция теплоисточников	37 953		
24	г. Можга	Строительство ПЗ	29 070		
		Реконструкция теплоисточников	157 811		
25	с. Якшур- Бодья	Строительство ПЗ	28 532		
		Реконструкция теплоисточников	125 944		
26	с. Шолья	Строительство ПЩ	6 775		
		Реконструкция теплоисточников	33 149		
27	п. Игра	Строительство ПЗ	28 652	2018	514 860
		Реконструкция теплоисточников	115 560		
28	п. Ува	Строительство ПЗ	40 364		
		Реконструкция теплоисточников	330 284		
Итого					2 408 848

В таблице 4.12 приведен объем финансирования по годам на реализацию мероприятий при различных периодах инвестирования (3, 5 и 7 лет) с учетом 9%-го уровня инфляции.

Таблица 4.12 – Распределение инвестиций по годам реализации мероприятий

Год	Затраты на реализацию мероприятий при различных периодах инвестирования с учетом инфляции (9%), тыс. руб.		
	3 года	5 лет	7 лет
2014	775 149	451 210	330 922
2015	847 455	521 785	390 167
2016	1 017 271	582 679	388 883
2017		613 387	394 332
2018		726 767	534 853
2019			520 997
2020			621 614

Окупаемость мероприятий определяется исходя из расчета экономического эффекта от их реализации.

Экономический эффект, получаемый в результате использования экономически более выгодных видов топлива, рассчитывается по формуле

$$E_t = \sum_{k=1}^{K_t} (t_{tk} - c_{tk}) D_{tk}, \quad (4.1)$$

где

E_t – экономический эффект в t -м году, отражающий экономию денежных средств по всем теплоисточникам, переводимым на топливо из древесных отходов, руб.;

t_{tk} – тариф на тепловую энергию в t -м году на k -м теплоисточнике, руб./Гкал;

c_{tk} – себестоимость тепловой энергии в t -м году на k -м теплоисточнике при его переводе на топливо из древесных отходов, руб./Гкал;

D_{tk} – объем производства тепловой энергии в t -м году на k -м теплоисточнике, Гкал;

K_t – количество теплоисточников, переведенных на топливо из древесных отходов к t -му году, единиц.

В таблице 4.13 представлен экономический эффект в текущих ценах при различных периодах инвестирования.

Таблица 4.13 – Экономический эффект от реализации мероприятий

Год	Экономический эффект от реализации мероприятий при различных периодах инвестирования, тыс. руб.		
	3 года	5 лет	7 лет
2015	114 115	65 042	51 772
2016	254 640	150 245	115 131
2017	402 345	259 124	184 454
2018	445 779	371 469	267 254
2019	489 213	489 213	377 590
2020	532 647	532 647	474 823
2021	576 081	576 081	576 081
2022	619 516	619 516	619 516
2023	662 950	662 950	662 950
2024	706 384	706 384	706 384
2025	749 818	749 818	749 818

Окупаемость мероприятий рассчитывается как разность накопленного экономического эффекта и капитальных вложений к текущему году.

В таблице 4.14 показана окупаемость мероприятий по годам в ценах текущих лет при различных периодах инвестирования.

Таблица 4.14 – Окупаемость мероприятий

Год	Окупаемость мероприятий при различных периодах инвестирования, тыс. руб.		
	3 года	5 лет	7 лет
2014	-775 149	-451 210	-330 922
2015	-1 508 489	-907 953	-669 317
2016	-2 271 120	-1 340 387	-943 069
2017	-1 868 775	-1 694 650	-1 152 947
2018	-1 422 996	-2 049 948	-1 420 546
2019	-933 783	-1 560 735	-1 563 953
2020	-401 136	-1 028 088	-1 710 744
2021	174 945	-452 007	-1 134 663
2022	794 461	167 509	-515 147
2023	1 457 411	830 459	147 803
2024	2 163 795	1 536 843	854 187
2025	2 913 613	2 286 661	1 604 005

На рисунке 4.7 представлен график окупаемости, или накопленного дохода

$$d_t = \sum_{t^*=t_0}^t (E_{t^*} - I_{t^*}), \quad (4.2)$$

где

d_t – доход в ценах текущего года t , руб.;

t_0 – год начала реализации мероприятий;

I_{t^*} – объем инвестиций в t^* -м году, руб.

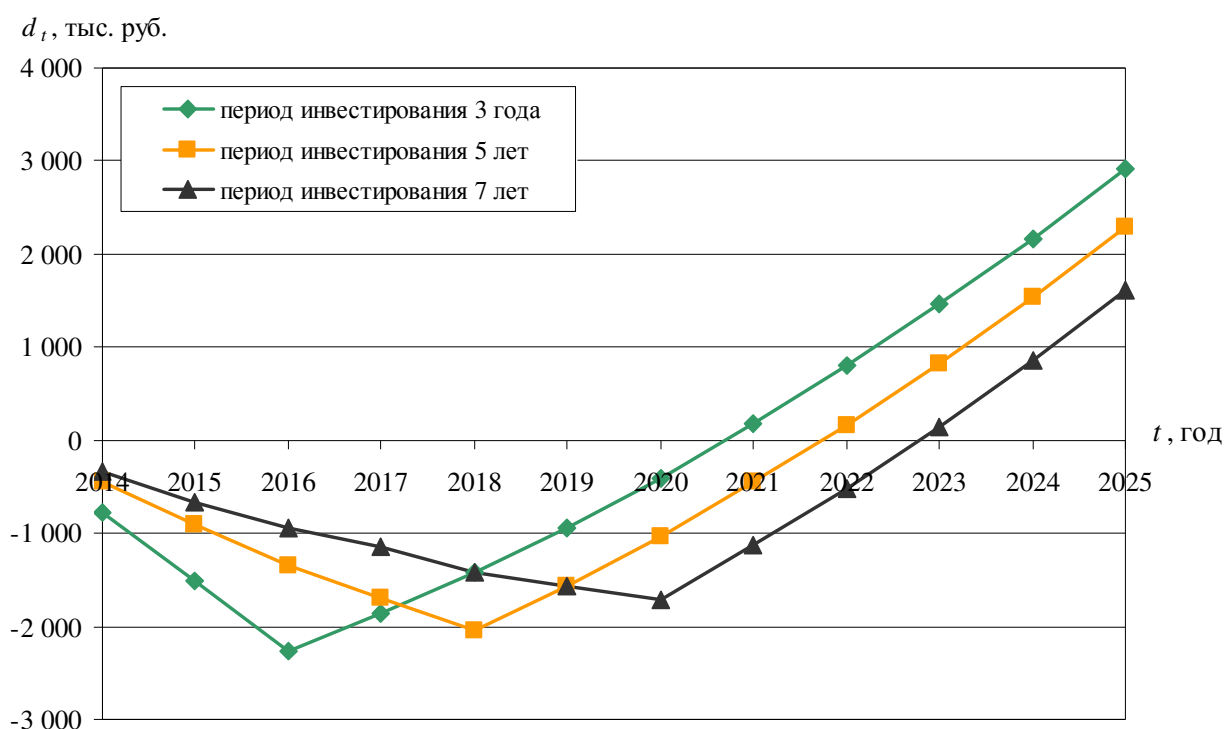


Рисунок 4.7 – Прогноз окупаемости мероприятий при различных периодах инвестирования

Таким образом, при 3-летнем периоде инвестирования срок окупаемости составит 8 лет с момента начала реализации мероприятий, при 5-летнем – 9 лет, при 7-летнем – 10 лет. Чем меньше период, в течение которого реализуется весь комплекс мероприятий, тем быстрее они окупаются.

После прохождения точки безубыточности появляется возможность уменьшения тарифов на тепловую энергию, что увеличивает социальную значимость проводимых мероприятий по организации производства топлива из древесных отходов.

4.1.5 Аналитический расчет оптимальных параметров размещения производства топлива из древесных отходов

Полагаем, что пеллеты производятся вблизи деревоперерабатывающих предприятий, поэтому транспортными затратами на поставку для них сырья будем пренебрегать. Зависимости себестоимости щепы ($c_T^{\text{щ}}$, руб./м³) и пеллет ($c_T^{\text{п}}$, руб./т) от затрат на транспортировку и объема производства на предприятии имеют вид [114]:

$$c_T^{\text{щ}} = a^{\text{щ}} + \frac{b^{\text{щ}}}{V^{\text{щ}}} + \alpha^{\text{щ}} h_c^{\text{щ}} L_c^{\text{щ}} + h_T^{\text{щ}} L_T^{\text{щ}} = 154,1 + \frac{361\,941,1}{V^{\text{щ}}} + 5,1 L_c^{\text{щ}} + 3,1 L_T^{\text{щ}}, \quad (4.3)$$

$$c_T^{\text{п}} = a^{\text{п}} + \frac{b^{\text{п}}}{V^{\text{п}}} + \alpha^{\text{п}} h_c^{\text{п}} L_c^{\text{п}} + h_T^{\text{п}} L_T^{\text{п}} = 1\,447,9 + \frac{764\,087,7}{V^{\text{п}}} + 2,1 L_T^{\text{п}}. \quad (4.4)$$

Годовые объемы производства щепы $V^{\text{щ}}$ и пеллет $V^{\text{п}}$ в правых частях выражений (4.3) и (4.4) определены в натуральных единицах измерения, в м³ и т соответственно. Учитывая, что теплотворная способность щепы равна 0,266 т у.т./м³, пеллет – 0,600 т у.т./т, значения коэффициентов производственных и транспортных затрат для щепы составят $a^{\text{щ}} = 579,3$ руб./т у.т., $b^{\text{щ}} = 361\,941,1$ руб./год, $h_c^{\text{щ}} = 5,1$ руб./м³/км, $h_T^{\text{щ}} = 11,7$ руб./т у.т./км; для пеллет – $a^{\text{п}} = 2\,413,2$ руб./т у.т., $b^{\text{п}} = 764\,087,7$ руб./год, $h_T^{\text{п}} = 3,5$ руб./т у.т./км.

Суммарный отпуск тепловой энергии на рассматриваемых теплоисточниках составляет $D = 310,00$ тыс. Гкал/год, площадь территории республики равна $S_T = 42,06$ тыс. км². Запасы сырья для производства щепы в республике составляют $W^{\text{щ}} = 382,29$ тыс. м³/год, запасы сырья для пеллет – $W^{\text{п}} = 235,23$ тыс. м³/год. Удельный объем производства тепловой энергии составляет $\rho_T = 7,37$ Гкал/год/км², удельные запасы сырья для щепы равны $\rho_c^{\text{щ}} = 9,09$ м³/год/км². Коэффициенты затрат на переработку топлива в тепло-

вую энергию составляют: для щепы $\tilde{a}^{\text{щ}} = 294,3$ руб./Гкал, $\tilde{b}^{\text{щ}} = 286\,775,4$ руб./год; для пеллет $\tilde{a}^{\text{п}} = 289,4$ руб./Гкал, $\tilde{b}^{\text{п}} = 299\,582,8$ руб./год. Количество теплоисточников равно 474 со средним объемом производства тепловой энергии $u = 654$ Гкал/год. Для дальнейших расчетов примем также $\gamma = 1,43$, $\beta = 0,383$.

После подстановки всех перечисленных параметров в формулу (3.24) выражение для себестоимости производства топлива и тепловой энергии принимает вид

$$C = \left(834,9 + \frac{14\,730,4}{(L_{\text{T}}^{\text{щ}})^2} + 4,5L_{\text{T}}^{\text{щ}} \right) D^{\text{щ}} + \left(1\,149,1 + \frac{31\,097,1}{(L_{\text{T}}^{\text{п}})^2} + 0,6L_{\text{T}}^{\text{п}} \right) D^{\text{п}} \rightarrow \min. \quad (4.5)$$

На рисунке 4.8 представлены графики зависимости совокупных затрат на производство тепловой энергии от расстояний транспортировки щепы и пеллет для случаев, когда весь объем тепловой энергии производится соответственно либо на щепе, либо на пеллетах.

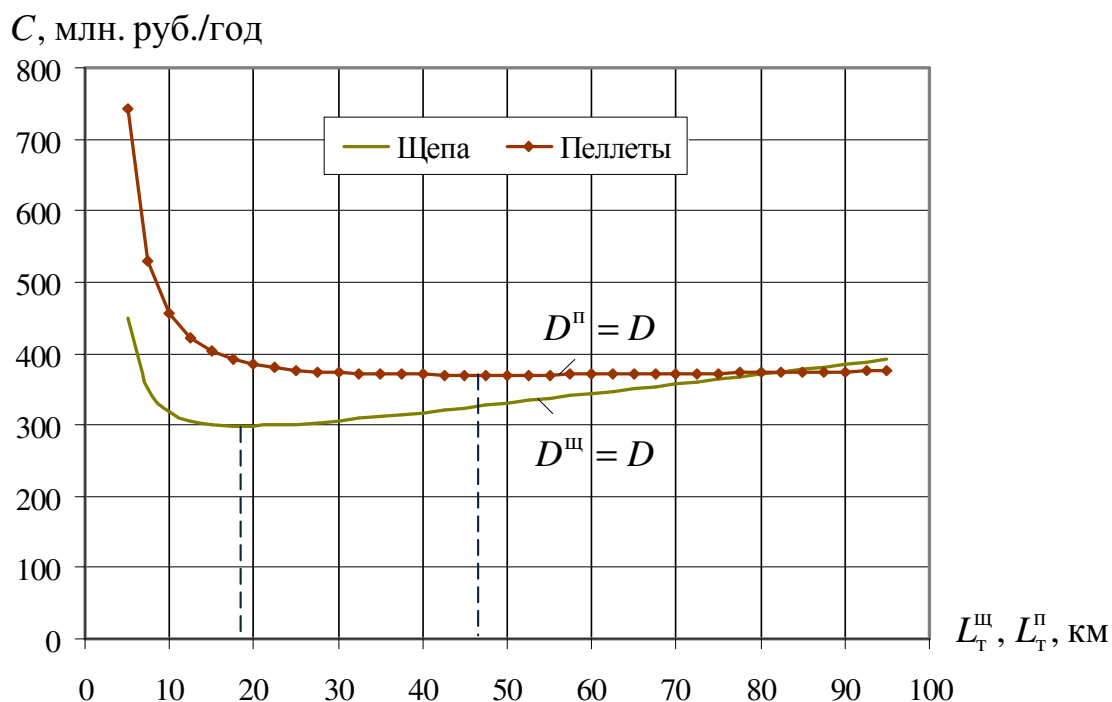


Рисунок 4.8 – Зависимость себестоимости производства тепловой энергии от расстояний транспортировки щепы и пеллет

Аналогичную зависимость можно получить при переходе от расстояний транспортировки топлива к объему его производства на предприятии. Из формулы (3.20) получаем соотношение

$$L_T^m = \frac{\gamma\beta}{\sqrt{\tau^m \rho_T}} \sqrt{V^m}, \quad m = \overline{1, M},$$

подстановка которого в выражение (4.5) для случая производства щепы и пеллет приводит к зависимости

$$C = \left(834,9 + \frac{63\,765,3}{V^{\text{щ}}} + 2,2\sqrt{V^{\text{щ}}} \right) D^{\text{щ}} + \left(1149,1 + \frac{127\,183,9}{V^{\text{п}}} + 0,3\sqrt{V^{\text{п}}} \right) D^{\text{п}} \rightarrow \min.$$

Графики данной зависимости при переводе всех теплоисточников на щепу или пеллеты представлены на рисунке 4.9.

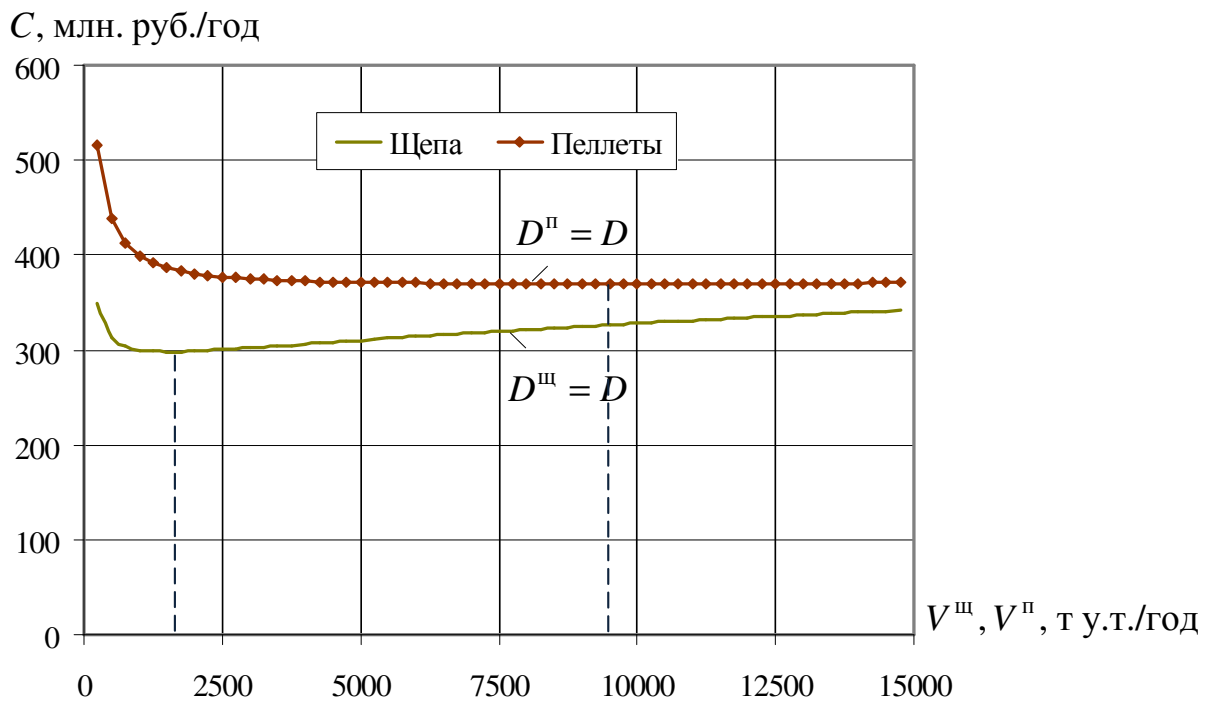


Рисунок 4.9 – Зависимость себестоимости тепловой энергии от объемов производства щепы и пеллет на предприятии

В случае перевода всех теплоисточников на щепу оптимальное расстояние транспортировки щепы, рассчитанное по формуле (3.27), составит $\bar{L}_T^{\text{щ}} = 18,7$ км, себестоимость производства тепловой энергии –

$\bar{C} = 297,96$ млн. руб./год, необходимое количество предприятий – $\bar{N}^{\text{ш}} = 36,1$, объем производства топлива на предприятии – $\bar{V}^{\text{ш}} = 1\,515$ т у.т./год. В случае использования в качестве топлива только пеллет оптимальное расстояние их транспортировки составит $\bar{L}_T^{\text{п}} = 47,0$ км, себестоимость производства тепловой энергии – $\bar{C} = 369,33$ млн. руб./год, необходимое количество предприятий – $\bar{N}^{\text{п}} = 5,7$, объем производства топлива на предприятии – $\bar{V}^{\text{п}} = 9\,552$ т у.т./год. Округлив количества предприятий по подготовке щепы и пеллет до целых значений, получим следующие скорректированные характеристики: для щепы $\tilde{N}^{\text{ш}} = 36$, $\tilde{L}_T^{\text{ш}} = 18,7$ км, $\tilde{V}^{\text{ш}} = 1\,517$ т у.т./год и себестоимость производства тепловой энергии $\tilde{C} = 297,96$ млн. руб./год; для пеллет $\tilde{N}^{\text{п}} = 6$, $\tilde{L}_T^{\text{п}} = 45,9$ км, $\tilde{V}^{\text{п}} = 9\,102$ т у.т./год и $\tilde{C} = 369,33$ млн. руб./год.

Подставив найденные расстояния $\tilde{L}_T^{\text{ш}}$ и $\tilde{L}_T^{\text{п}}$ в формулу (4.5), получим

$$C = 961,2D^{\text{ш}} + 1\,191,4D^{\text{п}}. \quad (4.6)$$

Суммарный объем производства тепловой энергии на щепе и пеллетах задается выражением

$$D^{\text{ш}} + D^{\text{п}} = D = 310\,000 \text{ Гкал/год}. \quad (4.7)$$

Ограничения на объемы производства тепловой энергии, определяемые сырьевой базой, имеют вид

$$0,662D^{\text{ш}} \leq 382\,290 \text{ м}^3/\text{год}, \quad (4.8)$$

$$0,782D^{\text{п}} \leq 235\,230 \text{ м}^3/\text{год}. \quad (4.9)$$

Введем следующую характеристику, определяющую отношение объема производства тепловой энергии на пеллетах к ее суммарному объему на всех видах топлива:

$$\omega^{\text{п}} = \frac{D^{\text{п}}}{D}.$$

Запасов сырья для производства щепы достаточно для производства тепловой энергии в объеме 577,27 тыс. Гкал/год. Запасы сырья для пеллет могут обеспечить производство тепловой энергии в объеме 300,68 тыс. Гкал/год. Для корректного решения задачи необходимо, чтобы запасы сырья были не меньше потребностей в топливе для рассматриваемого региона. Таким образом, максимальное значение отношения объема производства тепловой энергии на пеллетах к ее общему объему ограничено значением $\omega_{\max}^{\text{п}} = 0,97$. В таблице 4.15 приведены номинальные и скорректированные (под целые значения количества предприятий) оптимальные параметры размещения производства древесных видов топлива при различных значениях $\omega^{\text{п}}$.

Таблица 4.15 – Оптимальные параметры размещения производства m -го вида топлива из древесных отходов ($m = \{\text{щ, п}\}$)

Параметр $\omega^{\text{п}}$	Вид топлива	Оптимальные значения				Скорректированные значения			
		$\bar{L}_t^m$, км	$\bar{N}^m$	$\bar{V}^m$, т у.т./ год	$\bar{C}$, млн. руб./ год	$\tilde{L}_t^m$, км	$\tilde{N}^m$	$\tilde{V}^m$, т у.т./ год	$\tilde{C}$, млн. руб./ год
0	Щепа	18,7	36,1	1 515	297,96	18,7	36	1 517	297,96
	Пеллеты	–	–	–		–	–	–	
1/2	Щепа	18,7	18,0	1 515	333,64	18,7	18	1 517	333,65
	Пеллеты	47,0	2,9	9 552		45,9	3	8 637	
$\omega_{\max}^{\text{п}}$	Щепа	18,7	1,1	1 515	367,19	19,5	1	1 638	367,21
	Пеллеты	47,0	5,5	9 552		45,2	6	8 378	

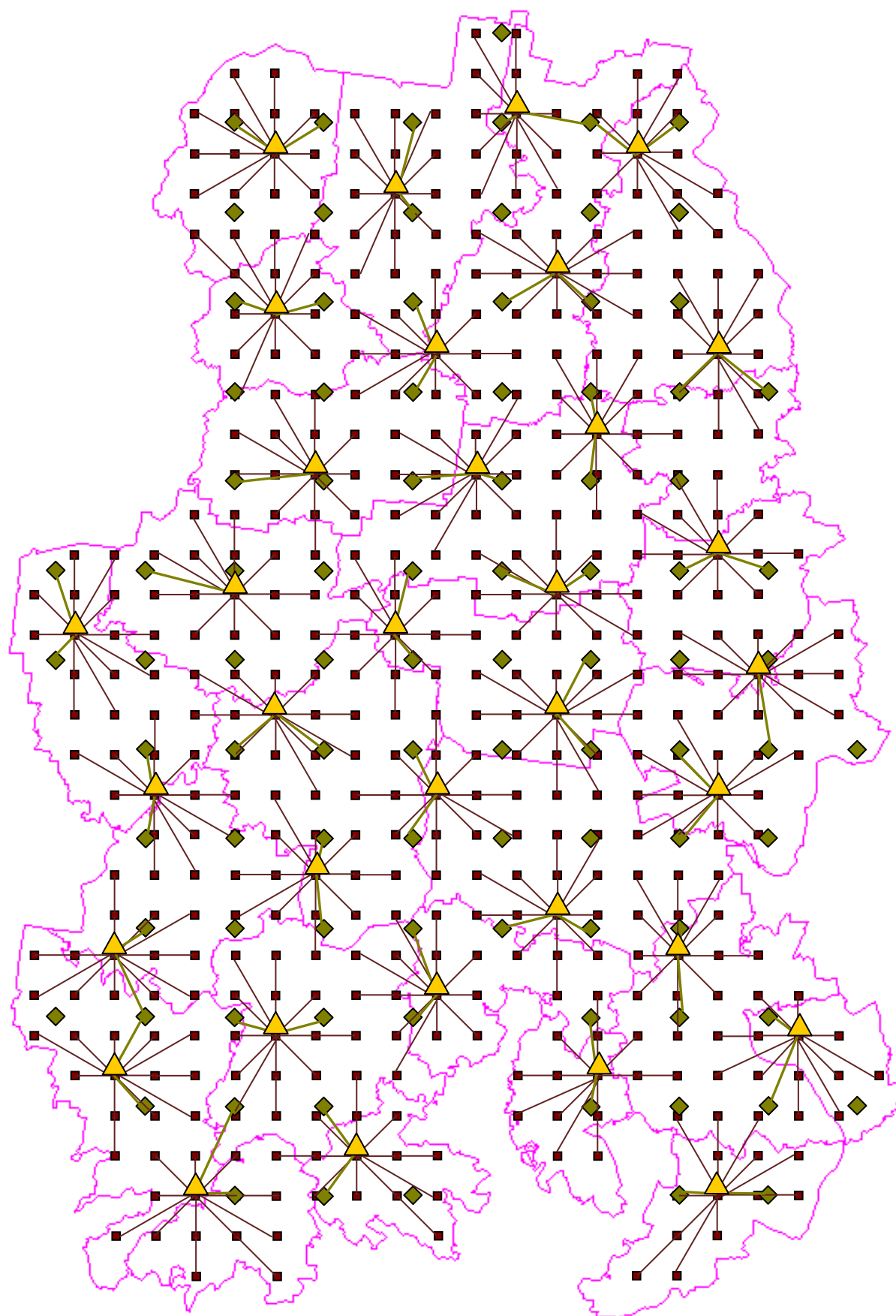
Для полученного аналитического решения, дающего оценку совокупных затрат распределенной производственной структуры, проведено сравнение результатов с численным решением задачи. При этом рассматривается случай производства одного вида топлива (щепы). Численное решение осуществляется по данным фактического местонахождения пунктов накопления сырья и теплоисточников на территории Удмуртской Республики, а также при допущении о равномерном распределении потенциала сырья и потребно-

сти в продукции. При равномерном распределении теплоисточники имеют одинаковую потребность в топливе, их количество равно фактическому значению, и расположены они в узлах равномерной сетки (см. рисунок 4.10). Аналогично распределены пункты накопления сырья. Потенциальными пунктами подготовки выбраны места расположения теплоисточников.

Отличие по совокупным затратам на производство тепловой энергии, рассчитанным по данным фактического местонахождения пунктов накопления сырья и теплоисточников на территории Удмуртской Республики (см. таблицу 4.16, вариант 1 численного решения) и с помощью аналитического решения при допущении о равномерном распределении запасов сырья и потребностей в топливе, составляет 14%, что вполне приемлемо для получения оценочных значений. В случае численного решения при допущении о равномерном распределении (вариант 2 численного решения) отличие совокупных затрат составляет 6% по сравнению с аналитическим решением.

Таблица 4.16 – Оптимальные параметры размещения пунктов подготовки щепы

Параметр	Численное решение		Аналитическое решение
	1	2	
Среднее расстояние транспортировки сырья, км	18,9	15,8	13,7
Среднее расстояние транспортировки топлива, км	24,0	20,9	18,7
Средний объем производства на предприятии, т у.т./год	1 761	1 605	1 517
Количество пунктов производства топлива	31	34	36
Совокупные затраты, млн. руб./год	340,25	315,84	297,96
Средняя себестоимость тепловой энергии, руб./Гкал	1 098	1 019	961



◆ Пункт накопления сырья ▲ Пункт подготовки щепы ■ Теплоисточник

Рисунок 4.10 – Оптимальная схема размещения пунктов подготовки щепы при допущении о равномерном распределении пунктов накопления сырья и теплоисточников

4.2 Задача о размещении производства биогаза

4.2.1 Энергетический потенциал отходов животноводства

В Удмуртской Республике насчитывается около 350 животноводческих предприятий: птицефабрик, свинокомплексов и ферм КРС – с суммарным потенциалом отходов, достаточным для производства 317,69 млн. м³ биогаза в год. Потенциальными пунктами его потребления выбраны теплоисточники на природном газе, суммарная потребность которых в топливе в пересчете на биогаз равна 266,37 млн. м³/год. В таблице 4.17 приведены данные по потенциалу производства биогаза из отходов животноводства, а также объемы выработки тепловой энергии на теплоисточниках по районам УР.

Таблица 4.17 – Годовые значения потенциала производства биогаза и потребности в нем теплоисточников

№ п/п	Район	Количество отходов, тыс. т			Потенциал биогаза		Выра- ботка тепло- вой энергии
		Птице- фабрики	Свино- комп- лексы	Фермы КРС	млн. м ³	тыс. Гкал	тыс. Гкал
1	Алнашский	0	0,28	345,35	14,87	65,11	32,20
2	Балезинский	0	0,00	516,17	22,20	97,18	23,39
3	Вавожский	0	9,88	403,95	18,10	79,25	29,52
4	Воткинский	21,07	0,44	238,61	13,07	57,24	92,01
5	Глазовский	101,29	0,00	331,54	27,63	120,96	12,84
6	Граховский	0	0,00	102,12	4,39	19,23	21,09
7	Дебесский	0	5,82	236,14	10,58	46,34	6,71
8	Завьяловский	121,27	197,81	265,15	42,05	184,09	181,73
9	Игринский	0	3,35	198,12	8,77	38,38	121,92
10	Камбарский	0	0,00	30,73	1,32	5,79	74,38
11	Каракулинский	0	0,00	142,13	6,11	26,76	28,18
12	Кезский	0	0,54	313,59	13,52	59,21	24,35
13	Кизнерский	0	0,11	112,78	4,86	21,27	37,00
14	Киясовский	0	57,68	166,60	11,43	50,05	20,32
15	Красногорский	0	0,00	103,81	4,46	19,54	4,22
16	Малопургинский	0	17,13	326,72	15,32	67,06	39,30

№ п/п	Район	Количество отходов, тыс. т			Потенциал биогаза		Выра- ботка тепло- вой энергии
		Птице- фабрики	Свино- комп- лексы	Фермы КРС	млн. м ³	тыс. Гкал	тыс. Гкал
17	Можгинский	0	22,92	367,05	17,48	76,53	25,30
18	Сарапульский	6,37	73,10	284,02	18,46	80,84	97,38
19	Селтинский	0	0,00	163,89	7,05	30,85	18,40
20	Сюмсинский	0	0,00	53,60	2,30	10,09	19,74
21	Увинский	9,88	49,10	401,52	22,20	97,21	145,30
22	Шарканский	0	20,22	289,22	13,93	61,00	28,75
23	Юкаменский	0	1,61	186,64	8,14	35,66	17,64
24	Як-Бодьинский	0	0,00	103,00	4,43	19,39	30,86
25	Ярский	0	0,00	116,76	5,02	21,98	33,74
Итого по УР		259,88	460,00	5 799,21	317,69	1391,01	1166,27

Диаграмма распределения потенциала выработки тепловой энергии на биогазе из отходов животноводства и требуемого объема выработки тепловой энергии представлена на рисунке 4.11.



Рисунок 4.11 – Сравнение энергетического потенциала отходов животноводства и требуемой выработки тепловой энергии по районам Удмуртской Республики

Коэффициент, определяющий количество сырья, необходимого для производства биогаза, в случае использования отходов птицефабрик составляет $\alpha^1 = 7,576$ тыс. т/млн. м³, свинокомплексов – $\alpha^2 = 13,514$ тыс. т/млн. м³, ферм КРС – $\alpha^3 = 23,256$ тыс. т /млн. м³. Коэффициент соотношения выработанной тепловой энергии к ее полезному отпуску для биогаза равен $\eta^{6r} = 1,142$. Калорийный эквивалент $\tau = 0,200$ тыс. м³/Гкал.

4.2.2 Оптимальная схема размещения биогазовых комплексов

В УР более 50% отходов обеспечиваются 60 предприятиями, которые рассматриваются в качестве потенциальных пунктов расположения биогазовых комплексов. Потенциальными пунктами потребления биогаза выбраны 383 теплоисточника.

В результате решения оптимизационной задачи определен максимальный объем производства биогаза, при котором суммарная себестоимость тепловой энергии на биогазе, включая затраты на его производство, не превысит себестоимости тепловой энергии на природном газе, включая затраты на его покупку. Значение данного объема составляет 70 млн. м³ биогаза в год, что обеспечивается 16 биогазовыми комплексами, расположенными вблизи наиболее крупных животноводческих предприятий, снабжающих топливом 62 теплоисточника (см. рисунок 4.12).

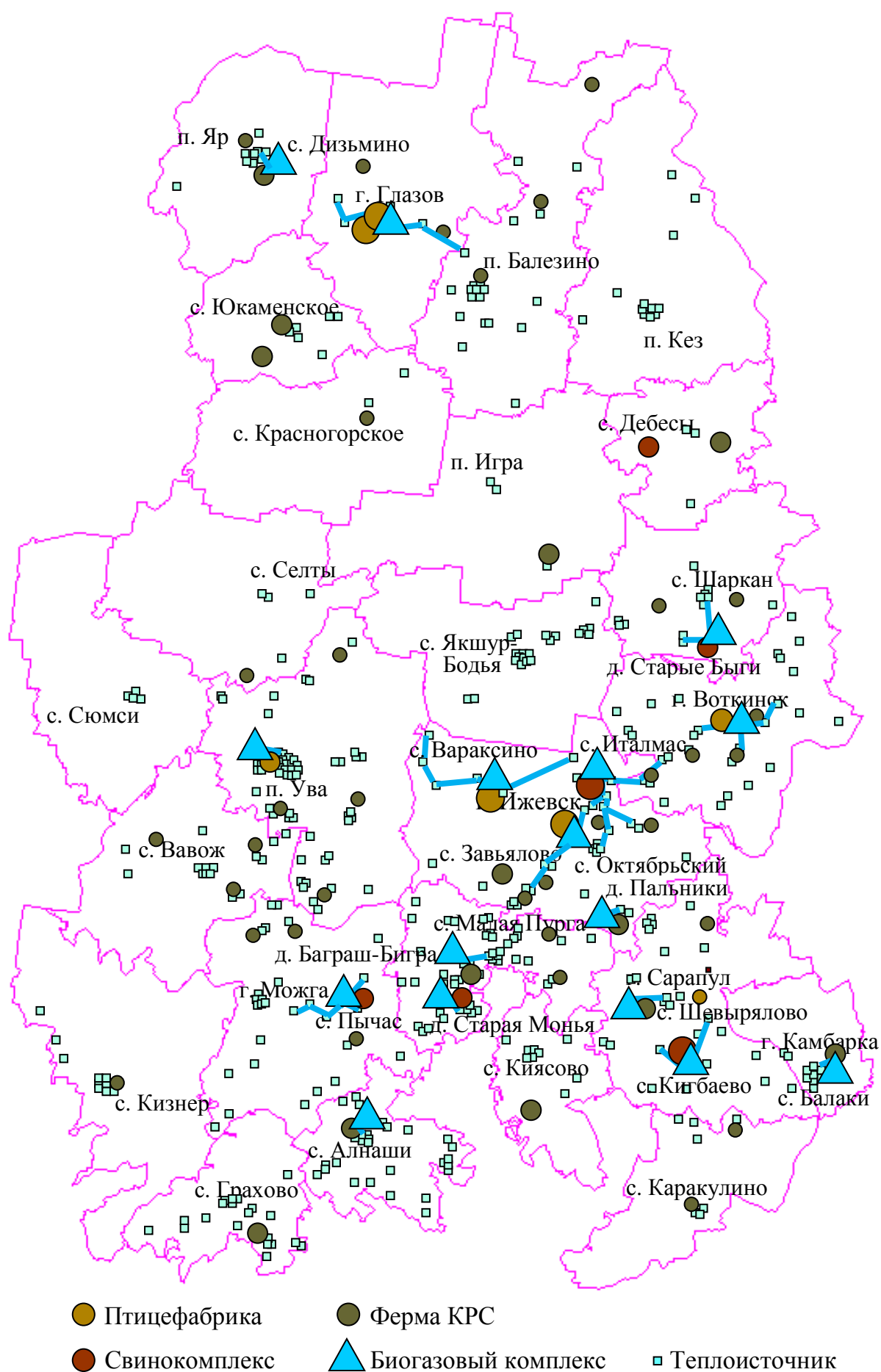


Рисунок 4.12 – Оптимальная схема размещения биогазовых комплексов

На рисунке 4.13 показано сравнение зависимостей себестоимости тепловой энергии (C), вырабатываемой на биогазе и на природном газе, от суммарного объема его замещения биогазом ($V^{бг}$). Увеличение объема производства биогаза достигается за счет менее крупных предприятий животноводства, что приводит к опережающему росту себестоимости биогаза по сравнению с фиксированной стоимостью природного газа, что также отражается на себестоимости тепловой энергии. Представленные результаты показывают, что при $V^{бг} > 70$ млн. м³/год использование биогаза для замещения им природного газа в условиях Удмуртской Республики экономически невыгодно.

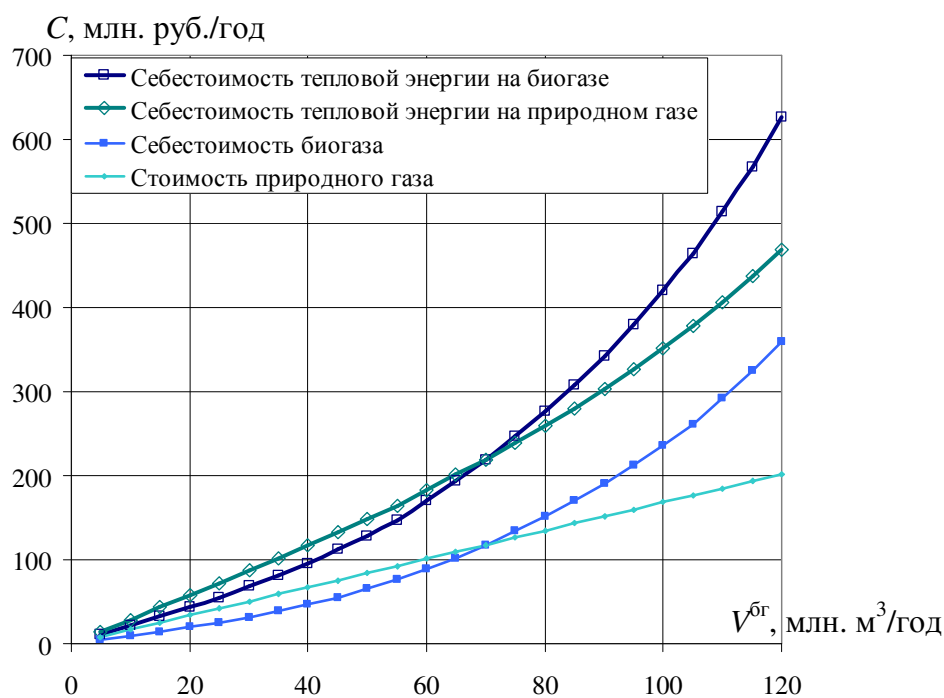


Рисунок 4.13 – Зависимость себестоимости производства тепловой энергии на биогазе и природном газе от суммарного объема производства биогаза

Объемы производства биогаза биогазовыми комплексами, суммарный объем производства которых составляет 70 млн. м³/год, приведены в таблице 4.18. Как показали расчеты, совокупные затраты на производство тепловой энергии, включая затраты на топливо, в данном случае составляют 215 млн. руб./год. Средняя себестоимость производства тепловой энергии на биогазе по выбранным теплоисточникам составила 701 руб./Гкал.

Таблица 4.18 – Биогазовые комплексы на территории УР

№ п/п	Расположение биогазового комплекса	Объем производства биогаза, млн. м ³ /год	Количество снабжаемых теплоисточников
1	с. Италмас	21,53	12
2	с. Вараксино	11,20	6
3	г. Глазов	8,21	5
4	с. Октябрьский	5,77	4
5	с. Кигбаево	5,07	3
6	г. Воткинск	2,66	5
7	с. Пычас	2,65	5
8	с. Дизьмино	2,29	3
9	с. Алнаши	2,08	2
10	п. Ува	1,82	3
11	с. Балаки	1,67	2
12	д. Баграш-Бигра	1,38	2
13	д. Пальники	1,17	1
14	с. Шевырялово	0,97	3
15	д. Старые Быги	0,85	3
16	д. Старая Монья	0,73	3
Всего		70,05	62

4.2.3 Экономическая эффективность комплексного использования продуктов производства биогаза

При производстве биогаза образуются экологически чистые органические удобрения. Путем сепарации образующегося биошлама получается около 8% твердых биоудобрений и 90% жидких от массы исходного сырья. Твердые биоудобрения могут быть реализованы населению. Жидкие биоудобрения могут быть непосредственно внесены в почву. Кроме того, отходы предприятий животноводства, согласно классификации Министерства природных ресурсов и экологии РФ, представляют собой вещества III класса опасности, утилизация которых при производстве биогаза позволяет исключить экологические штрафы.

На рисунке 4.14 приведены зависимости годового значения экономического эффекта (E), получаемого от замещения природного газа биогазом на

теплоисточниках, от объема его производства. Его значение определяется разницей между совокупными затратами на производство тепловой энергии на природном газе и на биогазе. С учетом дохода от продажи твердых биоудобрений стоимостью 500 руб./т и исключения экологических штрафов, равных 100 руб. за тонну сухого вещества, экономически выгодный объем производства биогаза на территории УР возрастает с 70 до 100 млн. м³/год, а максимальный экономический эффект – с 20 до 55 млн. руб./год.

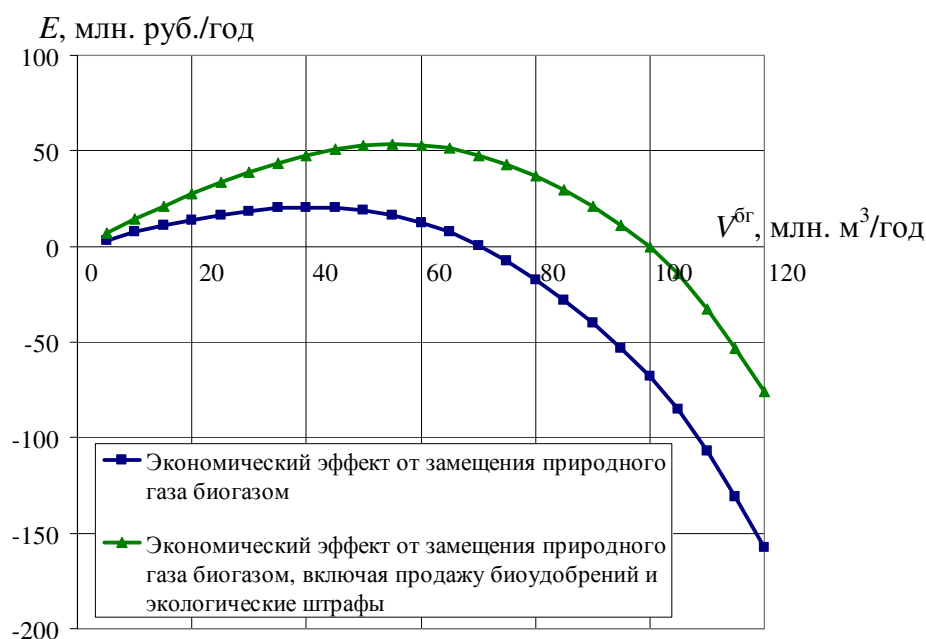


Рисунок 4.14 – Зависимость годового экономического эффекта от замещения природного газа биогазом от суммарного объема его производства

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана нелинейная математическая модель оптимального размещения элементов распределенной производственной структуры, включающей пункты накопления сырья, пункты производства и пункты потребления продукции. В модели учитываются различные виды ограничений, влияющих на размещение производства и поставку продукции на территории региона.
2. Разработан метод решения нелинейной задачи оптимального размещения элементов распределенной производственной структуры, основанный на использовании генетического алгоритма с вещественным кодированием. Алгоритм метода основан на сокращении размерности вектора решений, что дает существенный прирост на несколько порядков производительности поиска оптимального решения без существенной потери точности. Распараллеливание работы алгоритма на многопроцессорных системах позволяет дополнительно повысить его производительность в зависимости от количества параллельно работающих процессов. В частности, на системе, обеспечивающей параллельную обработку до 8-ми вычислительных процессов, скорость получения оптимального решения задачи возрастает более чем в 3 раза.
3. Разработан программно-вычислительный комплекс, определяющий оптимальное размещение элементов распределенной производственной структуры на примере решения задачи организации производства различных видов топлива из древесных отходов, а также биогаза из отходов животноводства на территории региона. Расчетный блок ПВК основан на применении параллельных вычислений и позволяет решать задачу размещения при различных ограничениях, накладываемых на исходные данные.

4. Определено, что при оптимальном решении задачи обеспечения топливом из древесных отходов всех рассматриваемых теплоисточников Удмуртской Республики необходимо создать 23 пункта подготовки щепы и 4 пеллетных завода. При этом объем производства щепы на всех предприятиях должен составить 38 028 т у.т./год, объем производства пеллет на всех пеллетных заводах – 15 689 т у.т./год. Среднее расстояние транспортировки щепы до теплоисточников равно 15 км, среднее расстояние транспортировки пеллет – 72 км.
5. Получено аналитическое решение задачи оптимального размещения элементов производственной структуры на заданной территории при допущении о равномерном распределении запасов сырья и потребностей в продукции. Аналитические расчеты позволяют, не прибегая к трудоемким вычислениям, получить оценку эффективности производства рассматриваемой продукции, в частности топлива из древесных отходов. С помощью аналитических расчетов получено, что себестоимость производства тепловой энергии на теплоисточниках с использованием в качестве топлива щепы для условий Удмуртской Республики равна 961 руб./Гкал. При численном решении задачи по данным фактического расположения пунктов накопления сырья и теплоисточников получено значение себестоимости тепловой энергии, равное 1 098 руб./Гкал.
6. Определено, что для условий Удмуртской Республики максимальный объем производства биогаза, при котором экономически целесообразно замещение им природного газа, равен 70 млн. м³ в год. С учетом дохода от продажи биоудобрений и исключения экологических штрафов экономически выгодный объем производства биогаза возрастает в 1,5 раза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Леш А. Пространственная организация хозяйства: пер. с нем. / под редакцией академика А.Г. Гранберга. – М.: Наука, 2007. – 663 с.
2. Daskin M.S. Network and discrete location: Models, algorithms and applications. – New York: Wiley, 1995. – 520 p.
3. Daskin M.S. What you should know about location modeling // Naval Research Logistics. – 2008. – Vol. 55. – P. 283-294.
4. Drezner Z. Dynamic facility location: The progressive p -median problem // Location Science. – 1995. – Vol. 3. – P. 1-7.
5. Drezner Z. Location strategies for satellites orbits // Naval research logistics. – 1988. – Vol. 35. – P. 503-512.
6. Hakimi S. L. Optimum distribution of switching centers in a communication network and some related graph theoretic problems // Operations Research. – 1965. Vol. 13. – P. 462–475.
7. Church R. L., Meadows, M. Location modeling utilizing maximum service distance criteria // Geographical Analysis. – 1979. – Vol. 11. – P. 358-373.
8. Хачатуров В.Р., Веселовский В.Е. и др. Комбинаторные методы и алгоритмы решения задач дискретной оптимизации большой размерности. – М.: Наука, 2000. – 360 с.
9. Береснев В.Л. Эффективный алгоритм для задачи размещения производства с вполне уравновешенной матрицей // Дискретный анализ и исследование операций. Серия 1. – Новосибирск: Институт математики им. С.П. Соболева СО РАН, 1998. – Т.5, №1. – С. 20-31.
10. Береснев В.Л., Гимади Э.Х., Дементьев В.Т. Экстремальные задачи стандартизации. – Новосибирск: Наука, 1978. – 333 с.
11. Гимади Э.Х. Задачи размещения на сети с центральносвязными областями обслуживания // Управляемые системы. – Новосибирск, 1984. – Вып. 25. – С. 38-47.

12. Fisher M.L. The Lagrangian relaxation method for solving integer programming problems // Management science. – 1981. – Vol. 27. – P. 1-18.
13. Galvao, R. D., ReVelle C. A Lagrangean heuristic for the maximal covering location problem // European Journal of Operational Research. – 1996. – Vol. 88. – P. 114-123.
14. Revelle C., Cohon J., Shobrys D. Simultaneous siting and routing in the disposal of hazardous wastes // Transportation Science. – 1991. – Vol. 25. – P. 138-145.
15. Maryanov V., ReVelle C.S. The queueing maximal availability location problem: A model for siting of emergency vehicles // European journal of operational research. – 1996. – Vol. 93. – P. 12-120.
16. Bozkaya B., Zhang J., Erkut E. An efficient genetic algorithm for the p -median problem // Facility location: application and theory. – Berlin: Springer, 2002. – P. 179-205.
17. Hodgson J. M., Rosing K. E., Zhang J. Locating vehicle inspection stations to protect a transportation network // Geographical analysis. – 1996. – Vol. 28. – P. 299-324.
18. Erkut E., Verter V. Hazardous materials logistics // Facility location: A survey of applications and methods. – New York: Springer-Verlag, 1995. – P. 467-506.
19. Bramel J., Simchi-Levi D. A location bases heuristic for general routing problems // Operations research. – 1995. – Vol. 43. – P. 649-660.
20. Rolland E., Schilling D.A., Current J.R. An efficient tabu search procedure for the p -median problem // European journal of operational research. – 1996. – Vol. 96 (2). – P. 329-342.
21. Rosing K.E., Revelle C.S., Rosing-Vogelaar H. The p -median and its linear programming relaxation: an approach to large problems // Journal of the operational research society. – 1979. – Vol. 30 (9). – P. 815-823.
22. Вознюк И.П., Гимади Э.Х., Филатов М.Ю. Асимптотически точный алгоритм для решения задачи размещения с ограниченными объемами про-

изводства // Дискретный анализ и исследование операций. – Новосибирск: Институт математики, 2001. – Т. 8, № 2. – С. 3-16.

23. Рубанова Н.А. Исследование декомпозиционных алгоритмов решения некоторых задач размещения // Матер. III Всерос. конф. «Проблемы оптимизации и экономические приложения». – Омск, 2006. – С. 119.

24. Лореш М.А. Разработка и исследование алгоритмов муравьиной колонии для решения задач оптимального размещения предприятий: Дис. ... канд. техн. наук. – Иркутск, 2006. – 113 с.

25. Трунов Е.С. Совершенствование механизма управления древесными ресурсами в регионе: Дис. ... канд. экон. наук. – Вологда, 2005. – 160 с.

26. Подкопаева Н.Р. Организационно-экономические аспекты диверсификации топливных ресурсов региона: На примере Костромской области: Дис. ... канд. экон. наук. – Кострома, 2005. – 184 с.

27. Ганеев А.Р., Гужеля Д.Ю., Петрова Ю.В., Ротманов В.В., Якименко А.А. Методика оценки результативности и хода выполнения программ с использованием новых показателей. – М.: Министерство образования РФ. Федеральное агентство по образованию; СПб.: ООО «Книжный Дом», 2008. – 76 с.

28. Радионов А.Р., Радионов Р.А. Управление запасами и оборотными средствами в условиях региональной экономики// научный журнал «Финансовый менеджмент» – 2003. – №5. – С. 66-76.

29. Русяк И.Г., Нефедов Д.Г. Постановка и решение задачи оптимального размещения предприятий по производству древесного топлива // Сибирский журнал индустриальной математики. – Новосибирск: Изд-во Института математики, 2012. – Т.XV, №4 (52). – С. 118-123.

30. Русяк И.Г., Нефедов Д.Г. Решение задачи оптимизации схемы размещения производства древесных видов топлива по критерию себестоимости тепловой энергии // Компьютерные исследования и моделирование. – М.: Изд-во Института компьютерных исследований, 2012. – Т.4, №3. – С. 651-659.

31. Русяк И.Г., Нефедов Д.Г. Математическая модель и методика расчета оптимальных параметров системы топливообеспечения древесными видами топлива // Вестник Ижевского государственного технического университета. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2011. – №3. – С. 58-60.

32. Нефедов Д.Г. Постановка и решение задачи оптимального размещения элементов равномерно распределенной производственной структуры // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты: сборник материалов XIV Международной научно-практической конференции (Новосибирск, 3 октября 2014 г.). – Новосибирск: Изд-во ЦРНС, 2014. – С. 128-134.

33. Нефедов Д.Г. Об одной задаче оптимального размещения предприятий с учетом расположения поставщиков сырья и потребителей продукции // VII Всероссийская научная конференция «Математическое моделирование развивающейся экономики, экологии и биотехнологий», ЭКОМОД-2012 (Киров, 2-8 июля 2012 г.) / Сборник тезисов. – Киров: Изд-во ВятГУ, 2012. – С. 54.

34. Русяк И.Г., Нефедов Д.Г. Оптимизация параметров пространственного размещения предприятий по производству древесных видов топлива // Сборник материалов 4-й Международной научно-практической конференции «Современные проблемы науки» (Тамбов, 31 марта 2011 г.). – Тамбов: ТМБпринт, 2011. – С. 60-65.

35. Королев С.А., Нефедов Д.Г. Решение задачи оптимального распределения предприятий производства топлива из древесного сырья для обеспечения системы теплоснабжения региона // Материалы Региональной научно-технической конференции «Математическое и компьютерное моделирование технических и социально-экономических систем» (Ижевск, 14 мая 2010 г.). – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2010. – С. 103-106.

36. Krarup J., Pruzan P. The simple plant location problem: survey and synthesis // European journal of operational research. – 1983. – Vol. 12. – P. 36-81.

37. Гончаров Е.Н. Метод ветвей и границ для простейшей двухуровневой задачи размещения предприятий // Дискретный анализ и исследование операций. – Новосибирск: Институт математики, 1998. – Т. 5, № 1. – С. 19-39.

38. Кочетов Ю.А. Двухуровневые задачи размещения // Труды ИВМ и МГ. Серия Информатика. – Новосибирск: Изд. ИВМиМГ СО РАН, 2007. – Вып. 7. – С. 97-104.
39. Campbell J.F. Location transportation terminals to serve an expanding demand // Transportation research. – 1990. – Vol. 24B. – P. 173-192.
40. Schilling D.A. Dynamic location modelling for public sector facilities: a multicriteria approach // Decision Sciences. – 1980. – Vol. 11. – P. 714-724.
41. Berman O. Location a facility on a congested network with random lengths // Networks. – 1985. – Vol. 15. – P. 275-294.
42. Carbone R. Public facilities location under stochastic demand // INFOR. – 1974. – Vol. 12. – P. 261-270.
43. Current J.R., Ratick S. A model to assess risk, equity, and efficiency in facility location and transportation of hazardous materials // Location Science. – 1995. – Vol. 3. – P. 187-202.
44. Ratick S.J., White A.L. A risk-sharing model for location noxious facilities // Environment and planning B. – 1988. – Vol. 15. – P.165-179.
45. Perl J., Daskin M.S. A warehouse location-routing problem // Transportation research. – 1985. – Vol. 19B (5). – P. 381-396.
46. Laporte G., Nobert Y., Pelletier J. Hamiltonian location problems // European journal of operational research. – 1983. – Vol. 12. – P.85-89.
47. Панов С.А. Модели маршрутизации на автомобильном транспорте. – М.: Транспорт, 1974. – 152 с.
48. Eppen G. Effects of centralization on expected costs in a multi-location newsboy problem // Management science. – 1979. – Vol. 25 (5). – P. 498-501.
49. Shen Z.-J., Coullard C., Daskin M.S. A joint location-inventory model // Transportation science. – 2003. – Vol. 37 (1). – P. 40-55.
50. Cho J., Sarrafzadeh M. The pin redistribution problem in multi-chip modules // Mathematical programming. – 1994. – Vol. 63. – P. 297-330.

51. Higgins A., Kozan E., Ferreira L. Modeling the number and location of siding on a single line railway // Computers and operations research. – 1997. – Vol. 24. – P. 209-220.
52. Kincaid R., Berger R. The damper placement problem on space truss structures // Location science. – 1993. – Vol. 1. – P. 219-234.
53. Swersey A., Thakur L. An integer programming model for location vehicle emissions testing stations // Management science. – 1995. – Vol. 41. – P. 496-512.
54. Flynn J., Ratick S. A multiobjective hierarchical covering model for the essential air services program // Transportation science. – 1988. – Vol. 22. – P. 139-147.
55. Min H. The dynamic expansion and relocation of capacitated public facilities: a multi-objective approach // Computers and operations research. – 1988. – Vol. 15. – P. 243-252.
56. Pirkul H., Narasimhan S., De P. Firm expansion through franchising: a model and solution procedures // Decision science. – 1987. – Vol. 18. – P. 631-645.
57. Hodgson J. M., Wong R. T., Honsaker J. The p-centroid problem on an inclined plane // Operations research. – 1987. – Vol. 35. – P. 221-233.
58. Birge J.R., Malysko V. Methods for a network design problem in solar power systems // Computers and operations research. – 1985. – Vol. 12. – P. 125-138.
59. Price W.L., Turcotte M. Locating a blood bank // Interfaces. – 1986. – Vol. 16. – P. 17-26.
60. Моисеев В.С., Сотников С.В. Общая математическая модель задачи оптимального размещения объектов // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – Казань: КГТУ им. А.Н. Туполева, 2000. – № 3. – С. 31-35.
61. Харчистов Б.Ф. Методы оптимизации. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. – 140 с.
62. Канторович Л.В., Горстко А.Б. Математическое оптимальное программирование в экономике. – М.: Знание, 1968. – 96 с.

63. Рейзлин В.И. Численные методы оптимизации: Учебное пособие / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 105 с.
64. Панюков А.В., Горбик В.В. Параллельные реализации симплекс-метода для безошибочного решения задач линейного программирования // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математическое моделирование и программирование». – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ (НИУ), 2011. – С. 107-118.
65. Ху Т.С. Целочисленное программирование и потоки в сетях: Пер. с англ. – М.: Мир, 1974. – 519 с.
66. Акулич И.Л. Математическое программирование в примерах и задачах. – М.: Высш. шк., 1986. – 319 с.
67. Васильев И.Л., Климентова К.Б. Метод ветвей и отсечений для задачи размещения с предпочтениями клиентов // Дискретный анализ и исследование операций. – Новосибирск: Институт математики, 2009. – Т. 16, № 2. – С. 21-41.
68. Климентова К.Б. Оценки оптимальных значений и методы решения задач размещения с предпочтениями клиентов: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Иркутск, 2010. – 124 с.
69. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К. Жадные алгоритмы // Алгоритмы: построение и анализ: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. – 1296 с.
70. Гончаров Е.Н., Кочетов Ю.А. Поведение вероятностных жадных алгоритмов для многостадийной задачи размещения // Дискретный анализ и исследование операций. – Новосибирск: Институт математики, 1999. – Т. 6, № 1. – С. 12-32.
71. Maranzana F.E. On the location of supply points to minimize transport costs // Operational research Quarterly. – 1964. – Vol. 15. – P. 261-270.
72. Алексеева Е.В., Кочетов Ю.А. Генетический локальный поиск для задачи о p -медиане с предпочтениями клиентов // Дискретный анализ и исследование

дование операций, 2007, серия 2. – Новосибирск: ИМ СО РАН, 2007. – Т.14, № 1. – С.3-31.

73. Батищев Д.И. Генетические алгоритмы решения экстремальных задач. – Нижний Новгород: Нижегородский университет, 1995. – 62 с.

74. Price K., Storn R., Lampinen J. Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization. – Berlin: Springer, 2005. – 538 p.

75. Пупков К.А., Егупов Н.Д. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т.5: Методы современной теории автоматического управления. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 784 с.

76. Crainic T.G., Gendreau M., Hansen P., Mladenovic N. Cooperative parallel variable neighborhood search for the p-median // Journal of Heuristics. – 2004. – Vol. 10 (3). – P. 293-314.

77. Koruplolu M.R., Plaxton C.G., Rajaraman R. Analysis of a local search heuristic for facility location problems // Journal of algorithms. – 2000. – Vol. 37 (1). – P. 146-188.

78. Восс Дж. Передовой опыт в использовании энергии биомассы / перевод с англ. – Минск, 2006. – 198 с.

79. Тикачев В. Машины для измельчения древесины [Электронный ресурс] // Леспроминформ, 2010. – № 2 (68). URL: <http://www.lesprominform.ru/jarchive/articles/itemshow/1176> (дата обращения 10.08.2013).

80. Шегельман И.Р., Васильев С.Б., Лапатин А.Ю. Передвижные рубительные машины: обоснование параметров и технологические расчеты. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1998. – 43 с.

81. Вальщиков Н.М., Лицман Э.П. Рубительные машины. – М.: Лесн. пром-сть, 1980. – 96 с.

82. Сайт компании «Форрестика» (г. Орша, Республика Беларусь) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.forrestika.by/> (дата обращения 10.08.2013).

83. Сайт компании ООО «Гран» (г. Химки) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gran-pellet.ru/> (дата обращения 10.08.2013).

84. Сайт компании ТПК КОДОС (г. Кострома) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.energy.promstanki.ru/> (дата обращения 29.01.2014).
85. Сайт компании ООО «Теплопроцесс» (г. Новосибирск) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.teplo.sibmetal.ru/> (дата обращения 10.08.2013).
86. Сайт компании «Экодрев» (г. Тверь) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ekodrev.ru/> (дата обращения 10.08.2013).
87. Гомонай М.В. Производство топливных брикетов. Древесное сырье, оборудование, технологии, режимы работы – М.: Московский государственный университет леса, 2006. – 68 с.
88. Savolainen V. Wood Fuels. Basic Information Pack. – Jyvaskyla, 2000. – 191 p.
89. Глушков В.А., Тарануха В.П., Печенкин А.Ю., Русяк И.Г. Технологические режимы получения энергоносителей путем переработки биомассы: монография. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2011. – 112 с.
90. Софер С. Биомасса как источник энергии: Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 368 с.
91. Гелетуха Г.Г. Обзор технологий газификации биомассы // Экотехнологии и ресурсосбережение. – Киев: Академперіодика, 1998. – №2. – С. 21-29.
92. Wampler Th.P. Applied pyrolysis handbook. – Boca Raton (USA): CRC Press, 2006. – 288 с.
93. Глушков В.А. Анализ проблемы поиска альтернативы нефти и природному газу. – М.; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2007. – 200 с.
94. Веденеев А.Г. Биогазовые установки в Кыргызской Республике. – Бишкек: Евро, 2006. – 90 с.
95. Сайт компании «Зорг» [Электронный ресурс]. URL: <http://zorgbiogas.ru> (дата обращения 10.10.2014).
96. Шомин А.А. Биогаз на сельском подворье. – Балаклея: Балаклійщина, 2002. – 68 с.

97. Преснухин В.К., Русяк И.Г., Кетова К.В. и др. Концепция Республиканской целевой программы «Снабжение населенных пунктов Удмуртской Республики местными видами топлива» // Отчет по Гос. контракту. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2010. – 264 с.

98. Методические указания по расчету тарифов на тепловую энергию, отпускаемую организациями всех форм собственности, кроме ОАО «Удмурт-энерго»: Постановление Региональной энергетической комиссии Удмуртской Республики от 30 июля 2003 года № 9/6.

99. Методические указания по расчету регулируемых тарифов и цен на электрическую (тепловую) энергию на розничном (потребительском) рынке, приказ ФСТ Российской Федерации от 06 августа 2004 года № 20-э/2.

100. Базара М., Шетти К. Нелинейное программирование: теория и алгоритмы: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 584 с.

101. Шор Н.З. Методы минимизации недифференцируемых функций и их приложения. – Киев: Наук. думка, 1979. – 200 с.

102. Панченко Т.В. Генетические алгоритмы / под ред. Ю.Ю. Тарасевича. – Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет», 2007. – 87 с.

103. Емельянов В.В., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Теория и практика эволюционного моделирования. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 432 с.

104. Тененев В.А. Применение генетических алгоритмов с вещественным кроссовером для минимизации функций большой размерности // Интеллектуальные системы в производстве. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2006. – №1. – С. 93-107.

105. Тененев В.А., Якимович Б.А. Генетические алгоритмы в моделировании систем: монография. – Ижевск: ИжГТУ, 2010. – 308 с.

106. Хохлюк В.И. Параллельные алгоритмы целочисленной оптимизации. – М.: Радио и связь, 1987. – 224 с.

107. Вальковский В.А., Котов В.Е., Марчук А.Г., Миренков Н.Н. Элементы параллельного программирования. – М.: Радио и связь, 1983. – 240 с.

108. Головкин Б.А. Параллельные вычислительные системы. – М.: Наука, 1980. – 520 с.
109. Bank B., Guddat J., Klatte D., Kummer B., Tammer K. Non-linear Parametric Optimization. – Berlin: Akademle-Verlag, 1982. – 228 p.
110. Дмитриев С.В. Разработка гибридных генетических алгоритмов для решения задач оптимального управления динамическими системами: Дис... канд. техн. наук. – Ижевск: ИжГТУ, 2007. – 127 с.
111. Хомоненко А.Д. и др. Delphi 7. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 1216 с.
112. Макленнен Дж., Танг Чж., Криват Б. Microsoft SQL Server: Data Mining – интеллектуальный анализ данных/ перевод с англ. – СПб: БХВ-Петербург, 2009. – 720 с.
113. Сайт компании Pitney Bowes MapInfo [Электронный ресурс]. URL: <http://www.pb.com/> (дата обращения 10.08.2013).
114. Русяк И.Г., Кетова К.В., Королев С.А., Трушкова Е.В. Логистика топливоснабжения региона возобновляемыми местными видами топлива, получаемыми из древесного сырья: монография. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2011. – 185 с.
115. Концепция долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года, утвержденная распоряжением Правительства РФ от 17 ноября 2008 г. №1662-р.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

УТВЕРЖДАЮ

Министр промышленности
и энергетики Удмуртской Республики

Радионов О.В.

“16” 05 2013 г.

АКТ

внедрения программно-вычислительного комплекса
решения задачи оптимального размещения предприятий
по производству топлива из возобновляемых источников энергии

Русяком И.Г., Нефедовым Д.Г. разработан программно-вычислительный комплекс (ПВК) "Оптимальное размещение предприятий", предназначенный для решения задач оптимального размещения элементов распределенной производственной структуры, включающей пункты накопления сырья, пункты производства продукции и пункты ее потребления.

ПВК создан при разработке Концепции Республиканской целевой программы "Снабжение населения, объектов социально-бытовой сферы местными возобновляемыми источниками энергии". Результаты расчетов использованы для анализа экономической эффективности перевода теплоисточников с традиционных видов топлива (уголь, природный газ, мазут, дрова) на топливо из древесных отходов и отходов животноводства. Конкурентоспособность местных видов топлива достигается за счет их комплексного использования в рамках трехуровневой логистической системы, включающей базы по подготовке исходного сырья, пункты его переработки в топливо и пункты производства тепловой энергии, входящие в распределенную систему теплоснабжения региона. Результаты решения визуализируются в виде графиков, таблиц и картограмм.

ПВК использован для расчета оптимального размещения предприятий по производству различных видов топлива из древесных отходов, а также биогазовых комплексов на территории Удмуртской Республики. В программном комплексе содержится информация о характеристиках и расположении предприятий лесозаготовительной и деревоперерабатывающей промышленности, а также животноводческих комплексов; содержится состав и стоимость технологического оборудования для производства древесного топлива и биогаза.

ПВК "Оптимальное размещение предприятий" внедрен в Министерстве промышленности и энергетики УР и используется для управления топливно-энергетическим комплексом распределенной системы теплоснабжения региона.

Начальник отдела электроэнергетики
и топливно-энергетических ресурсов
министерства промышленности
и энергетики УР

Т.Р. Сафиуллин

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2013611274

**Решение задачи оптимального размещения предприятий
по производству древесного топлива для распределенной
системы теплоснабжения региона**

Правообладатель(ли): **Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего профессионального
образования «Ижевский государственный технический
университет имени М.Т.Калашникова» (RU)**

Автор(ы): **Русяк Иван Григорьевич,
Нефедов Денис Геннадьевич (RU)**



Заявка № 2012660296

Дата поступления 27 ноября 2012 г.

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ

9 января 2013 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.Л. Симонов