

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«КУЗБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Т. Ф. ГОРБАЧЕВА»

На правах рукописи



ТАЙЛАКОВА АННА АЛЕКСАНДРОВНА

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ НЕЖЕСТКИХ
ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД**

Специальность

1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Пимонов А.Г.

Новокузнецк – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ОБЗОР И АНАЛИЗ МЕТОДОВ И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА КОНСТРУКЦИИ НЕЖЕСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД	14
1.1 Нормативные документы, регламентирующие проектирование и расчет конструкции нежестких дорожных одежд на территории Российской Федерации	14
1.2 Развитие отечественных методов расчета нежестких дорожных одежд	18
1.3 Обзор программного обеспечения для расчета конструкции нежестких дорожных одежд	21
1.4 Методы расчета, используемые за рубежом	26
1.5 Зарубежное программное обеспечение для расчета конструкции нежестких дорожных одежд	30
1.6 Анализ методов подбора оптимальной по стоимости затрат на материалы конструкции нежестких дорожных одежд	32
Выводы по первой главе	37
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ НЕЖЕСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД	41
2.1 Ограничения задачи расчета оптимальной по стоимости затрат на материалы конструкции	41
2.2 Концептуальная постановка задачи оптимизации конструкций нежестких дорожных одежд	51
2.3 Математическая модель для оптимизации конструкции нежестких дорожных одежд путем варьирования толщин и дорожно-строительных материалов конструктивных слоев	56
2.4 Математическая модель для многокритериальной оптимизации конструкции нежестких дорожных одежд по продольному профилю трассы, состоящей из нескольких участков	58
Выводы по второй главе	61

ГЛАВА 3. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ НЕЖЕСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД.....	63
3.1 Методы нелинейного программирования для расчета оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд	63
3.1.1 Полный перебор вариантов.....	63
3.1.2 Метод мултистарта.....	66
3.1.3 Метод динамического программирования	68
3.2 Эволюционные методы для расчета оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд.....	71
3.2.1 Модифицированный генетический алгоритм	73
3.2.2 Гибридный генетический алгоритм	79
3.2.3 Параллельный запуск генетического алгоритма	83
3.3 Алгоритм многокритериальной оптимизации конструкции нежестких дорожных одежд трассы, состоящей из нескольких участков	86
Выводы по третьей главе.....	95
ГЛАВА 4. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ НЕЖЕСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ	97
4.1 Технологии разработки.....	97
4.2 Схема данных	98
4.3 Модели данных.....	102
4.4 Оцифровка и представление номограмм	107
4.5 Интерфейс и основные возможности программного обеспечения.....	113
Выводы по четвертой главе.....	121
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	123
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	125
ПРИЛОЖЕНИЕ А Справка об использовании результатов диссертационной работы.....	139
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Справка об использовании результатов диссертационной работы.....	140

ПРИЛОЖЕНИЕ В Свидетельство о государственной регистрации базы данных	141
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ	142
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Свидетельство о государственной регистрации базы данных	143
ПРИЛОЖЕНИЕ Е Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ	144
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж Математические модели для цифрового представления графической информации ОДН 218.046-01	145

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Строительство автомобильных дорог с твердым покрытием обеспечивает населенные пункты круглогодичной связью. Недостаточное развитие сети автомобильных дорог приводит к исключению из хозяйственного использования значительной территории страны. Увеличение плотности дорожной сети и приведение автомобильных дорог в нормативное состояние являются важнейшими задачами государства.

Нагрузку от транспортных средств воспринимает дорожная одежда. Наиболее распространенным видом дорожных одежд на территории Российской Федерации являются нежесткие дорожные одежды. Возникновение разрушений дорожного покрытия (трещины, выбоины, колеи) приводит к образованию аварийно-опасных участков трассы. Важной задачей для обеспечения прочности дорожного покрытия в течение заданного срока службы является определение параметров напряженно-деформированного состояния конструкции дорожных одежд при проезде транспортных средств, а также подбор материалов и определение толщин слоев с учетом параметров прочности конструкции. Для предотвращения преждевременного разрушения дорожного покрытия возникающие в процессе эксплуатации дороги совокупности внешних воздействий не должны превышать предельных значений показателей прочности материалов.

В настоящее время на территории Российской Федерации в качестве нормативного документа, регламентирующего метод расчета нежестких дорожных одежд, приняты ОДН 218.046-01 (отраслевые дорожные нормы). Согласно ОДН 218.046-01 проектирование дорожной одежды представляет собой единый процесс конструирования и расчета дорожной конструкции на прочность, морозоустойчивость с технико-экономическим обоснованием вариантов для выбора наиболее экономичного в данных условиях. Дорожная одежда должна быть по возможности менее материалоемкой, особенно по расходу дефицитных материалов. Процесс проектирования конструкции нежестких дорожных одежд включает в себя следующие этапы: назначение конструкции; расчет конструкции; выбор наиболее экономичного варианта.

Назначение конструкции, как правило, осуществляется с использованием альбомов типовых решений. Типовые решения содержат указания по конструированию дорожных одежд для различных грунтовых и климатических условий, рекомендуемые материалы и толщины конструктивных слоев. Данные решения нуждаются в технико-экономическом обосновании, так как материалы конструктивных слоев могут иметь различную стоимость и отличаться по техническим характеристикам. Кроме того, учесть все возможные значения параметров внешней среды, оказывающих воздействие на конструкцию, невозможно в рамках типового решения. При этом использование альбомов типовых решений позволяет значительно сузить диапазон выбора конструктивных материалов среди возможных вариантов.

Современные программные средства («IndorPavement: Система расчета дорожных одежд», «Топоматик Robur – Дорожная одежда», «Кредо Радон RU»), применяемые в проектных организациях, позволяют выполнять расчет конструкции нежестких дорожных одежд в соответствии с нормативными требованиями, действующими на территории Российской Федерации, а также осуществлять поиск оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд путем варьирования толщин конструктивных слоев. Сравнение вариантов конструкций, имеющих различный состав материалов, предлагается осуществлять вручную.

Разработка математических моделей, метода, алгоритма и программного обеспечения для оптимизации конструкции путем варьирования материалов конструктивных слоев позволит заменять дорогостоящие материалы более экономичными, при этом соблюдая требования к обеспечению прочности конструкции.

Подбор оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд представляет собой трудоемкий итерационный процесс, требующий применения методов оптимизации. Оценка объема вычислительных затрат на поиск оптимального решения задачи показывает, что затраты возрастают экспоненциально с увеличением диапазона допустимых толщин конструктивных слоев и с расширением базы материалов. Таким образом, эффективного алгоритма, позволяющего найти решение путем прямого перебора, не существует. Исследования в области численного поиска

оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд позволят разработать эффективный метод и алгоритм подбора конструкции.

Целью диссертационной работы является минимизация стоимости строительства нежестких дорожных одежд за счет применения в процессе расчета конструкций методов оптимизации и программного обеспечения, использующего технологию параллельных вычислений. В соответствии с целью поставлены следующие задачи:

1. Выполнить обзор и анализ существующих методов и программного обеспечения для расчета конструкции нежестких дорожных одежд.

2. Предложить математическую модель оптимизации конструкции нежестких дорожных одежд для минимизации стоимости конструкции путем варьирования толщин и материалов конструктивных слоев. Предложить математическую модель многокритериальной оптимизации конструкции нежестких дорожных одежд для минимизации стоимости конструкции, состоящей из нескольких участков, с учетом критерия ее однотипности по продольному профилю трассы.

3. Разработать метод и алгоритм поиска оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд путем варьирования толщин и материалов конструктивных слоев для минимизации стоимости конструкции. Разработать метод и алгоритм поиска оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд, позволяющие получать оптимальные варианты конструкций нежестких дорожных одежд по продольному профилю трассы для различных участков автомобильных дорог в зависимости от климатических и геологических условий с минимальными затратами на сооружение.

4. На основе предложенных моделей и алгоритмов с использованием технологии параллельных вычислений создать программное обеспечение для оптимизации конструкции нежестких дорожных одежд автомобильных дорог общего пользования.

Объектом исследования является процесс расчета конструкций нежестких дорожных одежд.

Предметом исследования являются оптимизационные модели, методы, алгоритмы и программное обеспечение расчета конструкций нежестких дорожных одежд.

Методы исследования и технологии разработки: методы системного анализа, методы математического моделирования, методы нелинейного программирования, метод динамического программирования, эволюционные методы, методы многокритериальной оптимизации. Программное обеспечение разработано с применением технологии параллельных вычислений. При его разработке были использованы Yii PHP Framework, Apache HTTP Server 2.2.22, MySQL 5.5. Исходный код написан на языках программирования PHP 5.3, JavaScript с применением объектно-ориентированной методологии, технологии AJAX. Для оцифровки графической информации, содержащейся в нормативных документах, было разработано программное обеспечение в среде Borland Delphi. Обработка изображений выполнена с помощью программы CorelTrace, входящей в состав пакета программ CorelDRAW, для подбора тенденций динамических рядов использована информационная система СТЭК.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует паспорту специальности 05.13.18 (1.2.2) «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»: п. 3 «Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий»; п. 4 «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента»; п. 5 «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента».

Научная новизна

1. Предложена математическая модель для оптимизации конструкции нежестких дорожных одежд, позволяющая получать минимальные по стоимости и удовлетворяющие требованиям прочности и морозоустойчивости конструкции.

Предложенная модель отличается тем, что ее переменными параметрами являются не только толщины, но и дорожно-строительные материалы конструктивных слоев.

2. Предложена математическая модель для многокритериальной оптимизации конструкции нежестких дорожных одежд по продольному профилю трассы, состоящей из нескольких участков. Предложенная модель отличается тем, что позволяет получать варианты конструкций с минимальными затратами на сооружение и при этом учитывать критерий однотипности конструкции по всей длине трассы.

3. На основе предложенной математической модели разработаны метод и алгоритм оптимизации конструкции нежестких дорожных одежд. Разработанный метод отличается комплексным использованием эволюционного поиска и прямого перебора. Время работы алгоритма составляет менее одной минуты и не растет при увеличении количества рассматриваемых модификаций конструкции в отличие от полного перебора решений, где рост временных затрат при увеличении количества рассматриваемых модификаций конструкции близок к экспоненциальному.

4. На основе предложенной оптимизационной модели разработаны метод и алгоритм многокритериальной оптимизации конструкции нежестких дорожных одежд по продольному профилю трассы, состоящей из нескольких участков. Разработанный метод отличается комплексным использованием эволюционного поиска и прямого перебора и основан на применении аддитивной свертки критериев с адаптивными коэффициентами. Время работы алгоритма составляет менее одной минуты и не растет при увеличении количества рассматриваемых модификаций конструкции.

5. Создано оригинальное программное обеспечение, базирующееся на предложенных математических моделях и реализующее с применением технологии параллельных вычислений разработанные алгоритмы поиска оптимальных конструкций нежестких дорожных одежд для автомобильных дорог общего пользования.

Теоретическая значимость диссертации заключается в развитии численных методов, основанных на эволюционных вычислениях, для решения задачи дискретной оптимизации с нелинейными ограничениями.

Практическая значимость. Результаты диссертационной работы, представленные в виде разработанного программного продукта, использованы в отделе

проектирования дорог ООО «Индор-Кузбасс» для конструирования и расчета нежестких дорожных одежд автомобильных дорог общего пользования и городской улично-дорожной сети. Программное обеспечение, разработанное на основе предложенных моделей и алгоритмов расчета оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд, позволяет сократить трудозатраты и время работы над проектом, а также снизить вероятность появления ошибок при назначении конструкции в сравнении с традиционным способом.

Результаты диссертационного исследования используются в учебном процессе КузГТУ в рамках курсов «Интеллектуальные информационные системы», «Программная инженерия» для бакалавров направления подготовки 09.03.03 «Прикладная информатика».

Реализация результатов работы.

На разработанные программные продукты и базы данных получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и баз данных: № 2013661847 от 17.12.2013 «Информационно-вычислительная система для расчета и оценки стоимости конструкции нежесткой дорожной одежды для автомобильных дорог общего пользования», № 2014621634 от 28.11.2014 «База данных информационно-вычислительной системы для расчета и оценки стоимости конструкции нежесткой дорожной одежды для автомобильных дорог общего пользования», № 2016620435 от 11.04.2016 «База данных web-сервиса для поиска оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд», № 2016613863 от 11.04.2016 «Web-сервис для поиска оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд».

На защиту выносятся:

1. Математическая модель оптимизации конструкции нежестких дорожных одежд путем варьирования толщин и дорожно-строительных материалов конструктивных слоев, позволяющая получать минимальные по стоимости и удовлетворяющие требованиям прочности и морозоустойчивости конструкции.

2. Математическая модель многокритериальной оптимизации конструкции нежестких дорожных одежд для минимизации стоимости конструкции с учетом

критерия однотипности по продольному профилю трассы, состоящей из нескольких участков.

3. Метод и алгоритм оптимизации конструкции нежестких дорожных одежд, основанные на комплексном использовании эволюционного поиска и прямого перебора.

4. Метод и алгоритм многокритериальной оптимизации конструкции нежестких дорожных одежд по продольному профилю трассы, состоящей из нескольких участков, основанные на комплексном использовании эволюционного поиска и прямого перебора и использующие метод аддитивной свертки критериев.

5. Программное обеспечение с использованием технологии параллельных вычислений, в составе которого реализованы предложенные модели, методы и алгоритмы поиска оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд автомобильных дорог общего пользования.

Личный вклад автора заключается в разработке математической модели для оптимизации конструкции нежестких дорожных одежд путем варьирования толщин и дорожно-строительных материалов конструктивных слоев; разработке математической модели многокритериальной оптимизации конструкции нежестких дорожных одежд по продольному профилю трассы, состоящей из нескольких участков с различными геологическими условиями; разработке метода и алгоритма оптимизации конструкции нежестких дорожных одежд, основанных на комплексном использовании эволюционного поиска и прямого перебора; разработке метода и алгоритма многокритериальной оптимизации конструкции нежестких дорожных одежд по продольному профилю трассы, основанных на комплексном использовании эволюционного поиска и прямого перебора; разработке программного обеспечения, в составе которого реализованы предложенные модели, методы и алгоритмы.

Апробация работы. Исследования проводились в рамках реализации работ по государственному контракту № 048 от 01.02.2012 г. на выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по теме «Разработка информационно-вычислительной системы для проектирования, технического обслуживания и паспортизации автомобильных дорог» в рамках программы Фонда содействия

развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе «Участник Молодежного Научно-Инновационного Конкурса» («У.М.Н.И.К.»).

Основные результаты работы были представлены на научно-практических конференциях и конкурсах научных работ: Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс» (Новосибирск, 2008, 2009, 2010), Всероссийской научной конференции «Наука. Технологии. Инновации» (Новосибирск, 2008, 2012), Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (Томск, 2009), Всероссийской научно-практической конференции «Россия молодая» (Кемерово, 2009, 2020), VIII Санкт-Петербургском открытом конкурсе имени профессора В.Н. Вениаминова на лучшую студенческую научную работу по экономике, управлению и информатике в экономической сфере (Санкт-Петербург, 2010), Международной конференции «Математика, ее приложения и математическое образование» (Улан-Удэ, 2011, 2014), Инновационном конвенте «Кузбасс: образование, наука, инновации» (Кемерово, 2012), Всероссийском конкурсе студентов и аспирантов организаций, осуществляющих образовательную деятельность, обучающихся по инженерным специальностям и направлениям подготовки высшего образования (Москва, 2015), Международной научно-практической конференции «Программная инженерия: методы и технологии разработки информационно-вычислительных систем» (Донецк, 2018), Международной научно-практической конференции «Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте» (Кемерово, 2019), Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (Новосибирск, 2019).

Отдельные результаты исследования отмечены 9 дипломами конкурсов научных работ и научно-практических конференций.

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано 30 работ, из них 4 в изданиях из перечня ВАК, 1 работа в издании, индексируемом в международной наукометрической базе Scopus, получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и 2 свидетельства о государственной регистрации баз данных.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 123 наименований и 7 приложений, включает 42 рисунка и 38 таблиц. Полный объем диссертации составляет 138 страниц основного текста, 20 страниц – приложения.

ГЛАВА 1. ОБЗОР И АНАЛИЗ МЕТОДОВ И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА КОНСТРУКЦИИ НЕЖЕСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД

1.1 Нормативные документы, регламентирующие проектирование и расчет конструкции нежестких дорожных одежд на территории Российской Федерации

Российская Федерация является самым большим по площади государством мира и имеет широкую протяженность с запада на восток и с севера на юг. Недостаточное развитие сети автомобильных дорог приводит к исключению из хозяйственного использования значительной территории страны. Высокие транспортно-эксплуатационные расходы являются фактором замедления роста промышленного потенциала, низкой производительности труда, слабой экономической связи регионов. Увеличение плотности сети автомобильных дорог является важнейшей задачей государства, что отражено в «Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года» [1]. Среди целей последней редакции отмечена необходимость создания условий для экономического роста, повышения конкурентоспособности национальной экономики, повышения качества жизни населения через доступ к безопасным и качественным транспортным услугам, превращения географических особенностей России в ее конкурентное преимущество.

По данным Росстата [2] протяженность автомобильных дорог общего пользования в 2018 году выросла на 21,6 тыс. км (на 1,4 %) по сравнению с 2017 годом и составила 1 млн 529,4 тыс. км. Более половины общего прироста было обеспечено за счет автомобильных дорог с твердым покрытием, доля которых в общей протяженности автомобильных дорог общего пользования составляет более 70 %. Их протяженность в 2018 году увеличилась на 12,0 тыс. км (с 1 млн 64 тыс. км в 2017 году до 1 млн 76 тыс. км в 2018 году). Плотность автомобильных дорог общего пользования федерального, регионального или межмуниципального и местного значения с твердым покрытием составляет 63 км на 1000 км² территории Российской

Федерации. Данные показатели говорят о высоком темпе строительства автомобильных дорог. «Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года» [1] была утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 22 ноября 2008 года № 1734-р. На конец 2008 года общая протяженность сети автомобильных дорог составляла 754 тыс. км, плотность 37 км на 1000 км². Таким образом, общая протяженность автомобильных дорог за последние 10 лет увеличилась более чем в два раза.

В настоящее время на территории Российской Федерации реализуется национальный проект «Безопасные и качественные автомобильные дороги» [3], разработанный Минтрансом России во исполнение Указа Президента Российской Федерации от 7 мая 2018 года № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» [4]. Среди целевых показателей проекта можно отметить:

1. Увеличение доли автомобильных дорог регионального значения, соответствующих нормативным требованиям, в их общей протяженности не менее чем до 50 % (относительно их протяженности по состоянию на 31 декабря 2017 г.).

2. Снижение доли автомобильных дорог федерального и регионального значения, работающих в режиме перегрузки, в их общей протяженности на 10 % по сравнению с 2017 г.

3. Снижение количества мест концентрации ДТП (аварийно-опасных участков) на дорожной сети в два раза по сравнению с 2017 г.

4. Создание Реестра новых и наилучших технологий, материалов и технологических решений повторного применения и доведение доли контрактов на осуществление дорожной деятельности в рамках нацпроекта, предусматривающих использование новых технологий и материалов, включенных в Реестр, до 80 % к концу 2024 г.

Национальный проект [3] включает в себя четыре федеральных проекта: «Дорожная сеть» [5], «Общесистемные меры по развитию дорожного хозяйства» [6], «Безопасность дорожного движения» [7] и «Автомобильные дороги Минобороны России» [8]. В рамках федерального проекта «Дорожная сеть» предусматривается

реализация программ дорожной деятельности в отношении автомобильных дорог общего пользования, объектов улично-дорожной сети. Цели проекта:

1. Приведение в нормативное состояние сети автомобильных дорог общего пользования регионального или межмуниципального значения, уличной дорожной сети городских агломераций.
2. Сокращение доли автомобильных дорог федерального и регионального значения, работающих в режиме перегрузки.
3. Ликвидация мест концентрации дорожно-транспортных происшествий.
4. Увеличение в городских агломерациях доли автомобильных дорог, соответствующих нормативным требованиям, в их общей протяженности до 85 %.

Приведение автомобильных дорог регионального или межмуниципального значения и дорожной сети городских агломераций в нормативное состояние осуществляется с учетом соблюдения требований технического регламента таможенного союза «Безопасность автомобильных дорог» [9]. Регламент был утвержден решением комиссии Таможенного союза в 2011 году. В соответствии с требованиями регламента безопасность автомобильных дорог, а также связанных с ними процессов проектирования, строительства и эксплуатации, обеспечивается путем установления и соблюдения соответствующих проектных параметров, в т.ч. показателей прочности, надежности и устойчивости в течение всего срока службы. Автомобильная дорога и дорожные сооружения на ней при эксплуатации должны соответствовать следующим требованиям безопасности:

1. На покрытии проезжей части должны отсутствовать проломы, просадки, выбоины и иные повреждения или дефекты, затрудняющие движение транспортных средств с разрешенной скоростью и представляющие опасность.
2. Сцепные качества дорожного покрытия должны обеспечивать безопасные условия движения транспортных средств с разрешенной правилами дорожного движения скоростью при условии соответствия их эксплуатационного состояния установленным требованиям.

3. Ровность дорожного покрытия должна обеспечивать безопасные условия движения с установленной для данного класса и категории автомобильной дороги скоростью движения.

4. Дорожно-строительные материалы и изделия в течение всего срока службы автомобильной дороги и дорожных сооружений на них должны быть устойчивыми к воздействию транспортных, природных и иных факторов.

Требования к качеству автомобильных дорог и дорожных сооружений, устанавливаются в международных и региональных стандартах, а в случае их отсутствия – национальных (государственных) стандартах государств-членов Таможенного союза, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований принятого технического регламента Таможенного союза.

Режимы и безопасность движения автомобильного транспорта определяет состояние дорожного покрытия. Конструктивным элементом автомобильной дороги, воспринимающим нагрузку от транспортных средств и передающий ее на земляное полотно, является дорожная одежда. Различают дорожные одежды жесткого и нежесткого типа. Наиболее распространенным видом дорожных одежд на территории Российской Федерации являются нежесткие дорожные одежды (рис.1.1). Нежесткими называют одежды, прочность материалов слоев которых при изгибе и модуль упругости существенно зависят от температуры и влажности (асфальтобетон и др.), или же одежды с несущими слоями, не способными сопротивляться изгибу (щебень, гравийно-песчаные смеси и т. д.) [10].

Работы по совершенствованию нормативной базы в области проектирования дорожных одежд нашли отражение в «Инструкции по проектированию дорожных одежд нежесткого типа» ВСН 46-83 [11]. В 2001 г. взамен ВСН 46-83 утверждены отраслевые дорожные нормы ОДН 218.046-2001 «Проектирование нежестких дорожных одежд» [12], разработанные Союздорнии при участии Санкт-Петербургского и Омского филиалов Союздорнии, МАДИ (ГТУ), ГП «РОСДОРНИИ», Военной академии тыла и транспорта, СибАДИ и др. Руководителями работ и ответственными исполнителями были канд. техн. наук В.М. Юмашев, д-р техн. наук В.Д. Казарновский. Данный нормативный документ в настоящее время регламентирует

метод расчета нежестких дорожных одежд на территории Российской Федерации. Документ содержит указания по конструированию и расчету нежестких дорожных одежд автомобильных дорог общей сети. ОДН 218.046-01 применимы для проектирования вновь сооружаемых дорожных одежд, новых участков реконструируемых дорог, разработки альбомов типовых конструкций, а также могут использоваться при оценке прочности и при проектировании усиления дорожных одежд существующих дорог.

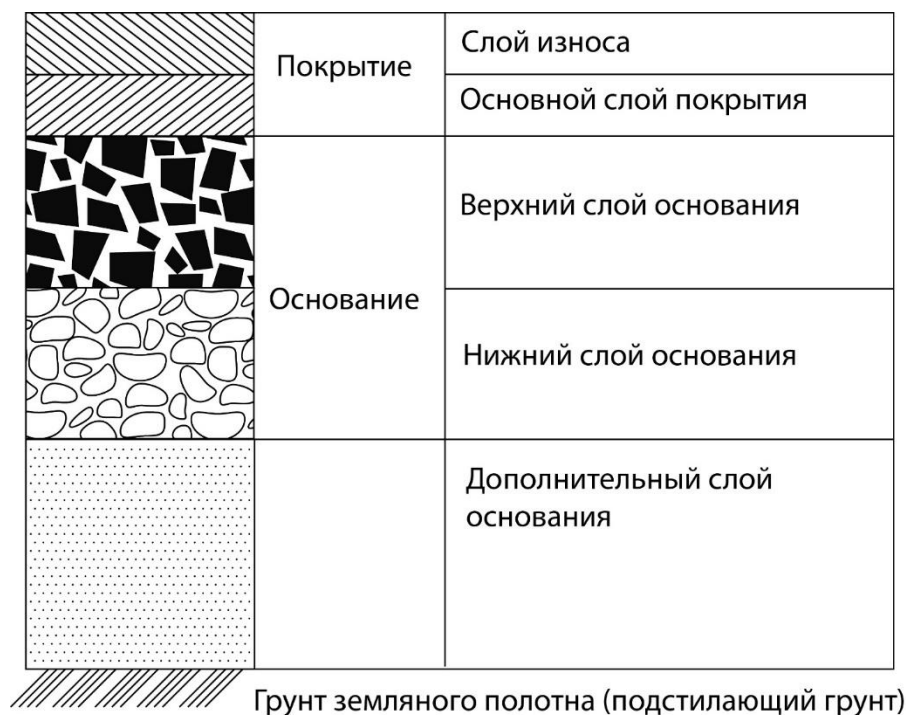


Рисунок 1.1 – Конструкция нежесткой дорожной одежды

1.2 Развитие отечественных методов расчета нежестких дорожных одежд

В основу большинства отечественных практических методов расчета дорожных одежд положены теоретические модели, позволяющие определять соответствие проекта критериям, обеспечивающим необходимый срок службы проезжей части автомобильных дорог [10, 13, 14].

Теоретическая задача заключается в разработке математической модели, позволяющей исследовать механические свойства проектируемой конструкции дорожных одежд, а также прогнозировать возможные разрушения дорожного покрытия,

возникающие под действием окружающей среды. Дорожная одежда представляет собой многослойную систему, физико-механические свойства материалов конструктивных слоев различны и зависят от большого количества факторов влияния внешней среды. Соотношение между напряжениями и возникающими деформациями имеют нелинейную зависимость. В рамках математической модели количественная оценка условий, возникающих на контакте между слоями из-за широкой номенклатуры материалов практически невозможна. Из-за изменчивости геологических условий, различных физико-механических свойств грунта параметры конструкции по длине трассы не однородны. Скорости движения транспортных средств, различное расположение колес автомобиля относительно проезжей части трассы также усложняют математическое решение. В связи с вышеперечисленными причинами современные теоретические схемы и математические модели для расчета конструкции дорожных одежд являются приближенными и могут учесть только ряд факторов [13-17].

К важным научным исследованиям в области разработки теоретических моделей проектирования дорожных одежд относятся работы Н.Н. Иванова [18] по механике грунтов и теории прочности дорожных одежд. Для расчета нежестких дорожных одежд Н.Н. Ивановым было предложено использовать расчетную схему упругого полупространства. Дорожную конструкцию предложено рассматривать как многослойную систему, расположенную на земляном полотне, в качестве показателя прочности конструкции использовать модуль деформации материалов. Под руководством Н.Н. Иванова в СоюздорНИИ на основе лабораторных исследований, экспериментальных наблюдений за эксплуатируемыми дорогами, а также анализа зарубежных данных был разработан метод расчета дорожных одежд нежесткого типа, которым руководствовались все проектные организации Советского Союза.

Исследования в области расчета нежестких дорожных одежд шли по пути углубления теоретической базы. Главной задачей являлось изучение механизмов возникновения различных видов разрушений конструкции дорожных одежд, выявление факторов окружающей среды и свойств материалов конструктивных слоев, оказывающих наибольшее влияние на продолжительность срока службы дорожной

одежды. На основании лабораторных и полевых исследований происходило уточнение теоретических схем расчета конструкции нежестких дорожных одежд путем введения новых параметров и ограничений [15]. Коллективы ученых-дорожников Ленинградского филиала СоюзДорНИИ, Московского автомобильно-дорожного института (МАДИ), Харьковского автомобильно-дорожного института (ХАДИ) и других проектных и исследовательских организаций проводили исследования в следующих направлениях:

1. Исследования в области конструирования и расчета по величине нормативного упругого прогиба (модуля упругости).

2. Исследования в области конструирования и расчета дорожных одежд по условию местного предельного равновесия.

3. Исследования в области расчета связных слоев дорожных одежд на изгиб.

Данные исследования проводились на основе обработки результатов многих тысяч испытаний, проведенных на дорогах страны, а также экспериментов, выполненных в лабораторных условиях. В результате были получены необходимые расчётные графики и номограммы, установлены значения модулей упругости и сдвиговые характеристики грунтов и материалов, определены допустимые значения растягивающих напряжений для асфальтобетонов и других материалов, содержащих вяжущие вещества, исследованы принципы возникновения явления усталости конструктивных слоев.

На основе данных исследований были предложены следующие методы расчета конструкций нежестких дорожных одежд.

Метод МАДИ. В качестве основного расчетного показателя предлагается нормативный прогиб (модуль упругости) под колесом расчетного автомобиля. Значение прогиба зависит от заданной интенсивности движения [15].

Метод Ленинградского филиала СоюзДорНИИ. Основными расчетными показателями являются: сопротивление сдвигу грунта земляного полотна и малосвязных конструктивных слоев дорожной одежды и предельное растягивающее напряжение при изгибе в монолитных слоях [15].

Метод ХАДИ. В качестве основного расчетного показателя принят нормативный прогиб, но особое внимание обращено на условия IV и V дорожно-климатических зон. В частности, подчеркивается целесообразность повышения модуля упругости верхней части земляного полотна путем улучшения водно-теплового режима, а также путем повышения степени уплотнения грунта. При конструировании рекомендован метод плавного убывания упругости слоев по экспоненциальной зависимости [15].

Впоследствии на основе обобщения данных методов был предложен единый метод проектирования нежестких дорожных одежд, представленный в нормативном документе ОДН 218.046-2001 «Проектирование нежестких дорожных одежд» и позволяющий обеспечивать надежность конструкции благодаря более полному учету факторов, оказывающих воздействие на дорогу.

1.3 Обзор программного обеспечения для расчета конструкции нежестких дорожных одежд

Процедура расчета конструкции нежестких дорожных одежд представляет собой трудоемкий процесс, требующий учета большого количества параметров окружающей среды, свойств материалов и грунтов. Кроме того, необходимо обеспечить экономию материальных и денежных ресурсов при строительстве автомобильной дороги. Сложность расчетов и большой объем справочной информации указывают на целесообразность применения программного обеспечения в процессе проектирования.

Практическое применение вычислительных технологий началось в середине 50-х годов. Из-за малого объема памяти и невысокого быстродействия ЭВМ того времени только небольшая часть проектных работ выполнялась с применением вычислительных средств. На сегодняшний день невозможно представить рабочее место специалиста-проектировщика без оснащения современным компьютерным оборудованием. Опыт применения информационно-вычислительных средств показывает высокую эффективность не только с точки зрения сокращения сроков

проектирования, но и с точки зрения повышения точности расчетов и обоснованности проектных решений [19-20].

Рассмотрим возможности современного программного обеспечения, применяемого в проектных организациях для расчета нежестких дорожных одежд.

«Кредо Радон RU» – это программа для расчета дорожной одежды нежесткого и жесткого типов и ее автоматизированного конструирования [21]. Программа «Кредо Радон RU» применяется при проектировании дорожных одежд на вновь сооружаемых дорогах, на новых участках реконструируемых дорог, при усилении существующих дорожных одежд, при проектировании улиц населенных пунктов, при разработке каталогов и альбомов типовых решений по конструкциям дорожных одежд на дорогах общей сети.

Комплекс программных продуктов «Кредо» для проектирования автомобильных дорог развивается с 1989 г. в научно-производственном объединении (НПО) «КредоДиалог». Коллективом специалистов дорожной отрасли из России, Украины, Белоруссии (Г.Л. Жуховицкий, Г.В. Величко, В.В. Филиппов, А.Н. Пигин и др.) было разработано программное обеспечение, ориентированное на эксплуатацию в производственных условиях и получившее широкое распространение в дорожных проектных организациях.

«Кредо Радон RU» входит в состав программного комплекса. Основными функциями программы являются прочностные инженерные расчеты конструкций нежестких дорожных одежд. В число основных алгоритмов входят:

- приведение фактического состава движения к расчетной нагрузке;
- определение расчетных характеристик грунтов рабочего слоя;
- расчет по критерию упругого прогиба;
- расчет по критерию сопротивления материалов монолитных слоев возникающим в них растягивающим напряжениям;
- расчет по критерию сдвигустойчивости материалов;
- проверка дорожной одежды на морозоустойчивость и расчет при проектировании морозозащитных и теплоизолирующих слоев;

- минимизация запаса прочности по одному из основных критериев с учетом физико-механических характеристик слоев.

С системой «Радон» поставляются базы автомобилей и материалов, созданные по стандартам РФ. Наличие разнообразных библиотек позволяет решать широкий спектр задач по назначению состава движения и конструированию дорожных одежд [14].

Помимо выполнения расчетов по заданным толщинам конструкции, система позволяет выполнять оптимизационный расчет по подбору конструкции минимальной толщины, наименьшего запаса прочности, минимальных показателей по базовой сметной стоимости. В целях экономии дорогостоящих материалов в системе была повышена точность выполнения оптимизационных расчетов для слоев покрытия. В системе можно назначать толщины слоев покрытия в дорожных конструкциях с точностью до 1 мм; точность выполнения оптимизационных расчетов для слоев покрытия составляет 5 мм. Кроме оптимального варианта, который выводится на экран, пользователю предлагается возможность просмотреть список вариантов конструкций, которые также удовлетворяют заданным условиям оптимизации. Проанализировав список вариантов, можно выбрать, допустим, конструкцию не только с большей толщиной, но и с более высоким запасом по растяжению на изгиб [21] и т.д.

Система «IndorPavement» [22], разработанная ООО «ИндорСофт», позволяет выполнять автоматизированный расчёт конструкций дорожных одежд жёсткого и нежёсткого типов. Программные продукты «ИндорСофт» [20] обеспечивают полную поддержку отечественных дорожных норм и стандартов. Теоретические основы и практические методы, а также расчетные схемы и алгоритмы для системы «IndorCAD/Road» были разработаны Г.А. Федотовым, В.Н. Бойковым, А.В. Скворцовым, Б.М. Шумиловым, С.П. Крысиным, С.Р. Люстом, Д.А. Петренко, М.О. Ивановым и др. Система автоматизированного проектирования автомобильных дорог «IndorCAD/Road» развивается с 1991 г. До 2003 г. система разрабатывалась в Инженерном дорожном центре «Индор» (г. Томск), затем была передана для дальнейшего развития в специализированную фирму по разработке программного обеспечения

«ИндорСофт. Инженерные сети и дороги». Программные продукты «ИндорСофт» предназначены для изыскания и проектирования, инженерного обустройства, управления и эксплуатации автомобильных дорог [23].

В системе «IndorPavement» реализована большая часть стандартов и методик отрасли, позволяющих производить расчёты как для нового строительства, так и для усиления существующих конструкций. Вместе с системой поставляется библиотека материалов, содержащая более 1000 различных дорожных материалов. Для всех материалов указаны физико-механические свойства (модуль упругости, плотность, теплопроводность и пр.) в соответствии с нормативными документами и описаниями производителей. В библиотеке также представлены геосинтетические материалы и объёмные георешетки. При необходимости специалист может дополнить библиотеку своими материалами. Одной из уникальных особенностей системы является встроенный мастер создания проектов, включающий в себя альбомы типовых конструкций (шаблонов) дорожной одежды. В системе «IndorPavement» реализована возможность оптимизации конструкции по толщинам слоёв в соответствии с заданными критериями (ценой, прочностью, общей толщиной конструкции и пр.) [22-23].

«Топоматик Robur-Дорожная одежда» – программное обеспечение, предназначенное для расчета нежестких и жестких дорожных одежд автомобильных дорог общей сети и городских дорог и улиц, применимо для проектирования вновь сооружаемых и реконструируемых дорожных одежд и для оценки прочности существующих конструкций [24].

Научно-производственная фирма «Топоматик» была основана в 2003 г. Самый известный продукт компании – это программный комплекс «Robur». Свою историю он ведет с 1991 года, с момента создания простой и удобной инженерной программы. В настоящее время «Топоматик Robur» – это мощный программный продукт, используемый при изыскании, проектировании, строительстве и эксплуатации как автомобильных, так и железных дорог [24].

В соответствии с отечественными дорожными нормами и стандартами в программе реализованы следующие расчеты:

– на прочность:

- по упругому прогибу;
- по условию сдвигоустойчивости подстилающего грунта и малосвязных конструктивных слоев;
- на сопротивление монолитных слоев усталостному разрушению на растяжение при изгибе;
- на статическую нагрузку;
- на морозоустойчивость;
- расчет дренирующего слоя.

Расчетные характеристики конструктивных слоев дорожной одежды выбираются из стандартной базы данных. Имеется возможность вводить в базу данных новые материалы и задавать их характеристики.

Программа позволяет автоматически выполнять перебор толщин конструктивных слоев дорожной одежды в заданных пределах и с заданным шагом. Варианты конструкций, отвечающих условиям прочности, упорядочиваются по критерию стоимости.

Системы «Кредо Радон RU», «IndorPavement», «Топоматик Robur» позволяют выполнять назначение и расчет конструкции нежестких дорожных одежд в соответствии с нормативными документами, вести базу материалов и типовых конструкций, а также осуществлять поиск оптимального решения путем варьирования толщин конструктивных слоев. Но в этих программных средствах не предусмотрена возможность подбора конструкции путем варьирования материалов конструктивных слоев и нет возможности оптимизации конструкции по длине трассы, состоящей из нескольких участков.

1.4 Методы расчета, используемые за рубежом

Анализируя зарубежные методы обеспечения качества нежестких дорожных одежд, можно прийти к выводу о преобладании подходов, основанных на эмпирических исследованиях или лабораторных испытаниях грунтов и материалов. Толщины конструктивных слоев назначаются на основе опыта эксплуатации подобных проектных решений ранее в аналогичных климатических условиях. С применением такого подхода были разработаны методы: метод Асфальтового института США, метод Центральной лаборатории путей сообщения Франции, метод Дорожно-исследовательской лаборатории Великобритании [25-28] и др.

На основе испытаний нескольких сотен дорожных конструкций, проведенных Американской ассоциацией государственных дорожных служащих AASHO в 60-х годах [29], был разработан эмпирический метод расчета дорожных одежд – метод AASHO. В результате испытаний было установлено следующие положения:

1. Существует определенная численная зависимость между воздействием автомобилей с разной нагрузкой на ось при одинаковом удельном давлении от пневматика, дающая возможность установить коэффициенты для приведения различных автомобилей к одному расчетному.

2. Важна не общая толщина дорожной одежды, а приведенная $H_{пр}$, полученная по формуле.

$$H_{пр} = a_1 h_1 + a_2 h_2 + a_3 h_3, \quad (1.1)$$

где a_1, a_2, a_3 – эмпирические коэффициенты, отражающие прочностные свойства покрытия, верхнего и нижнего слоёв основания;

h_1, h_2, h_3 – соответственно толщины покрытия, верхнего и нижнего слоёв основания.

3. Толщина дорожной одежды должна быть тем больше, чем выше повторяемость воздействия автомобилей и чем больше нагрузка на ось автомобиля.

Многие методы расчета нежестких дорожных одежд, применяемые в странах Европы и США, основаны на результатах испытаний AASHO [15-18, 26-28].

Среди эмпирических методов расчета нежестких дорожных одежд также можно выделить методы, основанные на дорожной классификации грунтов. Для характеристики прочности грунтов широко используется особый показатель CBR (California Bearing Ratio – калифорнийское число несущей способности). Этот показатель получают в ходе лабораторных испытаний по определению модуля деформаций грунта, что дает условную характеристику прочности, которая может существенно отличаться от аналогичных показателей грунта в основании дорожной одежды [15-18].

Ряд методов назначения конструкций нежестких дорожных одежд (Япония, Франция, Германия) основывается на использовании альбомов типовых конструкций. Альбомы содержат варианты равнопрочных дорожных одежд для разной интенсивности движения [15-18].

Существуют также зарубежные методы, включающие и теоретический подход. Например, широко используется в проектной практике метод компании Шелл (авторы Дормон и Эдвардс). Этот метод основан на опытах AASHO и одновременно учитывает чисто теоретические положения о работе многослойной системы. Для упрощения многослойная система приводится к трехслойной: верхний слой, обработанный органическими вяжущими материалами, нижние слои из дискретных материалов и грунта земляного полотна. Грунт характеризуется модулем упругости или показателем CBR, верхний слой – динамическим модулем упругости, слои основания – модулем упругости, значение которых для верхнего слоя должно превосходить величину модуля упругости для нижнего слоя не более чем в 3-4 раза [15-18].

На сегодняшний день крупнейшей международной организацией, осуществляющей международную координацию в области транспорта, автомобильных дорог и градостроительства, является «Постоянная международная ассоциация дорожных Конгрессов» (ПМАДК) или «Permanent International Association of Road Congresses» (PIARC) [30-34], которая проводит Всемирный дорожный конгресс 1 раз в 4 года в разных странах мира. В рамках конгрессов PIARC рассматривается ряд важных вопросов касательно международного сотрудничества и обмена опытом между

дорожными администрациями, в том числе и в сфере проектирования автомобильных дорог. По материалам отчета Технического комитета 4.3 «Дорожные одежды» Всемирной дорожной ассоциации (PIARC-AIPCR) [30-31] была представлена концепция вечных дорожных одежд. Из-за особенностей эксплуатации срок службы дорожных одежд составляет не более 20-25 лет, далее возникает необходимость капитального ремонта. В связи с этим обстоятельством в начале нынешнего столетия начались разработки концепции дорожных одежд с большой продолжительностью жизни (вечных дорожных одежд). В США под термином «вечная» подразумевают хорошо спроектированную дорожную одежду, прослужившую более 50 лет.

В результате наблюдений за ходом эксплуатации дорожных одежд было выявлено, что реальный срок службы конструкции может оказаться больше запроектированного. Слои дорожной одежды изнашиваются в различные сроки, так верхние слои, подвергаясь наибольшему воздействию окружающей среды, разрушаются быстрее – образуются колеи, трещины и другие дефекты. В связи с этим Европейская группа «Дороги с большой продолжительностью жизни» (ELLPAG) предложила понятие, применимое ко всем типам дорог – дороги с большой продолжительностью жизни. Это дороги, срок эксплуатации которых составляет более 50 лет при условии соблюдения требований эксплуатации и с учетом замены верхнего слоя покрытия в случае его преждевременного разрушения. Также ведутся исследования по разработке материалов для устройства верхних слоев дорожной одежды, способных выдерживать большие воздействия без разрушения [26-35].

Для более точного проектирования покрытия дороги и предсказания ее цикла жизни разработан механико-эмпирический метод расчета нежестких дорожных одежд (MEPDG) [32, 36]. Данный метод включает в себя математические модели, описывающие соотношение между механическими свойствами покрытия, климатическими данными, подвижными нагрузками, которым подвергается конструкция. MEPDG является результатом многолетней работы, проведенной совместной группой AASHTO по дорожным покрытиям в сотрудничестве с NCHRP (2004) и FHWA, чтобы обеспечить методологию проектирования дорожных покрытий на основе

механико-эмпирического подхода. MEPDG основывается на механико-эмпирических подходах к прогнозированию следующих типов разрушений:

- усталостное разрушение асфальтобетона (нисходящее и восходящее);
- постоянная деформация (колееобразование) слоев дорожной одежды;
- разрушение асфальтобетона (НМА) при действии температуры окружающей среды.

Проектирование дорожного покрытия с использованием MEPDG представляет собой итерационный процесс, включающий в себя несколько этапов.

Первый этап – назначение конструкции. Данный этап является достаточно трудоемким, так как необходимо учесть большое количество параметров. Используются детальные климатические данные (почасовая температура, осадки, ветер, относительная влажность воздуха и др.), необходимые для прогнозирования температуры и содержания влаги в каждом из слоев дорожного покрытия, а в последствии и разрушения дорожного покрытия; выполняется анализ интенсивности движения, заключающийся в оценке диапазона распределения нагрузки на ось (одиночные, tandemные, трехосные и составные нагрузки на ось); вводятся характеристики грунта и материалов дорожного покрытия.

Второй этап процесса проектирования – это структурный анализ и прогнозирование показателей износоустойчивости. Это итерационный процесс, который начинается с расчета первоначального варианта конструкции, полученной путем проектирования или на основе альбома типовых решений. Далее выполняется прогнозирование разрушений дорожного покрытия. Если данный вариант конструкции не удовлетворяет заданным критериям, то конструкция корректируется и процесс повторяется до тех пор, пока не будут достигнуты необходимые значения.

Третий этап процесса проектирования заключается в выборе вариантов конструкций, удовлетворяющих требованиям прочности, а также выборе наиболее экономичного варианта конструкции.

У MEPDG есть несколько принципиальных отличий от методов, используемых в России. Главным из них является прогнозирование изменения состояния дорожной одежды во времени службы. Для прогноза пользуются рядом эмпирических

зависимостей, калиброванных по экспериментальным данным, полученным при испытаниях дорожных одежд на стендах и путем обследования многочисленных опытных участков. Срок службы разделяют на много сравнительно коротких (например, двухнедельных) периодов, в течение каждого из которых влажность грунта и температура воздуха принимается постоянной, определяют поврежденность от движения в течение каждого из них, а затем суммируют [32, 36].

Современные методы расчета нежестких дорожных одежд, применяемые за рубежом, сочетают эмпирический и теоретический подходы и предполагают проведение большого объема расчетов, выполнение которых возможно только с применением программных средств.

1.5 Зарубежное программное обеспечение для расчета конструкции нежестких дорожных одежд

Развитие и внедрение программного обеспечения для организации проектирования дорожных одежд за рубежом велось с начала 60-х годов. Были разработаны и применялись следующие программные средства:

«*Chevron*» – программное обеспечение, разработанное в начале 1960-х годов компанией «Chevron company (Michelow 1963)» [37]. Позволяет работать с конструкциями, содержащими до 10 слоев, и учитывать до 10 различных видов нагрузки (NHI 2002; Tu 2007).

«*BISAR MAINFRAME*» – данное программное обеспечение было использовано при разработке метода компании Шелл для проектирования дорожных одежд. Совершенная версия для использования на персональном компьютере была выпущена в 1987 году [37].

«*WESLEA*» – программное обеспечение, разработанное экспериментальной группой Инженерного корпуса армии США по водным путям [37]. Оригинальная версия «*WESLEA*» могла рассчитывать конструкцию, содержащую до пяти конструктивных слоев при различных климатических условиях и при 20 различных нагрузках (Van Cauwelaert et al. 1989).

Стандарт MEPDG предполагает обязательное использование информационных технологий. С учетом данного стандарта был разработан ряд программных средств. Так модифицированной версией «WESLEA» является программное обеспечение «JULEA», которое было интегрировано в руководство по механистическому эмпирическому проектированию дорожного покрытия – MEPDG (NCHRP 2004). Следующая версия программного обеспечения, получившего название «MNLAYER», считается более точной, чем «JULEA». При расчете одинаковой конструкции «MNLAYER» выполняет расчет быстрее, чем «JULEA» и «BISAR» [37-38].

«MnPAVE» – программное обеспечение, которое реализует механико-эмпирический подход для прогнозирования состояния нежестких дорожных одежд. Включает три группы входных параметров: климат, интенсивность движения и структура конструкции, а также три уровня проектирования: базовый, средний и продвинутый [36]. «MnPAVE» моделирует дорожные нагрузки на дорожном покрытии с помощью метода анализа многослойных упругих систем (LEA) WESLEA. В результате расчета «MnPAVE» предоставляет ожидаемый срок службы дорожного покрытия, который рассчитывается с использованием коэффициента повреждения, основанного правиле Майнера (правило линейного суммирования повреждений для циклического нестационарного нагружения). Надежность оценивается с помощью моделирования методом Монте-Карло. Существует также исследовательский модуль для анализа срока службы слоев конструкции с различными толщинами. В специальном разделе меню заполняются формы с характеристиками состояния дорожного покрытия для различных сезонов [39].

Механико-эмпирический метод расчета реализован также в программном обеспечении «PerRoad» [40], разработанном в Обернском университете США (David H) для Asphalt Pavement Alliance. В данном программном обеспечении применяется модель упругого анализа многослойной системы WESLEA, а также метод статистического анализа (метод Монте-Карло) для оценки напряжений и деформаций в дорожном покрытии. Моделирование методом Монте-Карло позволяет включать вариативность в анализ для более точного прогнозирования изменений параметров дорожного покрытия. Результатом расчета в «PerRoad» являются оценки в

процентах для повторений нагрузки ниже предельно-допустимых деформаций дорожного покрытия, указанных во входных данных, оценки ущерба от единицы нагрузки и прогнозируемого времени, когда накопленный ущерб приведет к разрушению дорожного покрытия [40, 41].

«*Aashtoware Trouble ME Design*» (AASHTOWare 2013) – это следующее поколение программного обеспечения для проектирования дорожных одежд на основе механико-эмпирического метода расчета (MEPDG) [42, 43]. Данное программное обеспечение расширяет и улучшает возможности предыдущих версий программных продуктов. «*Aashtoware Trouble ME Design*» предоставляет пользователю удобный интерфейс, более высокую скорость вычислений по сравнению с аналогичными программными продуктами, доступ к климатическим данным, возможность сравнения проектов, оптимизация толщины конструктивных слоев, доступ к базам данных проектной организации, гибкие инструменты формирования отчетности. «*Aashtoware Trouble ME Design*» представляет собой инструмент для государственных и частных проектных организаций, который позволяет вычислять напряжения, деформации и прогибы дорожного покрытия, учитывать такие факторы как интенсивность движения, климат, характеристики материалов, чтобы прогнозировать образование разрушений асфальтобетонных покрытий. Данное программное обеспечение не решает всех проблем, связанных с проектированием дорожного покрытия, но представляет собой большой шаг вперед по сравнению с существовавшими ранее подходами, способствует развитию технологий проектирования и прогнозирования разрушений дорожного покрытия.

Используемое за рубежом программное обеспечение позволяет специалистам-проектировщикам выполнять расчет нежестких дорожных одежд в соответствии с современными методиками, работать с библиотеками материалов и осуществлять поиск оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд.

1.6 Анализ методов подбора оптимальной по стоимости затрат на материалы конструкции нежестких дорожных одежд

Среди рисков реализации федерального проекта «Дорожная сеть» наряду с сокращением объемов финансирования в связи с возможным дефицитом бюджета выделяют повышение цен на дорожно-строительные материалы.

Дорожная одежда является наиболее дорогостоящим элементом автомобильной дороги. Поэтому в процессе проектирования конструкции нежестких дорожных одежд необходимо обеспечивать не только прочностные характеристики, но и стремиться к экономичному использованию материалов конструктивных слоев. Применение математических методов оптимизации на стадии проектирования позволяет успешно добиваться снижения строительной стоимости дорог.

Исследования в области автоматизированного проектирования и оптимизации конструкций нежестких дорожных одежд в нашей стране ведутся более 40 лет. Так в 1977 году в Гипродорнии было создано программное обеспечение на основе разработанных Б.М. Наумовым метода и алгоритма математической оптимизации конструкции нежестких дорожных одежд [15, 44]. В качестве критерия оптимальности, определяющего эффективность того или иного варианта конструкции, было предложено использовать строительную стоимость единицы площади дорожной конструкции. В соответствии с данным методом поиск оптимальной конструкции дорожной одежды осуществляется путем варьирования толщин конструктивных слоев. Расчет начинается с нижнего слоя, толщина слоя принимается равной минимальному значению и в каждой итерации увеличивается на один шаг. Толщины вышележащих слоев также устанавливаются равными минимальному значению и остаются фиксированными. В случае получения варианта, удовлетворяющего техническим требованиям, данный вариант запоминают и переходят к варьированию толщин вышележащего слоя. В случае достижения максимальной толщины слоя, но при отсутствии вариантов, удовлетворяющих техническим требованиям, осуществляют увеличение толщины вышележащего слоя на один шаг и возвращаются к варьированию текущего слоя. Варианты, соответствующие требованиям прочности, сравниваются по стоимости материалов в процессе расчета.

Данный подход предполагает сокращение объема вычислений за счет прекращения варьирования толщины слоя в случае обнаружения варианта,

удовлетворяющего техническим требованиям, так как дальнейшее увеличение толщины слоя приведет к повышению его стоимости. Метод предусматривает последовательное варьирование толщин вышележащих слоев, но толщины слоев, расположенных ниже, остаются фиксированными. Таким образом все возможные варианты конструкции не могут быть рассмотрены.

В 1988 году опубликованы методические рекомендации по автоматизации расчетов дорожных одежд нежесткого типа, утвержденные СоюздорНИИ (В.М. Юмашев). Данные рекомендации были составлены П.И. Теляевым, В.А. Мазуровым, А.Е. Мерзликиным, Е.И. Масленковой, Г.А. Муромовой, И.Н. Налобиним, Т.Е. Полтарановой. В рекомендациях предложен алгоритм для расчета и подбора конструкции нежестких дорожных одежд в соответствии с ВСН 46-83 [45], приведены таблицы исходных расчетных характеристик грунтов и материалов, а также основные расчетные зависимости и таблицы для расчета, намечены пути реализации рекомендаций.

В соответствии с ВСН 46-83 общая расчетная схема дорожной одежды нежесткого типа применительно для ЭВМ включает девять конструктивных слоев дорожной одежды и грунтовое полупространство. Каждый слой имеет определенное назначение и допустимый набор материалов. Толщина отсутствующих слоев полагается равной нулю. Таким образом можно получать различные варианты конструкций нежестких дорожных одежд. Алгоритм поиска оптимальных толщин слоев дорожной одежды состоит из пяти блоков. В блоке №1 осуществляется введение исходной информации. В блоке №2 для каждого рассчитываемого слоя вычисляют показатели прочности, под которыми понимают отклонение коэффициентов прочности данной конструкции от соответствующих минимально допустимых при заданном уровне надежности. В случае отрицательного значения одного из данных показателей конструкция считается не удовлетворяющей критериям прочности. В случае отсутствия слоя данного типа показатели принимаются равными нулю. Положительное значение означает соответствие конструкции требованиям прочности по данному критерию.

Корректировка толщин конструктивных слоев в блоке №3 производится в целях обеспечения прочности конструкции и ликвидации излишних запасов прочности. Операции в блоках №2 и №3 могут повторяться многократно до тех пор, пока не будет получена конструкция, соответствующая требованиям прочности. Затем производится проверка конструкции на соответствие требованиям морозоустойчивости. В случае удовлетворения параметров конструкции данному требованию осуществляется нахождение оптимального по строительным затратам варианта дорожной одежды. Иначе выполняются операции из блока №5 для определения толщины слоев одежды, удовлетворяющей требованиям морозозащиты земляного полотна.

Поиск оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд в блоке № 4 осуществляется в несколько этапов. На каждом этапе попарно варьируются толщины определенных в соответствии с методикой слоев. Для каждой итерации определяются строительные затраты как суммарная стоимость материалов, необходимых для устройства конструкции. Вариант с минимальными затратами на материалы, полученный в результате выполнения этапов варьирования, принимается за первое приближение.

Далее осуществляются второе и последующее приближение. Расчет останавливается, когда толщины конструктивных слоев, полученных на различных этапах, будут отличаться не более, чем на 1 см. На выход подаются все конструкции, соответствующие критериям прочности. На основании этих данных из конструкций, незначительно отличающихся между собой по строительным затратам, может быть выбрана наиболее целесообразная в данных условиях по натуральным показателям (энергоёмкости, необходимости расхода дефицитных материалов и т.д.) [45].

Метод, предложенный в ВСН 46-83, позволяет осуществлять расчет конструкции не более чем из 9 слоев. Подбор оптимальной конструкции осуществляется путем варьирования толщин конструктивных слоев методом покоординатного спуска, что не гарантирует рассмотрения всех возможных вариантов конструкции. При большой размерности задачи время поиска оптимального решения может оказаться достаточно большим.

В 1984 году М.Л. Гольдбергом в Ташкентском автомобильно-дорожном институте разработана методика проектирования оптимальных конструкций дорожных одежд требуемой надежности по прочности для одного или нескольких участков дорог, которая позволяет сопоставить имеющиеся в наличии материалы и грунты, и определить объемы их поставок, характеризующиеся минимальной величиной затрат [15, 46].

В рамках данного исследования разработана математическая модель проектирования оптимальных дорожных одежд для одного или нескольких участков дорог. Для варьирования толщин конструктивных слоев предлагается использовать массив дискретных значений допустимых толщин конструктивных слоев. Также модель включает условия сочетаемости материалов, что позволяет формировать допустимые варианты конструкций. Для этого вводится параметр, обозначающий возможность использования конкретного материала для рассматриваемого конструктивного слоя. В случае если материал не допустим для устройства данного конструктивного слоя, или конструктивный слой данного типа отсутствует в расчетной схеме, значение параметра полагается равным нулю. Таким образом возможно получение множества расчетных схем с различным числом конструктивных слоев. Целевая функция оптимизационной модели представляет собой общую сумму затрат по обеспечению всех участков строительства материалами, а также затраты на укладку материалов.

Для поиска оптимальной конструкции предлагается назначение дискретных значений толщин каждого материала и использование полного перебора всех возможных вариантов конструкций. Процесс перебора характеризуется независимостью поисковой процедуры от вида ограничений и целевой функции и гарантирует отыскание глобального экстремума решаемой задачи. Каждому варианту дорожных конструкций отвечают свои оптимальные планы закрепления поставщиков материалов, которые могут быть найдены путем решения транспортной задачи. В связи с большим количеством рассматриваемых вариантов предлагается использовать метод направленного поиска.

Так как целевая функция является линейной – время расчета стоимости конструкции значительно меньше, чем время определения ее допустимости. Поэтому по целевой функции в соответствии с методикой следует применять фильтрующее ограничение. Фильтрующее ограничение представляет собой значение, изменяющееся в зависимости от найденного значения целевой функции. Проверке на допустимость будут подвергаться только те конструкции, стоимость которых ниже достигнутого уровня или отличается от него на заданную величину, что сокращает время, необходимое для поиска оптимального варианта.

Кроме того, Гольдбергом М.Л. разработан и экспериментально обоснован метод расчета надежности дорожных одежд по прочности, позволяющий при проектировании учесть изменчивость толщины и свойств применяемых материалов и грунтов с применением метода статистического моделирования (метод Монте-Карло). Данный метод основан на вычислении частоты событий, характеризующих эмпирическую вероятность безотказности конструкции по критериям напряженно-деформированного состояния. Гольдбергом М.Л. на основе предложенных методов были разработаны алгоритм и программа проектирования оптимальных дорожных одежд, на основе приложенных методов.

Разработанная в рамках описанного выше исследования математическая модель позволяет выполнять проектирование оптимальных дорожных одежд для одного или нескольких участков трассы, оптимизируя конструкцию автомобильной дороги с учетом почвенно-грунтовых, гидрогеологических условий, а также возможности доставки строительных материалов.

Сложность реализации данного метода состоит в учете критерия сочетаемости материалов. Данный критерий должен быть установлен для каждого материала, содержащегося в базе данных, и учитывать многообразие типовых конструкций жестких дорожных одежд.

Выводы по первой главе

В результате анализа зарубежного и отечественного опыта проектирования и расчета нежестких дорожных одежд можно отметить, что современные тенденции в развитии подходов к обеспечению прочности и износоустойчивости конструкций представляют собой трудоемкие процедуры расчета, требующие учета большого количества факторов влияния внешней среды, а также свойств конструктивных материалов и грунта подстилающего полотна. Проверка заданной конструкции на соответствие критериям, приведенным в нормативных документах, представляет собой трудоемкий процесс расчета, точность и эффективность которого может быть увеличена благодаря применению специализированного программного обеспечения.

Значительно повысить скорость и эффективность принятия решений позволяет учет многолетнего опыта наблюдений за сроком службы конструкции в различных климатических зонах. Использование альбомов типовых решений в проектных организациях позволяет значительно сузить диапазон поиска среди возможных вариантов конструкций. Применение средств вычислительной техники обеспечивает возможность доступа к альбомам типовых решений и обширной базе строительных материалов. Тем не менее, следует отметить, что эмпирические методы дают удовлетворительные результаты только в тех случаях, когда конкретные условия строительства соответствуют эталонным условиям ранее построенных участков. Поэтому назначение конструктивных материалов и толщин слоев с опорой на рекомендации, приведенные в альбомах типовых решений, остаются задачей специалиста-проектировщика.

Подбор оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд путем варьирования параметров конструктивных слоев представляет собой итерационный процесс, требующий применения методов математического моделирования и оптимизации.

В данной главе был выполнен обзор методов проектирования автомобильных дорог, обзор отечественного и зарубежного программного обеспечения, а также анализ известных на сегодняшний день методов расчета оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд в соответствии с действующими на территории Российской Федерации нормативными документами.

Анализ применяемых сегодня методов расчета оптимальной конструкции показал, что в основе данных методик лежат переборные методы, кроме того, применяемые сегодня системы проектирования нежестких дорожных одежд предлагают инженерам возможность подбора конструкции только одним способом, а именно путем варьирования толщин конструктивных слоев. В данных программных средствах не предусмотрены возможности оптимизации конструкции путем варьирования дорожно-строительных материалов конструктивных слоев, а также обеспечение однотипности конструкции по длине трассы, состоящей из нескольких участков с разными грунтовыми условиями.

Поэтому целью диссертационной работы является минимизация стоимости строительства нежестких дорожных одежд за счет применения в процессе расчета конструкций методов оптимизации и программного обеспечения, использующего технологию параллельных вычислений. В соответствии с целью поставлены следующие задачи:

1. Предложить математическую модель оптимизации конструкции нежестких дорожных одежд для минимизации стоимости конструкции путем варьирования толщин и материалов конструктивных слоев. Предложить математическую модель многокритериальной оптимизации конструкции нежестких дорожных одежд для минимизации стоимости конструкции, состоящей из нескольких участков, с учетом критерия ее однотипности по продольному профилю трассы.

2. Разработать метод и алгоритм поиска оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд путем варьирования толщин и материалов конструктивных слоев для минимизации стоимости конструкции. Разработать метод и алгоритм поиска оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд, позволяющие получать оптимальные варианты конструкций нежестких дорожных одежд по продольному профилю трассы для различных участков автомобильных дорог в зависимости от климатических и геологических условий с минимальными затратами на сооружение.

3. На основе предложенных моделей и алгоритмов с использованием технологии параллельных вычислений создать программное обеспечение для оптимизации

конструкции нежестких дорожных одежд автомобильных дорог общего пользования.

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ НЕЖЕСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД

2.1 Ограничения задачи расчета оптимальной по стоимости затрат на материалы конструкции

Обоснованием проектного решения конструкции нежестких дорожных одежд является соответствие конструкции необходимым техническим характеристикам, указанным в нормативных документах. Действующие в настоящее время на территории Российской Федерации в качестве нормативного документа отраслевые дорожные нормы (ОДН 218.046-01) содержат указания по конструированию и расчету нежестких дорожных одежд автомобильных дорог общего пользования. ОДН 218.046-01 применимы для проектирования вновь сооружаемых дорожных одежд, новых участков реконструируемых дорог, разработки альбомов типовых конструкций, а также могут использоваться при оценке прочности и при проектировании усиления дорожных одежд существующих дорог. В соответствии с ОДН 218.046-01 проектирование нежесткой дорожной одежды включает в себя следующие этапы:

- назначение конструкции;
- проверка конструкции на соответствие нормативным требованиям;
- выбор наиболее экономичного варианта.

Назначение конструкции включает в себя выбор типа конструкции, установление количества слоев покрытия, основания, при необходимости назначение дополнительных слоев, выбор материалов конструктивных слоев и назначение толщин. Как правило конструкция дорожной одежды обычно назначается по типовому проекту. Альбомы типовых решений содержат рекомендуемые для данных климатических условий конструкции дорожных одежд. Альбомы типовых конструкций могут быть составлены специалистами проектной организации. Также выбор типовых конструкций может осуществляться на основе существующих альбомов типовых конструкций [47-48].

Следует отметить, что варианты типовых конструкций, приведенные в альбомах, носят рекомендательный характер и не могут быть приняты в качестве

окончательного решения. При проектировании необходимо учитывать конкретные климатические, гидрологические и грунтовые условия местности, где планируется строительство дороги.

Проверка конструкции на соответствие нормативным требованиям. Дорожную одежду следует проектировать с требуемым уровнем надежности, под которой понимают вероятность безотказной работы в течение межремонтного периода. Отказ конструкции по прочности физически может характеризоваться образованием продольной и поперечной неровности поверхности дорожной одежды, связанной с прочностью конструкции (поперечные неровности, колея, усталостные трещины), с последующим развитием других видов деформаций и разрушений (частые трещины, сетка трещин, выбоины, просадки, проломы и т. д.) [10, 12].

В соответствии с ОДН 218.046-01 проверка прочности конструкции осуществляется следующими расчетами:

- расчет конструкции в целом по допускаемому упругому прогибу;
- расчет по условию сдвигоустойчивости подстилающего грунта и малосвязных конструктивных слоев;
- расчет конструкции на сопротивление монолитных слоев усталостному разрушению от растяжения при изгибе.

При проектировании дорог в районах сезонного промерзания грунтов необходимо провести проверку конструкции нежесткой дорожной одежды на морозоустойчивость.

Таким образом, согласно ОДН 218.046-01 для обеспечения прочности конструкции в течение заданного срока службы необходимо соответствие следующим условиям.

1. Условие прочности конструкции в целом по допускаемому упругому прогибу:

$$K_{\text{пр}} \leq E_{\text{ТР}} / E_{\text{общ}}, \quad (2.1)$$

где $E_{\text{общ}}$ – общий модуль упругости конструкции (МПа); $E_{\text{ТР}}$ – требуемый модуль упругости конструкции (МПа) с учетом капитальности одежды и интенсивности воздействия нагрузки.

Величину требуемого общего модуля упругости конструкции вычисляют по эмпирической формуле:

$$E_{\text{тр}} = 98,65 [\lg(\Sigma N_p) - c], \text{ (МПа)}, \quad (2.2)$$

где ΣN_p – суммарное расчетное число приложений нагрузки за срок службы дорожной одежды, определяется по формуле (2.3); c – эмпирический параметр, принимаемый равным для расчетной нагрузки на ось 100 кН – 3,55; 110 кН – 3,25; 130 кН – 3,05.

$$\Sigma N_p = 0,7 N_p \frac{K_c}{q^{(T_{\text{сл}}-1)}} T_{\text{р\o\delta}} k_n, \quad (2.3)$$

где N_p – приведенная интенсивность на последний год срока службы, (авт/сут); $T_{\text{р\o\delta}}$ – расчетное число расчетных дней в году, соответствующих определенному состоянию деформируемости конструкции (определяемое в соответствии с ОДН 218.046-01); k_n – коэффициент, учитывающий вероятность отклонения суммарного движения от среднего ожидаемого (ОДН 218.046-01); K_c – коэффициент суммирования (ОДН 218.046-01) определяется по формуле:

$$K_c = \frac{q^{T_{\text{сл}}} - 1}{q - 1}, \quad (2.4)$$

где $T_{\text{сл}}$ – расчетный срок службы (лет) (ОДН 218.046-01); q – показатель изменения интенсивности движения данного типа автомобиля по годам.

Общий расчетный модуль упругости $E_{\text{общ}}$ конструкции определяют с помощью номограммы (ОДН 218.046-01), построенной по решению задачи теории упругости для модели многослойной среды. Приведение многослойной конструкции к эквивалентной однослойной ведут послойно, начиная с подстилающего грунта. На рисунке 2.1 представлена блок-схема алгоритма проверки конструкции нежестких дорожных одежд на прочность по допускаемому упругому прогибу.

2. Условие прочности конструкции по сдвигоустойчивости подстилающего грунта и малосвязных конструктивных слоев:

$$K_{\text{пр}} \leq T_{\text{доп}} / T, \quad (2.5)$$

где $K_{\text{пр}}$ – коэффициент прочности, определяемый с учетом заданного уровня надежности; $T_{\text{доп}}$ – допустимое напряжение сдвига, обусловленное сцеплением в грунте

(МПа); T – активное напряжение сдвига в грунте или слабо-вязном материале (МПа).

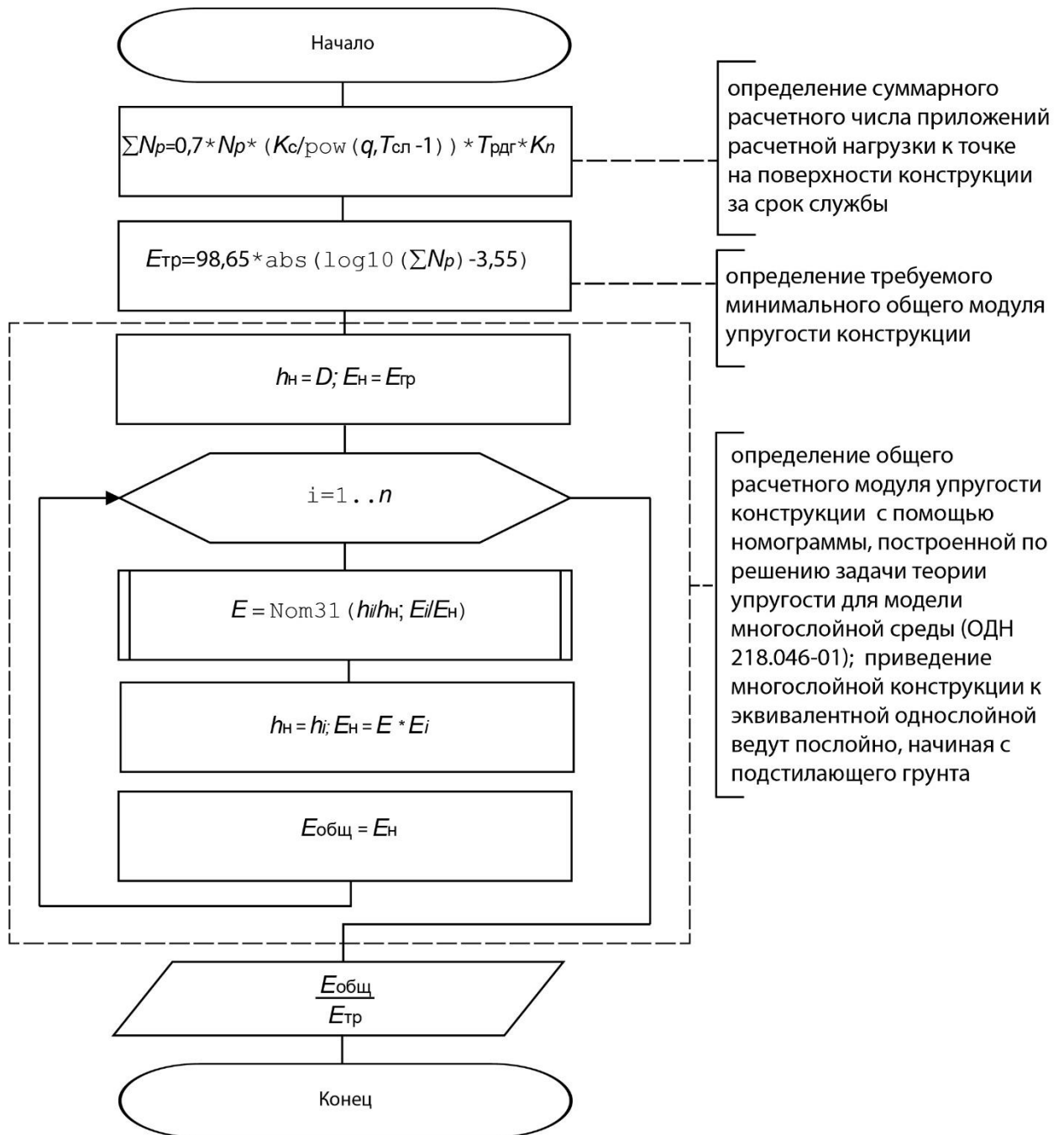


Рисунок 2.1 – Блок-схема алгоритма проверки конструкции на прочность по допускаемому упругому прогибу

Действующие в грунте или в песчаном слое активные напряжения сдвига (T) вычисляют по формуле:

$$T = \bar{\tau}_n \cdot p \text{ (МПа)}, \quad (2.6)$$

где $\bar{\tau}_n$ – удельное активное напряжение сдвига от единичной нагрузки, определяемое с помощью номограммы (ОДН 218.046-01); p – расчетное давление от колеса на

покрытие (МПа).

Предельное активное напряжение сдвига $T_{пр}$ в грунте рабочего слоя (или в песчаном материале промежуточного слоя) определяют по формуле:

$$T_{пр} = c_N k_d + 0,1 \gamma_{cp} z_{on} \operatorname{tg} \varphi_{CT} \text{ (МПа)}, \quad (2.7)$$

где c_N – сцепление в грунте земляного полотна (или в промежуточном песчаном слое) (МПа); k_d – коэффициент, учитывающий особенности работы конструкции на границе песчаного слоя с нижним слоем несущего основания; z_{on} – глубина расположения поверхности слоя (см), проверяемого на сдвигоустойчивость, от верха конструкции, см; γ_{cp} – средневзвешенный удельный вес конструктивных слоев, расположенных выше проверяемого слоя (кг/см³); φ_{CT} – расчетная величина угла внутреннего трения материала проверяемого слоя при статическом действии нагрузки.

На рисунке 2.2 представлена блок-схема алгоритма проверки конструкции на прочность по сдвигоустойчивости подстилающего грунта и малосвязных конструктивных слоев.

3. Условие сопротивления монолитных слоев конструкции усталостному разрушению от растяжения при изгибе:

$$K_{пр} \leq R_{доп} / \sigma_r, \quad (2.8)$$

где $R_{доп}$ – предельное допустимое растягивающее напряжение материала слоя с учетом усталостных явлений (МПа); σ_r – наибольшее растягивающее напряжение в рассматриваемом слое (МПа), найденное путем расчета.

$$\sigma_r = \bar{\sigma}_r \cdot p \cdot \kappa_\epsilon \text{ (МПа)}, \quad (2.9)$$

где $\bar{\sigma}_r$ – растягивающее напряжение от единичной нагрузки при расчетных диаметрах площадки, передающей нагрузку (МПа), определяемое по номограмме (ОДН 218.046-01); κ_ϵ – коэффициент, учитывающий особенности напряженного состояния покрытия конструкции под спаренным баллоном, принимают равным 0,85 (при расчете на однобаллонное колесо $\kappa_\epsilon = 1,00$); p – расчетное давление (МПа) назначают в соответствии с (ОДН 218.046-01).

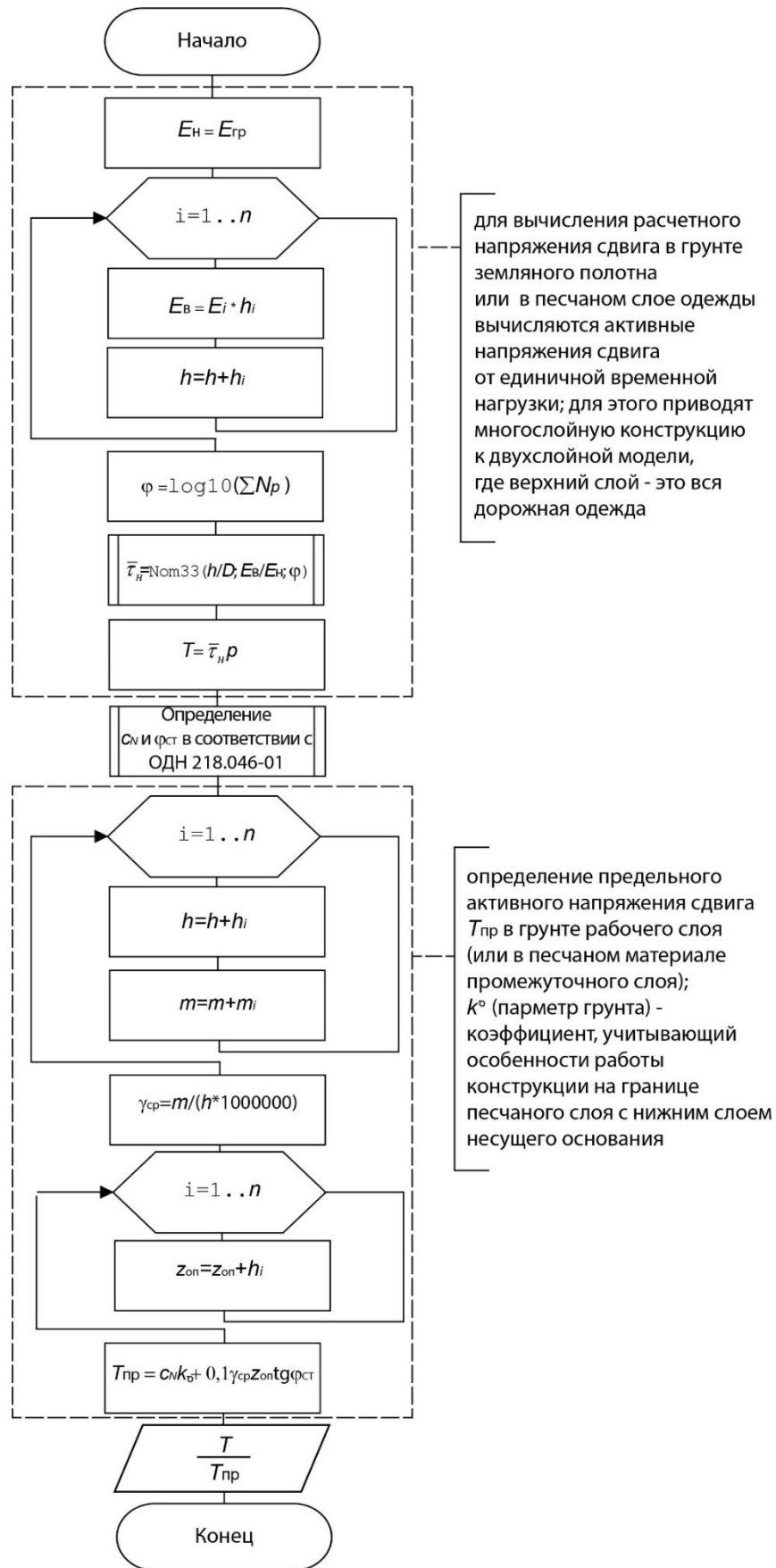


Рисунок 2.2 – Блок-схема алгоритма проверки конструкции на прочность по сдвигоустойчивости подстилающего грунта и малосвязных конструктивных слоев

Прочность материала монолитного слоя при многократном растяжении при изгибе определяют по формуле:

$$R_{\text{доп}} = R_o k_1 k_2 (1 - \nu_R t) \text{ (МПа)}, \quad (2.10)$$

где R_o – нормативное значение предельного сопротивления растяжению (прочность) при изгибе (МПа) при расчетной низкой весенней температуре при однократном приложении нагрузки; k_1 – коэффициент, учитывающий снижение прочности вследствие усталостных явлений при многократном приложении нагрузки; k_2 – коэффициент, учитывающий снижение прочности во времени от воздействия погодных климатических факторов; ν_R – коэффициент вариации прочности на растяжение; t – коэффициент нормативного отклонения.

Коэффициент k_1 , отражающий влияние на прочность усталостных процессов, вычисляют по формуле:

$$k_1 = \frac{\alpha}{\sqrt[m]{\Sigma N_p}}, \quad (2.11)$$

где ΣN_p – расчетное суммарное число приложений расчетной нагрузки за срок службы монолитного покрытия (2.3); m – показатель степени, зависящий от свойств материала рассчитываемого монолитного слоя; α – коэффициент, учитывающий различие в реальном и лабораторном режимах растяжения повторной нагрузкой, а также вероятность совпадения во времени расчетной (низкой) температуры покрытия и расчетного состояния грунта рабочего слоя по влажности.

На рисунке 2.3 представлена блок-схема алгоритма проверки конструкции на прочность по сопротивлению монолитных слоев конструкции усталостному разрушению от растяжения при изгибе.

В районах сезонного промерзания грунтов земляного полотна при неблагоприятных грунтовых и гидрологических условиях наряду с требуемой прочностью и устойчивостью должна быть обеспечена достаточная морозоустойчивость:

$$l_{\text{пуч}} \leq l_{\text{доп}}, \quad (2.12)$$

где $l_{\text{пуч}}$ – расчетное (ожидаемое) пучение грунта земляного полотна (см); $l_{\text{доп}}$ – допускаемое для данной конструкции пучение грунта (см).

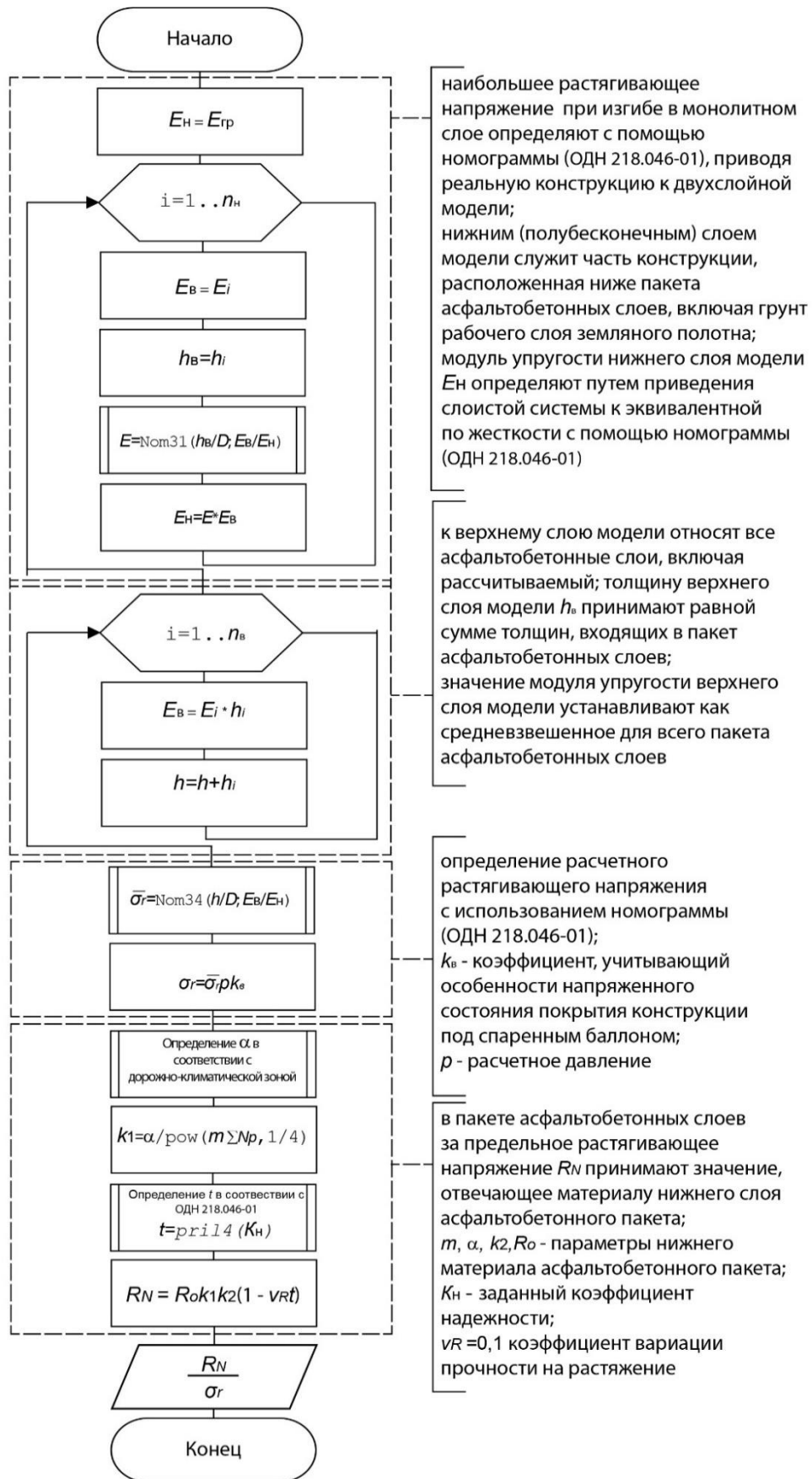


Рисунок 2.3 – Блок-схема алгоритма проверки конструкции на прочность по сопротивлению монолитных слоев усталостному разрушению от растяжения при изгибе

$$l_{\text{пуч}} = l_{\text{пуч ср}} K_{\text{УГВ}} K_{\text{пл}} K_{\text{гр}} K_{\text{нагр}} K_{\text{вл}} (\text{см}), \quad (2.13)$$

где $l_{\text{пуч ср}}$ – величина морозного пучения (см) при осредненных условиях, определяемая в зависимости от толщины дорожной одежды (включая дополнительные слои основания), группы грунта по степени пучинистости и глубины промерзания; $K_{\text{УГВ}}$ – коэффициент, учитывающий влияние расчетной глубины залегания уровня грунтовых или длительно стоящих поверхностных вод; при отсутствии влияния грунтовых или длительно стоящих поверхностных вод следует принимать: для супеси тяжелой и пылеватой и суглинка $K_{\text{УГВ}} = 0,53$; для песка и супеси легкой и крупной $K_{\text{УГВ}} = 0,43$; $K_{\text{пл}}$ – коэффициент, зависящий от степени уплотнения грунта рабочего слоя; $K_{\text{гр}}$ – коэффициент, учитывающий влияние гранулометрического состава грунта основания насыпи или выемки; $K_{\text{нагр}}$ – коэффициент, учитывающий влияние нагрузки от собственного веса вышележащей конструкции на грунт в промерзающем слое и зависящий от глубины промерзания; $K_{\text{вл}}$ – коэффициент, зависящий от расчетной влажности грунта.

На рисунке 2.4 представлена блок-схема алгоритма проверки конструкции на морозоустойчивость.

Стоимость конструкции нежесткой дорожной одежды складывается из расходов на строительство и стоимости дорожно-строительных материалов конструктивных слоев. Удельную стоимость m^2 конструкции S можно определить по формуле:

$$S = \sum_{i=1}^n c_i h_i \text{ (руб./м}^2\text{)}, \quad (2.14)$$

где h_i – толщина i -го конструктивного слоя (м); c_i – стоимость 1 m^3 материала (руб./ m^3) i -го слоя; n – см количество конструктивных слоев [49-58].

Выбор наиболее экономичного варианта. Стоимость конструкции нежестких дорожных одежд определяет стоимость строительства дороги в целом, так как дорожная одежда является самым материалоемким элементом проекта. Таким образом, задача поиска оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд может быть сведена к поиску такого варианта, где стоимость единицы площади конструкции являлась бы минимальной при условии соответствия конструкции

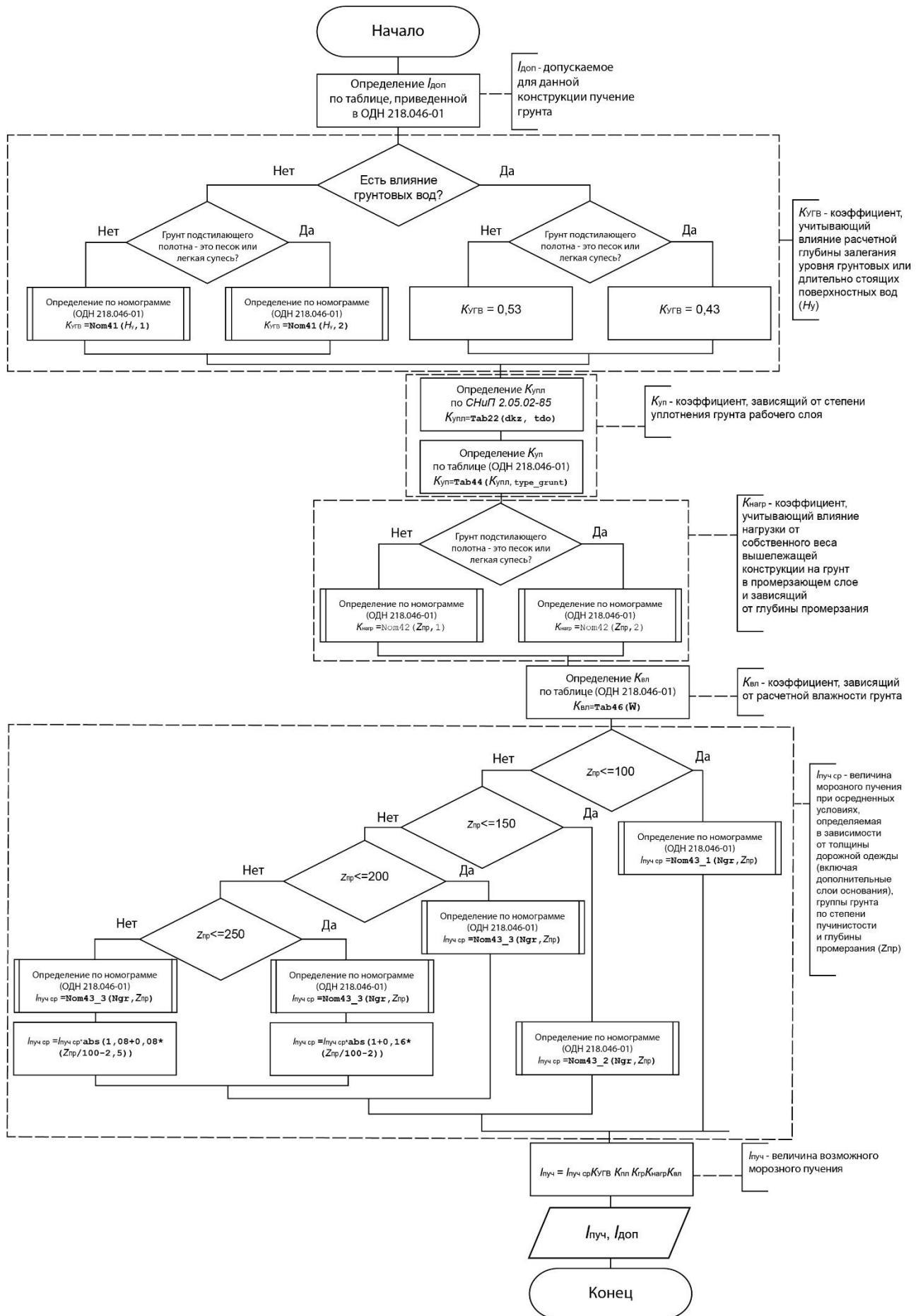


Рисунок 2.4 – Блок-схема алгоритма проверки конструкции на морозоустойчивость

техническим требованиям, указанным в нормативных документах. Данная задача не может быть решена аналитически, в связи с чем целесообразно применение методов математической оптимизации.

2.2 Концептуальная постановка задачи оптимизации конструкций нежестких дорожных одежд

Методы математического моделирования позволяют с минимальными временными и трудовыми затратами выполнить оценку и при необходимости оптимизировать полученное проектное решение. Так по данным, приведенным в [20], проектирование оптимальной конструкции дорожной одежды нежесткого типа по критерию «минимальная стоимость строительства» позволяет при выполнении всех требований к прочности дорожной одежды снизить на 5-18 % стоимость строительства дороги. Применение специализированного программного обеспечения позволяет сократить сроки проектных работ не менее чем на 20-25 % с соответствующим ростом производительного труда. При этом размеры капиталовложений в строительство автомобильных дорог и материалоемкость проектных решений оказываются на 10-15 % меньше, чем эти же показатели, полученные при применении традиционной технологии расчета [20, 59-63].

Согласно ОДН 218.046-01, задача расчета конструкции нежестких дорожных одежд сводится к подбору толщин слоев одежды в вариантах, намеченных при проектировании, или к выбору материалов с соответствующими деформационными и прочностными характеристиками при заданных толщинах слоев [12].

На основе норм и указания по проектированию и расчету нежестких одежд автомобильных дорог общей сети, приведенных в ОДН 218.046-01, предложена концептуальная модель расчета конструкции нежестких дорожных одежд (рис. 2.5).



Рисунок 2.5 – Концептуальная модель расчета конструкции нежестких дорожных одежд

Входными параметрами модели являются характеристики строительных материалов и параметры внешней среды: физико-технические характеристики грунтов, грузонапряженность дороги, ожидаемые транспортно-эксплуатационные качества дороги, заданный срок службы; климатические характеристики местности, прочностные и стоимостные характеристики возможных дорожно-строительных материалов.

Выходными параметрами являются толщины конструктивных слоев и перечень выбранных дорожно-строительных материалов.

Толщины конструктивных слоев представляют собой набор дискретных значений, ограниченных минимальной рекомендуемой толщиной слоя и максимальной заданной толщиной, с шагом в соответствии с нормативной документацией.

Альбом типовых решений может содержать произвольное число допустимых вариантов для каждого конструктивного слоя. Для программной реализации возможности работы с альбомами типовых решений необходимо организовать хранение параметров конструктивных материалов в базе данных. Таким образом материалы конструктивных слоев также могут быть представлены набором дискретных значений и включены в модель при помощи идентификаторов материалов в базе данных. Идентификаторы представляют собой целые натуральные числа. По данному идентификатору (ключевому полю) могут быть определены параметры материала конструктивного слоя такие, как модули упругости материалов конструктивных слоев, теплофизические характеристики конструктивных слоев. В таблицах 2.1-2.6 приведено описание структуры базы данных для хранения информации о строительных материалах и параметрах внешней среды проекта.

Часть параметров, необходимых для расчета конструкции нежестких дорожных одежд в ОДН 218.046-01 представлена в виде графиков и номограмм. Так для определения напряжений и деформаций, входящих в выражения (2.1)-(2.3), используются номограммы, построенные по решению задач теории упругости для модели многослойной среды [49, 50].

Так как необходимо обращение программной системы в процессе расчета к номограммам, приведенным в ОДН 218.046-01, потребовалось перевести эти данные в цифровое представление. Для включения вычислений по номограммам в оптимизационную модель расчета конструкции нежесткой дорожной одежды получены соответствующие аналитические выражения (прил. Ж).

Таблица 2.1 – Таблица для хранения информации о параметрах конструкции

Поле	Тип	Пояснение
iduch	INT, AUTO INCREMENT, PRIMARY KEY, NOT NULL	Идентификатор участка
tdo	VARCHAR, NOT NULL	Тип дорожной одежды
nameuch	VARCHAR, NOT NULL	Наименование участка
lineuch	FLOAT, NOT NULL	Протяженность участка
katdo	INT, NOT NULL	Категория дорожной одежды
tn	VARCHAR, NOT NULL	Тип нагрузки
kn	FLOAT, NOT NULL	Заданный коэффициент надежности
tcl	FLOAT, NOT NULL	Срок службы
trdg	FLOAT, NOT NULL	Количество расчетных дней в году
dkz	INT, NOT NULL	Дорожно-климатическая зона
np	FLOAT, NOT NULL	Интенсивность движения на конец срока службы
q	FLOAT, NOT NULL	Приращение интенсивности
nom_w	INT, NOT NULL	Номер изолинии на карте

Таблица 2.2 – Таблица для хранения информации о параметрах участка

Поле	Тип	Пояснение
idconstr	INT, AUTO INCREMENT, PRIMARY KEY, NOT NULL	Идентификатор участка
idroad	INT, NOT NULL	Идентификатор конструкции
nameconstr	VARCHAR, NOT NULL	Наименование участка
lconstr	FLOAT, NOT NULL	Протяженность участка (км)
idgrunt	INT, NOT NULL	Идентификатор грунта
sy	INT, NOT NULL	Схема увлажнения
hy	FLOAT, NOT NULL	Глубина залегания грунтовых вод

Таблица 2.3 – Таблица для хранения информации о грунтах

Поле	Тип	Пояснение
idgrunt	INT, AUTO INCREMENT, PRIMARY KEY, NOT NULL	Идентификатор грунта
namegrunt	VARCHAR, NOT NULL	Наименование грунта
typegrunt	VARCHAR, NOT NULL	Тип грунта
wpe	FLOAT, NOT NULL	Расчетная влажность дисперсного грунта
e	FLOAT, NOT NULL	Модуль упругости
cn1	FLOAT, NOT NULL	Сцепление, МПа при суммарном числе приложенных нагрузки (ΣN_p) 1
cn3	FLOAT, NOT NULL	Сцепление, МПа при суммарном числе приложенных нагрузки (ΣN_p) 10^3
cn4	FLOAT, NOT NULL	Сцепление, МПа при суммарном числе приложенных нагрузки (ΣN_p) 10^4
cn5	FLOAT, NOT NULL	Сцепление, МПа при суммарном числе приложенных нагрузки (ΣN_p) 10^5
cn6	FLOAT, NOT NULL	Сцепление, МПа при суммарном числе приложенных нагрузки (ΣN_p) 10^6
j1	FLOAT, NOT NULL	Угол внутреннего трения, град. при суммарном числе приложенных нагрузки (ΣN_p) 1
j3	FLOAT, NOT NULL	Угол внутреннего трения, град. при суммарном числе приложенных нагрузки (ΣN_p) 10^3
j4	FLOAT, NOT NULL	Угол внутреннего трения, град. при суммарном числе приложенных нагрузки (ΣN_p) 10^4
j5	FLOAT, NOT NULL	Угол внутреннего трения, град. при суммарном числе приложенных нагрузки (ΣN_p) 10^5
j6	FLOAT, NOT NULL	Угол внутреннего трения, град. при суммарном числе приложенных нагрузки (ΣN_p) 10^6
kd	FLOAT, NOT NULL	Коэффициент, учитывающий особенности работы конструкции на границе песчаного слоя с нижним слоем несущего основания.
puch	INT, NOT NULL	Группа грунта по степени пучинистости
type_grunt	INT, NOT NULL	Тип грунта для морозоустойчивости

Таблица 2.4 – Таблица для хранения информации о конструктивных материалах для устройства слоев покрытия нежестких дорожных

Поле	Тип	Пояснение
idpokritie	INT, AUTO INCREMENT, PRIMARY KEY, NOT NULL	Идентификатор материала покрытия, первичный ключ
plotnost	VARCHAR, NOT NULL	Плотность и вязкость

Продолжение таблицы 2.4

Поле	Тип	Пояснение
marka	VARCHAR, NOT NULL	Марка
type	VARCHAR, NOT NULL	Тип смеси
e	FLOAT, NOT NULL	Расчетные значения модуля упругости E , МПа
m	FLOAT, NOT NULL	Параметр для расчета на растяжение на изгибе
a2	FLOAT, NOT NULL	Параметр для расчета на растяжение на изгибе
a35	FLOAT, NOT NULL	Параметр для расчета на растяжение на изгибе
ro	FLOAT, NOT NULL	Нормативные значения сопротивление растяжению при изгибе R_o , МПа
ro2	FLOAT, NOT NULL	Нормативные значения сопротивление растяжению при изгибе R_o , МПа для песчаного асфальтобетона.
eup10	FLOAT, NOT NULL	Кратковременный модуль упругости E , МПа, при температуре покрытия, °C
eup20	FLOAT, NOT NULL	Кратковременный модуль упругости E , МПа, при температуре покрытия, °C
eup30	FLOAT, NOT NULL	Кратковременный модуль упругости E , МПа, при температуре покрытия, °C
eup40	FLOAT, NOT NULL	Кратковременный модуль упругости E , МПа, при температуре покрытия, °C
eup50	FLOAT, NOT NULL	Кратковременный модуль упругости E , МПа, при температуре покрытия, °C
esd20	FLOAT, NOT NULL	Расчетный модуль упругости E при статическом действии нагрузки, МПа, при расчетной температуре, °C
esd30	FLOAT, NOT NULL	Расчетный модуль упругости E при статическом действии нагрузки, МПа, при расчетной температуре, °C
esd40	FLOAT, NOT NULL	Расчетный модуль упругости E при статическом действии нагрузки, МПа, при расчетной температуре, °C
esd50	FLOAT, NOT NULL	Расчетный модуль упругости E при статическом действии нагрузки, МПа, при расчетной температуре, °C
p	FLOAT, NOT NULL	Плотность r , кг/м ³
kt	FLOAT, NOT NULL	Коэффициент теплопроводности l , Вт/(мК)

Таблица 2.5 – Таблица для хранения информации о конструктивных материалах для устройства слоев основания нежестких дорожных

Поле	Тип	Пояснение
idosnovanie	INT, AUTO INCREMENT, PRIMARY KEY, NOT NULL	Идентификатор материала основания, первичный ключ
type	VARCHAR, NOT NULL	Тип материала основания

Продолжение таблицы 2.5

Поле	Тип	Пояснение
marka	VARCHAR, NOT NULL	Марка
e1	FLOAT, NOT NULL	Модуль упругости
e2	FLOAT, NOT NULL	Модуль упругости
kt	FLOAT, NOT NULL	Теплопроводность
ktmz	FLOAT, NOT NULL	Теплопроводность в мерзлом состоянии

Таблица 2.6 – Таблица для хранения информации о конструктивных материалах для устройства дополнительных слоев нежестких дорожных одежд

Поле	Тип	Пояснение
iddopolnit	INT, AUTO INCREMENT, PRIMARY KEY, NOT NULL	Идентификатор материала для устройства дополнительных слоев
namedopolnit	VARCHAR, NOT NULL	Наименование материала для устройства дополнительных слоев
e1	FLOAT, NOT NULL	Модуль упругости
e2	FLOAT, NOT NULL	Модуль упругости
ktt	FLOAT, NOT NULL	Коэффициент теплопроводности в талом состоянии
ktmz	FLOAT, NOT NULL	Коэффициент теплопроводности в мерзлом состоянии

Благодаря применению методов оптимизации при проектировании нежестких дорожных одежд возможно значительное увеличение количества рассматриваемых вариантов проектных решений, определение условий, при которых целевые показатели достигают экстремальных значений [20].

2.3 Математическая модель для оптимизации конструкции нежестких дорожных одежд путем варьирования толщин и дорожно-строительных материалов конструктивных слоев

В результате формализации концептуальной модели получена математическая модель, позволяющая получать минимальные по стоимости и удовлетворяющие требованиям прочности и морозоустойчивости конструкции. Ограничения модели продиктованы требованиями, приведенными в ОДН 218.046-01 (2.1, 2.5, 2.8, 2.12). Целевой функцией является стоимость 1 м² конструкции дорожной одежды (2.14). Переменными параметрами являются толщины и материалы конструктивных слоев.

Минимальные толщины конструктивных слоев и шаг варьирования регламентируются нормативными документами. Варьирование материалов конструктивных слоев осуществляется на основе альбомов типовых решений [51].

$$S(h_1, t_1, h_2, t_2, \dots, h_n, t_n) \rightarrow \min_{h_i, t_i} \quad (2.14)$$

$$\text{при ограничениях} \quad \begin{cases} f_1(h_1, t_1, h_2, t_2, \dots, h_n, t_n) \geq k_1 \\ f_2(h_1, t_1, h_2, t_2, \dots, h_n, t_n) \geq k_2 \\ f_3(h_1, t_1, h_2, t_2, \dots, h_n, t_n) \geq k_3 \\ f_4(h_1, t_1, h_2, t_2, \dots, h_n, t_n) \geq k_4 \\ h_i \in H_i \\ t_i \in T_i \\ n \geq 3 \end{cases} \quad (2.15)$$

где k_1 – коэффициент прочности по условию сдвигоустойчивости подстилающего грунта и малосвязных конструктивных слоев (2.5); $f_1(h_1, t_1, h_2, t_2, \dots, h_n, t_n)$ – отношение допустимого напряжения сдвига к активному напряжению сдвига $T_{\text{доп}} / T$ (2.6), (2.7), вычисляется в соответствии с ОДН 218.046-01, блок-схема алгоритма вычисления приведена на рисунке 2.2; k_2 – коэффициент прочности по условию сопротивления монолитных слоев усталостному разрушению от растяжения при изгибе необходимо выполнение (2.8); $f_2(h_1, t_1, h_2, t_2, \dots, h_n, t_n)$ – отношение предельного допустимого растягивающего напряжения к наибольшему растягивающему напряжению в рассматриваемом слое $R_{\text{доп}} / \sigma_r$ (2.9), (2.10), блок-схема алгоритма вычисления приведена на рисунке 2.3; k_3 – коэффициент прочности по условию для упругого прогиба (2.1); $f_3(h_1, t_1, h_2, t_2, \dots, h_n, t_n)$ – отношение требуемого модуля упругости конструкции к общему модулю упругости $E_{\text{тр}} / E_{\text{общ}}$ (2.2), блок-схема алгоритма вычисления приведена на рисунке 2.1; k_4 – допускаемое для данной конструкции пучение грунта (2.12); $f_4(h_1, t_1, h_2, t_2, \dots, h_n, t_n)$ – расчетное (ожидаемое) пучение грунта земляного полотна (2.13), блок-схема алгоритма вычисления приведена на рисунке 2.4; $S(h_1, t_1, h_2, t_2, \dots, h_n, t_n)$ – удельная стоимость погонного метра конструкции (2.14); h_i – толщина i -го конструктивного слоя; H_i – допустимые толщины для i -го конструктивного слоя; t_i – материал i -го конструктивного слоя; T_i – допустимые материалы для i -го конструктивного слоя; n – количество конструктивных слоев дорожной одежды.

Предложенная математическая модель (2.14)-(2.15) позволяет получать минимальные по стоимости и удовлетворяющие требованиям прочности и морозоустойчивости конструкции путем варьирования толщин и дорожно-строительных материалов конструктивных слоев. Расчет оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд представляет собой задачу дискретной оптимизации с нелинейными ограничениями, которая не может быть решена аналитически.

2.4 Математическая модель для многокритериальной оптимизации конструкции нежестких дорожных одежд по продольному профилю трассы, состоящей из нескольких участков

В качестве обобщения математической модели (2.14)-(2.15) предложена многокритериальная оптимизационная модель для расчета конструкции по продольному профилю трассы, состоящей из нескольких участков. В этом случае стоимость всей конструкции может быть представлена как:

$$Q_1 = b \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j} c_i h_i L_j \text{ (руб.)}, \quad (2.16)$$

где n_j – количество слоев конструкции на j -м участке трассы; $\sum_{i=1}^{n_j} c_i h_i$ – удельная стоимость 1 м² конструкции на участке трассы j (руб./м²); L_j – длина j -го участка трассы (м); b – ширина трассы (м); m – количество участков трассы с различными геологическими и климатическими условиями.

Для получения варианта конструкции с минимальными затратами на сооружение необходимо решить задачу:

$$Q_1(S_1, L_1, S_2, L_2, \dots, S_n, L_n) \rightarrow \min_{S_j L_j}. \quad (2.17)$$

Однотипная на всей протяженности трассы конструкция нежестких дорожных одежд является наиболее простым с технологической точки зрения и, соответственно, наиболее дешевым вариантом. Параметры грунта подстилающего полотна на участке строительства трассы оказывают значительное влияние на прочностные

характеристики конструкции нежестких дорожных одежд. Грунтовые условия могут изменяться по длине проектируемой автомобильной дороги.

Для учета изменения климатических и геологических условий по длине трассы введем параметр, позволяющий определить необходимость изменения конструкции на текущем участке:

$$y_j = \begin{cases} 1, & \text{если } j = 1, \text{ или на предыдущем участке используется отличная конструкция;} \\ 0, & \text{если на предыдущем участке используется та же конструкция и } j \neq 1 \end{cases} \quad (2.18)$$

Тогда количество участков трассы, где происходит смена конструкции, можно обозначить как:

$$Q_2 = \sum_{j=1}^m y_j, \quad (2.19)$$

Q_2 принимает значения от 1 до m , где m – количество участков трассы с различными климатическими и геологическими условиями. Если $Q_2 = 1$ – конструкция однородна по длине всей трассы. Назначение однородной конструкции нежестких дорожных одежд на всей протяженности трассы не всегда возможно. Чем больше значение Q_2 , тем больше различных конструкций используется. Для получения оптимального варианта конструкции необходимо решить задачу:

$$Q_2(y_1, y_2, \dots, y_n) \rightarrow \min_{y_i}. \quad (2.20)$$

Таким образом задача расчета конструкций нежестких дорожных одежд, однотипных по продольному профилю трассы, состоящей из нескольких участков, с учетом критерия однотипности и с минимальными затратами на сооружение (2.17), (2.20), представляет собой задачу многокритериальной оптимизации. Для приведения задачи к однокритериальной выполнена аддитивная свертка критериев (2.17), (2.20). Для этого необходимо вычислить соответствующие адаптивные коэффициенты. Адаптивный коэффициент для Q_1 :

$$w_1 = 1 / \max Q_1. \quad (2.21)$$

Адаптивный коэффициент для Q_2 :

$$w_2 = 1 / \max Q_2. \quad (2.22)$$

Тогда целевая функция задачи может быть представлена следующим образом:

$$Q = w_1 Q_1 + w_2 Q_2. \quad (2.23)$$

Для расчета конструкций нежестких дорожных одежд по продольному профилю трассы, состоящей из нескольких участков, с учетом критерия однотипности конструкции предложена математическая модель:

$$Q(Q_1, Q_2) \rightarrow \min_{y_j, S_j, L_j} \quad (2.24)$$

$$\text{при ограничениях} \quad \begin{cases} f_{1j}(h_{1j}, t_{1j}, h_{2j}, t_{2j}, \dots, h_{nj}, t_{nj}) \geq k_{1j} \\ f_{2j}(h_{1j}, t_{1j}, h_{2j}, t_{2j}, \dots, h_{nj}, t_{nj}) \geq k_{1j} \\ f_{3j}(h_{1j}, t_{1j}, h_{2j}, t_{2j}, \dots, h_{nj}, t_{nj}) \geq k_{1j} \\ f_{4j}(h_{1j}, t_{1j}, h_{2j}, t_{2j}, \dots, h_{nj}, t_{nj}) \geq k_{1j} \\ h_{ij} \in H_{ij} \\ t_{ij} \in T_{ij} \\ n_j \geq 3 \\ m > 1 \end{cases} \quad (2.25)$$

где k_{1j} – коэффициент прочности по условию сдвигоустойчивости подстилающего грунта и малосвязных конструктивных слоев (2.5); $f_{1j}(h_{1j}, t_{1j}, h_{2j}, t_{2j}, \dots, h_{nj}, t_{nj})$ – отношение допустимого напряжения сдвига к активному напряжению сдвига $T_{\text{доп}} / T$ (2.6), (2.7), вычисляется в соответствии с ОДН 218.046-01, блок-схема алгоритма приведена на рисунке 2.2; k_{2j} – коэффициент прочности по условию сопротивления монолитных слоев усталостному разрушению от растяжения при изгибе необходимо выполнение (2.8); $f_{2j}(h_{1j}, t_{1j}, h_{2j}, t_{2j}, \dots, h_{nj}, t_{nj})$ – отношение предельного допустимого растягивающего напряжения к наибольшему растягивающему напряжению в рассматриваемом слое $R_{\text{доп}} / \sigma_r$ (2.9), (2.10), блок-схема алгоритма приведена на рисунке 2.3; k_{3j} – коэффициент прочности по условию для упругого прогиба (2.1); $f_{3j}(h_{1j}, t_{1j}, h_{2j}, t_{2j}, \dots, h_{nj}, t_{nj})$ – отношение требуемого модуля упругости конструкции к общему модулю упругости $E_{\text{тр}} / E_{\text{общ}}$ (2.2), блок-схема алгоритма приведена на рисунке 2.1; k_{4j} – допускаемое для данной конструкции пучение грунта (2.12); $f_{4j}(h_{1j}, t_{1j}, h_{2j}, t_{2j}, \dots, h_{nj}, t_{nj})$ – расчетное (ожидаемое) пучение грунта земляного полотна (2.13), блок-схема алгоритма приведена на рисунке 2.4; Q – целевая функция, содержащая адаптивные коэффициенты (2.23); $i = 1, \dots, n_j$; $j = 1, \dots, m$; n_j – количество слоев конструкции нежестких дорожных одежд на участке j ; m – количество участков трассы с

различными геологическими и климатическими условиями; h_{ij} – толщина i -го конструктивного слоя на участке j ; H_{ij} – допустимые толщины для i -го конструктивного слоя на участке j ; t_{ij} – материал i -го конструктивного слоя на участке j ; T_{ij} – допустимые материалы для i -го конструктивного слоя на участке j .

Математическая модель многокритериальной оптимизации конструкций нежестких дорожных одежд (2.24)-(2.25) позволяет получать варианты конструкций с минимальными затратами на сооружение и при этом учитывать критерий однотипности конструкции по продольному профилю трассы, состоящей из нескольких участков.

Выводы по второй главе

В этой главе представлены ограничения задачи расчета конструкции нежестких дорожных одежд в соответствии с ОДН 218.046-01 и предложены две математические модели:

1. Математическая модель для оптимизации нежестких дорожных одежд путем варьирования толщин и материалов конструктивных слоев, позволяющая получать минимальные по стоимости и удовлетворяющие требованиям прочности и морозоустойчивости конструкции (2.14)-(2.15).

2. Математическая модель для многокритериальной оптимизации конструкции нежестких дорожных одежд по продольному профилю трассы, состоящей из нескольких участков, позволяющая получать однородные конструкции по длине всей дороги с минимальными затратами на ее сооружение (2.24)-(2.25).

Математическая модель (2.14)-(2.15) для оптимизации конструкций нежестких дорожных одежд позволяет рассматривать все множество допустимых вариантов конструкций нежестких дорожных одежд, которые могут быть сформированы из доступных для проектной организации материалов в соответствии с выбранным альбомом типовых решений.

Математическая модель (2.24)-(2.25) для многокритериальной оптимизации конструкций нежестких дорожных одежд по продольному профилю трассы, состоящей из нескольких участков, позволяет учитывать критерий однородности

конструкции и получать более простые с технологической точки зрения варианты проектов трассы с минимальными затратами на сооружение.

Применение методов оптимизации позволяет получать наилучшие варианты проектных решений с учетом различной стоимости и технических характеристик строительных материалов, учитывать изменение грунтовых условий по длине трассы. Благодаря применению информационно-вычислительных средств назначение, расчет и технико-экономический анализ проектных решений выполняется с более высокой точностью и с меньшими временными затратами.

ГЛАВА 3. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ НЕЖЕСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД

В рамках исследования рассмотрены численные методы дискретной оптимизации. Для анализа эффективности разработанных методов и алгоритмов были проведены вычислительные эксперименты. Вычислительные эксперименты проводились на оборудовании со следующими характеристиками: процессор Intel(R) Core(TM) i5-4210U CPU 1.70GHz 2.4GHz; общее количество ядер – 2, потоков – 4; оперативная память 6.00 ГБ (доступно 5.9 ГБ); тип системы – 64-разрядная операционная система, процессор x64 Windows-10; виртуальный сервер Apache; MySQL 5.5, phpMyAdmin 3.5.1.

3.1 Методы нелинейного программирования для расчета оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд

3.1.1 Полный перебор вариантов

В связи с нелинейными ограничениями в предложенных математических моделях (2.14)-(2.15) и (2.24)-(2.25) для решения задачи невозможно использовать аналитические методы. Путем дискретизации интервалов задача оптимизации может быть сведена к дискретной и решена путем полного перебора вариантов решений. Полный перебор гарантирует нахождение глобального экстремума [60].

Производится расчет всех возможных вариантов конструкции дорожных одежд при последовательном варьировании параметров каждого из слоев конструкции. Блок-схема алгоритма полного перебора представлена на рисунке 3.1. При таком подходе возникает проблема неэффективности полного перебора, связанная с его трудоемкостью. В ходе вычислительного эксперимента было установлено, что время работы такого метода для решения поставленной задачи значительно возрастает при небольшом увеличении размера входных данных.

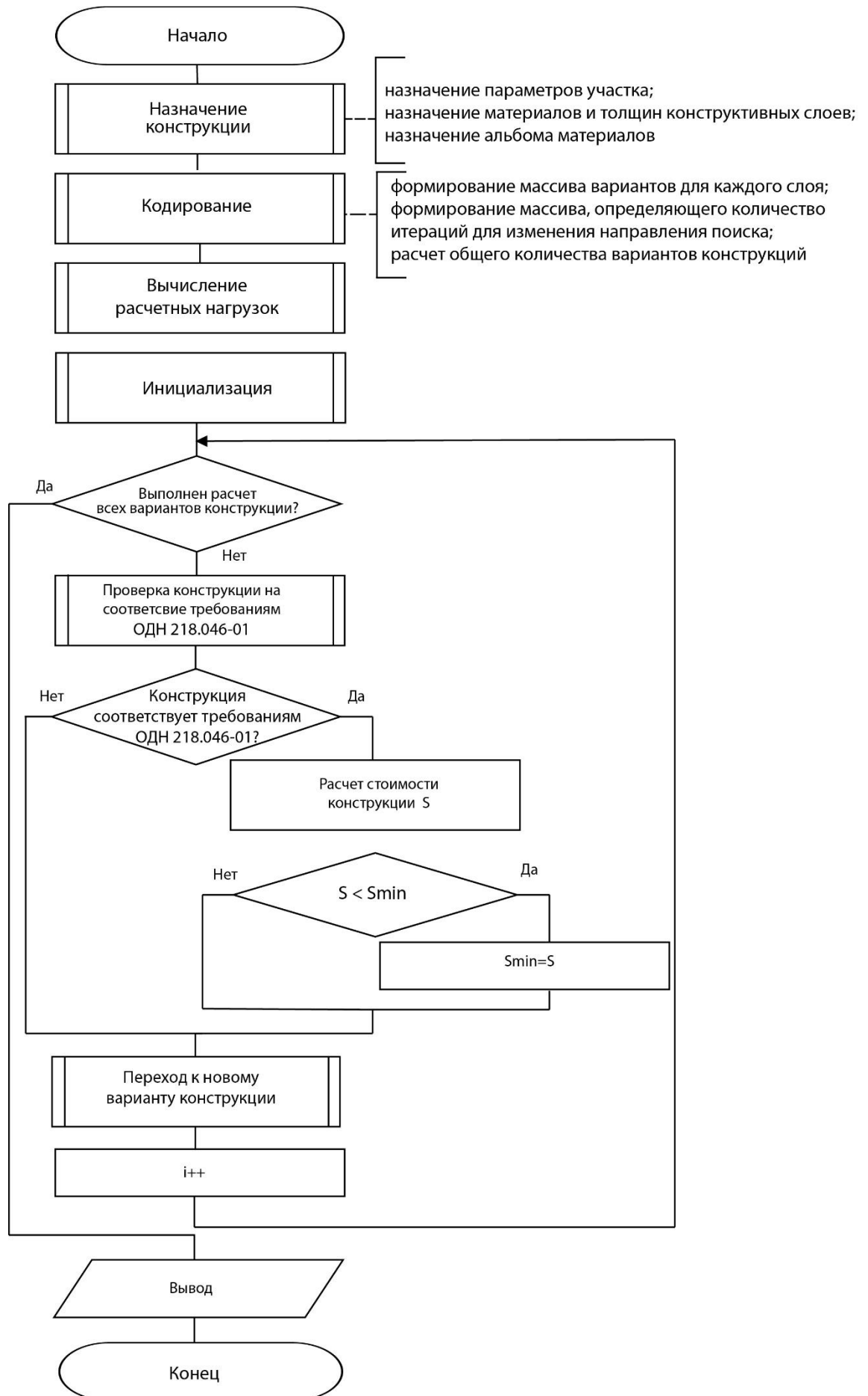


Рисунок 3.1 – Блок-схема алгоритма полного перебора

Для проведения вычислительного эксперимента была использована расчетная схема конструкции нежестких дорожных одежд капитального типа для III климатической зоны, содержащая 5 конструктивных слоев. Материалы конструктивных слоев назначены в соответствии с альбомом типовых конструкций [47]. Общее число вариантов конструкции составляет 24000 (табл. 3.1).

Таблица 3.1 – Расчетная схема конструкции нежестких дорожных одежд для проведения вычислительного эксперимента

Тип слоя	Кол-во вариантов конструктивных материалов слоя	Толщина (см)	Шаг (см)	Минимальная толщина слоя (см)
Слой покрытия №1	5	12	2	6
Слой покрытия №2	5	12	2	6
Слой покрытия №3	5	12	2	6
Слой основания №1	5	24	8	8
Дополнительный слой	1	60	2	58

Были рассмотрены модификации данной конструкции с различным количеством вариантов слоев основания (2,3,4 и 5 вариантов материалов для слоя основания). Результаты вычислительного эксперимента представлены на рисунке 3.2 и в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты вычислительного эксперимента (работа алгоритма полного перебора решений для различного количества вариантов конструкций)

№	Кол-во вариантов материалов для каждого слоя покрытия и основания	Количество вариантов конструкции	Среднее время работы алгоритма (с)
1	2	6144	19,61
2	3	31104	98,32
3	4	98304	380,29
4	5	240000	886

Из результатов вычислительного эксперимента следует, что при добавлении в альбом типовых решений новых материалов (или при увеличении диапазона допустимых толщин слоя) рост времени работы алгоритма будет близок к экспоненциальному.

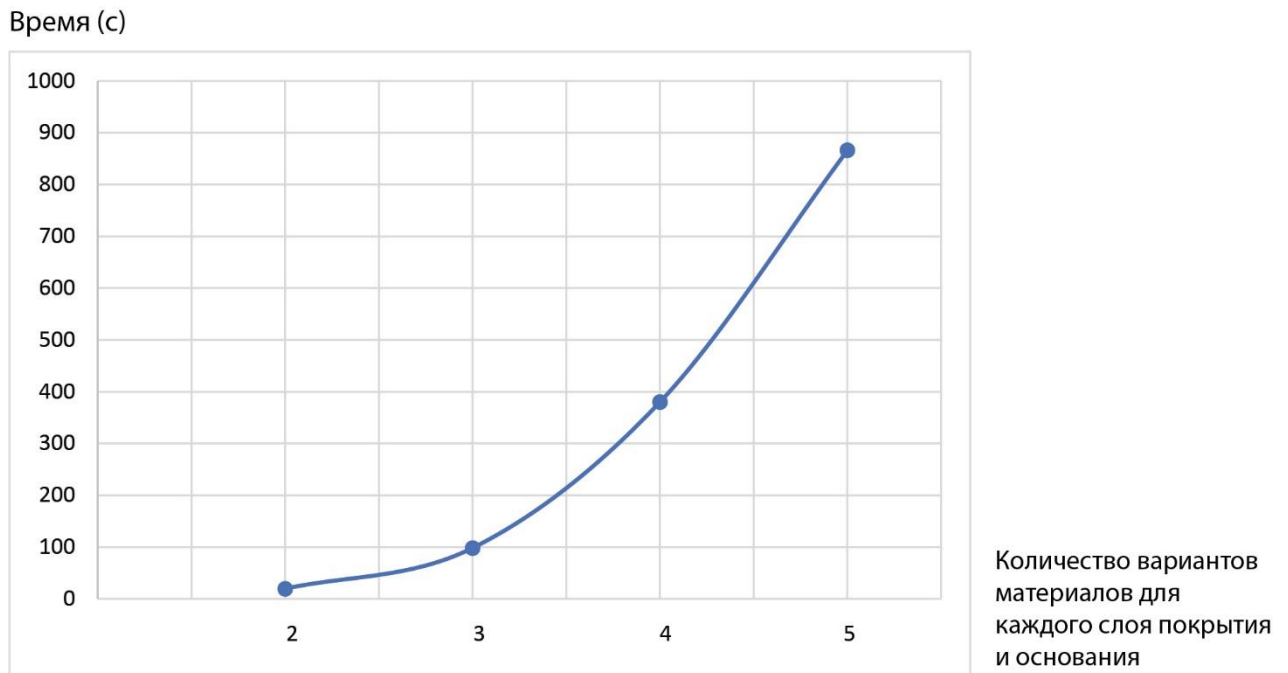


Рисунок 3.2 – Зависимость времени работы алгоритма от объема вычислений

Следовательно, при небольшой размерности задачи данный метод позволяет быстро получить оптимальное решение, но при увеличении размерности решаемой задачи алгоритм становится неэффективен по времени [64].

3.1.2 Метод мультистарта

Время работы алгоритма полного перебора может быть улучшено благодаря применению технологии параллельных вычислений [65-67]. Метод мультистарта предполагает параллельный запуск полного перебора из нескольких точек множества допустимых решений (рис. 3.3). Наилучший результат, полученный при запуске параллельных процессов, выбирается в качестве решения задачи. В лучшем случае скорость работы алгоритма вырастает пропорционально числу потоков (рис 3.4, табл. 3.3).

Максимально возможное число потоков при учете характеристик используемого оборудования составляет 4, следовательно попытка увеличения числа потоков не приводит к сокращению времени расчетов [64].

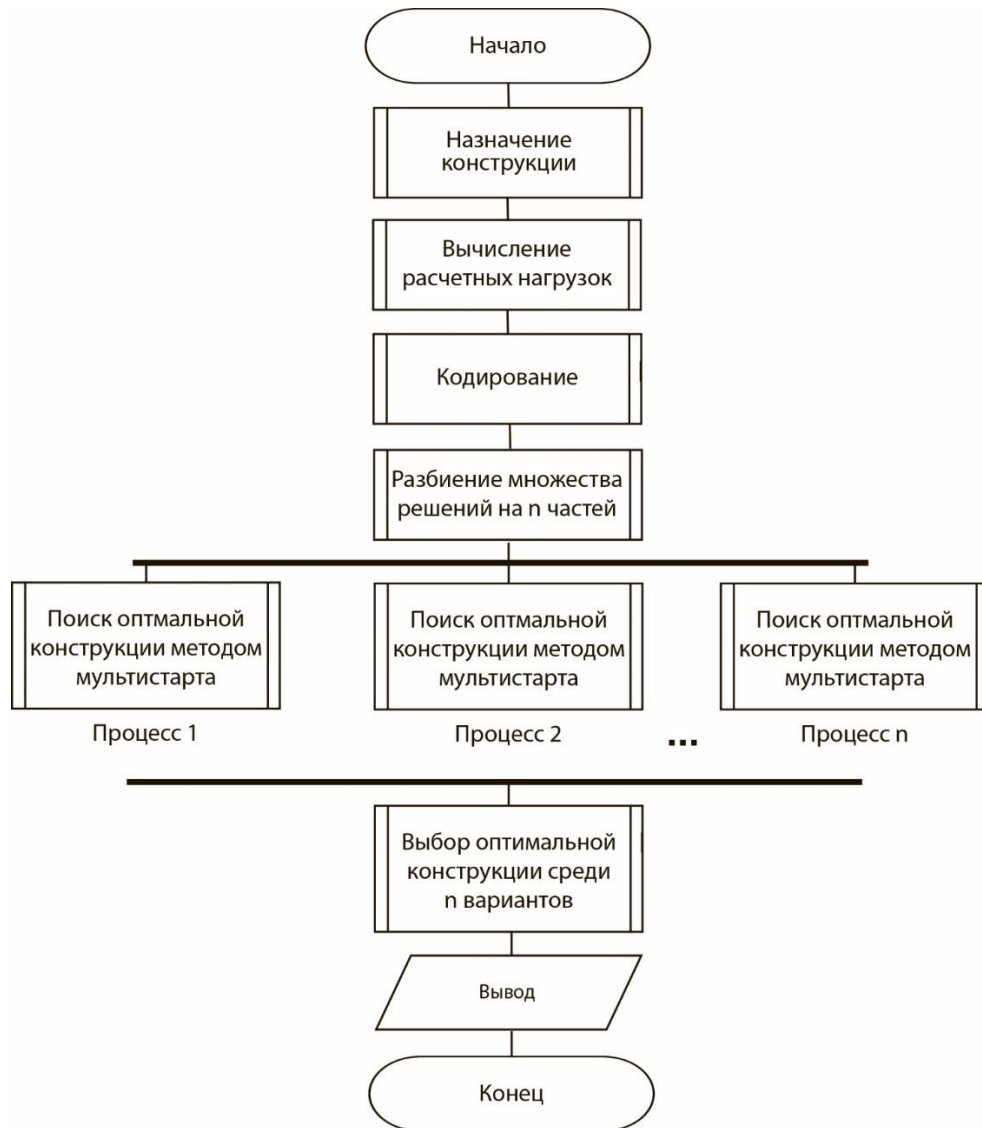


Рисунок 3.3 – Блок-схем алгоритма мултистарта

Время (с)

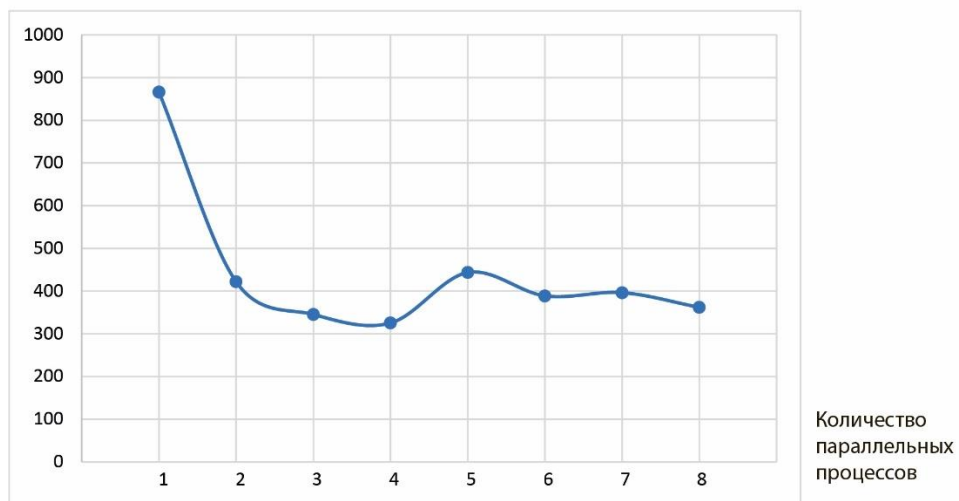


Рисунок 3.4 – Зависимость времени работы алгоритма от числа параллельно запущенных процессов

Таблица 3.3 – Результаты вычислительного эксперимента (работа алгоритма мультистарта)

№	Количество параллельных процессов	Среднее время работы алгоритма (с)
1	1	886
2	2	421,672
3	3	345,082
4	4	325,13
5	5	443,365
6	6	388,547
7	7	396,159
8	8	361,68

3.1.3 Метод динамического программирования

Решением проблемы неэффективности полного перебора может быть использование методов динамического программирования, благодаря которым возможен направленный поиск оптимального варианта конструкции, удовлетворяющего требованиям прочности и морозоустойчивости. В соответствии с принципом оптимальности Беллмана [68], на каждой итерации поиска определяется оптимальная стратегия относительно состояния, полученного в результате первоначального управления. Таким образом, как только будет получено решение, удовлетворяющее ограничениям задачи, поиск может быть остановлен [69-74].

Для поиска оптимальной конструкции дорожных одежд был реализован метод динамического программирования по изломанному профилю – поиск оптимального варианта внутри подмножеств происходит на основе различных (для каждого подмножества) вариантов конструкций (рис. 3.5). Для формирования профиля применяются битовые маски. Битовая маска представляет собой двоичную строку длиной n (n – количество слоев конструкции), состоящую из нулей и содержащую одну единицу, соответствующую номеру варьируемого слоя. На основе выбранного варианта формируются новые варианты путем применения каждой из масок.

Применяются те маски, для которых не достигнуто максимальное значение варьируемых параметров. Полученные варианты записываются в очереди для поиска

наилучшего варианта в соответствующих подмножествах. Варианты в подмножествах хранятся в ранжированном виде. Заполняется очередь вариантов конструкции – туда попадают первые значения для каждого из подмножеств. Цикл продолжает работу пока не будет найден вариант, удовлетворяющий ограничениям задачи, либо не будут рассчитаны все возможные варианты конструкции. Число возможных вариантов определяется комбинаторно перед началом работы алгоритма. Результаты вычислительного эксперимента представлены в таблице 3.4.

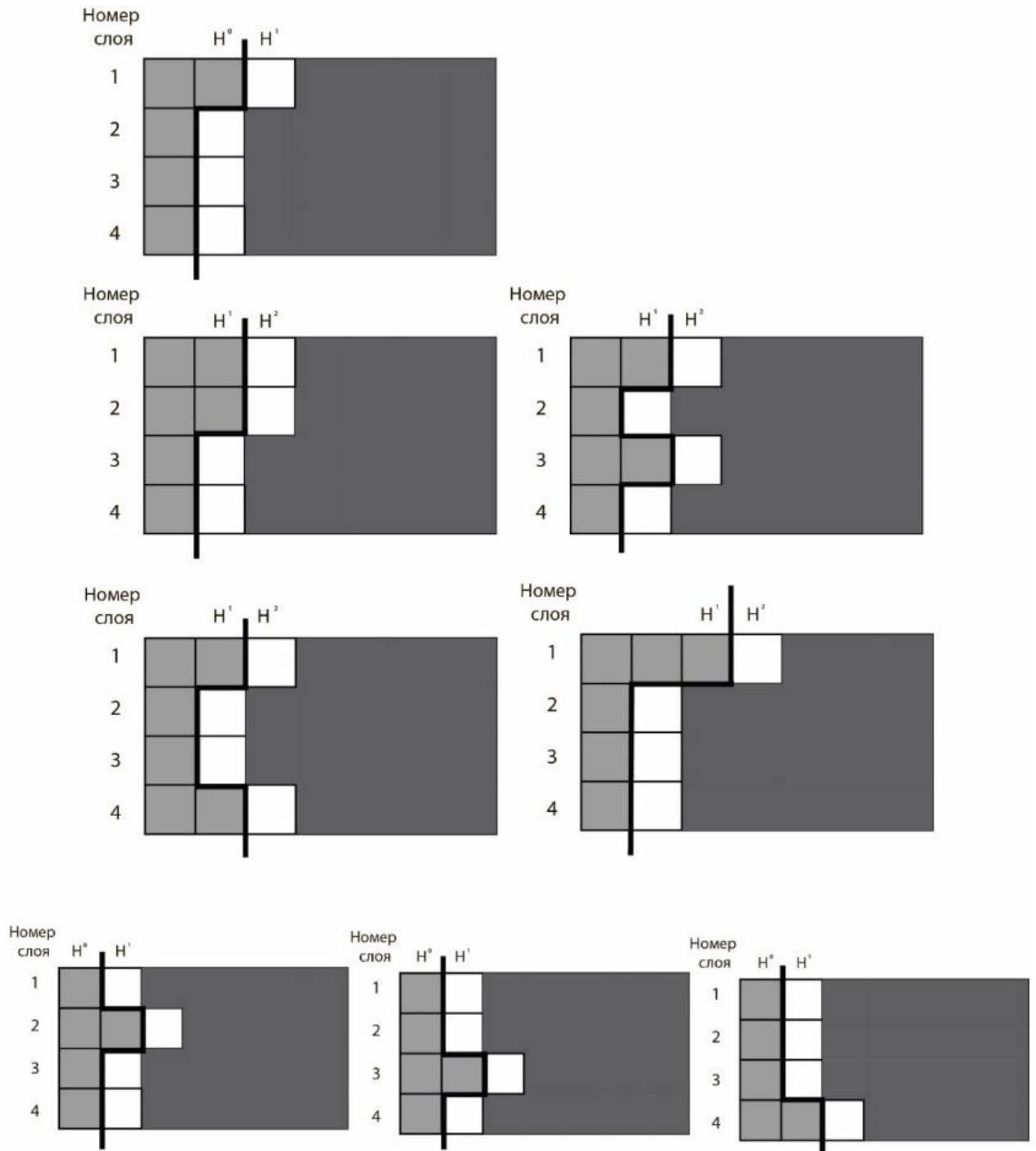


Рисунок 3.5 – Работа алгоритма динамического программирования

Таблица 3.4 – Результаты вычислительного эксперимента (работа алгоритма динамического программирования)

№	Номер итерации алгоритма динамического программирования, где достигнут глобальный минимум	Количество вариантов конструкции	Среднее время работы алгоритма динамического программирования (с)	Среднее время работы алгоритма полного перебора (с)
1	745	750	3,88	2,39
2	2815	1125	37,02	3,53
3	5124	1500	229,74	4,81
4	5	32000	0,44	146,67
5	5	48000	0,05	202,82
6	5	64000	0,055	269,54

В ходе вычислительного эксперимента установлено, что время работы алгоритма зависит от расположения точки глобального минимума. В случае если точка глобального экстремума находится в начале рассматриваемого пространства решений, время работы алгоритма составляет менее 1 секунды, по мере удаления точки глобального экстремума в пространстве решения рост времени работы алгоритма близок к экспоненциальному.

В некоторых случаях асимптотика алгоритма (число проверок ограничений задачи) может оказаться хуже, чем в работе алгоритма полного перебора. Но в случае нахождения точки глобального экстремума в начале рассматриваемой функции, время работы алгоритма будет значительно сокращено за счет отбрасывания необходимости расчета всех вариантов.

Динамическое программирование – это хорошо зарекомендовавший себя метод, используемый, когда задача может быть решена рекурсивно, что приводит к алгоритму с экспоненциальной временной сложностью. Если подзадачи перекрываются, то подход динамического программирования может сократить излишние вычисления, так что каждая подзадача решается не более одного раза, а сложность алгоритма по времени сводится к полиномиальной. С другой стороны, алгоритмы, основанные на динамическом программировании, трудно распараллелить, так как

подзадачи являются взаимозависимыми, то есть каждая подзадача требует результатов решения предыдущих подзадач [69].

3.2 Эволюционные методы для расчета оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд

Эволюционные методы представляют собой эффективные способы для решения различных задач оптимизации. Алгоритмы, основанные на данных методах, позволяют работать как с непрерывными, так и с разрывными целевыми функциями, учитывать большое количество ограничений задачи. Данные алгоритмы легко поддаются распараллеливанию и позволяют решать комбинаторные задачи [75].

Эволюционные вычисления позволяют получить приемлемое решение задачи с применением численных методов, ориентированных на поиск наилучших вариантов решений из множества альтернатив, при этом избегая полного перебора и сравнения всех вариантов. Наиболее известным эволюционным алгоритмом является генетический алгоритм (ГА). Математически генетический алгоритм можно определить как метод стохастической оптимизации для задач дискретной оптимизации [75-89].

Для оценки эффективности работы различных модификаций алгоритма была проведена серия вычислительных экспериментов. Для проведения вычислительных экспериментов были использованы схемы конструкции нежестких дорожных одежд, составленные на основе альбомов типовых решений (табл. 3.5-3.7). Рассматривались конструкции капитального типа для III климатической зоны, содержащие по 5 конструктивных слоев [47].

В ходе вычислительных экспериментов были заданы следующие параметры ГА: размер популяции – 100 хромосом; максимальное число поколений – 100. Для настройки ГА использовались различные комбинации операторов ГА. Для каждого случая ГА запускался 100 раз. В ходе вычислительных экспериментов были оценены следующие показатели: скорость работы алгоритма, относительная погрешность полученного результата, доля совпадений результата с точным

решением, относительная погрешность худшего результата, номер поколения, в котором была остановлена работа алгоритма [75-89].

Таблица 3.5 – Расчетная схема конструкций на основе альбома №1

Тип слоя	Кол-во вариантов конструктивных материалов слоя	Толщина (см)	Шаг (см)	Минимальная толщина слоя (см)
Слой покрытия №1	5	12	2	6
Слой покрытия №2	5	12	2	6
Слой покрытия №3	5	12	2	6
Слой основания №1	5	24	8	8
Дополнительный слой	1	60	2	58
Грунт подстилающего полотна	Супесь легкая (70 МПа)			
Количество возможных вариантов конструкций	Конструкций, соответствующих требованиям ОДН 218.046-01		Максимальное возможное значение относительной погрешности	
240000	8809 (3,67%)		0,93	

Таблица 3.6 – Расчетная схема конструкций на основе альбома №2

Тип слоя	Кол-во вариантов конструктивных материалов слоя	Толщина (см)	Шаг (см)	Минимальная толщина слоя (см)
Слой покрытия №1	3	10	2	2
Слой покрытия №2	3	10	2	2
Слой покрытия №3	3	26	2	2
Слой основания №1	7	32	8	8
Дополнительный слой	1	60	2	58
Грунт подстилающего полотна	Супесь легкая (49 МПа)			
Количество возможных вариантов конструкций	Конструкций, соответствующих требованиям ОДН 218.046-01		Максимальное возможное значение относительной погрешности	
491400	158629 (32,28%)		2,35	

Таблица 3.7 – Расчетная схема конструкций на основе альбома №3

Тип слоя	Кол-во вариантов конструктивных материалов слоя	Толщина (см)	Шаг (см)	Минимальная толщина слоя (см)
Слой покрытия №1	3	14	2	2
Слой покрытия №2	3	14	2	2
Слой покрытия №3	3	28	2	2
Слой основания №1	6	32	8	8
Дополнительный слой	1	60	2	58
Грунт подстилающего полотна	Супесь пылеватая (108 МПа)			
Количество возможных вариантов конструкций	Конструкций, соответствующих требованиям ОДН 218.046-01		Максимальное возможное значение относительной погрешности	
889056	330414 (37,16%)		2,59	

3.2.1 Модифицированный генетический алгоритм

Блок-схема реализованного для проведения вычислительных экспериментов канонического ГА представлена на рисунке 3.5. Работа алгоритма включает следующие шаги:

Шаг 1. Назначение конструкции. На основе выбранного пользователем альбома типовых конструкций формируется массив допустимых толщин и идентификаторов материалов каждого слоя. Выполняется запрос к базе данных для получения прочностных и стоимостных характеристик конструктивных материалов и физико-технические характеристики грунта подстилающего полотна.

Шаг 2. Вычисление расчетных нагрузок. На основе введенных пользователем климатических характеристик местности, грузонапряженности дороги, ожидаемых транспортно-эксплуатационных качеств дороги, заданного срока службы выполняется вычисление расчетных нагрузок.

Шаг 3. Кодирование. Решением задачи является двумерный массив, количество элементов в котором соответствует количеству слоев. Каждый i -й элемент массива содержит два значения – толщину слоя h_i и идентификатор материала id_i . Хромосомы в генетическом алгоритме представляют собой закодированные решения. Применительно к данной задаче предложено использовать кодирование целыми натуральными числами, т.к. фенотип (допустимые значения для каждого из генов) представляет собой набор дискретных значений. В таблице 3.8 представлен пример кодирования для проведения вычислительного эксперимента на основе расчетной схемы конструкций, представленной в таблице 3.5.

Шаг 4. Формирование первой популяции. В каноническом генетическом алгоритме первая популяция формируется случайно: происходит случайный отбор n хромосом из пространства допустимых решений (n – размер популяции).

Шаг 5. Оценка приспособленности хромосом. Для оценки приспособленности хромосом выполняется декодирование хромосомы, расчет полученной конструкции по критериям прочности и морозоустойчивости и в случае соответствия требованиям – расчет удельной стоимости погонного метра конструкции. Значением функции приспособленности хромосомы является удельная стоимость погонного метра конструкции. В случае несоответствия конструкции требованиям значение функции

приспособленности принимается равным нулю. Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 3.6.

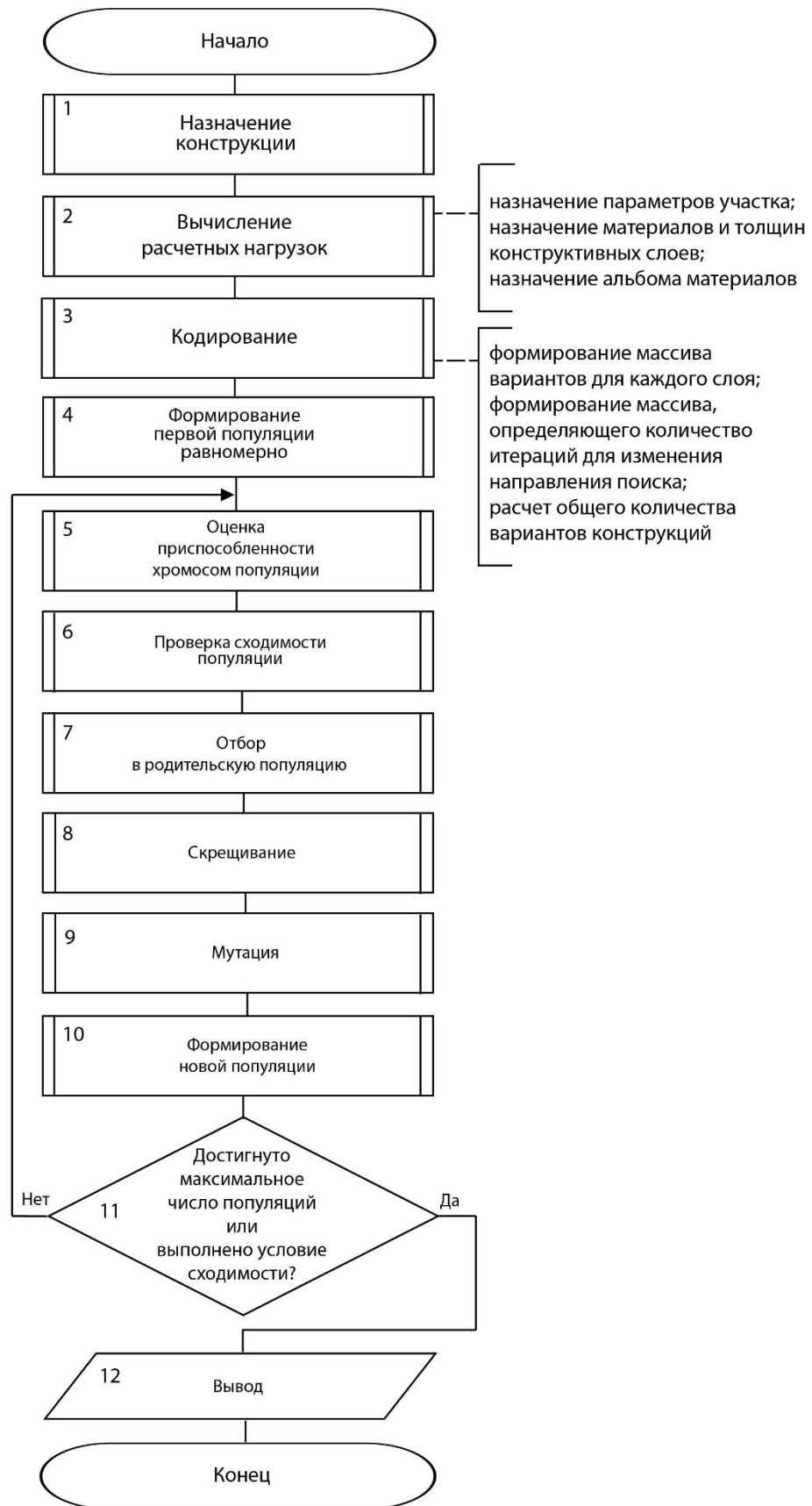


Рисунок 3.5 – Блок схема канонического генетического алгоритма

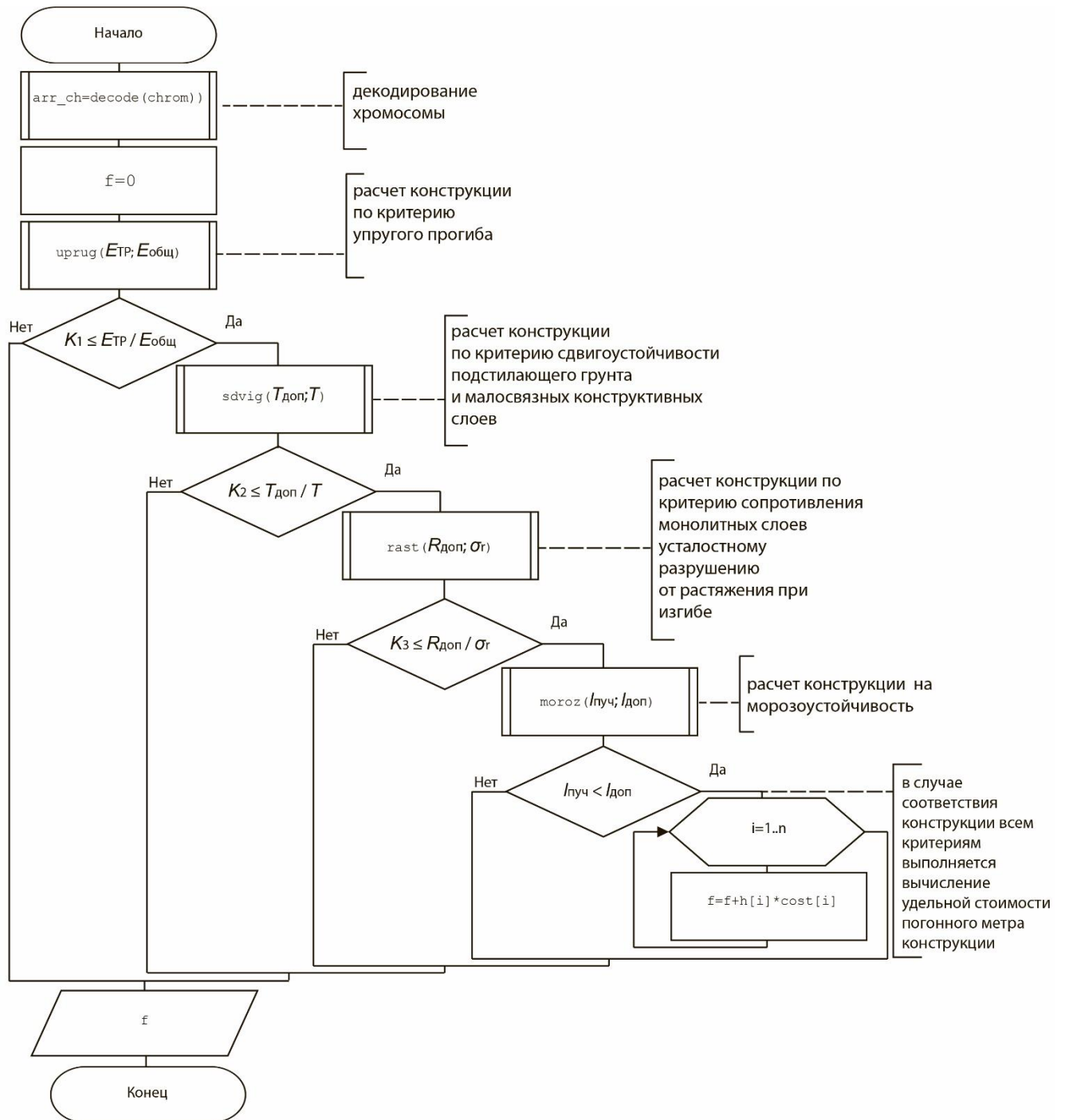


Рисунок 3.6 – Блок-схема подпрограммы оценки приспособленности хромосомы

Шаг 6. Проверка сходимости алгоритма. Определяется количество уникальных хромосом в популяции.

Шаг 7. Отбор в родительскую популяцию. Случайным образом формируется родительская популяция – хромосомы, предназначенные для скрещивания.

Шаг 8. Кроссовер. В скрещивании принимают участие две идущие подряд хромосомы. Одноточечное скрещивание представляет собой обмен частями случайной длины между двумя хромосомами (рис. 3.7).

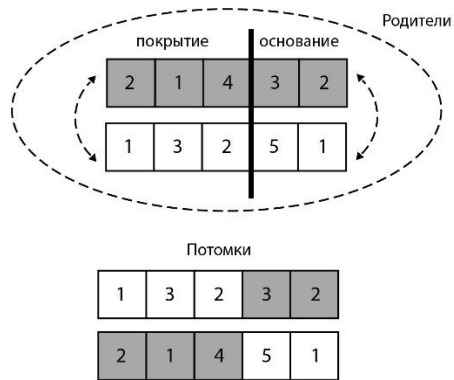


Рисунок 3.7 – Одноточечный кроссовер

Таблица 3.8 – Кодирование целыми натуральными числами допустимых значений толщин и идентификаторов материалов

Слои покрытия									Слои основания			Доп. слой		
Слой №1			Слой №2			Слой №3			Слой №4			Слой №5		
h	id	код	h	id	код	h	id	код	h	id	код	h	id	код
6	26	1	6	31	1	6	31	1	8	40	1	58	8	1
6	19	2	6	34	2	6	34	2	8	31	2	60	8	2
6	17	3	6	30	3	6	42	3	8	32	3			
6	15	4	6	35	4	6	43	4	8	38	4			
6	25	5	6	33	5	6	44	5	8	29	5			
8	26	6	8	31	6	8	31	6	16	40	6			
8	19	7	8	34	7	8	34	7	16	31	7			
8	17	8	8	30	8	8	42	8	16	32	8			
8	15	9	8	35	9	8	43	9	16	38	9			
8	25	10	8	33	10	8	44	10	16	29	10			
10	26	11	10	31	11	10	31	11						
10	19	12	10	34	12	10	34	12						
10	17	13	10	30	13	10	42	13						
10	15	14	10	35	14	10	43	14						
10	25	15	10	33	15	10	44	15						
12	26	16	12	31	16	12	31	16						
12	19	17	12	34	17	12	34	17						
12	17	18	12	30	18	12	42	18						
12	15	19	12	35	19	12	43	19						
12	25	20	12	33	20	12	44	20						

Шаг 9. Мутация. Случайное изменение значений одного гена в хромосоме на допустимое значение.

Шаг 10. Формирование новой популяции. В каноническом алгоритме новая популяция состоит из хромосом, полученных в результате скрещивания и мутации.

Шаг 11. Проверка условий завершения вычислений. Работа алгоритма завершается в случае, если достигнуто максимальное число поколений или достигнута конвергенция популяции (снижение разнообразия – менее 3 вариантов хромосом во всей популяции).

Шаг12. Формирование отчета. Вывод результатов расчета.

Результаты вычислительных экспериментов приведены в таблицах 3.9-3.11. В ходе вычислительного эксперимента установлено, что для решения задачи подбора оптимальной конструкции дорожных одежд данный алгоритм медленно сходится, не эффективен по времени в связи с большим количеством обращений к целевой функции, а также демонстрирует невысокую точность – как правило найденное решение достаточно далеко от оптимального.

Для повышения точности поиска оптимального значения целесообразно использовать элитарную стратегию. Элитарная стратегия предполагает, что в ходе селекции наиболее приспособленная особь гарантированно будет включена в новую популяцию, что позволяет не терять хорошие решения, таким образом точность поиска становится выше. Были выполнены следующие модификации алгоритма:

Шаг 4. Равномерное формирование первой популяции. За расстояние между хромосомами принимается евклидово расстояние. Формируется популяция из n хромосом с равным расстоянием.

Шаг 10. При формировании новой популяции используется элитарная стратегия. Наилучшее решение из предыдущей популяции автоматически переносится в новую, минуя этапы скрещивания и мутации, что позволяет сохранить найденное решение.

В результате ограничений задачи большое количество хромосом оказывается непригодным, такие конструкции не соответствуют критериям прочности согласно нормативной документации. Для предотвращения преждевременного вырождения популяции был использован генетический алгоритм с частичной заменой популяции. Несколько лучших хромосом могут переходить в новую популяцию без изменений, таким образом повышается сходимость алгоритма и точность результатов поиска [90-95]. Для данного вычислительного эксперимента была выполнена модификация одного шага алгоритма:

Шаг 10. В отборе в новую популяцию принимают участие хромосомы, полученные в результате скрещивания и мутации, а также хромосомы из предыдущей

родительской популяции. Выполняется соединение массивов 2-х популяций, ранжирование и отсечение n -лучших значений.

Таблица 3.9 – Результаты вычислительных экспериментов с использованием альбома типовых решений №1

	Канонический	Элитарная стратегия	Отбор с частичной заменой популяции	Гибридный алгоритм	Гибридный алгоритм (турнирная селекция)
Относительная погрешность	0,144	0,031	0,013	0,025	0,032
Относительная погрешность худшего результата	0,283	0,081	0,077	0,067	0,077
Доля совпадений результата с точным решением	0	0,09	0,36	0,5	0,37
Среднее время работы (с)	31,65	33,794	24,182	15,2874	9,7
Среднее количество обращений к целевой функции	6346,36	6519,21	3227	1030,6	721,07
Среднее поколение получения результата ГА	100	100	32,35	30,22	18,9

Таблица 3.10 – Результаты вычислительных экспериментов с использованием альбома типовых решений №2

	Канонический	Элитарная стратегия	Отбор с частичной заменой популяции	Гибридный алгоритм	Гибридный алгоритм (турнирная селекция)
Относительная погрешность	0,397	0,146	0,029	0,035	0,022
Относительная погрешность худшего результата	0,811	0,206	0,220	0,213	0,187
Доля совпадений результата с точным решением	0	0,21	0,46	0,38	0,55
Среднее время работы (с)	38,95	39,60	26,027	15,410	15,081
Среднее количество обращений к целевой функции	3243,63	3439,6	3063,42	833,66	1005,67
Среднее поколение получения результата ГА	100	100	31,52	29,16	27,71

Таблица 3.11 – Результаты вычислительных экспериментов с использованием альбома типовых решений №3

	Канонический	Элитарная стратегия	Отбор с частичной заменой популяции	Гибридный алгоритм	Гибридный алгоритм (турнирная селекция)
Относительная погрешность	0,505	0,09	0,13	0,139	0,153
Относительная погрешность худшего результата	0,892	0,282	0,327	0,322	0,390
Доля совпадений результата с точным решением	0	0,07	0,12	0,05	0,09
Среднее время работы (с)	33,03	32,155	24,612	16,282	11,261
Среднее количество обращений к целевой функции	4433,63	4311,86	3544,24	789,74	582,8
Среднее поколение получения результата ГА	100	100	36,12	34,74	21,76

3.2.2 Гибридный генетический алгоритм

Одной из проблем применения эволюционных вычислений для оптимизации многоэкстремальных функций является попадание в локальный экстремум. Для решения данной проблемы возможно применение гибридных генетических алгоритмов. Преимуществом генетических алгоритмов является возможность их сочетания с другими методами оптимизации. Распространенным подходом является включение в генетический алгоритм методов нелинейного программирования для локальной оптимизации хромосом. При формировании новой популяции все новые варианты конструкций оптимизируются при помощи метода полного перебора и только потом записываются в новую популяцию. Такой подход сочетает в себе возможность рассмотрения множества вариантов решения с точностью переборных методов для достижения более быстрой сходимости, а также повышения надежности алгоритма. Таким образом гибридные алгоритмы показывают достаточно высокую надежность, позволяя при этом достаточно быстро найти оптимальное или близкое к оптимальному решение задачи [90-95].

В рамках данного исследования рассмотрена возможность сочетания генетического алгоритма с полным перебором решений. В разработанном алгоритме предложено определять области локального экстремума путем сдвига каждой хромосомы. Сдвиг хромосомы осуществляется путем определения ближайшей с точки зрения евклидова расстояния хромосомы до тех пор, пока полученные решения удовлетворяют ограничениям задачи. Полученные промежутки запоминаются в массив. В последующих поколениях в случае попадания хромосомы в уже рассмотренный ранее промежуток сдвиг хромосом может быть осуществлен на основе данного массива, что сокращает объем вычислений и позволяет получить высокую скорость расчета. Блок-схема гибридного генетического алгоритма представлена на рисунке 3.8.

Выполнены следующие модификации алгоритма:

Шаг 5. При формировании новой популяции все новые варианты конструкций оптимизируются при помощи метода полного перебора. Сдвиг хромосомы осуществляется путем определения ближайшей с точки зрения евклидова расстояния хромосомы до тех пор, пока полученные решения удовлетворяют ограничениям задачи. Полученные промежутки запоминаются в массив. В последующих поколениях в случае попадания хромосомы в уже рассмотренный ранее промежуток сдвиг хромосом может быть осуществлен на основе данного массива, что сокращает объем вычислений и позволяет получить высокую скорость расчета. Блок-схема алгоритма уточнения значений хромосом представлена на рисунке 3.9.

В каноническом генетическом алгоритме отбор в родительскую популяцию происходит случайным образом, замена метода случайного отбора на турнирный делает поиск лучшего решения направленным. Популяция будет разбита на две подгруппы, затем особи из разных подгрупп попарно сравниваются и наиболее приспособленные переходят в следующую популяцию. Как видно из результатов эксперимента (табл. 3.9-3.11), турнирный отбор позволяет сократить объем вычислений [90-95]. Выполнены следующие модификации алгоритма:

Шаг 7. Отбор в родительскую популяцию. Турнирный отбор. Из популяции случайным образом выбирается две хромосомы, и лучшая записывается в родительскую популяцию. Операция повторяется n раз. Данная стратегия не требует

дополнительных вычислений и ранжирования хромосом, но делает поиск более направленным.

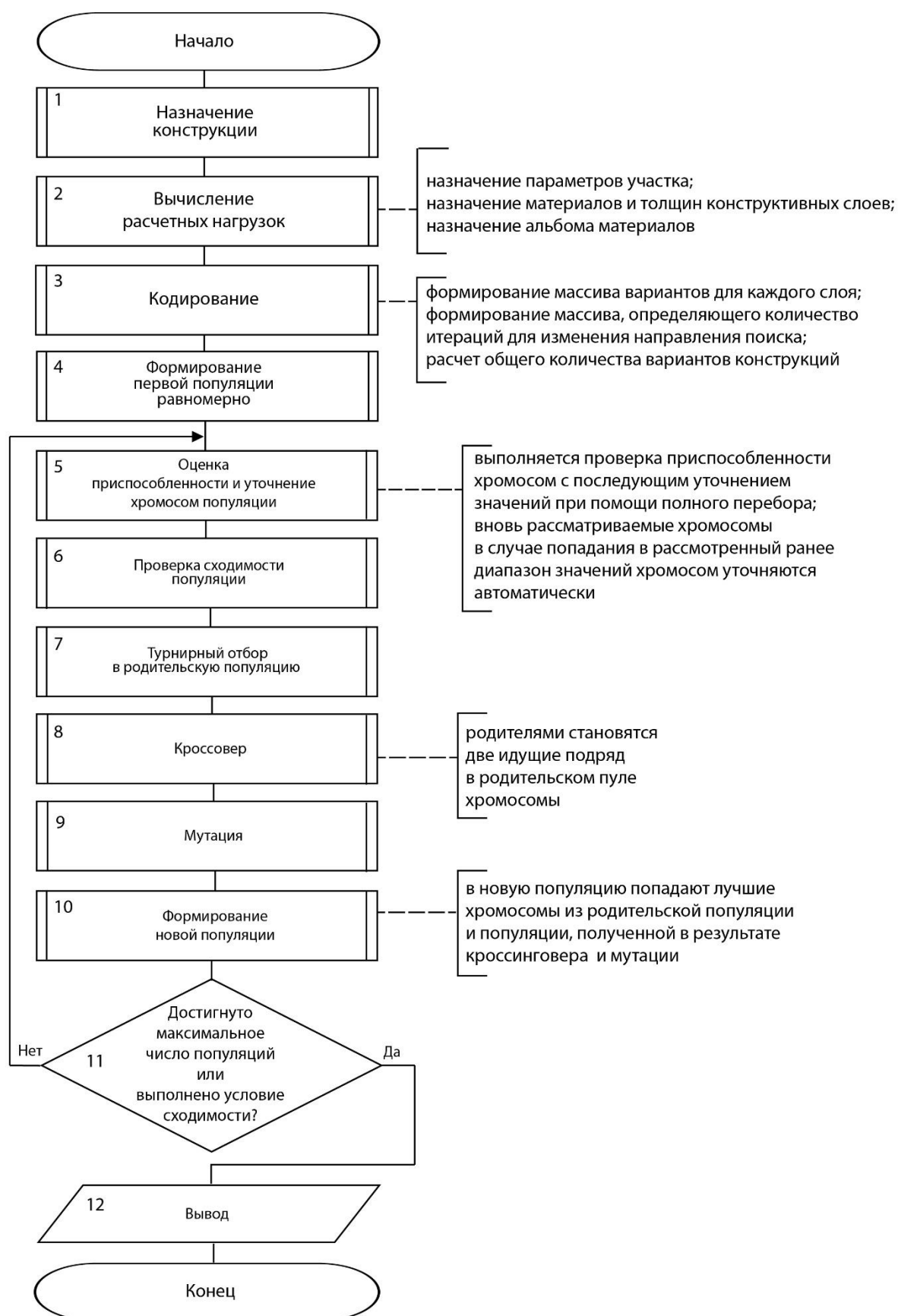


Рисунок 3.8 – Блок-схема гибридного генетического алгоритма

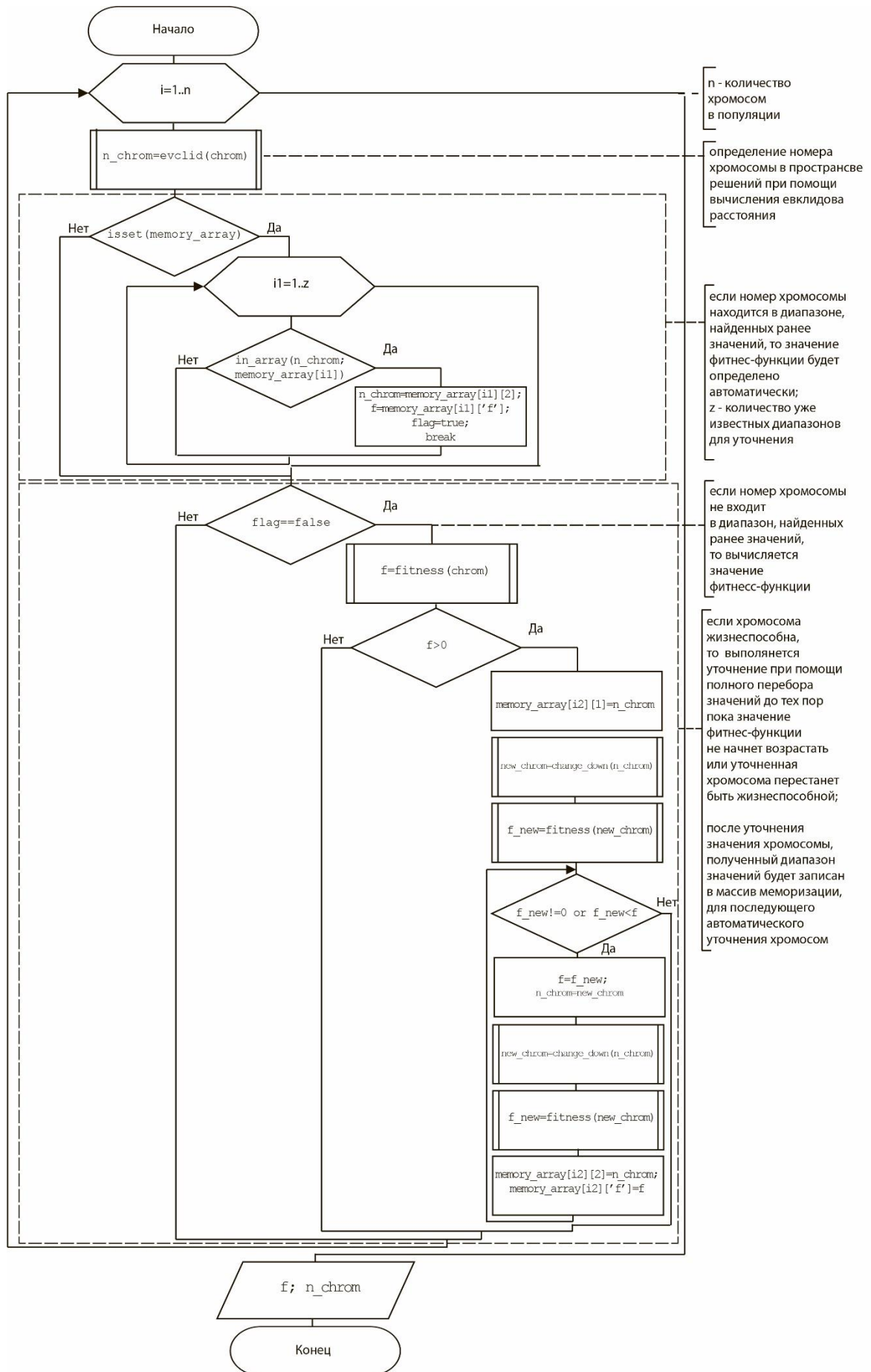


Рисунок 3.9 – Блок-схема алгоритма расчета фитнес-функции с уточнением при помощи полного перебора

Результаты приведённых выше вычислительных экспериментов (табл. 3.9-3.11) показывают, что выполненные модификации генетического алгоритма позволяют получать решение задачи, близкое к оптимальному, за короткое время. Скорость работы и точность генетического алгоритма может быть повышена за счет совмещения с методом точного поиска, основанного на полном переборе решений.

3.2.3 Параллельный запуск генетического алгоритма

При увеличении числа хромосом в популяции точность полученных результатов растёт, но вместе с тем возрастает и время работы алгоритма. Параллельный запуск нескольких генетических алгоритмов с меньшим числом хромосом позволяет получить высокую точность при меньшем времени работы. В ходе вычислительного эксперимента (табл. 3.12-3.14) было установлено, что параллельный запуск нескольких ГА с меньшим числом хромосом позволяет получить высокую точность при меньшем времени работы.

Таблица 3.12 – Результаты запуска гибридного ГА с различным количеством хромосом (альбом типовых решений №1)

	Гибридный генетический алгоритм (200 хромосом в популяции)	Гибридный генетический алгоритм (400 хромосом в популяции)	Гибридный генетический алгоритм (150 хромосом). Параллельный запуск (4 процесса)
Относительная погрешность	0,008	0	0
Относительная погрешность худшего результата	0,067	0	0
Доля совпадений результата с точным решением	0,78	1	1
Среднее время работы (с)	26,040	50,894	40,057

Таблица 3.13 – Результаты запуска гибридного ГА с различным количеством хромосом (альбом типовых решений №2)

	Гибридный генетический алгоритм (200 хромосом в популяции)	Гибридный генетический алгоритм (400 хромосом в популяции)	Гибридный генетический алгоритм (150 хромосом). Параллельный запуск (4 процесса)
Относительная погрешность	0,046	0,013	0,013
Относительная погрешность худшего результата	0,226	0,056	0,095
Доля совпадений результата с точным решением	0,41	0,61	0,65
Среднее время работы (с)	26,6962	57,473	45,774

Таблица 3.14 – Результаты запуска гибридного ГА с различным количеством хромосом (альбом типовых решений №3)

	Гибридный генетический алгоритм (200 хромосом в популяции)	Гибридный генетический алгоритм (400 хромосом в популяции)	Гибридный генетический алгоритм (150 хромосом). Параллельный запуск (4 процесса)
Относительная погрешность	0,059	0,047	0,023
Относительная погрешность худшего результата	0,199	0,12	0,084
Доля совпадений результата с точным решением	0,22	0,31	0,62
Среднее время работы (с)	26,067	55,379	38,522

Работа алгоритма начинается с формирования общей популяции, содержащей большое число хромосом, с последующим разбиением на n подпопуляций, для каждой из которых выполняется запуск ГА. По окончании всех процессов полученные решения вновь объединяются в общую популяцию и происходит выбор наилучшего решения.

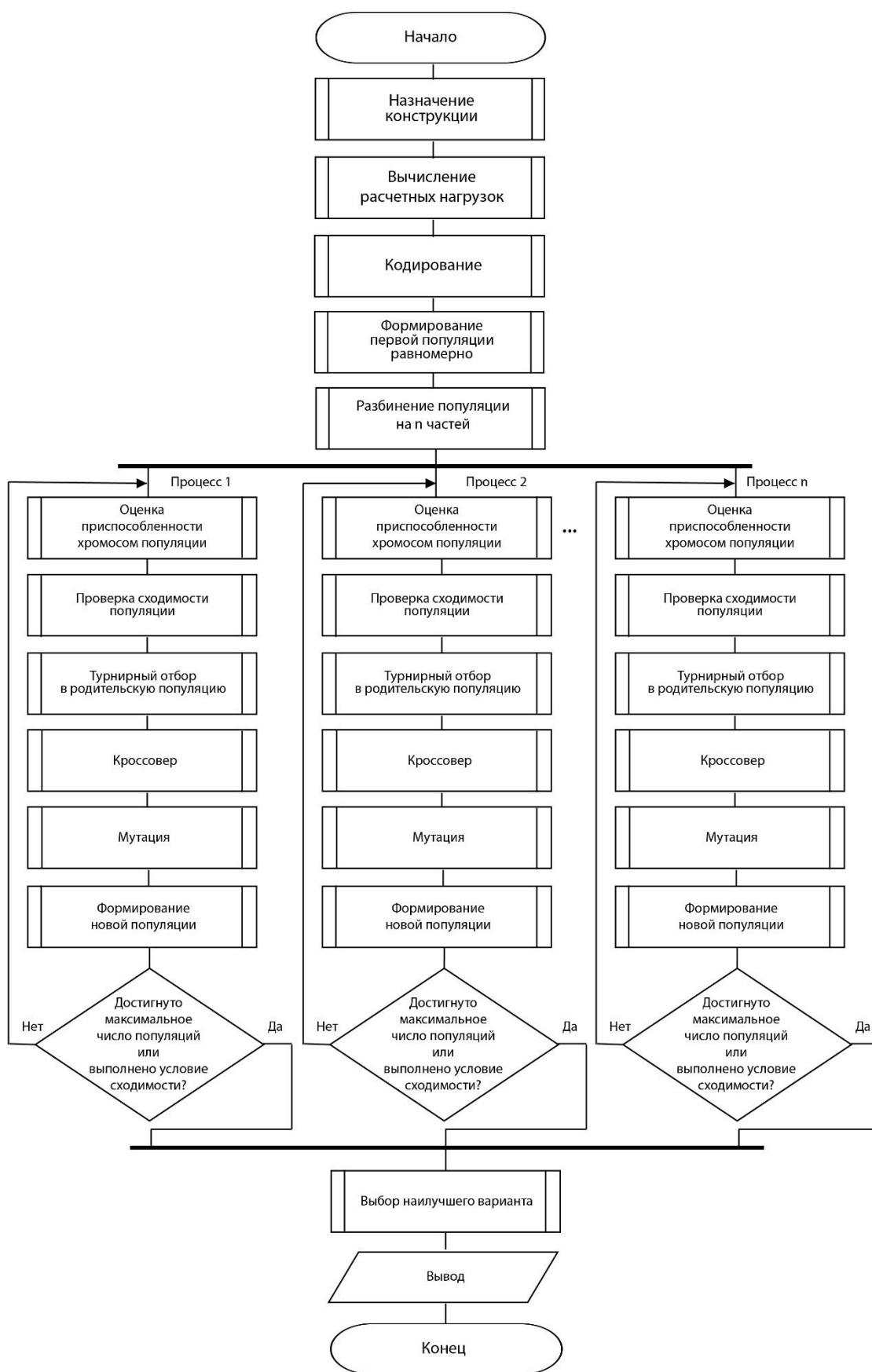


Рисунок 3.10 – Параллельный запуск генетического алгоритма

3.3 Алгоритм многокритериальной оптимизации конструкции нежестких дорожных одежд трассы, состоящей из нескольких участков

В рамках данного исследования предложено использовать метод аддитивной свертки критериев для расчета оптимальных по длине трассы конструкций нежестких одежд с учетом критерия однотипности конструкции (2.24)-(2.25).

Для проведения вычислительных экспериментов были рассмотрены два проекта трассы, содержащей 3 участка с различными грунтовыми условиями (табл. 3.15-3.16). Общее количество допустимых решений можно оценить как количество размещений с повторениями. Существуют различные способы расположения конструкций по длине трассы. Например, может быть найдена конструкция, соответствующая требованиям прочности и морозоустойчивости на всех участках или на нескольких смежных участках, или только на одном.

Таблица 3.15 – Расчетная схема конструкции № 1 для проведения вычислительного эксперимента

Тип слоя	Кол-во вариантов конструктивных материалов слоя	Толщина (см)	Шаг (см)	Минимальная толщина слоя (см)
Слой покрытия №1	3	10	2	2
Слой покрытия №2	3	10	2	2
Слой покрытия №3	3	14	2	2
Слой основания №1	6	32	8	8
Дополнительный слой	1	30	2	28
Количество возможных вариантов конструкций		Количество вариантов конструкций, позволяющих получить однотипную конструкцию по длине трассы		
226800		3250		
Грунт подстилающего полотна	Протяженность участка (м)		Конструкций, соответствующих требованиям ОДН 218.046-01	
Супесь легкая (49 МПа)	2500		12345	
Суглинок легкий (50 МПа)	5700		16784	
Супесь пылеватая (46 МПа)	1800		8765	

Таблица 3.16 – Расчетная схема конструкции № 2 для проведения вычислительного эксперимента

Тип слоя	Кол-во вариантов конструктивных материалов слоя	Толщина (см)	Шаг (см)	Минимальная толщина слоя (см)
Слой покрытия №1	3	8	2	2
Слой покрытия №2	3	8	2	2
Слой покрытия №3	3	10	2	2
Слой основания №1	3	24	8	8
Дополнительный слой	1	20	2	18
Количество возможных вариантов конструкций		Количество вариантов конструкций, позволяющих получить однотипную конструкцию по длине трассы		
116640		0		
Грунт подстилающего полотна	Протяженность участка (м)		Конструкций, соответствующих требованиям ОДН 218.046-01	
Супесь легкая (60 МПа)	2500		7800	
Суглинок легкий (70 МПа)	5700		587	
Супесь пылеватая (108 МПа)	1800		1230	

Для обозначения соответствия рассматриваемой конструкции нормативным требованиям на участках трассы в реализованном алгоритме используется битовая маска. Длина маски соответствует количеству участков с различными геологическими условиями. В случае соответствия конструкции бит будет установлен как 1, в случае несоответствия бит будет установлен как 0. Так, для трассы, включающей 3 участка с различными геологическими условиями, маска вида 111 обозначает, что рассматриваемая конструкция соответствует всем участкам трассы. Конструкция, соответствующая маске m , соответствует и всем подмаскам, т.е. маскам, включающим только биты, включенные в маску m . Для маски длиной 3 бита существует 2^3 подмасок.

В таблице 3.17 приведены все возможные варианты битовых масок для обозначения соответствия конструкций требованиям ОДН 218.046-01 на 3-х участках с различными грунтовыми и геологическими условиями.

Таблица 3.17 – Возможные варианты битовых масок для обозначения соответствия конструкций требованиям ОДН 218.046-01 на 3-х участках с различными грунтовыми и геологическими условиями

№	Битовая маска	Соответствие конструкции нормативным требованиям на участках трассы
1	111	Конструкции соответствует нормативным требованиям на 1-м, 2-м, 3-м участках трассы
2	110	Конструкции соответствует нормативным требованиям на 1-м, 2-м участках трассы
3	101	Конструкции соответствует нормативным требованиям на 1-м и 3-м участках трассы
4	100	Конструкции соответствует нормативным требованиям на 1-м участке трассы
5	011	Конструкции соответствует нормативным требованиям на 2-м и 3-м участках трассы
6	010	Конструкции соответствует нормативным требованиям на 2-м участке трассы
7	001	Конструкции соответствует нормативным требованиям на 3-м участках трассы
8	000	Конструкции не соответствует нормативным требованиям на 1,2,3 участках трассы

В случае если не может быть найдена конструкция, соответствующая маске, состоящей только из единиц, необходимо рассмотреть варианты проекта из различных конструкций.

Предпочтительным вариантом является проект, содержащий меньшее количество точек трассы, где происходит смена конструкции. Возможные варианты размещения конструкций по продольному профилю трассы, включающей 3 участка с различными геологическими условиями, представлены в таблице 3.18.

Строки таблицы 3.18 соответствуют вариантам проекта, содержащего от 1-й до 3-х различных конструкций. Предпочтительным вариантом является проект, представленный в строке №1.

Для каждой из масок (табл. 3.17) может быть найден вариант конструкции с минимальной стоимостью. Далее путем применения операции «исключающее или» могут быть получены варианты размещений конструкций по продольному профилю трассы.

Таблица 3.18 – Возможные варианты размещения конструкций по продольному профилю трассы, включающей 3 участка с различными геологическими условиями

№	Битовая маска соответствия конструкции №1	Битовая маска соответствия конструкции №2	Битовая маска соответствия конструкции №3	Количество точек трассы, где происходит смена конструкции
1	111			0
2	110	001		1
3	011	100		1
4	101	010		2
5	100	010	001	2

Была проведена серия вычислительных экспериментов с применением гибридного ГА (рис. 3.11), модифицированного следующим образом:

Шаг 1. Назначение конструкции. На основе выбранного альбома типовых конструкций (или нескольких альбомов) формируется массив допустимых толщин и идентификаторов материалов каждого слоя. Выполняется запрос к базе данных для получения прочностных и стоимостных характеристик конструктивных материалов. Грунтовые условия по длине трассы могут отличаться, поэтому выполняется запрос к базе данных для получения физико-технических характеристик грунтов, встречающихся по длине трассы, формируется массив для хранения значений протяженности участков с различными грунтовыми условиями.

Шаг 2. Вычисление расчетных нагрузок. На основе введенных пользователем климатических характеристик местности, грузонапряженности дороги, ожидаемых транспортно-эксплуатационных качеств дороги, заданного срока службы выполняется вычисление расчетных нагрузок для всех участков трассы.

Шаг 3. Формирование массива вариантов размещения конструкций. В зависимости от количества участков трассы m с различными грунтовыми условиями формируется советующий массив всех возможных битовых масок, содержащих хотя бы одну единицу. Каждая маска содержит m бит. Путем применения операции «исключающее или» могут быть получены варианты размещений конструкций по продольному профилю трассы. Необходимо получить комбинации масок, которые после применения операции «исключающее или» позволяют получить маску, состоящую только из единиц.

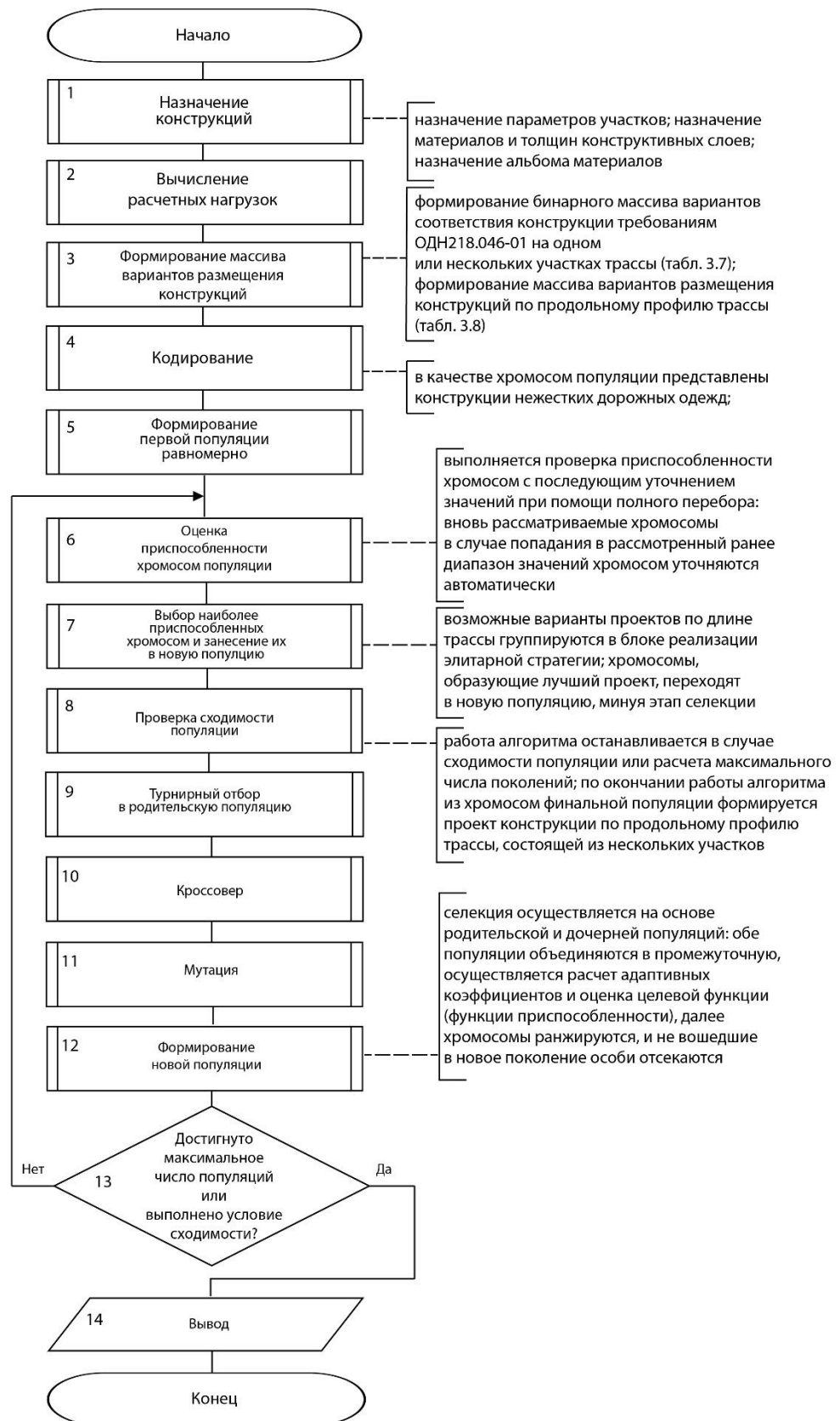


Рисунок 3.11 – Блок-схема гибридного генетического алгоритма для расчета оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд по продольному профилю трассы, состоящей из нескольких участков

Шаг 4. Кодирование. Решением задачи является многомерный массив, количество элементов в котором соответствует количеству участков трассы с различными геологическими условиями. Каждому участку соответствует двумерный массив, каждый i -й элемент массива содержит два значения – толщину слоя h_i и идентификатор материала id_i . Хромосомы в генетическом алгоритме представляют собой закодированные целыми натуральными числами решения.

Шаг 5. Равномерное формирование первой популяции. За расстояние между хромосомами принимается евклидово расстояние. Формируется популяция из n хромосом с равным расстоянием.

Шаг 6. Все жизнеспособные хромосомы (варианты конструкций) оптимизируются при помощи метода полного перебора. Жизнеспособными вариантами считаются варианты, которые советуют требованиям прочности и морозоустойчивости для не менее чем одного участка. Сдвиг хромосомы осуществляется путем определения ближайшей с точки зрения евклидова расстояния хромосомы до тех пор, пока полученные решения удовлетворяют требованиям прочности и морозоустойчивости для не меньшего количества участков, чем первоначальный вариант. Полученные промежутки запоминаются в массив. В последующих поколениях сдвиг хромосом может быть осуществлен на основе данного массива. Подпрограмма возвращает массив значений функции приспособленности (в случае несоответствия конструкции требованиям прочности и морозоустойчивости значение фитнес функции принимается равным нулю). Кроме того, записывается битовая маска соответствия ограничениям задачи на каждом участке (рис. 3.12).

Шаг 7. На основе массива вариантов размещения конструкций по длине трассы и найденных жизнеспособных вариантов формируются проекты конструкций по продольному профилю трассы. Для этого выполняется поиск конструкций с минимальной стоимостью для каждой из масок. Далее формируются проекты и выполняется расчет их стоимости с учетом длины каждого участка, а также определяется количество точек, где происходит смена конструкции. Рассчитываются адаптивные коэффициенты и выполняется оценка проектов при помощи аддитивной свертки критериев. Конструкции, составляющие наилучший проект переходят в новое поколение без изменений (рис 3.13).

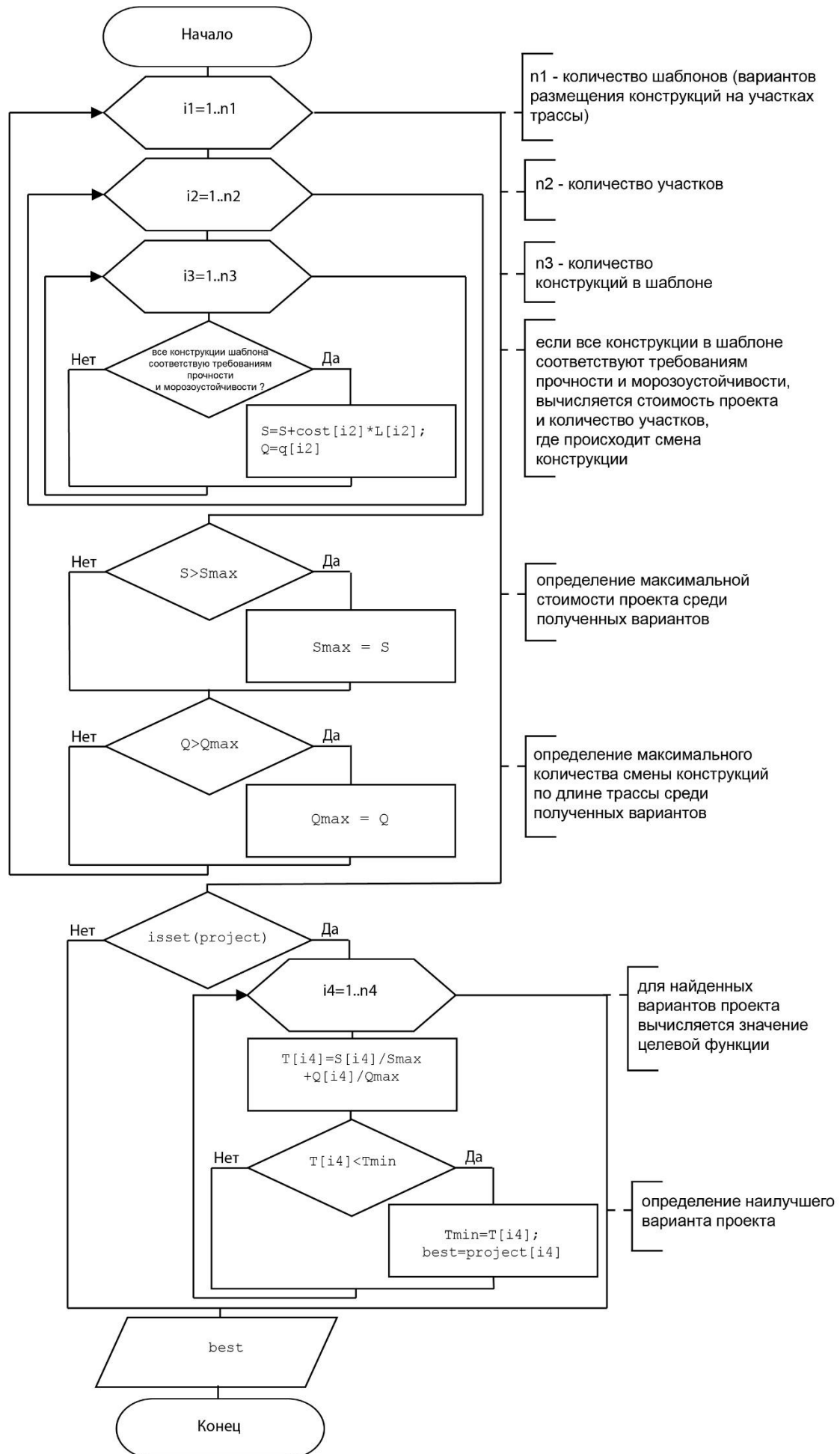


Рисунок 3.12 – Блок-схема алгоритма вычисления функции приспособленности с применением адаптивных коэффициентов

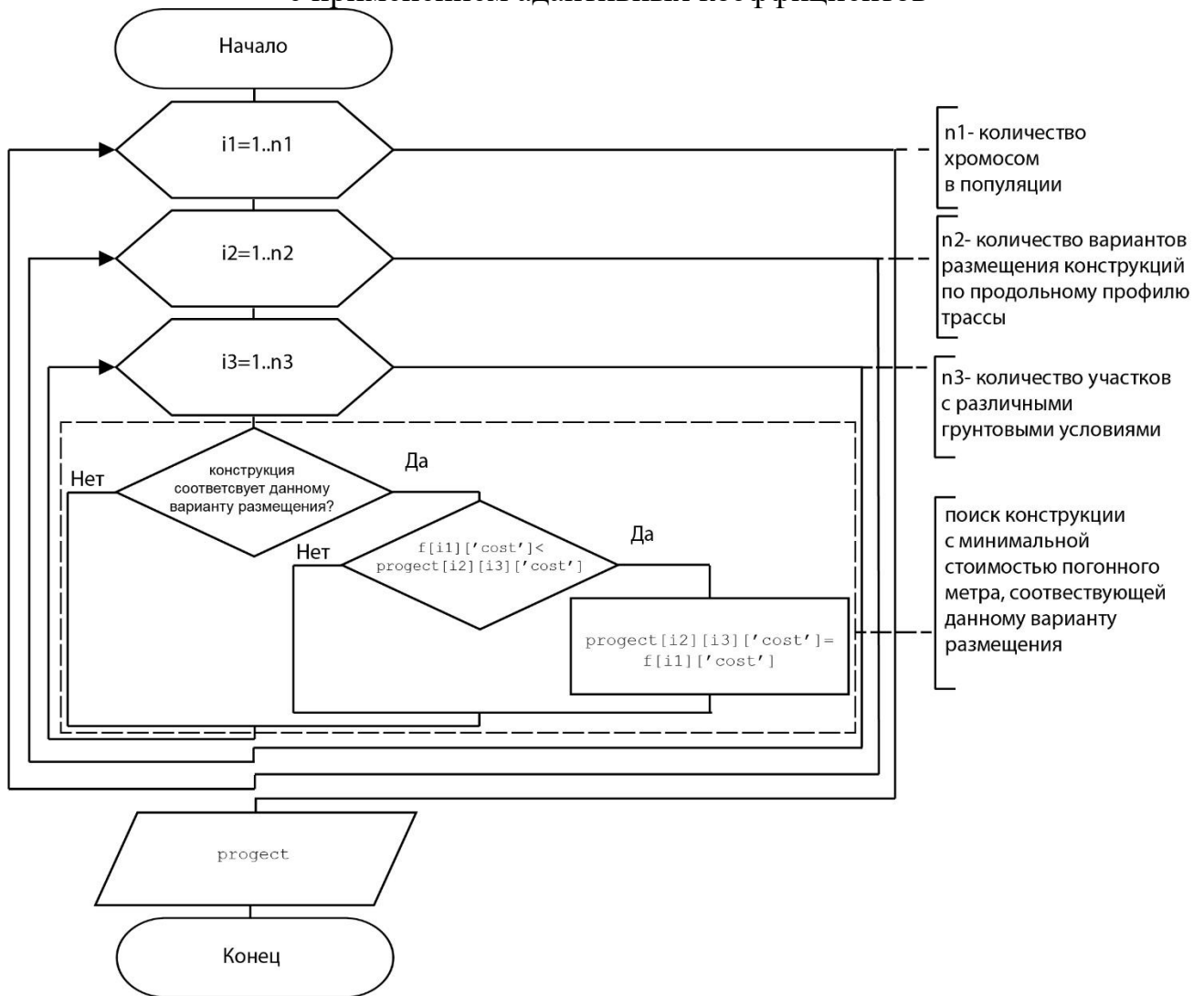


Рисунок 3.13 – Блок-схема расчета алгоритма выбора оптимального варианта конструкции по продольному профилю трассы

Шаг 9. Турнирный отбор.

Шаг 10. Кроссовер. В скрещивании принимают участие две идущие подряд хромосомы.

Шаг 11 Мутация. Случайное изменение значений одного гена в хромосоме на допустимое значение.

Шаг 12 Формирование новой популяции. В отборе в новую популяцию принимают участие хромосомы, полученные в результате скрещивания и мутации, а также хромосомы из предыдущей родительской популяции. Выполняется расчет адаптивных коэффициентов. Выполняется соединение массивов 2-х популяций, ранжирование и отсечение n лучших значений на основе значения аддитивной свертки адаптивных критериев.

Шаг 13. Проверка условий завершения вычислений. Работа алгоритма завершается в случае, если достигнуто максимальное число поколений или достигнута конвергенция популяции (снижение разнообразия – менее 2 вариантов хромосом во всей популяции).

Шаг 14. Формирование отчета. Вывод результатов расчета.

В ходе вычислительного эксперимента (табл. 3.19, 3.20) установлено, что для расчета оптимальных конструкций нежестких дорожных одежд, развернутых в пространстве, целесообразно применение параллельных вычислений для сокращения времени работы алгоритма.

Таблица 3.19 – Результаты вычислительного эксперимента для расчетной схемы №1 (расчет оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд по продольному профилю трассы, состоящей из нескольких участков)

	Гибридный генетический алгоритм (100 хромосом в популяции)	Гибридный генетический алгоритм (200 хромосом в популяции)	Гибридный генетический алгоритм (150 хромосом). Параллельный запуск (4 процесса)
Относительная погрешность	0,019	0,017	0,006
Относительная погрешность худшего результата	0,089	0,076	0,032
Доля совпадений результата с точным решением	0,29	0,27	0,8
Среднее время работы (с)	48,071	105,5595	50,389

Таблица 3.20 – Результаты вычислительного эксперимента для расчетной схемы №2 (расчет оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд по продольному профилю трассы, состоящей из нескольких участков)

	Гибридный генетический алгоритм (100 хромосом в популяции)	Гибридный генетический алгоритм (200 хромосом в популяции)	Гибридный генетический алгоритм (150 хромосом). Параллельный запуск (4 процесса)
Относительная погрешность	0,02	0,009	0,005
Относительная погрешность худшего результата	0,067	0,049	0,013

Продолжение таблицы 3.20

	Гибридный генетический алгоритм (100 хромосом в популяции)	Гибридный генетический алгоритм (200 хромосом в популяции)	Гибридный генетический алгоритм (150 хромосом). Параллельный запуск (4 процесса)
Доля совпадений результата с точным решением	0,09	0,29	0,7
Среднее время работы (с)	53,613	99,6	48,03

В результате проведенного исследования предложены модифицированные гибридные генетические алгоритмы для расчета оптимальных конструкций нежестких дорожных одежд на основе оптимизационных моделей (2.14)-(2.15) и (2.24)-(2.25). Показано, что применение технологии параллельных вычислений позволяет сократить время расчета.

Выводы по третьей главе

В этой главе приведены результаты серии вычислительных экспериментов для оценки эффективности различных алгоритмов поиска оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд. Были рассмотрены методы нелинейного программирования: полный перебор решений, динамическое программирование, метод мультистарта) и эволюционные методы оптимизации. В ходе проведения вычислительных экспериментов установлено, что методы нелинейного программирования для решения поставленной задачи являются неэффективными по времени. Время работы гибридного генетического алгоритма, сочетающего полный перебор решений с эволюционным поиском, составляет менее 1 минуты и не изменяется с ростом размерности задачи. Параллельный запуск алгоритма позволяет уменьшить относительную погрешность поиска и сократить время расчета.

На основе результатов проведенных вычислительных экспериментов разработаны:

1. Метод и алгоритм оптимизации конструкции нежестких дорожных одежд. Разработанный метод отличается комплексным использованием эволюционного

поиска и прямого перебора. Время работы алгоритма составляет менее одной минуты и не растет при увеличении количества рассматриваемых модификаций конструкции в отличие от полного перебора решений, где рост временных затрат при увеличении количества рассматриваемых модификаций конструкции близок к экспоненциальному.

2. Метод и алгоритм многокритериальной оптимизации конструкции нежестких дорожных одежд по продольному профилю трассы, состоящей из нескольких участков. Разработанный метод отличается комплексным использованием эволюционного поиска и прямого перебора и основан на применении аддитивной свертки критериев с адаптивными коэффициентами. Время работы алгоритма составляет менее одной минуты и не растет при увеличении количества рассматриваемых модификаций конструкции.

ГЛАВА 4. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ НЕЖЕСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ

4.1 Технологии разработки

Веб-приложения – программы, предназначенные для выполнения каких-либо задач на веб-серверах и использующие в качестве программы клиента интернет – браузеры. Данные хранятся на сервере, а обмен информацией между сервером и клиентом происходит по сети.

К преимуществам веб-приложений следует отнести следующие факторы:

1. Веб-приложения не требуют установки на компьютер заказчика объемного программного обеспечения. Для полноценной работы нужен только браузер и доступ в интернет.
2. Веб-приложения не требуют специальной настройки и администрирования, их администраторами являются разработчики.
3. Для работы веб-приложений требуется минимальная аппаратная платформа [96].

Часто используемым шаблоном проектирования веб-приложений является Модель-Представление-Контроллер (MVC) [96]. Шаблон MVC описывает простой способ построения структуры приложения, целью которого является отделение бизнес-логики от пользовательского интерфейса. В результате чего приложение лучше масштабируется, тестируется и является более простым в реализации и сопровождении. В архитектуре MVC *модель* предоставляет данные и правила бизнес-логики, *представление* отвечает за пользовательский интерфейс, а *контроллер* обеспечивает взаимодействие между моделью и представлением. Типичную последовательность работы MVC-приложения можно описать следующим образом:

1. При заходе пользователя на веб-ресурс скрипт инициализации создает экземпляр приложения и запускает его на выполнение. При этом отображается представление главной страницы сайта.

2. Приложение получает запрос от пользователя и определяет запрошенные контроллер и действие. В случае главной страницы выполняется действие по умолчанию (index).

3. Приложение создает экземпляр контроллера и запускает метод действия, в котором, к примеру, содержатся вызовы модели, считывающие информацию из базы данных.

4. После этого действие формирует представление с данными, полученными из модели, и выводит результат пользователю [96-98].

В качестве технологии разработки был выбран PHP-фреймворк «Yii». «Yii» – это высокоэффективный, основанный на компонентной структуре MVC-фреймворк для быстрой разработки крупных веб-приложений. Он позволяет максимально применить концепцию повторного использования кода и может существенно ускорить процесс разработки [97-99].

Для экспорта отчетов в MS Excel применялась библиотека PHPExcel. Она содержит огромный функционал для работы с форматами xls, xlsx, позволяет считывать данные из файла Excel, создавать и записывать файлы в формате xls, xlsx, pdf, менять форматирование, задавать формулы, а также работать с изображениями [98].

Для организации хранения данных использована СУБД MySQL [100]. Для реализации серверной части приложения (модели и контроллеры) – язык программирования PHP [99] и библиотека PHPExcel. Для реализации интерфейса – технологии HTML, CSS [101], JavaScript [102], библиотека jQuery [103].

Разработанное программное обеспечение позволяет выполнять расчет оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд в соответствии с предложенными моделями (2.14)-(2.15), (2.24)-(2.25), легко и быстро обрабатывать большие массивы данных, хранить результаты расчетов и предоставлять отчеты в удобном для пользователя виде. Использование веб-технологий обеспечивает возможность удаленной работы с данными одновременно нескольким пользователям.

4.2 Схема данных

Разработанное программное обеспечение функционирует на основе базы данных, структура которой представлена на рисунке 4.1. База включает в себя таблицы, необходимые для определения расчетных характеристик грунта и материалов, а также справочники показателей, необходимых для расчета конструкции по основным критериям в соответствии с ОДН 218.046-01. Структура данных представлена в таблицах 2.1-2.6 и 4.1-4.5.

Таблица 4.1 – Таблица для хранения информации о проектируемом участке

Поле	Тип	Пояснение
idconstr	INT, AUTO INCREMENT, PRIMARY KEY, NOT NULL	Идентификатор конструкции
nameconstr	VARCHAR, NOT NULL	Наименование конструкции
tdo	VARCHAR, NOT NULL	Тип дорожной одежды
type_grunt	INT, NOT NULL	Идентификатор грунта
sy	INT, NOT NULL	Схема увлажнения
npsum	INT, NOT NULL	Интенсивность движения
dkz	INT, NOT NULL	Дорожно-климатическая зона

Таблица 4.2 – Таблица для хранения информации о конструкции нежестких дорожных одежд

Поле	Тип	Пояснение
id	INT, AUTO INCREMENT, PRIMARY KEY, NOT NULL	Идентификатор слоя покрытия конструкции
idconstr	INT, NOT NULL	Идентификатор конструкции
ibmaterial	INT, NOT NULL	Идентификатор материала покрытия
number	INT, NOT NULL	Номер слоя
h	FLOAT, NOT NULL	Толщина (см)

Таблица 4.3 – Таблица для хранения информации о слоях покрытия конструкций нежестких дорожных одежд

Поле	Тип	Пояснение
id	INT, AUTO INCREMENT, PRIMARY KEY, NOT NULL	Идентификатор слоя основания конструкции
idconstr	INT, NOT NULL	Идентификатор конструкции
ibmaterial	INT, NOT NULL	Идентификатор материала основания
number	INT, NOT NULL	Номер слоя
h	FLOAT, NOT NULL	Толщина (см)

Таблица 4.4 – Таблица для хранения информации о слоях основания конструкций нежестких дорожных одежд

Поле	Тип	Пояснение
id	INT, AUTO INCREMENT, PRIMARY KEY, NOT NULL	Идентификатор дополнительного слоя конструкции
idconstr	INT, NOT NULL	Идентификатор конструкции
ibmaterial	INT, NOT NULL	Идентификатор материала для устройства дополнительного слоя
number	INT, NOT NULL	Номер слоя
h	FLOAT, NOT NULL	Толщина (см)

Таблица 4.5 – Таблица для хранения информации о дополнительных слоях конструкций нежестких дорожных одежд

Поле	Тип	Пояснение
id	INT, AUTO INCREMENT, PRIMARY KEY, NOT NULL	Идентификатор материала
name	VARCHAR, NOT NULL	Наименование материала
idpokritie	INT, NOT NULL	Идентификатор материала покрытия
unit	VARCHAR, NOT NULL	Единицы измерения
m	INT, NOT NULL	Масса
cost	FLOAT, NOT NULL	Цена

Разработанное программное обеспечение позволяет вести базу материалов и альбомов типовых конструкций. Интерфейс подсистемы ведения базы материалов и альбомов типовых конструкций представлен на рисунках 4.2-4.5.

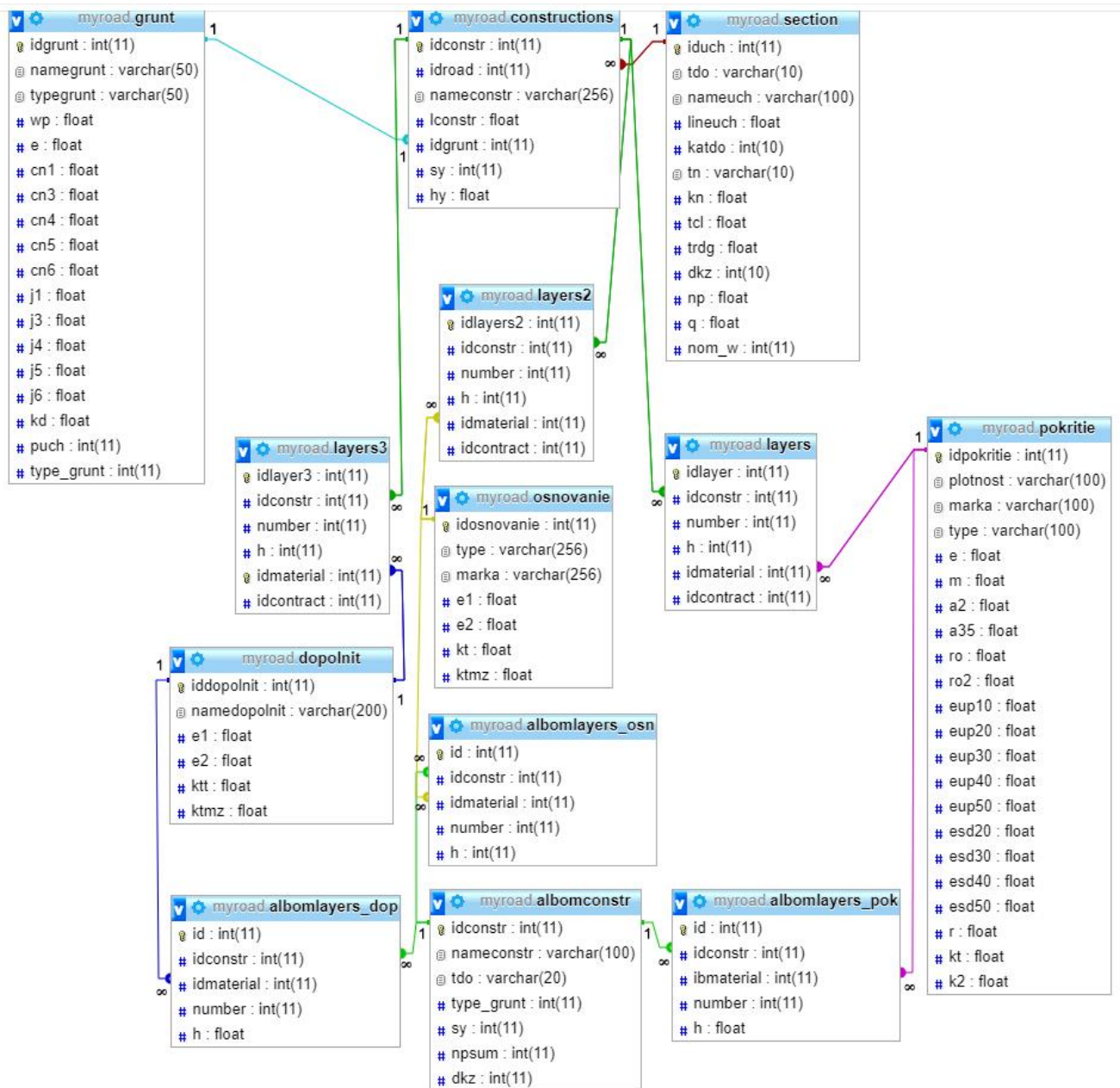






















Рисунок 4.1 – Схема данных

Displaying 1-10 of 135 results.

idconstr	ibmaterial	number	h	
4	Плотный на БНД марки 40-60 A	1	24	 
4	Пористый на БНД марки: 40-60 крупнозернистая смесь	1	24	 
4	Плотный на БНД марки: 60-90 A	2	18	 
4	Пористый на БНД марки: 60-90 крупнозернистая смесь	2	18	 
5	Плотный на БНД марки 40-60 A	1	12	 
5	Плотный на БНД марки: 60-90 A	1	12	 
5	Пористый на БНД марки: 60-90 крупнозернистая смесь	2	12	 
1	Плотный на БНД марки 40-60 A	1	22	 
1	Пористый на БНД марки: 60-90 крупнозернистая смесь	1	22	 
1	Высокопористый на БНД марки: 60-90 крупнозернистая смесь	1	24	 

Go to page: [Previous](#) [1](#) [2](#) [3](#) [4](#) [5](#) [6](#) [7](#) [8](#) [9](#) [10](#) [Next](#)

Рисунок 4.2 – Представление информации о конструктивных слоях

Displaying 1-10 of 43 results.																			
наименование	марка	тип	Q	M	A2	A2B	Re	Re2	EupR	EupR2	EupR3	EupR4	EupR5	EupR6	EupR7	EupR8	EupR9	EupR10	W
Песчаный	на БСД марки 40-50	A	8000	9	9	9.9	10		4400	2800	1880	850	520	480	420	380	300	2400	1.4
Песчаный	на БСД марки 60-80	A	4500	9.5	9.2	9.9	9.9		3200	1800	1100	650	480	480	420	380	300	2400	1.4
Песчаный	на БСД марки 80-100	A	3600	9	9.4	9.3	9.5		2400	1200	980	550	420	480	420	380	300	2400	1.4
Песчаный	на БСД марки 40-60	укрепленная смесь	3800	9.5	9.8	9.8	9.3		2800	1700	900	540	480	380	320	280	280	2300	1.25
Песчаный	на БСД марки 60-80	укрепленная смесь	2800	9.3	9.9	7.1	8		2000	1200	700	480	420	380	320	280	280	2300	1.25
Песчаный	на БСД марки 80-100	укрепленная смесь	2200	4	6.5	7.5	7.5		1400	800	510	380	420	380	320	280	280	2300	1.25
Высокопрочный	на БСД марки 40-60	укрепленная смесь	3000	9.3	9.9	7.1	9.5	6.5	2800	1700	900	540	480	380	320	280	280	2300	1.1
Высокопрочный	на БСД марки 60-80	укрепленная смесь	2100	4	6.3	7.8	9.88	6.2	2000	1200	700	480	420	380	320	280	280	2300	1.1
Высокопрочный	на БСД марки 80-100	укрепленная смесь	1700	3.8	6.5	7.9	9.5		1400	800	510	380	420	380	320	280	280	2300	1.1
Автомар-ЦМА	на ПБВ	80	24000	9.5	9.9	9.9	9.9	9.9	4000	980	5300	5300	5300						

Рисунок 4.3 – Представление информации о конструктивных материалах для устройства слоев покрытия

Displaying 31-40 of 88 results.				
idmaterial	number	h		
C5-80мм Автодор ШПС	2	20		
Портландцементом М-40 в кол-ве 4-6% смесь 1 1 класс_Готовые песчано-щебеночные смеси, укрепленные	1	24		
Портландцементом М-40 в кол-ве 6-8% смесь 2 1 класс_Готовые песчано-щебеночные смеси, укрепленные	1	24		
Шлаковыми вяжущими М-5 в кол-ве 14-16% смесь 1 1 класс_Готовые песчано-щебеночные смеси, укрепленные	1	24		
Шлаковыми вяжущими М-5 в кол-ве 16-20% смесь 2 1 класс_Готовые песчано-щебеночные смеси, укрепленные	1	24		
Шлаковыми вяжущими М5 в кол-ве 10-14% в сочетании с 1-3% портландцемента М-40 смесь 1 1 класс_Готовые песчано-щебеночные смеси, укрепленные	1	24		
Шлаковыми вяжущими М5 в кол-ве 12-16% в сочетании с 2-3% портландцемента М-40 смесь 2 1 класс_Готовые песчано-щебеночные смеси, укрепленные	1	24		
Гранулированным шлаком в кол-ве 6-8% в сочетании с 3-5% портландцемента М-40 смесь 1 1 класс_Готовые песчано-щебеночные смеси, укрепленные	1	24		
Гранулированным шлаком в кол-ве 8-10% в сочетании с 5-7% портландцемента М-40 смесь 2 1 класс_Готовые песчано-щебеночные смеси, укрепленные	1	24		
Малоактивной золошлаковой смесью (золой) в количестве 10-16% в сочетании с 4-6% портландцемента М-40 смесь 1 1 класс_Готовые песчано-щебеночные смеси, укрепленные	1	24		

Рисунок 4.4 – Представление информации о конструктивных материалах для устройства слоев основания

тип	марка	E1	E2	K1	K2	
Щебеночно-гравийно-песчаные смеси и крупнообломные грунты (оптимально-неоптимального состава)	обработанные механизированными способами или вручную, в т.ч. ампулированными органическими вяжущими	450	350	2.1	2.1	
Щебеночно-гравийно-песчаные смеси и крупнообломные грунты (оптимально-неоптимального состава)	обработанные механизированными способами совместно с минеральными или ампулированными органическими вяжущими совместно с минеральными	650	700	2.1	2.1	
Пески гравелистые, крупные, среднепесчаные мелкие, супеси легкая и пылеватая, суглинки легкие	обработанные механизированными способами или вручную, в т.ч. ампулированными органическими вяжущими	430	280	0.64	0.75	
Пески гравелистые, крупные, среднепесчаные мелкие, супеси легкая и пылеватая, суглинки легкие	обработанные механизированными способами совместно с минеральными или ампулированными органическими вяжущими совместно с минеральными	700	600	0.64	0.75	
черный щебень	уплотненный по способу засыпки	500	600	1.88	1.88	
черный щебень	стой из щебня, утрамбованного по способу уплотнения в смеси с битумом и битумной эмульсией	400	600	1.88	1.88	
щебеночно-гравийно-песчаные смеси, крупнообломные грунты (оптимально-неоптимальные), обработанные цементом	соответствующая марке 20	500	400	2.02	2.02	
щебеночно-гравийно-песчаные смеси, крупнообломные грунты (оптимально-неоптимальные), обработанные цементом	соответствующая марке 40	600	500	2.02	2.02	
щебеночно-гравийно-песчаные смеси, крупнообломные грунты (оптимально-неоптимальные), обработанные цементом	соответствующая марке 60	800	700	2.02	2.02	
щебеночно-гравийно-песчаные смеси, крупнообломные грунты (оптимально-неоптимальные), обработанные цементом	соответствующая марке 75	870	830	2.02	2.02	

Рисунок 4.5 – Представление информации о конструктивных материалах для устройства дополнительных слоев

4.3 Модели данных

В процессе разработки спроектирована и создана база данных, в соответствии с которой в архитектуру программного обеспечения вошли следующие модели данных [104]: «Section» – проектируемый участок, «Pokritie», «Osnovanie», «Dopolnit» – конструктивный слой, «Construction» – конструкция нежесткой дорожной одежды. Проект участка дороги может быть представлен в виде древовидной структуры, содержащей поле *section* (экземпляр класса «Section»), не имеющий ответвлений и контейнер *consrt_arr* (массив объектов «Construction»), который может содержать

некоторое количество конструкций, каждая в свою очередь является контейнером для набора слоев.

Объект «CompositeProject» является объектом-компоновщиком для древовидной структуры проекта – содержит методы для добавления конструкций, конструктивных слоев, назначения грунта и параметров проекта (рис 4.6).

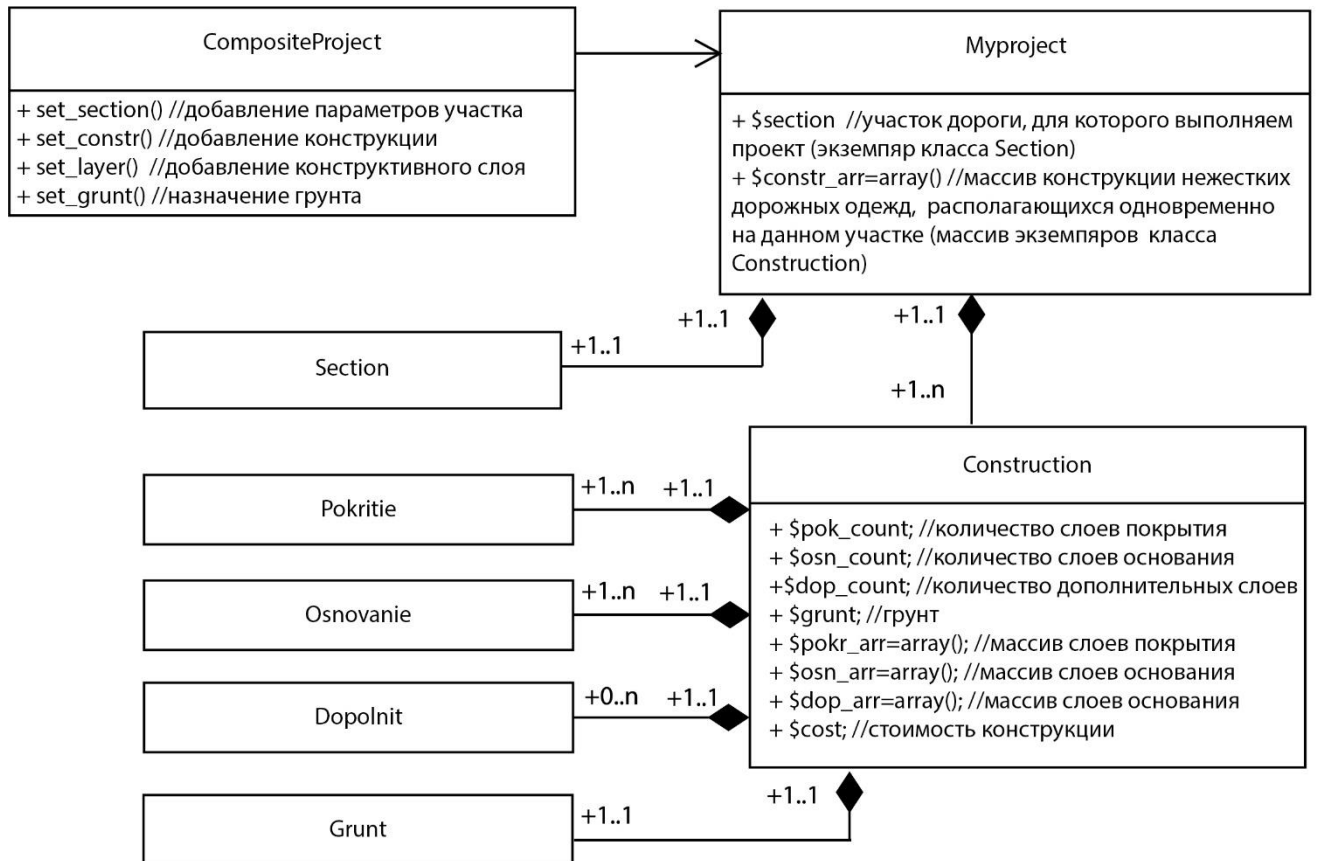


Рисунок 4.6 – Композиция объектов для представления проектируемого участка

«CompositeProject» – базовый класс для классов компоновщиков проекта. В зависимости от способа создания проекта: на основе данных пользовательских форм; на основе сохраненных ранее данных; путем преобразования данных, полученных в формате JSON – может быть вызван соответствующий класс-компоновщик, расширяющий класс «CompositeProject» (рис. 4.7).

Подбор оптимальной конструкции нежесткой дорожной одежды выполняется на основе различных математических моделей. Соответственно существуют различные вариации каждого из реализованных алгоритмов. Например, различия в работе генетического алгоритма для различных оптимизационных моделей заключаются в

способе кодирования хромосом и вычисления целевой функции. «Controller» создает объект для работы с конкретной оптимизационной моделью и передает его в конструктор «Algorithm», «Controller» имеет возможность заменить математическую модель в любой момент, так как объект «Algorithm» работает независимо от выбранной математической модели.

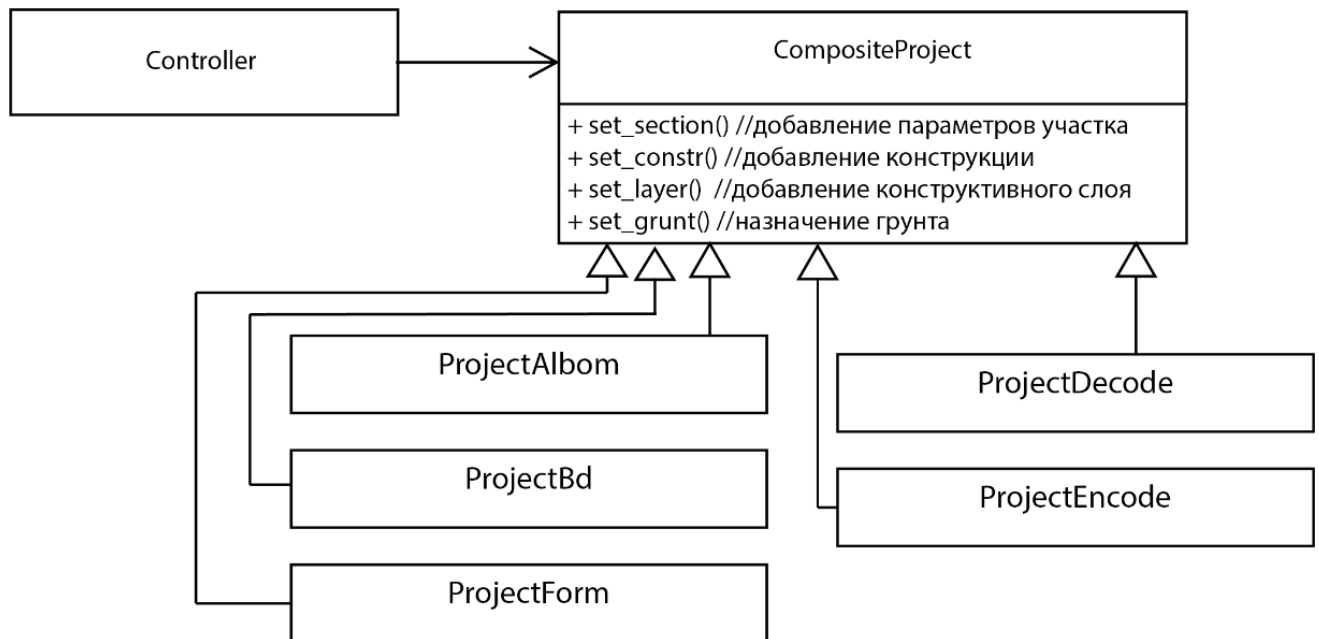


Рисунок 4.7 – «Фабрики» создания проектов

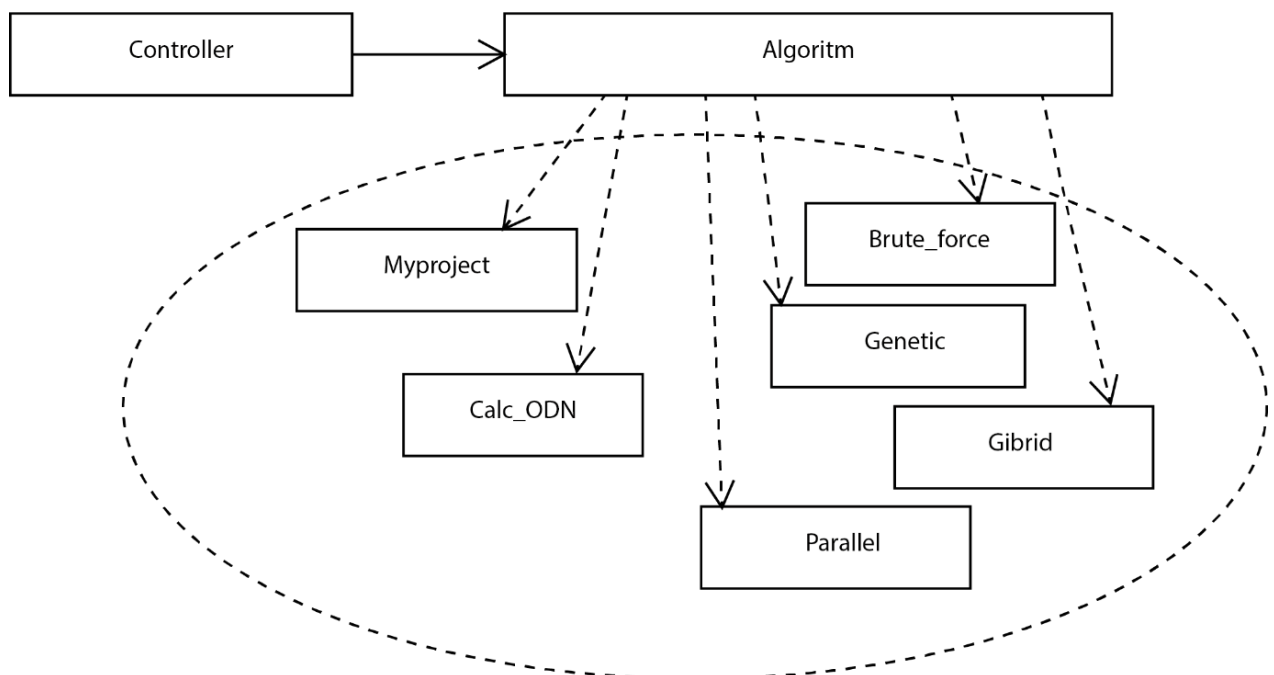


Рисунок 4.8 – Фасад для работы алгоритмов

Все алгоритмы описаны как методы класса «Algorithm». «Controller» использует объект класса «Algorithm» как фасад вместо прямой работы с объектами системы (рис. 4.8).

Разработанное программное обеспечение позволяет работать с различными математическими моделями расчета конструкции нежестких дорожных одежд (рис. 4.9):

1. Математическая модель для оптимизации конструкции нежестких дорожных одежд, позволяющая получать минимальные по стоимости и удовлетворяющие требованиям прочности и морозоустойчивости конструкции путем варьирования толщин и (или) материалов конструктивных слоев.

2. Математическая модель для многокритериальной оптимизации конструкций нежестких дорожных одежд по продольному профилю трассы, состоящей из нескольких участков, позволяющая получать варианты конструкции с минимальными затратами на сооружение и с учетом критерия однотипности.

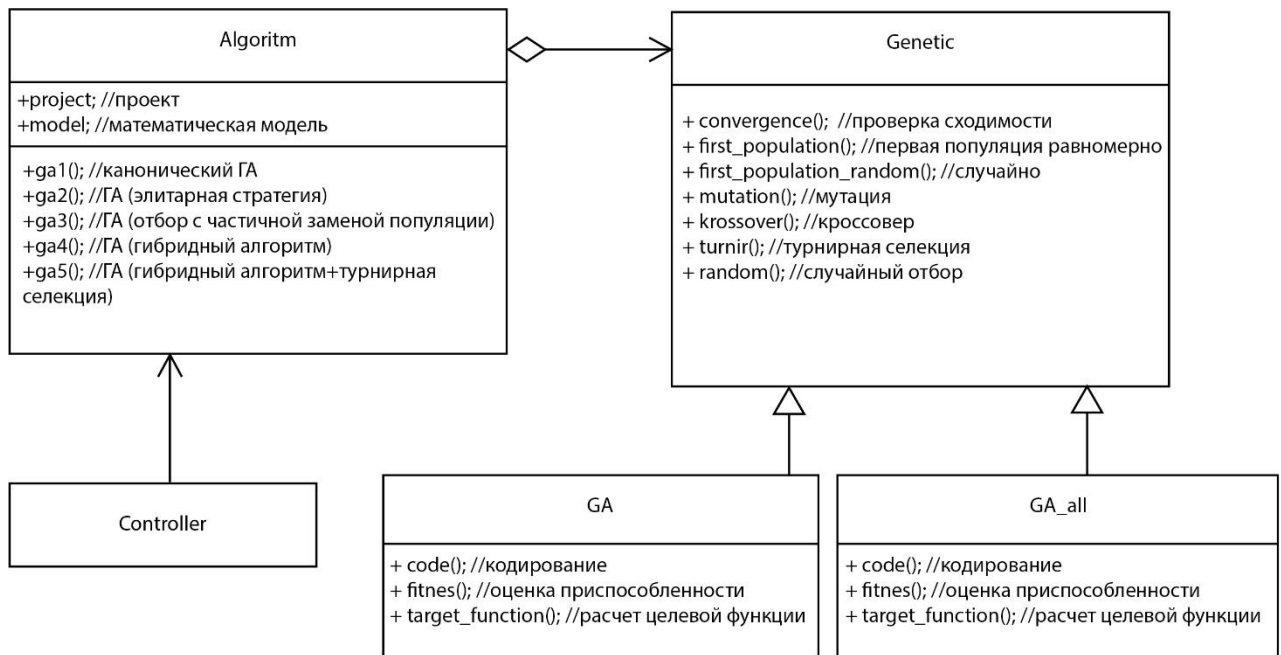


Рисунок 4.9 – Стратегия работы используемого алгоритма

Применение предложенной архитектуры позволяет легко выполнять масштабирование разработанного программного обеспечения, что делает его более простым в реализации и сопровождении.

В результате проведенных вычислительных экспериментов установлено, что применение параллельных вычислений позволяет получить при меньшем времени

работы алгоритма более высокую точность результата подбора конструкции. Параллельные вычисления реализованы с применением технологии AJAX [105]. Диаграмма последовательности работы параллельного запуска алгоритма приведена на рисунке 4.10.

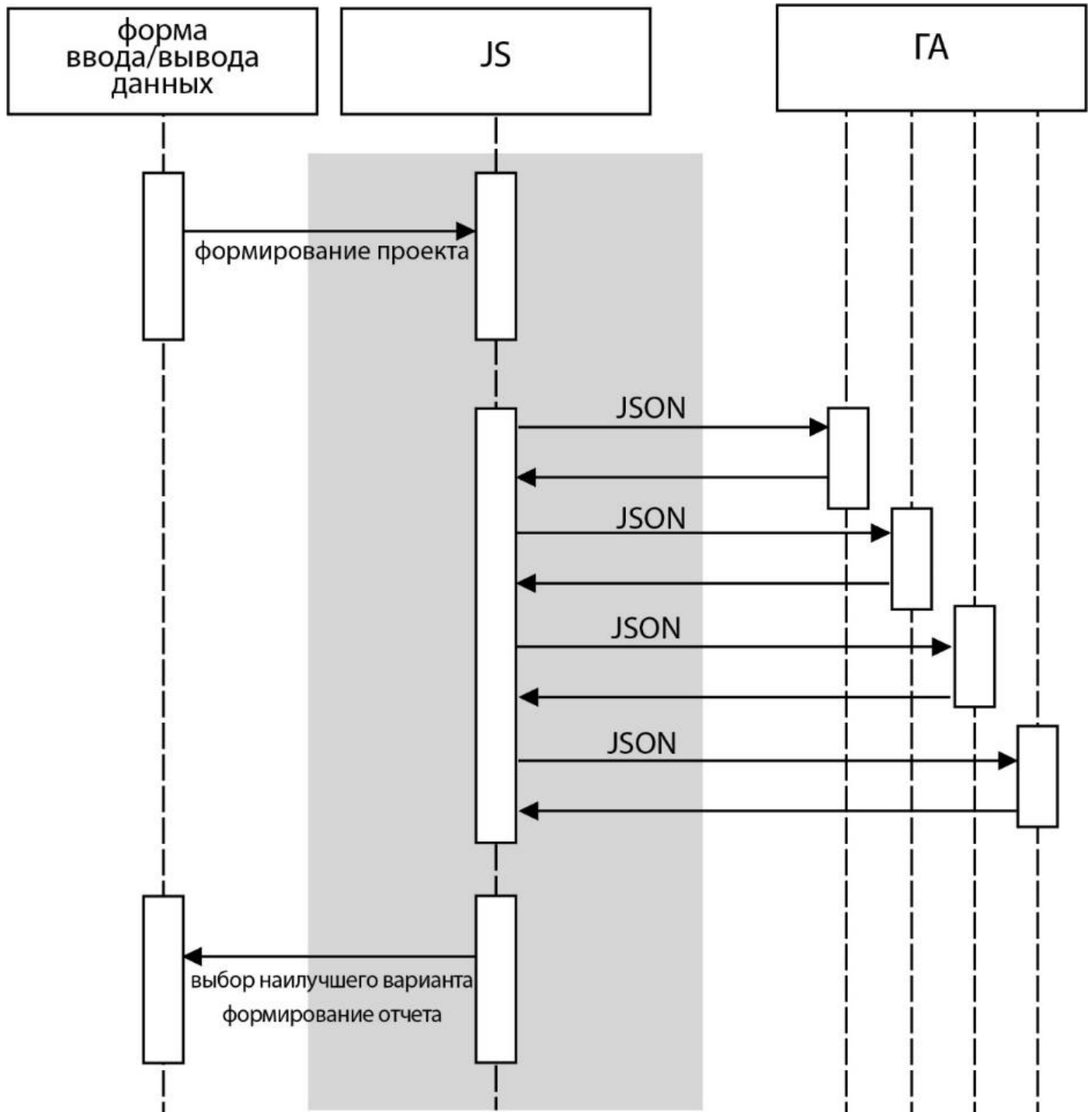


Рисунок 4.10 – Диаграмма последовательности работы параллельного генетического алгоритма

4.4 Оцифровка и представление номограмм

Для оцифровки графиков и номограмм, содержащихся в ОДН 218.046-01, средствами Borland Delphi [106] было разработано программное обеспечение. Разработанное программное обеспечение позволяет на основе изображений в формате .bmp, предварительно обработанных в графическом редакторе, получать таблицы значений для последующей аппроксимации, что делает возможным использование графической информации для расчета конструкций нежестких дорожных одежд программным способом.

Оцифровка графиков и номограмм, представленных в ОДН 218.046-01, проводилась в несколько этапов:

1. В результате предварительной обработки каждой номограммы (рис. 4.11) в графическом редакторе были получены бинарные изображения отдельных линий номограммы, удалены визуальный шум и вспомогательные линии (сетка, легенда, оси координат).

2. Выполнена трассировка каждой линии при помощи графического редактора CorelTrase (рис. 4.12).

3. С использованием разработанного приложения для обработки графической информации (рис. 4.13) получены координаты (табл. 4.6) отдельных точек номограмм (путем построчного сканирования изображения с заданным интервалом найдены точки черного цвета).

4. На основе полученных вспомогательных таблиц с помощью кусочно-линейной аппроксимации можно производить любые расчеты по номограммам в любой программной среде.

Для включения вычислений по номограммам в оптимизационную модель расчета конструкции нежесткой дорожной с помощью системы СТЭК (рис. 4.14) [107] методом наименьших квадратов осуществлен подбор тенденций путем аппроксимации этих данных набором из 18 функций (прил. Ж) [108, 109].

В таблицах 4.7, 4.8 и на рисунке 4.15 приведены результаты аппроксимации, выполненной при помощи системы СТЭК (на примере данных номограммы для определения коэффициента $K_{\text{нагр}}$). На рисунке 4.16 представлена блок-схема алгоритма для вычисления значений по данной номограмме.

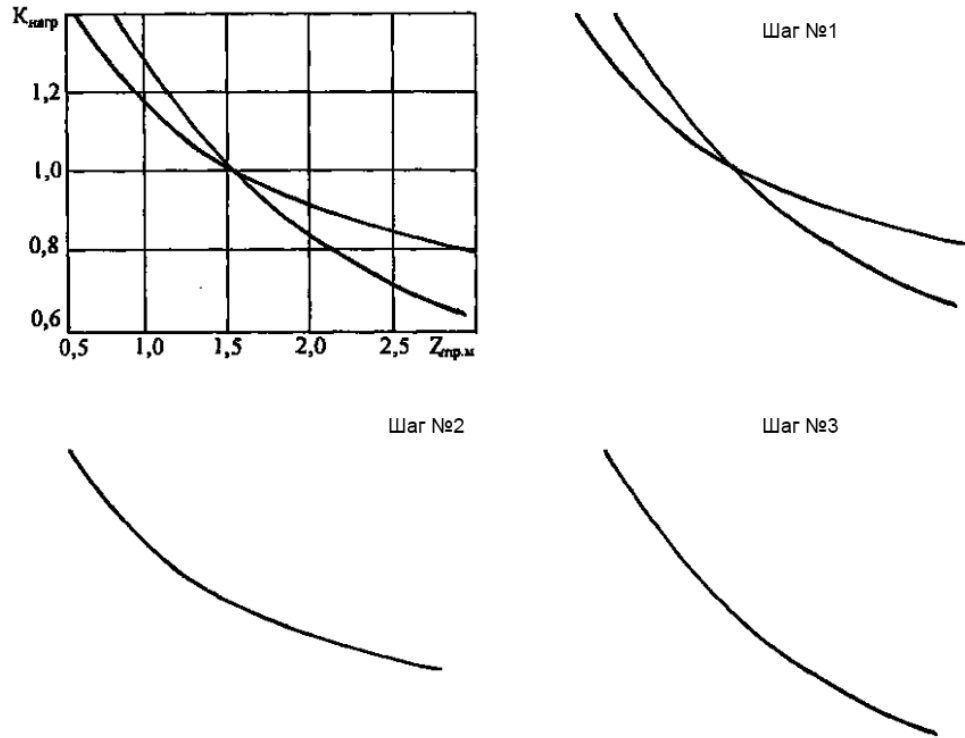


Рисунок 4.11 – Этапы обработки номограммы в графическом редакторе

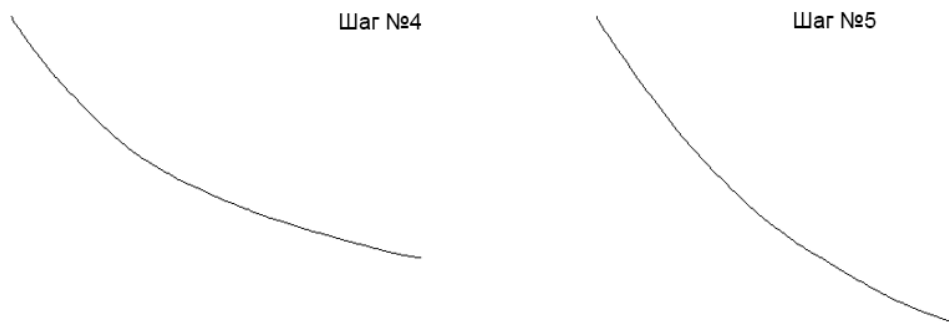


Рисунок 4.12 – Этапы обработки номограммы в графическом редакторе

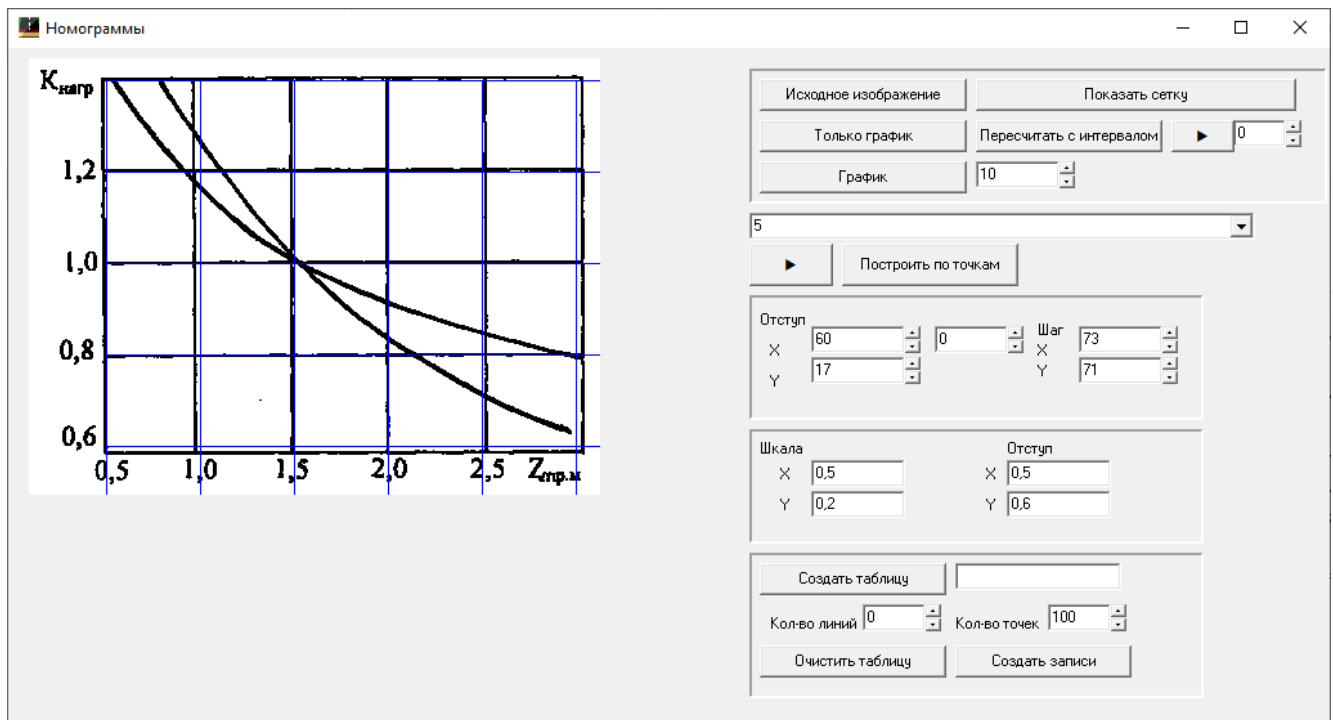


Рисунок 4.13 – Интерфейс программы для оцифровки номограмм

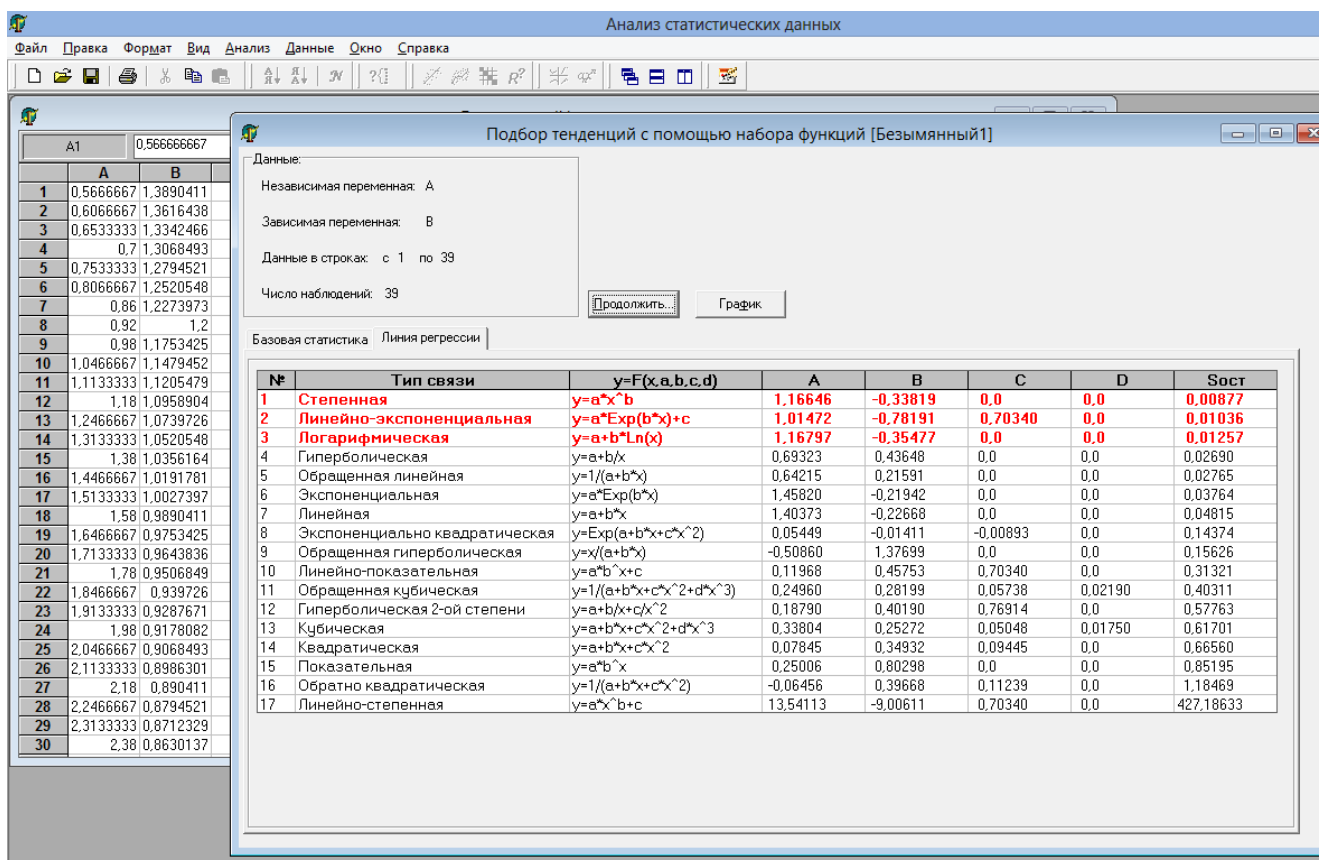


Рисунок 4.14 – Результат аппроксимации, выполненной при помощи системы СТЭК

Таблица 4.6 –Таблица значений, полученных в результате оцифровки номограммы

X ₁	Y ₁	X ₂	Y ₂
0,566667	1,389041	0,813333	1,389041
0,606667	1,361644	0,846667	1,361644
0,653333	1,334247	0,893333	1,334247
0,7	1,306849	0,94	1,306849
0,753333	1,279452	0,986667	1,279452
0,806667	1,252055	1,033333	1,252055
0,86	1,227397	1,08	1,224658
0,92	1,2	1,133333	1,19726
0,98	1,175342	1,18	1,169863
1,046667	1,147945	1,233333	1,142466
1,113333	1,120548	1,28	1,115068
1,18	1,09589	1,34	1,087671
1,246667	1,073973	1,4	1,060274
1,313333	1,052055	1,46	1,032877
1,38	1,035616	1,52	1,005479
1,446667	1,019178	1,586667	0,980822
1,513333	1,00274	1,646667	0,956164
1,58	0,989041	1,713333	0,928767
1,646667	0,975342	1,78	0,90411
1,713333	0,964384	1,846667	0,882192
1,78	0,950685	1,913333	0,863014
1,846667	0,939726	1,98	0,843836
1,913333	0,928767	2,046667	0,824658
1,98	0,917808	2,113333	0,808219
2,046667	0,906849	2,18	0,791781
2,113333	0,89863	2,246667	0,775342
2,18	0,890411	2,313333	0,758904
2,246667	0,879452	2,38	0,745205
2,313333	0,871233	2,446667	0,728767
2,38	0,863014	2,513333	0,712329
2,446667	0,857534	2,58	0,69863
2,513333	0,849315	2,646667	0,687671
2,58	0,841096	2,713333	0,676712
2,646667	0,832877	2,78	0,665753
2,713333	0,824658	2,846667	0,654795
2,78	0,819178	2,933333	0,641096

Таблица 4.7 – Результаты аппроксимации значений, полученных в результате оцифровки набором из 18 функций для линии номограммы «Зависимость коэффициента $K_{нагр}$ от глубины промерзания $z_{пр}$ от поверхности покрытия для супеси тяжелой и пылеватой»

№	Тип связи	$y=F(x,a,b,c,d)$	A	B	C	D	$S_{ост}$
1	Степенная	$y=a \cdot x^b$	1,16700	-0,3400	0	0	0,009
2	Линейно-экспоненциальная	$y=a \cdot \exp(b \cdot x) + c$	1,02047	0,78449	0,7034	0	0,01
3	Логарифмическая	$y=a+b \cdot \ln(x)$	1,16923	0,35664	0	0	0,013
4	Гиперболическая	$y=a+b/x$	0,69944	0,42584	0	0	0,029
5	Обращенная линейная	$y=1/(a+b \cdot x)$	0,63722	0,21816	0	0	0,029
6	Экспоненциальная	$y=a \cdot \exp(b \cdot x)$	1,47047	0,22325	0	0	0,039
7	Линейная	$y=a+b \cdot x$	1,41631	0,23243	0	0	0,05
8	Экспоненциально-квадратическая	$y=\exp(a+b \cdot x+c \cdot x^2)$	0,05934	0,01327	0,00868	0	0,152
9	Обращенная гиперболическая	$y=x/(a+b \cdot x)$	0,49353	1,37011	0	0	0,167
10	Линейно-показательная	$y=a \cdot b^x + c$	0,12446	0,45635	0,7034	0	0,322
11	Обращенная кубическая	$y=1/(a+b \cdot x+c \cdot x^2+d \cdot x^3)$	0,25358	0,28301	0,05771	0,02198	0,414
12	Гиперболическая 2-ой степени	$y=a+b/x+c/x^2$	0,16968	0,46075	0,67059	0	0,584
13	Кубическая	$y=a+b \cdot x+c \cdot x^2+d \cdot x^3$	0,3528	0,25546	0,05112	0,01767	0,632
14	Квадратическая	$y=a+b \cdot x+c \cdot x^2$	0,09609	0,35276	0,09549	0	0,683
15	Показательная	$y=a \cdot b^x$	0,25941	0,79992	0	0	0,855
16	Обратно-квадратическая	$y=1/(a+b \cdot x+c \cdot x^2)$	0,05523	0,39783	0,11292	0	1,229
17	Линейно-степенная	$y=a \cdot x^b + c$	8,17514	8,27322	0,7034	0	222,5
18	Логистическая	$y=a/(1+b \cdot \exp(-c \cdot x))$	-	-	-	-	-

Таблица 4.8 – Результаты аппроксимации значений, полученных в результате оцифровки набором из 18 функций для линии номограммы «Зависимость коэффициента $K_{нагр}$ от глубины промерзания $z_{пр}$ от поверхности покрытия для песка, супеси легкой и крупной»

№	Тип связи	$y=F(x,a,b,c,d)$	A	B	C	D	$S_{ост}$
1	Обращенная линейная	$y=1/(a+b \cdot x)$	0,385	0,402	0	0	0,00574
2	Логарифмическая	$y=a+b \cdot \ln(x)$	1,26342	0,59805	0	0	0,00859
3	Линейно-экспоненциальная	$y=a \cdot \exp(b \cdot x) + c$	1,71486	0,45198	0,16164	0	0,01836
4	Степенная	$y=a \cdot x^b$	1,26256	0,61508	0	0	0,02225
5	Экспоненциальная	$y=a \cdot \exp(b \cdot x)$	1,81341	0,37241	0	0	0,02322
6	Гиперболическая	$y=a+b/x$	0,39609	0,86553	0	0	0,03543

Продолжение таблицы 4.8

№	Тип связи	$y=F(x,a,b,c,d)$	A	B	C	D	$S_{ост}$
7	Линейная	$y=a+b*x$	1,59678	0,35611	0	0	0,04598
8	Экспоненциально квадратическая	$y=Exp(a+b*x+c*x^2)$	0,06488	0,03068	-0,02026	0	0,17853
9	Обращенная кубическая	$y=1/(a+b*x+c*x^2+d*x^3)$	0,22582	0,30389	0,06639	0,0281	0,22799
10	Обращенная гиперболическая	$y=x/(a+b*x)$	-1,15764	1,84911	0	0	0,27563
11	Гиперболическая 2-ой степени	$y=a+b/x+c/x^2$	0,30351	0,25364	1,62799	0	0,39088
12	Кубическая	$y=a+b*x+c*x^2+d*x^3$	0,30884	0,23904	0,05028	0,01771	0,63543
13	Квадратическая	$y=a+b*x+c*x^2$	0,05937	0,32928	0,09366	0	0,66977
14	Линейно-показательная	$y=a*b^x+c$	0,25225	0,63636	0,16164	0	0,71861
15	Обратно квадратическая	$y=1/(a+b*x+c*x^2)$	-0,14629	0,4336	0,13522	0	0,74266
16	Показательная	$y=a*b^x$	0,27967	0,68907	0	0	0,84469
17	Линейно-степенная	$y=a*x^b+c$	3,92623	3,30663	0,16164	0	2,19373
18	Логистическая	$y=a/(1+b*Exp(-c*x))$	-	-	-	-	-

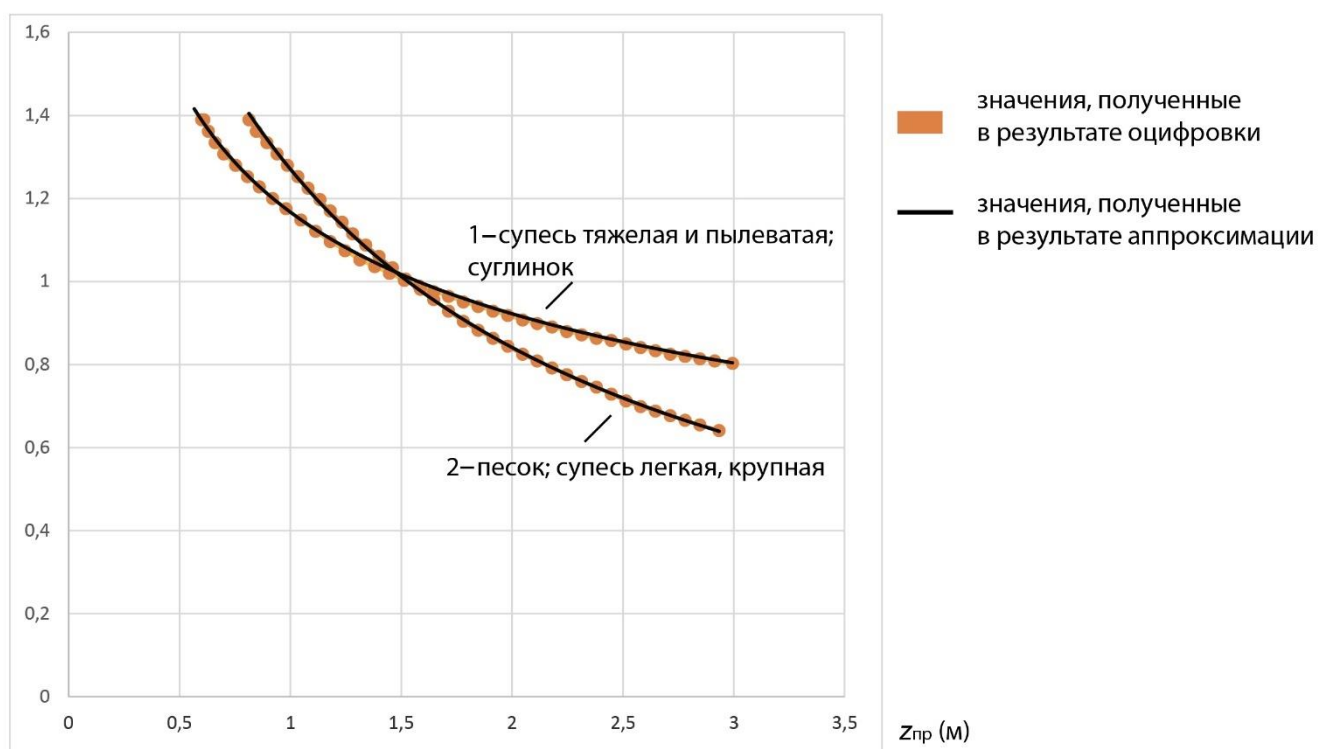
 $K_{нагр}$ 

Рисунок 4.15 – Номограмма «Зависимость коэффициента $K_{нагр}$ от глубины промерзания $z_{пр}$ от поверхности покрытия для песка, супеси легкой и крупной», построенная на основе данных, полученных при оцифровке номограммы и в результате аппроксимации

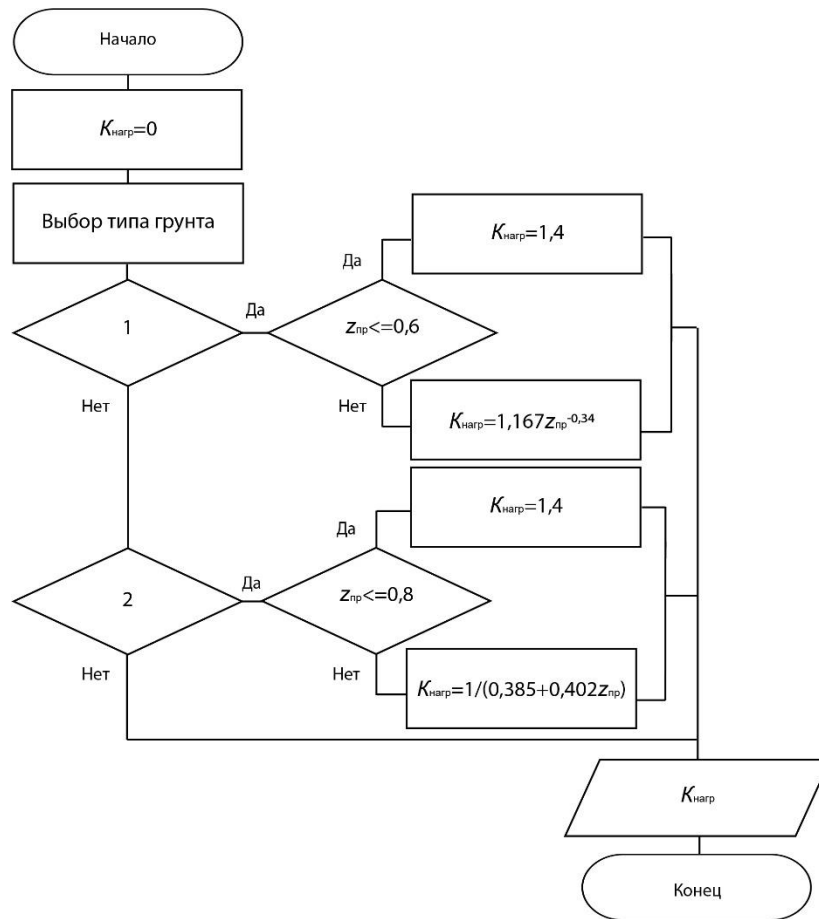


Рисунок 4.16 – Блок-схем алгоритма для вычисления значений по номограмме «Зависимость коэффициента $K_{\text{нагр}}$ от глубины промерзания $z_{\text{пр}}$ от поверхности покрытия для супеси тяжелой и пылевой»

4.5 Интерфейс и основные возможности программного обеспечения

Назначение конструкции (рис. 4.17-4.19). Процедура расчета конструкции дорожной одежды включает:

- выбор вида покрытия;
- назначение числа конструктивных слоев с выбором материалов для устройства слоев, размещение слоев в конструкции и назначение их ориентировочных толщин;
- предварительную оценку необходимости назначения дополнительных морозозащитных мер с учетом дорожно-климатической зоны, типа грунта рабочего слоя земляного полотна и схемы увлажнения рабочего слоя на различных участках;

- предварительный отбор конкурентоспособных вариантов с учетом местных природных и проектных условий работы [12, 108-119].

Рисунок 4.17 – Назначение конструкции

Рисунок 4.18 – Назначение конструкции

New project Update Albomodn BDmaterial

наименование участка: 1_class протяженность участка: 5000

дорожно-климатическая зона dkz: I категория дорожной одежды katdo: I тип дорожной tdo: kapitalni

тип нагрузки tn: A1 заданный коэф. надежности kn: 0.95 срок службы tcl: 15

кол-во расчетных дней в году trdg: 125 интенсивность движения на конец срока службы Np: 3000 приращение интенсивности q: 1.04

3

1 2 3

Конструкция нежесткой дорожной одежды: constr_1

Длина участка: 1200

Схема увлажнения: I

Глубина залегания грунтовых вод: 2

Шаблон конструкции: 12

Покрытие

	h_слоя	шаг	h_min	
1_класс_1_Плотный марки 1 Асфальтобен из горячей	4	2	2	3872
1 класс_2_Пористый марки 1 Асфальтобен из горячей	6	2	2	4500
1 класс_3_Высокопористый марки 2 Асфальтон из гор.	8	2	2	3430

3

Основание

	h_слоя	шаг	h_min	
1 класс_Готовые песчано-щебеночные смеси, укрепл	24	2	2	872

1

Дополнительные слои

	h_слоя	шаг	h_min	
песок средней крупности	20	2	2	720

Грунт

Супесь легкая 70

+ Добавить новую конструкцию

Рисунок 4.19 – Назначение конструкции для поиска оптимальной по продольному профилю трассы конструкции

New project Update Albomodn BDmaterial

наименование участка: primer1 протяженность участка: 1000

дорожно-климатическая зона dkz: II категория дорожной одежды katdo: I тип дорожной tdo: kapitalni

тип нагрузки tn: A1 заданный коэф. надежности kn: 0.95 срок службы tcl: 20

кол-во расчетных дней в году trdg: 125 интенсивность движения на конец срока службы Np: 3200 приращение интенсивности q: 1.04

расчетные нагрузки: 7179493.615

требуемый минимальный коэффициент прочности для расчета по допускаемому упругому прогибу: 1.38

Допустимое значение морозного лучения: 4

требуемый минимальный коэффициент прочности при заданных условиях надежности: 1

Рисунок 4.20 – Вычисление расчетных нагрузок участка

Расчет дорожных одежд на прочность и морозоустойчивость. В процессе расчета конструкции на прочность выполняются вычисления по критериям упругого прогиба, сдвигоустойчивости малосвязных конструктивных слоев и подстилающего грунта и расчет на сопротивление монолитных слоев усталостному растяжению при изгибе. Результатом расчета являются значения расчетных коэффициентов по соответствующим критериям. На основании их соотношения с нормативными значениями делается вывод о соответствии или несоответствии конструкции требованиям прочности (рис. 4.20-4.21).

1

Конструкция нежесткой дорожной одежды: construction_1

Длина участка: 1000

Схема увлажнения: III

Глубина залегания грунтовых вод: 0.9

Шаблон конструкции: 1

Покрывтие	h_слоя	шаг	h_min	
Плотный А на БНД марки: 60-90	4	2	2	3087
Пористый крупнозернистая смесь на БНД марки: 60-90	8	2	2	3509
Высокопористый крупнозернистая смесь на БНД марки	22	2	2	3509

Основание	h_слоя	шаг	h_min	
Укрепленная щебеночно-гравийно-песчаная смесь	15	8	8	685

Дополнительные слои	h_слоя	шаг	h_min	
песок средней крупности	30	2	2	500

Грунт: Супесь пылеватая 46

Рассчет по упругому прогибу

минимальный требуемый общий модуль упругости E_{min} : 326.14

общий модуль упругости E_{ob} : 528

расчетный коэффициент прочности по упругому прогибу: 1.619

Рассчет по критерию сопротивления усталостному разрушению

расчетное растягивающее напряжение σ_r : 0.37

предельное растягивающее напряжение R_r : 0.46

расчетный коэф. прочности ДО по критерию сопротивления усталостному разрушению: 1.23

Рассчет по критерию сдвигоустойчивости

действующее активное напряжение T : 0.0069

предельное активное напряжение T_{gr} : 0.015

расчетный коэф. прочности ДО по критерию сдвигоустойчивости: 2.173

Морозоустойчивость

расчетное (ожидаемое) пучение грунта земляного полотна L_{push} : 5.06

+ Добавить новую конструкцию

Рисунок 4.21 – Расчет прочности и морозоустойчивости

Для верификации работы алгоритма расчета конструкции нежестких дорожных одежд по критериям прочности и морозоустойчивости в соответствии с ОДН 218.046-01 использованы примеры расчетов нежестких дорожных одежд, приведенные в ОДН 218.046-01. В таблицах 4.9 и 4.10 приведены параметры участка и конструкции нежестких дорожных одежд, соответствующие примеру №2, приведенному в приложении №8 «Примеры расчета» ОДН 218.046-01. В таблице 4.11 представлено сравнение результатов расчета, полученных в результате работы программного обеспечения и приведенных в сравнении с ОДН 218.046-01.

Таблица 4.9 – Параметры участка для тестового расчета

Параметр	Значение
Дорожно-климатической зоне	II
Категория автомобильной дороги	I
Заданный срок службы дорожной одежды – T_{cl}	20 лет
Заданная надежность K_n	0,95
Приведенная к нагрузке	Типа А
Интенсивность движения на конец срока службы N_p	3200 авт/сут
Приращение интенсивности q	1,04
Грунт рабочего слоя земляного полотна – супесь пылеватая с расчетной влажностью	0,7 W_T
Схема увлажнения рабочего слоя земляного полотна	III
Глубина залегания грунтовых вод	0,9 м

Таблица 4.10 – Параметры конструкции нежестких дорожных одежд для тестового расчета

№	Материал слоя	h слоя, см	Расчет по до- пустимому упруг. про- гибу, Е, МПа	Расчет по усл. сдвига- устойчиво- сти, Е, Па	Расчет на растяжение при из- гибе			
					Е, МПа	R_o , МПа	α	m
1.	Асфальтобетон плотный на БНД марки 60/90	4	3200	1800	4500	9,80	5,2	5,5
2.	Асфальтобетон пористый на БНД марки 60/90	8	2000	1200	2800	8,0	5,9	4,3
3.	Асфальтобетон высоко-пористый на БНД марки 60/90	22	2000	1200	2100	5,65	6,3	4,0
4.	Укрепленная щебеночно-гравийно-песчаная смесь	15	400	400	400	-	-	-
5.	Песок средней крупности	30	120	120	120	-	-	-
6.	Супесь пылеватая $W_p = 0,7W_T$	-	46	46	46	-	-	-

Таблица 4.11 – Сравнение результатов расчета, приведенных в ОДН 218.046-01, и тестовых расчетов, полученных в результате работы разработанного программного обеспечения

	Результаты расчета, приведенные в ОДН 218.046-01	Результаты расчета с использованием разработанного ПО
Суммарное расчетное количество приложений расчетных нагрузок за срок службы	7179494	7179494
Общий модуль упругости (МПа)	528	528
Требуемый модуль упругости (МПа)	326	326,14

Продолжение таблицы 4.11

	Результаты расчета, приведенные в ОДН 218.046-01	Результаты расчета с использованием разработанного ПО
Коэффициент прочности по упругому прогибу	1,61	1,619
Соответствие конструкции условию прочности по допускаемому упругому прогибу	Конструкция удовлетворяет условию прочности по допускаемому упругому прогибу	Конструкция удовлетворяет условию прочности по допускаемому упругому прогибу
Действующие в грунте активные напряжения сдвига (МПа)	0,007	0,0069
Предельное активное напряжение сдвига $T_{пр}$ в грунте рабочего слоя (МПа)	0,015	0,015
Коэффициент прочности по условию сдвигоустойчивости в грунте	2,17	2,173
Соответствие конструкции условию прочности по сдвигу в грунте	Конструкция удовлетворяет условию прочности по сдвигу в грунте	Конструкция удовлетворяет условию прочности по сдвигу в грунте
Действующие в грунте активные напряжения сдвига (МПа)	0,102	0,1
Предельное активное напряжение сдвига $T_{пр}$ в грунте рабочего слоя (МПа)	0,0141	0,014
Коэффициент прочности по условию сдвигоустойчивости в песчаном слое основания	1,38	1,3
Соответствие конструкции условию прочности по сдвигоустойчивости в песчаном слое	Конструкция удовлетворяет условию прочности по сдвигоустойчивости в песчаном слое	Конструкция удовлетворяет условию прочности по сдвигоустойчивости в песчаном слое
Расчетное растягивающее напряжение (МПа)	0,38	0,37
Предельное растягивающее напряжение (МПа)	0,49	0,46
Коэффициент прочности по упругому прогибу	1,28	1,23
Соответствие конструкции условию разрушения на изгибе	Конструкция удовлетворяет условию прочности разрушения на изгибе	Конструкция удовлетворяет условию прочности разрушения на изгибе
Величина пучения для данной конструкции (см)	5,0	5,06
Допустимая величина морозного пучения согласно (см)	4	4
Соответствие конструкции условию разрушения на изгибе	Не соответствует условию	Не соответствует условию

В результате работы программного обеспечения вычисляются основные расчетные показатели, и на основании их соотношения с требуемыми значениями делается вывод о соответствии конструкции основным параметрам прочности и морозостойкости. Рассчитанные варианты конструкции сохраняются в базе данных, и каждый из них может быть экспортирован на рабочий лист MS Excel (рис. 4.22-4.23).

Программное обеспечение, разработанное с использованием технологии параллельных вычислений на основе предложенной модели и генетического алгоритма численного расчета оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд, позволяет сократить трудозатраты и время работы над проектом, а также снизить вероятность появления ошибок при назначении конструкции в сравнении с традиционным способом.

Результаты расчета									
Исходные данные									
Категория автомобильной дороги	1	Участок №1		№1					
Тип дорожной одежды	Капитальный	Участок №2		Конструкция					
Заданный коэффициент надежности	0,95	Протяженность участка (м)		2500					
Тип нагрузки	A1	Участок №1		Конструкция					
Дорожно-климатическая зона	1	Протяженность участка (м)		5700					
Схема увлажненности	1	Участок №3		Конструкция					
Количество расчетных дней в году	125	Протяженность участка		№2					
Интенсивность движения на конец срока службы, авто	3000	Протяженность участка (м)		1800					
Заданный срок службы, лет	15	Стоимость проекта (руб.)		8463200					
Конструкция нежесткой дорожной одежды №1		Удельная стоимость погонного метра конструкции		832 руб/м ³					
Материал слоя	Толщина слоя h (см)	Расчет по допустимому упругому прогибу, E (МПа)	Расчет по условию сдвиговой устойчивости, E (МПа)	Расчет на растяжение при изгибе			Стоимость (м ³ /руб)		
				E (МПа)	R ₀ (МПа)	α	β	γ	
Асфальтобетон плотный марки 2 из горячей (теплой) мелкозернистой щебеночной смеси типа А	8	3200	1800	4500	9,8	5,2	5,5	19	
Асфальтобетон пористый марки 2 из горячей (теплой) крупнозернистой щебеночной (гравийной) смеси	8	2800	1700	2800	8,0	5,9	4,3	20	
Слой из фракционного щебня, обработанного азавим битумом, жидким битумом, дегтем в установках для тепловой укладки	4	450	450	450	5,6	6,3	4,0	23	
Готовая песчано-щебеночная смесь, укрепленная шлаковыми вяжущими М5 в количестве 12-16% в сочетании с 2-3% поглотителями М-40 смеси 2	24	700	700	700	-	-	-	7,7	
Песок средней крупности	18	120	120	120	-	-	-	2,4	
Подстилающий грунт	-	-	-	-	-	-	-	-	
Слойсы дегтя	-	60	60	60	-	-	-	-	
Конструкция нежесткой дорожной одежды №1		Удельная стоимость погонного метра конструкции		832 руб/м ³					
Материал слоя	Толщина слоя h (см)	Расчет по допустимому упругому прогибу, E (МПа)	Расчет по условию сдвиговой устойчивости, E (МПа)	Расчет на растяжение при изгибе			Стоимость (м ³ /руб)		
				E (МПа)	R ₀ (МПа)	α	β	γ	
Асфальтобетон плотный марки 2 из горячей (теплой) мелкозернистой щебеночной смеси типа А	8	3200	1800	4500	9,8	5,2	5,5	19	
Асфальтобетон пористый марки 2 из горячей (теплой) крупнозернистой щебеночной (гравийной) смеси	8	2800	1700	2800	8,0	5,9	4,3	20	
Слой из фракционного щебня, обработанного азавим битумом, жидким битумом, дегтем в установках для тепловой укладки	4	450	450	450	5,6	6,3	4,0	23	
Готовая песчано-щебеночная смесь, укрепленная шлаковыми вяжущими М5 в количестве 12-16% в сочетании с 2-3% поглотителями М-40 смеси 2	24	700	700	700	-	-	-	7,7	
Песок средней крупности	18	120	120	120	-	-	-	2,4	
Подстилающий грунт	-	-	-	-	-	-	-	-	
Слойсы дегтя	-	70	70	70	-	-	-	-	
Конструкция нежесткой дорожной одежды №2		Удельная стоимость погонного метра конструкции		708 руб/м ³					
Материал слоя	Толщина слоя h (см)	Расчет по допустимому упругому прогибу, E (МПа)	Расчет по условию сдвиговой устойчивости, E (МПа)	Расчет на растяжение при изгибе			Стоимость (м ³ /руб)		
				E (МПа)	R ₀ (МПа)	α	β	γ	
Асфальтобетон плотный марки 2 из горячей (теплой) мелкозернистой щебеночной смеси типа А	8	3200	1800	4500	9,8	5,2	5,5	19	
Дегтебетон пористый марки 1 из горячей крупнозернистой щебеночной (гравийной) смеси	8	2000	300	3600	8,3	5,8	4,5	12	
Слой из фракционного щебня, обработанного азавим битумом, жидким битумом, дегтем в установках для тепловой укладки	10	450	450	450	5,6	6,3	4,0	23	
Готовая песчано-щебеночная смесь, укрепленная шлаковыми вяжущими М5 в количестве 12-16% в сочетании с 2-3% поглотителями М-40 смеси 2	24	700	700	700	-	-	-	7,7	
Песок средней крупности	18	120	120	120	-	-	-	2,4	
Подстилающий грунт	-	-	-	-	-	-	-	-	
Слойсы дегтя	-	108	108	108	-	-	-	-	

Рисунок 4.22 – Результат подбора оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд по продольному профилю трассы, состоящей из нескольких участков

Конструкция нежесткой дорожной одежды

Исходные данные	
Наименование	Участок №1
Категория автомобильной дороги	I
Тип дорожной одежды	Капитальный
Заданный коэффициент надежности	0,95
Тип нагрузки	A1
Дорожно-климатическая зона	I
Количество расчетных дней в году	125
Интенсивность движения на конец срока службы, авт/су	3000
Заданный срок службы, лет	15

Результат расчета			
Параметр расчета	Расчетное значение	Требуемое значение	
Расчет по допускаемому упругому прогибу	$K_n=1,46$	$K_{тр}=1,38$	$K_n > K_{тр}$
Расчет на сопротивление монолитных слоев	$K_n=2,19$	$K_{тр}=1$	$K_n > K_{тр}$
Расчет по условию сдвигустойчивости	$K_n=2,4$	$K_{тр}=1$	$K_n < K_{тр}$
Расчет морозостойкости	$I_{пуч} = 3,2 \text{ см}$	$I_{доп} = 4 \text{ см}$	$I_{пуч} < I_{доп}$

Материал слоя	Толщина слоя h (см)	Расчет по допустимому упругому прогибу, E (МПа)	Расчет по условию сдвигустойчивости, E (МПа)	Расчет на растяжение при изгибе				Стоимость (м³/руб)
				E (МПа)	R_o (МПа)	a	m	
Асфальтобетон плотный марки 2 из горячий (теплый) мелкозернистой щебеночной (гравийной) смеси типа В	2	3200	1800	4500	9,8	5,2	5,5	28,5
Асфальтобетон высокопористый марки 1 из горячий (теплый) мелкозернистой щебеночной (гравийной) смеси	4	2800	1700	3000	5,5	5,9	4,3	32
Готовая песчано-щебеночная смесь, обработанная вязким битумом	6	450	450	450	5,6	6,3	4,0	24
Готовая песчано-гравийная смесь, укрепленная поргандцементом М-40 в кол-ве 6-8%	32	700	700	700	-	-	-	6,9
Песок средней крупности	58	120	120	120	-	-	-	2,4
Подстилающий грунт								
Супесь пылеватая	-	108	108	108	-	-	-	
Удельная стоимость погонного метра конструкции		689 руб/м²						

Рисунок 4.23 – Результат подбора оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд

Таблица 4.12 – Сравнение возможностей программного обеспечения для расчета конструкции нежестких дорожных одежд

	Оптимизация путем варьирования толщин конструктивных слоев	Оптимизация путем варьирования материалов конструктивных слоев	Оптимизация путем варьирования толщин и материалов конструктивных слоев	Оптимизация конструкции по продольному профилю трассы, состоящей из нескольких участков
IndorPavement: Система расчёта дорожных одежд	Да	Нет	Нет	Нет
Топоматик Robur - Дорожная одежда. 5.0	Да	Нет	Нет	Нет
Кредо Радон 3.9	Да	Нет	Нет	Нет
Программное обеспечение для расчета нежестких дорожных одежд	Да	Да	Да	Да

Разработанное программное обеспечение [108-123] позволяет выполнять расчет конструкции нежестких дорожных одежд в соответствии с принятыми на территории Российской Федерации нормативными документами, а также осуществлять

подбор оптимальной конструкции путем варьирования толщин и материалов конструктивных слоев, так как благодаря применению предложенного гибридного генетического алгоритма и технологии параллельных вычислений становится возможным анализ большого количества вариантов конструкций нежестких дорожных одежд за приемлемое время (табл. 4.12).

Выводы по четвертой главе

В этой главе представлено разработанное оригинальное программное обеспечение, базирующееся на предложенных математических моделях и реализующее с применением технологии параллельных вычислений разработанные алгоритмы поиска оптимальных конструкций нежестких дорожных одежд для автомобильных дорог общего пользования.

Возможности разработанного программного обеспечения:

1. Назначение и расчет входных параметров задачи (параметры транспортной нагрузки, климатические и геологические параметры проектируемого участка).
2. Назначение конструкции нежестких дорожных одежд на основе справочника «Дорожные одежды автомобильных дорог общего пользования» Серия 3.503–71/88.
3. Проверка конструкции нежестких дорожных одежд на соответствие требованиям прочности и морозоустойчивости (ОДН 218.046-01).
4. Подбор минимальной по стоимости конструкции нежестких дорожных одежд, удовлетворяющей требованиям прочности и морозоустойчивости, путем варьирования толщин и материалов конструктивных слоев.
5. Подбор оптимального варианта конструкций нежестких дорожных одежд по продольному профилю трассы для различных участков автомобильных дорог в зависимости от климатических и геологических условий с минимальными затратами на сооружение.
6. Формирование отчетов.

Для разработки программного обеспечения применялись следующие технологии: PHP 5.3, JavaScript, AJAX, MySQL 5.5, Yii PHP Framework. Разработанное в результате исследования программное обеспечение позволяет повысить оперативность принятия решений при расчете оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд автомобильных дорог общего пользования в процессе проектирования.

На разработанное программное обеспечение и базы данных получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и баз данных: № 2013661847 от 17.12.2013 «Информационно-вычислительная система для расчета и оценки стоимости конструкции нежесткой дорожной одежды для автомобильных дорог общего пользования», № 2014621634 от 28.11.2014 «База данных информационно-вычислительной системы для расчета и оценки стоимости конструкции нежесткой дорожной одежды для автомобильных дорог общего пользования», № 2016620435 от 11.04.2016 «База данных web-сервиса для поиска оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд», № 2016613863 от 11.04.2016 «Web-сервис для поиска оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд» [120-123].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные математические модели, алгоритмы и разработанное программное обеспечение для расчета оптимальных конструкций нежестких дорожных одежд автомобильных дорог общего пользования, имеющие существенное значение для развития страны. В рамках исследования получены следующие результаты:

1. Предложена математическая модель оптимизации конструкции нежестких дорожных одежд путем варьирования толщин и дорожно-строительных материалов конструктивных слоев, позволяющая получать минимальные по стоимости и удовлетворяющие требованиям прочности и морозоустойчивости конструкции.

2. Предложена математическая модель многокритериальной оптимизации конструкции нежестких дорожных одежд для минимизации ее стоимости с учетом критерия однотипности по продольному профилю трассы, состоящей из нескольких участков.

3. На основе предложенной математической модели разработаны метод и алгоритм оптимизации, основанные на сочетании эволюционного поиска и прямого перебора, позволяющие получать минимальные по стоимости и удовлетворяющие требованиям прочности и морозоустойчивости конструкции путем варьирования толщин и (или) материалов конструктивных слоев.

4. На основе предложенной математической модели разработаны метод и алгоритм многокритериальной оптимизации конструкции нежестких дорожных одежд состоящей из нескольких участков трассы, основанные на применении метода аддитивной свертки критериев с адаптивными коэффициентами, сочетании эволюционного поиска и прямого перебора.

5. Рассмотрены различные модификации генетического алгоритма применительно к поставленным задачам. Разработаны гибридные генетические алгоритмы, базирующиеся на предложенных численных методах. Для получения результатов

вычисления с относительной погрешностью менее 0,1 время работы разработанных алгоритмов составляет менее 1 минуты.

6. С использованием технологии параллельных вычислений разработано программное обеспечение, в составе которого реализованы предложенные математические модели и алгоритмы поиска оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд.

7. Выполнена оцифровка представленных в ОДН 218.046-01 графиков и номограмм. Методом наименьших квадратов осуществлен подбор тенденций путем аппроксимации этих данных набором из 18 функций.

8. Результаты диссертационной работы, представленные в виде разработанного программного продукта, использованы в отделе проектирования дорог ООО «Индор-Кузбасс» для конструирования и расчета нежестких дорожных одежд автомобильных дорог общего пользования и городской улично-дорожной сети. Отдельные результаты исследования используются в учебном процессе КузГТУ в рамках курсов «Интеллектуальные информационные системы», «Программная инженерия» для бакалавров направления подготовки 09.03.03 «Прикладная информатика».

9. На разработанное программное обеспечение и базы данных получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и баз данных: № 2013661847 от 17.12.2013 «Информационно-вычислительная система для расчета и оценки стоимости конструкции нежесткой дорожной одежды для автомобильных дорог общего пользования», № 2014621634 от 28.11.2014 «База данных информационно-вычислительной системы для расчета и оценки стоимости конструкции нежесткой дорожной одежды для автомобильных дорог общего пользования», № 2016620435 от 11.04.2016 «База данных web-сервиса для поиска оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд», № 2016613863 от 11.04.2016 «Web-сервис для поиска оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распоряжение Правительства РФ от 22.11.2008 N 1734-р (ред. от 12.05.2018) «О Транспортной стратегии Российской Федерации» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_82617 (дата обращения: 01.03.2020).
2. Материалы сайта «Федеральная служба государственной статистики» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.gks.ru> (дата обращения: 01.03.2020).
3. Паспорт национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги» (утв. президиумом Совета при Президенте РФ по стратегическому развитию и национальным проектам, протокол от 24.12.2018 N 15) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_319305 (дата обращения: 01.03.2020).
4. Указ Президента Российской Федерации от 7 мая 2018 года № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://base.garant.ru/71937200> (дата обращения: 01.03.2020).
5. Паспорт федерального проекта «Дорожная сеть» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mintrans.gov.ru/documents/8/9758> (дата обращения: 01.03.2020).
6. Паспорт федерального проекта «Общесистемные меры по развитию дорожного хозяйства» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mintrans.gov.ru/documents/8/9759> (дата обращения: 01.03.2020).
7. Паспорт федерального проекта «Безопасность дорожного движения» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mintrans.gov.ru/documents/8/9757> (дата обращения: 01.03.2020).
8. Федеральный проект «Автомобильные дороги Минобороны России» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_319305/50539d9187ad2831ff9205a5b8335d8fbecd38f7 (дата обращения: 01.03.2020).

9. Решение Комиссии Таможенного союза от 18.10.2011 N 827 (ред. от 12.10.2015) «О принятии технического регламента Таможенного союза «Безопасность автомобильных дорог» (вместе с «ТР ТС 014/2011. Технический регламент Таможенного союза. Безопасность автомобильных дорог») [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_120834 (дата обращения: 01.03.2020).

10. Афиногенов, О.П. Проектирование нежестких дорожных одежд. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2004. – 130 с.

11. ВСН 46-83 «Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа» / Минтрансстрой. – М.: Транспорт, 1985. – 41 с.

12. Отраслевые дорожные нормы. ОДН 218.046-01. Проектирование нежестких дорожных одежд / Минтранс России. – М.: Информавтодор, 2001. – 145 с.

13. Справочник «Справочная энциклопедия дорожника. Том I. Строительство и реконструкция автомобильных дорог» / Под ред. А.П. Васильева. – М.: Транспорт, 2005. – 1519 с.

14. Справочник «Справочная энциклопедия дорожника. Том IV. Дорожная наука» / Под ред. А.А. Надежко (ред.). – М.: Транспорт, 2006. – 393 с.

15. Справочник «Справочная энциклопедия дорожника. Том V. Проектирование автомобильных дорог» / Под ред. Г.А. Федотова, П.И. Поспелова. – М.: Транспорт, 2007. – 1466 с.

16. Шведовский, П.В. Изыскания и проектирование автомобильных дорог. Учебное пособие. Часть 2. Обустройство автомагистралей / П.В. Шведовский, В.В. Лукша. – М.: Новое знание, Инфра-М, 2017. – 340 с.

17. Смирнов, А.В. Динамическая устойчивость и расчет дорожных конструкций: Учебное пособие / Под ред. А.В. Смирнова. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2003. – 188 с.

18. Иванов, Н.Н. Конструирование и расчет нежестких дорожных одежд. – М.: Транспорт, 1973. – 328 с.

19. Федотов, Г.А. Автоматизированное проектирование автомобильных дорог. – М.: Транспорт, 1986. – 317 с.

20. Пуркин, В.И. Основы автоматизированного проектирования автомобильных дорог. – М.: Изд-во МАДИ (ТУ), 2000. – 141 с.

21. Материалы сайта «Программные продукты и технологии CREDO» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://credo-dialogue.ru> (дата обращения: 01.03.2020).

22. Материалы сайта «Индор.Софт» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://indorsoft.ru/products/pavement> (дата обращения: 01.03.2020).

23. Бойков, В.Н. Автоматизированное проектирование автомобильных дорог (на примере IndorCAD/Road) / В.Н. Бойков, Г.А. Федотов, В.И. Пуркин. – М.: Изд-во МАДИ (ГТУ), 2005. – 224 с.

24. Материалы сайта «Научно-производственная фирма «Топоматик» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.topomatic.ru> (дата обращения: 01.03.2020).

25. Корочкин, А.В. Теория расчета жесткой дорожной одежды с асфальтобетонным покрытием: учеб. пособие. – М.: МАДИ, 2017. – 148 с.

26. Опыт США по проектированию нежестких дорожных одежд / Федеральное дорожное агентство. Министерства транспорта российской федерации. Новости в дорожном деле [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nto.rosavtodor.ru/docs/ois08/Inform/345.doc> (дата обращения: 01.03.2020).

27. Радовский, Б.С. Первые представления о прочности и расчете дорожных одежд: дорожные одежды до XX века // Дорожная техника. – 2012. – №3. – С. 120-133.

28. Радовский, Б.С. Современное состояние разработки американского метода проектирования асфальтобетонных смесей суперпейв // Дорожная техника. – 2008. – №1. – С. 12-22.

29. Радовский, Б.С. Строительство дорог с цементобетонными покрытиями в США: новые тенденции (Организация и направления исследований в области цементобетонных покрытий) // Дорожная техника. – 2010. – №2. – С. 62-70.

30. Behbahani, H. Assessment of Perpetual Pavement Performance using Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (M-E PDG) and PerRoad Software Models /

H. Behbahani, A. M. Khaki, A. A. Amini. – International Conference on Perpetual, Columbus, Ohio, 2009. – 204 с.

31. AASHTOWare Pavement ME User Manual – Virginia Department of Transportation Pavement Design and Evaluation Section Central Office, Materials Division, 2017. – 55 с.

32. Материалы сайта «EXPOCLUB.ru – международный выставочный портал» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.exproclub.ru/> (дата обращения: 01.03.2020).

33. Материалы сайта «Worldexpo» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://worldexpo.pro/xxv-world-road-congress-2015-25-y-vsemirnyy-dorojnyy-kongress-i-vystavka> (дата обращения: 01.03.2020).

34. Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide. A Manual of Practice July 2008 – American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008. – 50 с.

35. Материалы сайта «Федеральное дорожное агентство Росавтодор» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rosavtodor.ru> (дата обращения: 01.03.2020).

36. Материалы сайта «СоюздорНИИ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://souzdornii.ru/> (дата обращения: 01.03.2020).

37. Материалы сайта «Автомобильные дороги – ежемесячный аналитический журнал» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.avtodorogi-magazine.ru/> (дата обращения: 01.03.2020).

38. Highway Engineering Pavements, Materials and Control of Quality. Athanassios Nikolaides by Taylor & Francis Group, LLC CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business, 2015. – 868 с.

39. Материалы сайта «U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://highways.dot.gov/> (дата обращения: 01.03.2020).

40. MnPAVE User's Guide July 2012 / Minnesota Department of Transportation. – 2012. – 35 с.

41. Amini, A. Assessment of Perpetual Pavement Performance using

Mechanistic Empirical Pavement Design Guide (M-E PDG) and PerRoad Software Models // B. Hamid, K. Ali Mansour, A. Amir, A. Amini / International Conference on Perpetual Pavement, 2009. – 241 с.

42. Материалы сайта «Asphalt Pavement Alliance» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.driveasphalt.org> (дата обращения: 01.03.2020).

43. Материалы сайта «AASHTOWare» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.aashtoware.org> (дата обращения: 01.03.2020).

44. Наумов, Б.М. Автоматизированное проектирование дорожных одежд нежесткого типа с применением ППП-I САПР-АД: Учеб. пособие. – М.: МАДИ, 1984. – 37 с.

45. Методические рекомендации по автоматизации расчетов дорожных одежд нежесткого типа / Союздорнии. – М, 1988. – 72 с.

46. Гольденберг, М.Л. Обоснование методики проектирования оптимальных нежестких дорожных одежд с учетом требуемой надежности по прочности (на примере автомобильных дорог Узбекистана): диссертация кандидата технических наук: 05.22.03. – Ташкент, 1984. – 277 с.

47. «Типовые строительные конструкции, изделия и узлы. Серия 3.503-71/88. Дорожные одежды автомобильных дорог общего пользования. Материалы для проектирования». – Союздорпроект Минтрансстроя, 1989. – 94 с.

48. Строительные нормы и правила СНиП 2.05.02-85 «Автомобильные дороги» / ЗАО «СоюздорНИИ», 2013. – 122 с.

49. Тайлакова, А.А. Автоматизированная система расчета и оценки стоимости конструкции нежесткой дорожной одежды / А.А. Тайлакова, А.Г. Пимонов, М.А. Катасонов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2009. – № 5 (75). – С.98-104.

50. Тайлакова, А.А. Web-сервис для поиска оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд / А.А. Тайлакова, А.Г. Пимонов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2015. – № 6 (112). – С. 176-181.

51. Тайлакова, А.А. Оптимизационные модели расчета конструкции нежестких дорожных одежд / А.А. Тайлакова, А.Г. Пимонов // Вестник Кузбасского

государственного технического университета. – 2015. – № 3 (109). – С. 149-155.

52. Тайлакова, А.А. Разработка комплекса программ для моделирования оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд // Сборник трудов Всероссийской молодежной школы-семинара «Анализ, геометрия и топология» Барнаул, 2-4 октября, 2013: в 2 ч. – Барнаул: ИП Колмогоров И.А., 2013. – Ч.2. – С. 165-169.

53. Тайлакова, А.А. Комплекс программ для моделирования и расчета оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд // Материалы V Международной конференции «Математика, ее приложения и математическое образование». – Улан-Удэ: Изд-во ВСГУ, 2014. – С. 307-309.

54. Тайлакова, А.А. Разработка автоматизированной системы для имитационного моделирования процесса проектирования автомобильных дорог // Материалы Всероссийской молодежной научно-практической школы «Информационно-телекоммуникационные системы и технологии (ИТСиТ-2014)». – Кемерово: КузГТУ, 2014. – С. 137-138.

55. Тайлакова, А.А. Разработка информационно-вычислительной системы для имитационного моделирования процесса проектирования автомобильных дорог // Труды Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Перспективы развития информационных технологий», г. Кемерово, 29-30 мая 2014 г. – Кемерово: КузГТУ, 2014. – С. 291.

56. Тайлакова, А.А. Автоматизированное проектирование оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд / А.А. Тайлакова, А.Г. Пимонов // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2016. Материалы XVI Международной научно-практической конференции, 23-24 ноября 2016 г. – Кемерово КузГТУ, 2016 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/Sibresource/2016/materials/pages/sections.htm> (дата обращения: 01.03.2020).

57. Тайлакова, А.А. Алгоритм расчета оптимальной развернутой в пространстве конструкции нежестких дорожных одежд / А.А. Тайлакова, А.Г. Пимонов // Информационно-телекоммуникационные системы и технологии (ИТСиТ-2017): Материалы Всероссийской научно-практической конференции, г. Кемерово, 12-13

октября 2017 г. – Кемерово, 2017. – С. 249-250.

58. Тайлакова, А.А. Особенности задачи поиска оптимальной конструкции не жестких дорожных одежд // Сборник материалов XII Всерос. научно-практической конференции с международным участием, 21-24 апр. 2020 г., Кемерово [Электронный ресурс]. – Кемерово, 2020. – Режим доступа: <http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/RM/2020/RM20/pages/Articles/21191.pdf> (дата обращения: 01.03.2020).

59. Пимонов, А.Г. Имитационное моделирование экономических систем / А.Г. Пимонов, С.А. Вережкин. – Кемерово: Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева, 2013. – 138 с.

60. Кубланов, М.С. Математическое моделирование. Методология и методы разработки математических моделей механических систем и процессов. Часть I. Третье издание. – М.: МГТУ ГА, 2004. – 108 с.

61. Тынкевич, М.А. Статистический анализ данных на компьютере / М.А. Тынкевич, А.Г. Пимонов, А.М. Вайнгауз. – Кемерово: Кузбас.гос.техн.ун-т им. Т. Ф. Горбачева, 2013. – 124 с.

62. Михелькевич, В.Н. Основы научно-технического творчества / В.Н. Михелькевич, В.М. Радомский. – М.: Феникс, 2004. – С. 320.

63. Золотова, Т.В. Методы принятия управленческих решений: учебник – М.: КНОРУС, 2017 – 344 с.

64. Тайлакова, А.А. Применение методов нелинейного программирования для поиска оптимальной конструкции дорожных одежд // Сборник материалов III Международной научно-практической конференции «Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте» (14-17 октября 2019 года). – Кемерово, 2019. – С. 83-85.

65. Impagliazzo, R. 10th Annual Structure in Complexity Theory Conference (SCT'95). A personal view of average-case complexity, 1995. – 134 с.

66. Marti, R. Multi-start methods for combinatorial optimization / Handbook of Metaheuristics, 2006. – 355-368 с.

67. Marti, R. International Series in Operations Research & Management Science.

Intelligent Multi-Start Methods / R. Marti, R. Aceves, M.T. Leon, J.M Moreno-Vega, A. Duarte, 2018. – 272 с.

68. Беллман, Р. Динамическое программирование / Под ред. Н.Н. Воробьева. – М.: Иностранная литература, 1960. – 400 с.

69. Тайлакова, А.А. Применение методов динамического программирования для поиска оптимальной конструкции дорожных одежд / А.А. Тайлакова, А.Г. Пимонов // Информационно-телекоммуникационные системы и технологии (ИТСиТ-2019): Материалы Всероссийской научно-практической конференции, г. Кемерово, 10-11 октября 2019 г. – Кемерово, 2019. – С. 66-67.

70. Sniedovich, M. University of Melbourne Melbourne, Australia. Dynamic Programming Foundations and Principles Second Editio, 2011. – 624 с.

71. Lew, A. Dynamic Programming A Computational Tool. Studies in Computational Intelligence / A. Lew, H. Mauch, 2007. – 38 с.

72. Bertsekas, D.P. Massachusetts Institute of Technology/ Dynamic Programming & Optimal Control, 1995. – 159 с.

73. Laaksonen, A. Competitive Programmer's Handbook, 2018. – 286 с.

74. Bednárek, D. «Information Systems. Improving matrix-based dynamic programming on massively parallel accelerators» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://isiarticles.com/bundles/Article/pre/pdf/111781.pdf> (дата обращения: 01.03.2020).

75. Пантелеев, А.В. Метаэвристические алгоритмы поиска глобального экстремума. – М.: МАИ, 2009. – 160 с.

76. Аверченков, В.И. Эволюционное моделирование и его применение: монография / В.И. Аверченков, П.В. Казаков. – М.: ФЛИНТА, 2016. – 200 с.

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

78. Казаковцев, Л.А. Эволюционные алгоритмы с гетерогенной популяцией для задач кластеризации и размещения: монография / Л.А Казаковцев, М.Н. Гудыма, Д.В. Сташков., А.А. Ступина, Н.Н. Джигоева. – Москва: Сибирский федеральный ун-т. 2017. – 196 с.

79. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие

системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л Рутковский; пер. с пол. И. Д. Рудинского. – М.: Горячая линия -Телеком, 2006. – 452 с.

80. Гладков, Л.А. Генетические алгоритмы / Л.А. Гладков, В.В. Курейчик, В.М. Курейчик. – Ростов-на-Дону: РостИздат, 2004. – 400 с.

81. Еремеев, А.В. Генетические алгоритмы и оптимизация – Омск: Изд-во Ом. гос. ун-та, 2008. – 48 с.

82. Сопов, Е.А. Вероятностный генетический алгоритм решения сложных задач многокритериальной оптимизации с адаптивной мутацией и прогнозом множества Парето / Е.А. Сопов, С.А. Сопов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2011. – №6 (30). – С. 273-281.

83. Брестер, К.Ю. Параллельный адаптивный генетический алгоритм многокритериальной оптимизации / К.Ю Брестер, Е.С. Семенкин // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева (Красноярск), 2013. – С. 326-327.

84. Галушин, П.В. Асимптотический вероятностный генетический алгоритм / П.В. Галушин, Е.С. Семенкин // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетникова. – 2009. – №4(25). – С. 37-42.

85. Черноруцкий, И.Г. Методы оптимизации. Компьютерные технологии – Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2012. – 152 с.

86. Карпенко, А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой. – Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2014. – 448 с.

87. Oliver, K. Genetic Algorithm Essentials. Studies in Computational Intelligence, 2017. – 679 с.

88. Ganjefar, S. Engineering Applications of Artificial Intelligence. Training qubit neural network with hybrid genetic algorithm and gradient descent for indirect adaptive controller design / S. Ganjefar, M. Tofighi // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2017. – №65. – С. 346.

89. Батищев, Д.И. Применение генетических алгоритмов к решению задач дискретной оптимизации. Учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Информационные технологии и компьютерное моделирование в прикладной математике» / Д.И. Батищев, Е.А. Неймарк, Н.В. Старостин. – Нижний Новгород, 2007. – 85 с.

90. Тайлакова, А.А. Применение генетических алгоритмов для решения оптимизационной задачи расчета конструкции нежестких дорожных одежд / А.А. Тайлакова, А.Г. Пимонов // Информационно-телекоммуникационные системы и технологии (ИТСиТ-2018): Материалы Всероссийской научно-практической конференции, г. Кемерово, 11-13 октября 2018 г. – Кемерово, 2018. – С. 244-246.

91. Тайлакова, А.А. Анализ эффективности генетического и переборного алгоритмов при решении задачи подбора оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд / А.А. Тайлакова, А.Г. Пимонов // Современные технологии принятия решений в цифровой экономике : сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2018. – С. 197-201.

92. Тайлакова, А.А. Эволюционные методы и генетические алгоритмы для численного расчета оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд / А.А. Тайлакова, А.Г. Пимонов // Системы управления и информационные технологии. – 2021. – № 1 (83). – С. 84-90.

93. Tailakova, A. Optimization Methods and Algorithms for Calculating the Construction of Non-Rigid Pavement for Technological Quarries Roads / A. Tailakova, A. Pimonov // E3S Web of Conferences 134, 03006 (2019) SDEMR-2019. The First Interregional Conference «Sustainable Development of Eurasian Mining Regions (SDEMR-2019)» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2019/60/e3sconf_sdemr18_01007.pdf (дата обращения: 01.03.2020).

94. Тайлакова, А.А. Разработка программного комплекса для анализа эффективности алгоритмов оптимизации при решении задачи подбора конструкции

нежестких дорожных одежд // Программная инженерия: методы и технологии разработки информационно-вычислительных систем (ПИИВС-2018): сборник научных трудов II Международной научно-практической конференции, Том. 1. 14-18 ноября 2018 г. – Донецк, ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», 2018. – С. 280-285.

95. Тайлакова, А.А. Оптимизационные методы и алгоритмы расчета конструкции нежестких дорожных одежд / А.А. Тайлакова, А.Г. Пимонов // Тезисы XX Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям. г. Новосибирск, Россия 28 октября-1 ноября 2019 г. – Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2019. – С. 80.

96. Model-View-Controller-MVC [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.phppro.org/tutorials/Model-View-Controller-MVC.html> (дата обращения: 01.03.2020).

97. Yiiframework. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.yiiframework.com/doc/guide/1.1/ru/quickstart.what-is-yii> (дата обращения: 01.03.2020).

98. habrahabr.ru. Аналитические статьи, мысли, связанные с информационными технологиями, бизнесом и Интернетом [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://habrahabr.ru/post/150267/> (дата обращения: 01.03.2020).

99. Материалы сайта «PHP:Hypertext Preprocessor» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.php.net/> (дата обращения: 01.03.2020).

100. Материалы сайта «MySQL» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mysql.com/> (дата обращения: 01.03.2020).

101. Материалы сайта «World Wide Web Consortium (W3C)» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.w3.org/> (дата обращения: 01.03.2020).

102. Материалы сайта «JavaScript.com» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.javascript.com/> (дата обращения: 01.03.2020).

103. Материалы сайта «jQuery» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://jquery.com/> (дата обращения: 01.03.2020).

104. Гамма, Э. Приемы объектно-ориентированного проектирования.

Паттерны проектирования / Э. Гамма, Р. Хелм, Р. Джонсон, Дж. Влиссидес. – СПб: Питер, 2001. – 368 с.

105. Дари, К. AJAX и PHP: Разработка динамических веб-приложений / К. Дари, Б. Бринзаре, Ф. Черchez Тоза, М. Бусика. – СПб.: Символ Плюс, 2007. – 336 с.

106. Материалы сайта «BorlanD Russian Community» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://bdrc.ru/> (дата обращения: 01.03.2020).

107. Тынкевич, М.А. Информационная система статистической обработки экономических данных (СТЭК) / М.А. Тынкевич, О.С. Болотова, Е.И. Латышева // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2004. – № 4. – С. 120-125.

108. Тайлакова, А.А. Программный комплекс расчета нежесткой дорожной одежды / А.А. Тайлакова, Е.А. Хвостова // Материалы XLVI Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс»: Информационные технологии. – Новосибирск: Новосиб. гос. ун-т, 2008. – С. 181.

109. Тайлакова, А.А. Комплекс программ для проектирования нежесткой дорожной одежды / А.А. Тайлакова, Е.А. Хвостова / Наука. Технологии. Инновации // Материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых в 7-ми частях. Часть. 1. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – С. 140-141.

110. Тайлакова, А.А. Комплекс программ для расчета и оценки стоимости конструкции нежестких дорожных одежд / А.А. Тайлакова, Е.А. Хвостова // Материалы XLVII Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс»: Информационные технологии. – Новосибирск: Новосиб. гос. ун-т, 2009. – С. 173.

111. Тайлакова, А.А. Информационно-вычислительная система для проектирования, технического обслуживания и паспортизации автомобильных дорог // Материалы V(XXXVII) Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Образование, наука, инновации вклад молодых исследователей, КемГУ, 2010. – Кемерово: ООО «ИНТ», 2010. – С.169-171.

112. Тайлакова, А.А. Модульная информационно-вычислительная система проектирования, технического обслуживания автомобильных дорог // Материалы

XLVIII Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс»: Информационные технологии, 2010. – Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2010. – С. 258.

113. Тайлакова, А.А. Автоматизированная система для проектирования, технического обслуживания и паспортизации, автомобильных дорог // Материалы IV Международной конференции «Математика, ее приложения и математическое образование». – Улан-Удэ: Изд-во ВСГУ, 2011. – С. 77-80.

114. Тайлакова, А.А. Разработка автоматизированной системы для проектирования, технического обслуживания и паспортизации автомобильных дорог // Материалы четырнадцатой конференции по математике «МАК-2011», Барнаул, 15-17 июня 2011 г. – Барнаул: Алтайский государственный университет. – С. 69-70.

115. Тайлакова, А.А. Информационно-вычислительная система для проектирования, паспортизации и технического обслуживания автомобильных дорог общего назначения // Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (с международным участием) «Развитие дорожно-транспортного комплекса и строительной инфраструктуры на основе рационального природопользования». – Омск: Изд-во:УМУ СибАДИ, 2012. – С. 568-572.

116. Тайлакова, А.А. Информационно-вычислительная система для проектирования, технического обслуживания и паспортизации автомобильных дорог общего назначения // Материалы пятнадцатой конференции по математике «МАК-2012», Барнаул, 22-24 июня 2012 г. – Барнаул: Алтайский государственный университет. – С. 79.

117. Тайлакова, А.А. Информационно-вычислительная система для проектирования, паспортизации и оценки технического состояния автомобильных дорог общего назначения // Материалы Всероссийской молодежной конференции «Информационно-телекоммуникационные системы и технологии (ИТСиТ-2012)». – Кемерово: КузГТУ, 2012. – С. 174-175.

118. Тайлакова, А.А. Информационно-вычислительная система для оценки технического состояния, паспортизации и проектирования автомобильных дорог // Наука. Технологии. Инновации // Материалы Всероссийской научной конференции

молодых ученых в 7-ми частях. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – С. 138-140.

119. Тайлакова, А.А. Автоматизированная система для проектирования, паспортизации и оценки технического состояния автомобильных дорог общего назначения // Материалы инновационного конвента «Кузбасс: образование, наука, инновации». – КемГУ, Кемерово: ООО «Фирма ПОЛИГРАФ», 2012. – С. 181-184.

120. Тайлакова, А.А. Информационно-вычислительная система для расчета и оценки стоимости конструкции нежесткой дорожной одежды для автомобильных дорог общего пользования // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013661847; заяв. 30.10.2013; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 12.12.2013.

121. Тайлакова, А.А. База данных информационно-вычислительной системы для расчета и оценки стоимости конструкции нежесткой дорожной одежды для автомобильных дорог общего пользования // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621634; заяв. 02.06.2014; зарегистрировано в Реестре баз данных 28.11.2014.

122. Тайлакова, А.А. Web-сервис для поиска оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016613863; заяв. 15.02.2016; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 11.04.2016.

123. Тайлакова, А.А. База данных web-сервиса для поиска оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2016620435; заяв. 15.02.2016; зарегистрировано в Реестре баз данных 11.04.2016.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Справка об использовании результатов диссертационной работы

**Индор - Кузбасс**

Группа компаний «Индор»

Россия, 650010, г. Кемерово, ул. Коммунистическая, 55а

Тел./факс: (3842) 366-579

E-mail: mail@indor-kuzbass.ruСайт: www.indor-kuzbass.ru

ООО «Индор-Кузбасс»

ИНН 4205102120, КПП 420501001

р/счет 407 028 100 700 000 770 01

Сибирский ф-л ПАО «Промсвязьбанк»

г. Новосибирск, к/сч 30101810500000000816

в ГРКЦ ГУ Банка России по Кемеровской

области г. Кемерово, БИК 045004816

ОГРН 1064205067398, ОКПО 93138792

Исх. № 62-20 от «16» апреля 2020 г.

СПРАВКА

об использовании результатов диссертационной работы
на соискание ученой степени кандидата технических наук
Тайлаковой Анны Александровны

Настоящий документ свидетельствует о том, что результаты диссертационной работы Тайлаковой А.А. «Математические модели и программно-алгоритмическое обеспечение для оптимизации конструкции нежестких дорожных одежд», представленные в виде разработанного программного продукта, использованы в отделе проектирования дорог ООО «Индор-Кузбасс» для конструирования и расчета нежестких дорожных одежд автомобильных дорог общего пользования.

Специалистами компании использованы следующие возможности разработанного программного продукта:

- Ведение базы материалов и грунтов с возможностью добавления и редактирования.
- Назначение конструкции нежестких дорожных одежд на основе справочника «Дорожные одежды автомобильных дорог общего пользования» Серия 3.503–71/88.
- Расчет конструкции нежестких дорожных одежд на прочность в соответствии с ОДН 218.046-01 «Проектирование нежестких дорожных одежд» по следующим критериям:
 - расчет конструкции в целом по допускаемому упругому прогибу;
 - расчет конструкции по условию сдвигоустойчивости подстилающего грунта и малосвязных конструктивных слоев;
 - расчет конструкции на сопротивление монолитных слоев усталостному разрушению от растяжения при изгибе.
- Проверка конструкции на морозоустойчивость в соответствии с ОДН 218.046-01 «Проектирование нежестких дорожных одежд».
- Поиск наиболее экономичного варианта конструкции в смысле минимума стоимости используемых материалов:
 - подбор толщин и материалов конструктивных слоев;
 - подбор конструкции с учетом критерия однотипности по продольному профилю трассы, состоящей из нескольких участков.
- Формирование отчетов.

Внедрение научно-практических результатов диссертационного исследования А.А. Тайлаковой позволяет существенно увеличить оперативность принятия решений при выборе оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд в процессе проектирования.

Директор

(наименование должности руководителя)



(подпись)

Должиков А.И.

(фамилия и инициалы руководителя)

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Справка об использовании результатов диссертационной работы

УТВЕРЖДАЮ

проректор по учебной работе
ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный
технический университет имени Т.Ф. Горбачева»,
к.т.н., доцент

Баканов Александр Александрович

«31» января 2021 г.

СПРАВКА

об использовании результатов диссертационной работы
на соискание ученой степени кандидата технических наук
Тайлаковой Анны Александровны
в учебном процессе

Комиссия в составе председателя Стенина Дмитрия Владимировича, директора Института информационных технологий, машиностроения и автотранспорта, членов комиссии: Пимонова Александра Григорьевича, заведующего кафедрой прикладных информационных технологий, Славолубовой Ярославны Викторовны, заместителя председателя учебно-методической комиссии направления подготовки бакалавров 09.03.03 «Прикладная информатика» подтверждает, что результаты диссертационной работы старшего преподавателя кафедры прикладных информационных технологий Тайлаковой Анны Александровны «Математические модели и программно-алгоритмическое обеспечение для оптимизации конструкции нежестких дорожных одежд» используются в учебном процессе при организации занятий студентов направления подготовки 09.03.03 «Прикладная информатика» по следующим дисциплинам:

- 1) «Интеллектуальные информационные системы»;
- 2) «Программная инженерия».

Председатель комиссии

Директор Института
информационных технологий,
машиностроения и автотранспорта,
к.т.н., доцент



Д.В. Стенин

Члены комиссии

Заведующий кафедрой прикладных
информационных технологий,
д.т.н., профессор



А.Г. Пимонов

Заместитель председателя учебно-
методической комиссии
направления подготовки 09.03.03,
к.ф.-м.н., доцент



Я.В. Славолубова

ПРИЛОЖЕНИЕ В
Свидетельство о государственной регистрации базы данных

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации базы данных

№ 2014621634

**База данных информационно-вычислительной системы
для расчета и оценки стоимости конструкции нежесткой
дорожной одежды для автомобильных дорог общего
пользования**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего профессионального
образования «Кузбасский государственный технический
университет имени Т.Ф. Горбачева» (КузГТУ) (RU)*

Автор: *Тайлакова Анна Александровна (RU)*

Заявка № **2014620744**

Дата поступления **02 июня 2014 г.**

Дата государственной регистрации
в Реестре баз данных **28 ноября 2014 г.**



*Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Л.Л. Кирий

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2013661847

**Информационно-вычислительная система для расчета и
оценки стоимости конструкции нежесткой дорожной одежды
для автомобильных дорог общего пользования**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего профессионального
образования «Кузбасский государственный технический
университет имени Т.Ф. Горбачева» (КузГТУ) (RU)*

Автор: *Тайлакова Анна Александровна (RU)*



Заявка № 2013619967

Дата поступления 30 октября 2013 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 17 декабря 2013 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов

ПРИЛОЖЕНИЕ Д
Свидетельство о государственной регистрации базы данных

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации базы данных

№ 2016620435

**База данных web-сервиса для поиска оптимальной
конструкции нежестких дорожных одежд**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский
государственный технический университет имени Т.Ф.
Горбачева» (КузГТУ) (RU)*

Автор: *Тайлакова Анна Александровна (RU)*

Заявка № **2016620118**

Дата поступления **15 февраля 2016 г.**

Дата государственной регистрации
в Реестре баз данных **11 апреля 2016 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

 **Г.П. Ивлиев**



ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2016613863

**Web-сервис для поиска оптимальной конструкции
нежестких дорожных одежд**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский
государственный технический университет имени Т.Ф.
Горбачева» (КузГТУ) (RU)*

Автор: *Тайлакова Анна Александровна (RU)*



Заявка № 2016611118

Дата поступления 15 февраля 2016 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 11 апреля 2016 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Математические модели для цифрового представления графической информации ОДН 218.046-01

Таблица Ж.1 – Результаты аппроксимации данных номограммы для определения общего модуля упругости двухслойной системы

N	E	F(x)	a	b	x	S _{ост}	F(x)	a	b	c	x	S _{ост}	F(x)	a	b	c	x	S _{ост}
1	0,9	y=0,9			0<=x<=0,26	0	y=a+b*x	0,94344	-0,14988		0,26<x<=2	0,004						
2	0,89	y=a+b*x	0,8969	-0,06609	0<=x<=0,43	0,003	y=a*Exp(b*x)	0,95856	-0,22549		0,43<x<=2	0,002						
3	0,88	y=a+b*x	0,88395	-0,05939	0<=x<=0,35	0,003	y=a*Exp(b*x)+c	0,95282	-0,24044	-0,00948	0,35<x<=2	0,003						
4	0,87	y=a+b*x	0,87509	-0,06716	0<=x<=0,34	0,003	y=a*Exp(b*x)	0,80498	-0,33137	0,13585	0,34<x<=2	0,001						
5	0,86	y=a+b*x	0,86388	-0,05966	0<=x<=0,3	0,003	y=a*Exp(b*x)	0,92537	-0,29127		0,3<x<=2	0,002						
6	0,85	y=a+b*x	0,8544	-0,08263	0<=x<=0,3	0,003	y=a*Exp(b*x)+c	0,8458	-0,35319	0,07204	0,3<x<=2	0,002						
7	0,84	y=a+b*x	0,846	-0,09738	0<=x<=0,3	0,003	y=a*Exp(b*x)+c	0,80955	-0,40664	0,1044	0,3<x<=2	0,002						
8	0,83	y=a+b*x	0,83564	-0,09124	0<=x<=0,27	0,002	y=a*Exp(b*x)+c	0,76147	-0,47442	0,14796	0,27<x<=2	0,003						
9	0,82	y=a+b*x	0,82353	-0,09327	0<=x<=0,259	0,001	y=a*Exp(b*x)+c	0,79096	-0,44562	0,0973	0,259<x<=2	0,002						
10	0,81	y=a+b*x	0,81561	-0,12456	0<=x<=0,258	0,003	y=a*Exp(b*x)+c	0,75962	-0,49611	0,12005	0,258<x<=2	0,003						
11	0,8	y=a+b*x	0,80524	-0,11923	0<=x<=0,225	0,002	y=a*Exp(b*x)+c	0,77586	-0,49373	0,08922	0,225<x<=2	0,005						
12	0,79	y=a+b*x	0,79469	-0,12308	0<=x<=0,22	0,002	y=a*Exp(b*x)+c	0,7179	-0,59159	0,14536	0,22<x<=2	0,002						
13	0,78	y=a+b*x	0,78418	-0,12962	0<=x<=0,225	0,002	y=a*Exp(b*x)+c	0,77391	-0,51401	0,06682	0,225<x<=2	0,003						
14	0,77	y=a+b*x	0,77252	-0,11846	0<=x<=0,18	0,001	y=a*Exp(b*x)+c	0,78346	-0,49596	0,03519	0,18<x<=2	0,005						
15	0,76	y=a+b*x	0,76743	-0,16346	0<=x<=0,225	0,003	y=a*Exp(b*x)+c	0,71177	-0,65251	0,12156	0,225<x<=2	0,004						
16	0,75	y=a+b*x	0,75527	-0,16827	0<=x<=0,23	0,003	y=a*Exp(b*x)+c	0,70258	-0,68164	0,11938	0,23<x<=2	0,003						
17	0,74	y=a+b*x	0,74206	-0,14308	0<=x<=0,17	0,004	y=a*Exp(b*x)+c	0,6849	-0,72474	0,12814	0,17<x<=2	0,005						
18	0,73	y=a+b*x	0,73199	-0,14027	0<=x<=0,2	0,004	y=a*Exp(b*x)	0,681	-0,73954	0,12036	0,2<x<=2	0,105						
19	0,72	y=a+b*x	0,72098	-0,16231	0<=x<=0,2	0,002	y=a*Exp(b*x)+c	0,71547	-0,68446	0,06967	0,2<x<=1,291	0,004	y=a*Exp(b*x)	0,69741	-0,65591	0,0724	1,291<x<=2	0,017
20	0,71	y=a+b*x	0,71309	-0,19769	0<=x<=0,24	0,002	y=a*Exp(b*x)+c	0,84541	-0,56515	-0,07087	0,24<x<=0,95	0,003	y=a+b*Ln(x)	0,41189	-0,22994		0,95<x<=2	0,156
21	0,7	y=a+b*x	0,7023	-0,19998	0<=x<=0,21	0,003	y=a*Exp(b*x)	0,76679	-0,65948		0,21<x<=0,937	0,002	y=a+b*Ln(x)	0,40006	-0,2331		0,937<x<=2	0,003
22	0,69	y=a+b*x	0,69042	-0,19808	0<=x<=0,22	0,003	y=a*Exp(b*x)	0,75538	-0,67577		0,22<x<=0,975	0,002	y=a+b*Ln(x)	0,3877	-0,23097		0,975<x<=2	0,002
23	0,68	y=a+b*x	0,68254	-0,21339	0<=x<=0,21	0,004	y=a*Exp(b*x)	0,74146	-0,69098		0,21<x<=0,975	0,002	y=a+b*Ln(x)	0,37466	-0,22844		0,975<x<=2	0,000
24	0,67	y=a+b*x	0,67145	-0,19923	0<=x<=0,179	0,002	y=a*Exp(b*x)	0,72888	-0,7086		0,179<x<=0,88	0,002	y=a*Exp(b*x)+c	0,64808	-0,91463	0,1042	0,88<x<=2	0

Продолжение таблицы Ж.1

N	E	F(x)	a	b	x	S _{ост}	F(x)	a	b	c	x	S _{ост}	F(x)	a	b	c	x	S _{ост}
25	0,66	y=a+b*x	0,66382	-0,24362	0<=x<=0,25	0,003	y=a*Exp(b*x)	0,71539	-0,71934	-0,09607 -0,05999 -0,0031	0,25<x<=1	0,004	y=a*Exp(b*x)+c	0,64553	-0,92683	0,09677	1<x<=2	0,001
26	0,65	y=a+b*x	0,65329	-0,24362	0<=x<=0,24	0,003	y=a*Exp(b*x)	0,71218	-0,75897		0,24<x<=0,95	0,002	y=a+b*Ln(x)	0,33624	-0,21479		0,95<x<=2	0,001
27	0,64	y=a+b*x	0,6419	-0,24462	0<=x<=0,21	0,002	y=a*Exp(b*x)	0,70205	-0,78098		0,21<x<=1	0,001	y=a*Exp(b*x)+c	0,57495	-0,79385	0,06361	1<x<=2	0,001
28	0,63	y=a+b*x	0,63077	-0,22713	0<=x<=0,21	0,003	y=a*Exp(b*x)	0,68996	-0,79438		0,21<x<=1,03	0,003	y=a+b*Ln(x)	0,31094	-0,20165		1,03<x<=2	0,001
29	0,62	y=a+b*x	0,62132	-0,24385	0<=x<=0,23	0,002	y=a*Exp(b*x)	0,68041	-0,81536		0,23<x<=1,03	0,004	y=a+b*Ln(x)	0,29897	-0,19586		1,03<x<=2	0,001
30	0,61	y=a+b*x	0,61011	-0,24077	0<=x<=0,18	0,001	y=a*Exp(b*x)	0,66412	-0,82405		0,18<x<=1	0,002	y=a*Exp(b*x)+c	0,52378	-0,73616	0,03666	1<x<=2	0,001
31	0,6	y=a+b*x	0,60099	-0,2511	0<=x<=0,19	0,001	y=a*Exp(b*x)	0,65465	-0,84955		0,19<x<=1,05	0,002	y=a*Exp(b*x)+c	0,51041	-0,86196	0,05982	1,05<x<=2	0,001
32	0,59	y=a+b*x	0,59123	-0,26264	0<=x<=0,195	0,002	y=a*Exp(b*x)	0,64315	-0,86462		0,195<x<=1,025	0,003	y=a*Exp(b*x)+c	0,5805	-1,14421	0,08772	1,025<x<=2	0,001
33	0,58	y=a+b*x	0,58109	-0,25971	0<=x<=0,2	0,002	y=a*Exp(b*x)	0,63164	-0,87551		0,2<x<=1	0,002	y=1/(a+b*x)	0,383	3,38634		1<x<=2	0,001
34	0,57	y=a+b*x	0,57261	-0,28165	0<=x<=0,24	0,002	y=a*Exp(b*x)	0,62626	-0,91309		0,24<x<=1,025	0,003	y=a*Exp(b*x)+c	0,5637	-1,18888	0,08038	1,025<x<=2	0,001
35	0,56	y=a+b*x	0,56368	-0,29262	0<=x<=0,22	0,004	y=a*Exp(b*x)	0,61745	-0,93466		0,22<x<=0,97	0,001	y=1/(a+b*x)	0,31011	3,7737		0,97<x<=2	0
36	0,55	y=a+b*x	0,55199	-0,26666	0<=x<=0,2	0,002	y=a*Exp(b*x)	0,60431	-0,95136		0,2<x<=1,025	0,001	y=a*Exp(b*x)+c	0,46636	-0,97507	0,05349	1,025<x<=2	0
37	0,54	y=a+b*x	0,5409	-0,27392	0<=x<=0,2	0,003	y=a*Exp(b*x)	0,59041	-0,96049		0,2<x<=1,0125	0,003	y=a*Exp(b*x)+c	0,52275	-1,21836	0,06933	1,0125<x<=2	0,001
38	0,53	y=a+b*x	0,53075	-0,28707	0<=x<=0,196	0,006	y=a*Exp(b*x)	0,57935	-0,97892		0,196<x<=0,9	0,005	y=a*Exp(b*x)+c	0,45276	-0,99821	0,047	0,9<x<=2	0,001
39	0,52	y=a+b*x	0,52064	-0,28554	0<=x<=0,21	0,005	y=a*Exp(b*x)	0,57115	-1,0015		0,21<x<=1	0,001	y=a*Exp(b*x)+c	0,44335	-1,01531	0,045	1<x<=2	0,001
40	0,51	y=a+b*x	0,51177	-0,29579	0<=x<=0,2375	0,003	y=a*Exp(b*x)	0,5597	-1,02307		0,2375<x<=1,0625	0,001	y=a*Exp(b*x)+c	0,43239	-1,0365	0,0433	1,0625<x<=2	0,001
41	0,5	y=a+b*x	0,50125	-0,30165	0<=x<=0,2375	0,003	y=a*Exp(b*x)	0,55198	-1,05939		0,2375<x<=1,05	0,002	y=a+b/x	-0,0082	0,20399		1,05<x<=2	0,001
42	0,49	y=a+b*x	0,48979	-0,27856	0<=x<=0,2	0,003	y=a*Exp(b*x)+c	0,61809	-0,80138		0,2<x<=0,95	0,001	y=a*Exp(b*x)+c	0,43881	-1,16873	0,04713	0,95<x<=2	0,001
43	0,48	y=a+b*x	0,47966	-0,28821	0<=x<=0,2042	0,002	y=a*Exp(b*x)+c	0,57655	-0,89956		0,2042<x<=0,95	0,002	y=a+b/x	-0,00527	0,18349		0,95<x<=2	0,001
44	0,47	y=a+b*x	0,46898	-0,26216	0<=x<=0,1667	0,002	y=a*Exp(b*x)+c	0,56941	-0,93035		0,1667<x<=0,9333	0,001	y=a*Exp(b*x)+c	0,43136	-1,30383	0,05149	0,9333<x<=2	0,001
45	0,46	y=a+b*x	0,45991	-0,2728	0<=x<=0,175	0,002	y=a*Exp(b*x)	0,51351	-1,16144		0,175<x<=0,9958	0,002	y=a+b/x	-0,00537	0,16911		0,9958<x<=2	0,001
46	0,45	y=a+b*x	0,44975	-0,26483	0<=x<=0,1708	0,003	y=a*Exp(b*x)+c	0,51215	-1,19618		0,1708<x<=0,9667	0,002	y=1/(a+b*x)	-0,39711	6,77716		0,9667<x<=2	0,001
47	0,44	y=a+b*x	0,44103	-0,28506	0<=x<=0,2047	0,003	y=a*Exp(b*x)	0,49565	-1,22768		0,2047<x<=0,8958	0,002	y=a+b/x	-0,00516	0,15427		0,8958<x<=2	0,001
48	0,43	y=a+b*x	0,4307	-0,26682	0<=x<=0,2083	0,003	y=a*Exp(b*x)	0,49136	-1,27149		0,2083<x<=0,8583	0,002	y=a*Exp(b*x)+c	0,41264	-1,41536	0,04437	0,8583<x<=2	0
49	0,42	y=a+b*x	0,41901	-0,26254	0<=x<=0,2167	0,002	y=a*Exp(b*x)	0,48065	-1,30075		0,2167<x<=0,8547	0,002	y=a+b/x	-0,00807	0,14507		0,8547<x<=2	0,001
50	0,41	y=a+b*x	0,41112	-0,27782	0<=x<=0,2125	0,002	y=a*Exp(b*x)	0,46591	-1,31374		0,2125<x<=0,8042	0,002	y=a*Exp(b*x)+c	0,38743	-1,46953	0,04129	0,8042<x<=2	0,000
51	0,4	y=a+b*x	0,40397	-0,29252	0<=x<=0,2125	0,003	y=a*Exp(b*x)	0,45154	-1,3266		0,2125<x<=0,8167	0,002	y=a*Exp(b*x)+c	0,38102	-1,51181	0,04029	0,8167<x<=2	0,001
52	0,39	y=a+b*x	0,39233	-0,29011	0<=x<=0,2125	0,003	y=a*Exp(b*x)	0,45206	-1,41246		0,2125<x<=0,7917	0,001	y=a*Exp(b*x)+c	0,36506	-1,50222	0,03772	0,7917<x<=2	0,001
53	0,38	y=a+b*x	0,38433	-0,29685	0<=x<=0,2083	0,003	y=a*Exp(b*x)	0,43633	-1,41923		0,2083<x<=0,7792	0,001	y=a*Exp(b*x)+c	0,35667	-1,49383	0,0344	0,7792<x<=2	0,001
54	0,37	y=a+b*x	0,37284	-0,29728	0<=x<=0,2083	0,003	y=a*Exp(b*x)	0,42237	-1,43179		0,2083<x<=0,8	0,001	y=a+b/x	-0,0096	0,11721		0,8<x<=2	0,001

Продолжение таблицы Ж.1

N	E	F(x)	a	b	x	S _{ост}	F(x)	a	b	c	x	S _{ост}	F(x)	a	b	c	x	S _{ост}
55	0,36	$y=a+b*x$	0,36477	-0,30341	$0<=x<=0,2041$	0,002	$y=a*Exp(b*x)$	0,41283	-1,46271	-0,01078	$0,2041<x<=0,7583$	0,001	$y=a*Exp(b*x)+c$	0,35409	-1,61163	0,03275	$0,7583<x<=2$	0,001
56	0,35	$y=a+b*x$	0,35491	-0,2989	$0<=x<=0,2125$	0,003	$y=a*Exp(b*x)+c$	0,4103	-1,41468		$0,2125<x<=0,7333$	0,001	$y=a*Exp(b*x)+c$	0,36928	-1,73299	0,03257	$0,7333<x<=2$	0,001
57	0,34	$y=a+b*x$	0,3449	-0,28969	$0<=x<=0,2$	0,002	$y=a*Exp(b*x)$	0,39195	-1,54037		$0,2<x<=0,7042$	0,001	$y=a+b/x$	-0,01082	0,10205		$0,7042<x<=2$	0,001
58	0,33	$y=a+b*x$	0,33498	-0,29294	$0<=x<=0,2042$	0,003	$y=a*Exp(b*x)$	0,37769	-1,54512		$0,2042<x<=0,7375$	0,001	$y=a*Exp(b*x)+c$	0,31429	-1,59434	0,024	$0,7375<x<=2$	0,001
59	0,32	$y=a+b*x$	0,32563	-0,3012	$0<=x<=0,2083$	0,002	$y=a*Exp(b*x)$	0,37082	-1,58006	-0,13121	$0,2083<x<=0,7583$	0,001	$y=a*Exp(b*x)+c$	0,3008	-1,55113	0,01986	$0,7583<x<=2$	0,001
60	0,31	$y=a+b*x$	0,3157	-0,29471	$0<=x<=0,2417$	0,002	$y=a*Exp(b*x)$	0,35827	-1,6024		$0,2417<x<=0,6333$	0,001	$y=a+b/x$	-0,0177	0,09473		$0,6333<x<=2$	0,001
61	0,3	$y=a+b*x$	0,30493	-0,29023	$0<=x<=0,2292$	0,002	$y=a*Exp(b*x)$	0,34299	-1,62477		$0,2292<x<=0,7333$	0,000	$y=a*Exp(b*x)+c$	0,24119	-1,20644	0,00259	$0,7333<x<=2$	0,001
62	0,29	$y=a+b*x$	0,29513	-0,30844	$0<=x<=0,4667$	0,002	$y=a+b/x$	-0,01107	0,08001		$0,4667<x<=0,8292$	0,001	$y=a*Exp(b*x)$	0,22326	-1,1481		$0,8292<x<=2$	0,001
63	0,28	$y=a+b*x$	0,28667	-0,30629	$0<=x<=0,4625$	0,002	$y=a+b/x$	-0,01059	0,07563	-0,06133	$0,4625<x<=1,1667$	0,001	$y=a*Exp(b*x)$	0,22438	-1,19928		$1,1667<x<=2$	0,001
64	0,27	$y=a+b*x$	0,27195	-0,24	$0<=x<=0,126$	0,001	$y=a*Exp(b*x)$	0,3	-1,67		$0,126<x<=0,7125$	0,002	$y=a*Exp(b*x)$	0,22129	-1,2622		$0,7125<x<=2$	0,016
65	0,26	$y=a+b*x$	0,26167	-0,27416	$0<=x<=0,2375$	0,002	$y=a+b*Ln(x)$	0,05266	-0,10072		$0,2375<x<=0,8333$	0,002	$y=a+b/x$	-0,018	0,07407		$0,8333<x<=2$	0,015
66	0,25	$y=a+b*x$	0,25034	-0,2471	$0<=x<=0,175$	0,001	$y=a*Exp(b*x)+c$	0,39659	-0,94184		$0,175<x<=0,575$	0,001	$y=a*Exp(b*x)+c$	0,24102	-1,84142	0,01348	$0,575<x<=2$	0,009
67	0,24	$y=a+b*x$	0,24156	-0,24542	$0<=x<=0,175$	0,002	$y=a*Exp(b*x)+c$	0,3186	-1,25784	-0,52608	$0,175<x<=0,5708$	0	$y=a+b/x$	-0,01033	0,06032		$0,5708<x<=2$	0
68	0,23	$y=a+b*x$	0,2325	-0,24196	$0<=x<=0,1833$	0,002	$y=a*Exp(b*x)$	0,26804	-1,92878		$0,1833<x<=0,5$	0	$y=a+b/x$	-0,01077	0,05748		$0,5<x<=2$	0,001
69	0,22	$y=a+b*x$	0,22211	-0,23646	$0<=x<=0,1708$	0,002	$y=a*Exp(b*x)$	0,25129	-1,91728		$0,1708<x<=0,4833$	0	$y=a+b/x$	-0,01141	0,05511		$0,4833<x<=2$	0
70	0,21	$y=a+b*x$	0,21185	-0,23646	$0<=x<=0,1708$	0,002	$y=a+b*Ln(x)$	0,03546	-0,0806		$0,1708<x<=0,5667$	0	$y=a*Exp(b*x)+c$	0,22957	-2,11017	0,00966	$0,5667<x<=2$	0,001
71	0,2	$y=a+b*x$	0,20205	-0,24968	$0<=x<=0,055$	0,004	$y=a*Exp(b*x)$	0,22549	-1,99389	0,00974	$0,055<x<=0,75$	0	$y=a*Exp(b*x)+c$	0,25652	-2,35697	0,0112	$0,75<x<=2$	0,001
72	0,19	$y=a+b*x$	0,19157	-0,22655	$0<=x<=0,04$	0,003	$y=a*Exp(b*x)$	0,21893	-2,11942		$0,04<x<=0,4083$	0,001	$y=a+b/x$	-0,01137	0,04304		$0,4083<x<=2$	0,001
73	0,18	$y=a+b*x$	0,1807	-0,17582	$0<=x<=0,075$	0	$y=a*Exp(b*x)+c$	0,71424	-0,39132		$0,075<x<=0,3625$	0,001	$y=a+b/x$	-0,00876	0,03897		$0,3625<x<=2$	0,002
74	0,17	$y=a+b*x$	0,17106	-0,19207	$0<=x<=0,0792$	0	$y=a*Exp(b*x)$	0,19692	-2,22708		$0,0792<x<=0,675$	0,001	$y=a+b/x$	-0,00537	0,03366		$0,675<x<=2$	0,006
75	0,16	$y=a+b*x$	0,1618	-0,19021	$0<=x<=0,1458$	0	$y=a*Exp(b*x)$	0,18091	-2,25561	0,00213	$0,1458<x<=0,67917$	0,001	$y=a+b*Ln(x)$	0,026	-0,025		$0,67917<x<=2$	0,004
76	0,15	$y=a+b*x$	0,15146	-2,03E-01	$0<=x<=0,1667$	0	$y=a+b*Ln(x)$	0,015	-0,05685		$0,1667<x<=0,6416$	0,001	$y=a*Exp(b*x)+c$	0,1408	-2,29812	0,00625	$0,6416<x<=2$	0,001
77	0,14	$y=a+b*x$	0,13917	-0,14575	$0<=x<=0,0958$	0	$y=a+b*Ln(x)$	0,0105	-0,05417		$0,0958<x<=0,65$	0	$y=a*Exp(b*x)+c$	0,09457	-1,89091	0,00533	$0,65<x<=2$	0,001
78	0,13	$y=a+b*x$	0,1326	-1,92E-01	$0<=x<=0,1$	0	$y=a+b*Ln(x)$	0,00838	-0,0519		$0,1<x<=0,6458$	0,001	$y=a+b/x$	-0,0044	0,02324		$0,6458<x<=2$	0,001
79	0,12	$y=a+b*x$	0,12383	-1,97E-01	$0<=x<=0,1$	0	$y=a*Exp(b*x)+c$	0,13704	-3,13287	0,00213	$0,1<x<=0,6547$	0,001	$y=a*Exp(b*x)$	0,04662	-0,9496		$0,6547<x<=2$	0
80	0,11	$y=a+b*x$	0,11062	-0,16251	$0<=x<=0,1708$	0,001	$y=a*Exp(b*x)+c$	0,11619	-2,52088		$0,1708<x<=0,7208$	0,001	$y=a*Exp(b*x)$	0,07742	-1,85434		$0,7208<x<=2$	0,001
81	0,1	$y=a+b*x$	0,10129	-0,15944	$0<=x<=0,1833$	0,001	$y=a*Exp(b*x)$	0,10793	-2,49761		$0,1833<x<=0,7375$	0,002	$y=a+b/x$	-9,26E-03	1,91E-02		$0,7375<x<=2$	0,002
82	0,09	$y=a+b*x$	0,09338	-0,1526	$0<=x<=0,0917$	0,001	$y=a*Exp(b*x)$	0,10363	-2,69386		$0,0917<x<=0,6083$	0,001	$y=a+b/x$	-0,00689	0,01617		$0,6083<x<=2$	0,006
83	0,08	$y=a+b*x$	0,08446	-0,1428	$0<=x<=0,175$	0,001	$y=a+b/x$	-0,00182	0,01237	0,00994	$0,175<x<=0,6083$	0,001	$y=a+b/x$	-0,00497	0,0137		$0,6083<x<=2$	0,001
84	0,07	$y=a+b*x$	0,07382	-0,13108	$0<=x<=0,1708$	0,001	$y=a+b/x$	-6,8E-05	0,00994		$0,1708<x<=0,6083$	0,001	$y=a+b/x$	-0,00277	0,01085		$0,6083<x<=2$	0,002

Продолжение таблицы Ж.1

N	E	F(x)	a	b	x	S _{oct}	F(x)	a	b	c	x	S _{oct}	F(x)	a	b	c	x	S _{oct}
85	0,06	y=a+b*x	0,0631	-0,11966	0<=x<=0,1667	0	y=a*Exp(b*x)+c	0,0677	-3,0633	0,00213	0,1667<x<=0,6083	0	y=a+b/x	-0,00208	0,00918		0,6083<x<=2	0,001
86	0,05	y=a+b*x	0,04981	-0,0876	0<=x<=0,3667	0	y=a+b/x	-0,00705	0,00946		0,3667<x<=0,725	0,001	y=a+b/x+c/x^2	-0,00281	0,00495	0,00112	0,725<x<=2	0,012
87	0,04	y=a+b*x	0,03911	-0,06668	0<=x<=0,25	0	y=a+b*Ln(x)	-0,00237	-0,01709		0,25<x<=0,5125	0,001	y=a+b/x	-0,00307	0,00628		0,5125<x<=2	0,010
88	0,03	y=a+b*x	0,0301	-0,05594	0<=x<=0,175	0	y=a*Exp(b*x)	0,03634	-3,51276		0,175<x<=0,725	0	y=a+b/x+c/x^2	-0,00144	0,0025	0,000672	0,725<x<=2	0
89	0,02	y=a+b*x	0,0178	-0,01399	0<=x<=0,0958	0	y=a+b/x	-6,05E-04	0,0022		0,0958<x<=2	0,001						
90	0,01	y=a+b*x	0,00923	-0,01778	0<=x<=0,2583	0,001	y=a+b/x	-0,00132	0,00124		0,2583<x<=0,85	0	y=0				0,85<x<=2	0

Таблица Ж.2 – Результаты аппроксимации данных номограммы для определения активного напряжения сдвига от временной нагрузки в нижнем слое двухслойной системы (при $h_{\text{в}}/D \in [0;2]$)

N	ЕВ/ЕН	F(x)	a	b	c	x	S _{оcт}	F(x)	a	b	c	x	S _{оcт}	F(x)	a	b	c	x	S _{оcт}
1	2	y=a*Exp(b*x)	1,1007	-0,131		0<=x<=0,107	0,027	y=a+b*x	1,19838	-0,57369		0,107<x<=1,2628	0,009	y=a+b*x	1,03592	-0,44786		1,2628<x<=2	0,004
2	3	y=a+b*x	1,19458	-0,69489		0<=x<=0,6	0,001	y=a*Exp(b*x)	1,62893	-1,17477		0,6<x<=2	0,001						
3	4	y=a+b*x	1,18212	-0,76407		0<=x<=0,886	0,002	y=a+b/x	-0,15909	0,58751		0,886<x<=2	0,003						
4	5	y=a+b*x	1,10279	-0,70343		0<=x<=0,4419	0,007	y=a*Exp(b*x)+c	1,57545	-1,25324	-0,07717	0,4419<x<=1,1256	0,004	y=a+b/x	-0,12671	0,47526		1,1256<x<=2	0,006
5	7	y=a+b*x	1,06737	-0,85606		0<=x<=0,6558	0,001	y=a*Exp(b*x)+c	1,48594	-1,66439	0,00423	0,6558<x<=2	0,002						
6	10	y=a*Exp(b*x)+c	21,02532	-0,05129	-	0<=x<=0,4047	0	y=a*Exp(b*x)+c	1,5051	-2,29125	0,07853	0,4047<x<=1,0814	0,002	y=a*Exp(b*x)+c	3,36928	-2,83662	0,06054	1,0814<x<=2	0,002
7	20	y=a+b*x	1,08382	-1,59872	19,9357	0<=x<=0,2814	0,003	y=a*Exp(b*x)+c	1,1	-2,25134	0,03959	0,2814<x<=1,0605	0,003	y=a+b/x	-0,058	0,20257		1,0605<x<=2	0,002
8	30	y=a+b*x	1,07978	-2,20728		0<=x<=0,2	0,003	y=a+b/x	-0,03403	0,14801		0,2<x<=0,8	0,003	y=a+b/x	-0,04631	0,14998		0,8<x<=2	0,002
9	40	y=a+b*x	1,07138	-2,85221		0<=x<=0,1558	0,004	y=a+b/x	-0,04157	0,11241		0,1558<x<=0,8116	0,004	y=a*Exp(b*x)+c	0,45283	-2,08075	0,01245	0,8116<x<=2	0,001
N	φ	F(x)	a	b	S _{оcт}														
10	46	y=a+b*x	0,00171	1,78044	0,001														
11	44	y=a+b*x	6,72E-05	1,59295	0,002														
12	42	y=a+b*x	-0,00184	1,45324	0,003														
13	40	y=a+b*x	-0,00315	1,31623	0,003														
14	38	y=a+b*x	-0,00125	1,21541	0,002														
15	36	y=a+b*x	1,48E-04	1,11748	0,001														
16	34	y=a+b*x	-0,00115	1,03464	0,001														
17	32	y=a+b*x	-0,00163	0,96222	0,001														
18	30	y=a+b*x	-0,0012	0,88516	0,002														

19	28	$y=a+b*x$	3,21E-04	0,82821	0,001
20	26	$y=a+b*x$	0,0039	0,7704	0,003
21	24	$y=a+b*x$	0,00519	0,71875	0,004
22	22	$y=a+b*x$	0,00577	0,66806	0,003
23	20	$y=a+b*x$	0,00485	0,62592	0,004
24	18	$y=a+b*x$	0,00723	0,58424	0,005
25	16	$y=a+b*x$	0,00533	0,55161	0,003
26	14	$y=a+b*x$	0,00136	0,52072	0,002
27	12	$y=a+b*x$	0,00533	0,48769	0,005
28	10	$y=a+b*x$	0,00411	0,46171	0,004
29	8	$y=a+b*x$	0,0032	0,42624	0,003
30	6	$y=a+b*x$	0,00215	0,39713	0,002
31	4	$y=a+b*x$	6,97E-04	0,36254	0,001
32	2	$y=a+b*x$	-0,00107	0,32112	0,001

Таблица Ж.3 – Результаты аппроксимации данных номограммы для определения активного напряжения сдвига от временной нагрузки в нижнем слое двухслойной системы (при $h_B/D \in [0;4]$)

N	Ев/Ен	F(x)	a	b	x	S _{оет}	F(x)	a	b	c	x	S _{оет}	F(x)	a	b	c	x	S _{оет}
1	50	$y=a*\text{Exp}(b*x)$	47,05166	-1,5027	$0<=x<=1,085$	0,07	$y=a*\text{Exp}(b*x)+c$	52,74861	-1,85373	2,21639	$1,085<x<=2,235$	0,03	$y=a*\text{Exp}(b*x)+c$	12,36689	-0,73872		$2,235<x<=4$	0,02
2	40	$y=a*\text{Exp}(b*x)$	50,38852	-1,44164	$0<=x<=1,19$	0,07	$y=a*\text{Exp}(b*x)+c$	53,36576	-1,73502	2,47768	$1,19<x<=2,355$	0,05	$y=a*\text{Exp}(b*x)+c$	16,66238	-0,82307	0,85	$2,355<x<=4$	0,03
3	30	$y=a*\text{Exp}(b*x)$	56,68638	-1,34497	$0<=x<=1,345$	0,06	$y=a*\text{Exp}(b*x)+c$	61,84305	-1,65121	2,65849	$1,345<x<=2,505$	0,05	$y=a*\text{Exp}(b*x)+c$	27,25079	-0,97267	1,13667	$2,505<x<=4$	0,02
4	25	$y=a*\text{Exp}(b*x)$	64,33567	-1,31678	$0<=x<=1,465$	0,06	$y=a*\text{Exp}(b*x)+c$	64,61189	-1,52158	2,64583	$1,465<x<=2,645$	0,05	$y=a*\text{Exp}(b*x)+c$	28,22342	-0,93348	1,29583	$2,645<x<=4$	0,03
5	20	$y=a+b/x$	-7,52345	27,34187	$0<=x<=1,61$	0,1	$y=a*\text{Exp}(b*x)+c$	80,39805	-1,55972	3,02128	$1,61<x<=2,78$	0,08	$y=a+b/x$	-1,71222	15,69391		$2,78<x<=4$	0,02
6	15	$y=a*\text{Exp}(b*x)$	78,32768	-1,21622	$0<=x<=1,605$	0,04	$y=a*\text{Exp}(b*x)+c$	77,1401	-1,40698	3,30887	$1,605<x<=2,88$	0,06	$y=a+b/x$	-2,32032	19,71323		$2,88<x<=4$	0,03
7	10	$y=a*\text{Exp}(b*x)$	80,78929	-1,0981	$0<=x<=1,725$	0,08	$y=1/(a+b*x)$	-0,05796	0,08028		$1,725<x<=3,1$	0,06	$y=1/(a+b*x)$	-0,14872	0,10995		$3,1<x<=4$	0,02
8	7	$y=a+b/x$	-12,17017	45,91317	$0<=x<=1,675$	0,06	$y=1/(a+b*x)$	-0,05288	0,0702		$1,675<x<=3,285$	0,06	$y=a+b/x$	-3,36151	29,20147		$3,285<x<=4$	0,03
9	5	$y=a*\text{Exp}(b*x)$	105,91537	-0,98762	$0<=x<=1,965$	0,06	$y=1/(a+b*x)$	-0,0681	0,06791		$1,965<x<=3,365$	0,02	$y=1/(a+b*x)$	-0,09826	0,07715		$3,365<x<=4$	0,01

Продолжение таблицы Ж.3

N	ϕ	F(x)	a	b	S _{ост}
10	2	$y=a+b*x$	0,03075	4,28784	0,056
11	4	$y=a+b*x$	0,07996	4,87892	0,059
12	6	$y=a+b*x$	0,0586	5,40498	0,037
13	8	$y=a+b*x$	0,07973	5,78657	0,043
14	10	$y=a+b*x$	0,07236	6,14622	0,053
15	12	$y=a+b*x$	0,04008	6,60266	0,044
16	14	$y=a+b*x$	0,07256	6,99548	0,092
17	16	$y=a+b*x$	0,05858	7,39944	0,074
18	18	$y=a+b*x$	0,04464	7,86337	0,071
19	20	$y=a+b*x$	0,06061	8,25954	0,032
20	22	$y=a+b*x$	0,03473	8,85197	0,046
21	24	$y=a+b*x$	0,09054	9,33295	0,102
22	26	$y=a+b*x$	0,06707	9,93957	0,143
23	28	$y=a+b*x$	0	10,68757	0,088
24	30	$y=a+b*x$	0	11,2375	0,064
25	32	$y=a+b*x$	0	11,94651	0,052
26	34	$y=a+b*x$	0	12,76118	0,093
27	36	$y=a+b*x$	0	13,43078	0,066
28	38	$y=a+b*x$	0	14,22008	0,076
29	40	$y=a+b*x$	0	15,25522	0,083
30	42	$y=a+b*x$	0	16,27147	0,076
31	44	$y=a+b*x$	0	17,3682	0,105
32	46	$y=a+b*x$	0	18,95744	0,114

Таблица Ж.4 – Результаты аппроксимации данных номограммы для определения растягивающего напряжения при изгибе в верхнем монолитном слое двухслойной системы

N	E	F(x)	a	b	c	x	S _{ост}	F(x)	a	b	c	x	S _{ост}	F(x)	a	b	c	x	S _{ост}
1	10	$y=a+b/x$	-1,2004	1,9833		$0 \leq x \leq 0,5817$	0,05	$y=a*\text{Exp}(b*x)+c$	10,686	-3,0711	0,445	$0,5817 < x \leq 1$	0,01						
2	70	$y=a+b/x$	-0,6364	1,589		$0 \leq x \leq 0,5$	0,03	$y=a*\text{Exp}(b*x)+c$	8,6945	-2,8344	0,370	$0,5 < x \leq 1$	0,01						
3	50	$y=a*\text{Exp}(b*x)$	9,7648	-2,9587		$0,1867 < x \leq 0,45$	0,08	$y=a*\text{Exp}(b*x)+c$	7,8389	-2,7764	0,32	$0,45 < x \leq 1$	0,01						
4	40	$y=a*\text{Exp}(b*x)$	8,5921	-2,8865		$0,2 < x \leq 0,3217$	0,15	$y=a*\text{Exp}(b*x)$	7,6688	-2,5552		$0,3217 < x \leq 0,622$	0,02	$y=a+b/x$	-0,51	1,285		$0,6212 < x \leq 4$	0
5	30	$y=a*\text{Exp}(b*x)$	6,9736	-2,6038		$0,2133 < x \leq 0,472$	0,17	$y=a*\text{Exp}(b*x)+c$	5,4518	-1,8439	0,255	$0,472 < x \leq 0,755$	0,01	$y=a+b/x$	-0,43	1,153		$0,755 < x \leq 4$	0
6	25	$y=a+b*x$	5,0006	-6,8354		$0,2067 < x \leq 0,39$	0,10	$y=a+b/x$	-0,3683	1,0744		$0,39 < x \leq 0,6383$	0,01	$y=a*\text{Exp}(b*x)+c$	4,13	-1,8	0,013	$0,6383 < x \leq 4$	0
7	20	$y=a+b*x$	4,1842	-5,3368		$0,2117 < x \leq 0,315$	0,07	$y=a*\text{Exp}(b*x)+c$	4,9798	-2,5474	0,243	$0,315 < x \leq 0,6417$	0,01	$y=a+b/x$	-0,38	1,02		$0,6417 < x \leq 4$	0
8	15	$y=a+b*x$	3,1952	-3,5429		$0,23 < x \leq 0,3267$	0,04	$y=a*\text{Exp}(b*x)+c$	4,0282	-2,3635	0,197	$0,3267 < x \leq 0,678$	0	$y=a+b/x$	-0,31	0,89		$0,678 < x \leq 4$	0
9	10	$y=a*\text{Exp}(b*x)+c$	3,6629	-0,9201	-1,14	$0,2683 < x \leq 0,502$	0,01	$y=a*\text{Exp}(b*x)+c$	2,9265	-1,8941	0,049	$0,502 < x \leq 0,5017$	0,01	$y=x/(a+b*x)$	-1,2	3,9		$0,5017 < x \leq 4$	0
10	7	$y=a+b*x$	1,7009	-1,539		$0,3067 < x \leq 0,54$	0,03	$y=a*\text{Exp}(b*x)$	2,1306	-1,6253		$0,54 < x \leq 1$	0						
11	5	$y=a+b*x$	1,1415	-0,8422		$0,3017 < x \leq 0,593$	0,02	$y=a*\text{Exp}(b*x)+c$	4,119	-4,2886	0,332	$0,593 < x \leq 1$	0,01						

Таблица Ж.5 – Результаты аппроксимации данных номограммы зависимости коэффициента $K_{\text{УГВ}}$ от расстояния от низа дорожной одежды до расчетного УГВ или УПВ (1 – супесь тяжелая и тяжелая пылеватая, суглинок; 2 – песок, супесь легкая и легкая крупная)

N	F(x)	a	b	x	S _{ост}	F(x)	a	b	c	x	S _{ост}
1	$y=a+b*x$	1,2052	-0,40445	$0 \leq x \leq 0,977$	0,012	$y=a*x^b + c$	0,77	-0,33	0,025	$0,977 < x \leq 4$	0,05
2	$y=a+b/x$	0,37	0,3	$0 \leq x \leq 4$	0,013						

Таблица Ж.6 – Результаты аппроксимации данных номограммы зависимости коэффициента $K_{\text{нагр}}$ от глубины промерзания $z_{\text{пр}}$ от поверхности покрытия (1 – супесь тяжелая и пылеватая; суглинок; 2 – песок; супесь легкая, крупная)

N	F(x)	a	b	x	S _{ост}
1	$y=a*x^b$	1,167	-0,34	$0,5 \leq x \leq 3$	0,009
2	$y=1/(a+b*x)$	0,385	0,402	$0,5 \leq x \leq 3$	0,006

Таблица Ж.7 – Результаты аппроксимации данных графика для определения осредненной величины морозного пучения $I_{\text{пуч.ср.}}$ ($Z_{\text{пр}}=100$ см)

N	Группа грунтов	F(x)	a	b	c	x	S _{ост}	F(x)	a	b	c	x	S _{ост}
1	V	$y=a*\text{Exp}(b*x)$	18,46277	-0,02061		$0 \leq x \leq 31$	0,09	$y=a*\text{Exp}(b*x)+c$	35,89195	-0,00543	-20,5517	$31 < x \leq 100$	0,063
2	IV	$y=a*\text{Exp}(b*x)$	11,6394	-0,01691		$0 \leq x \leq 47$	0,038	$y=a*\text{Exp}(b*x)+c$	16,95173	-0,00936	-5,68966	$47 < x \leq 100$	0,028
3	III	$y=a+b*x$	8,57427	-0,12671		$0 \leq x \leq 30$	0,072	$y=a+b*\text{Ln}(x)$	17,59363	-3,74024		$30 < x \leq 100$	0,034
4	IIa	$y=a*\text{Exp}(b*x)+c$	12,855	-0,0058	-7,7	$0 \leq x \leq 100$	0,077						
5	IIб	$y=a*\text{Exp}(b*x)+c$	3,72	-0,0136	-0,95	$0 \leq x \leq 100$	0,057						

Таблица Ж.8 – Результаты аппроксимации данных графика для определения осредненной величины морозного пучения $I_{\text{пуч.ср.}}$ ($Z_{\text{пр}}=150$ см)

N	Группа грунтов	F(x)	a	b	c	x	S _{ост}	F(x)	a	b	c	x	S _{ост}
1	V	$y=a*\text{Exp}(b*x)$	23,94533	-0,01223		$10 \leq x \leq 39$	0,114	$y=a*\text{Exp}(b*x)+c$	30,17971	-0,00937	-5,92857	$39 < x \leq 140$	0,1208
2	IV	$y=a+b*x$	15,79141	-0,13863		$10 \leq x \leq 45,81$	0,054	$y=a+b*\text{Ln}(x)$	39,00938	-7,54073		$45,81 < x \leq 140$	0,095
3	III	$y=a*\text{Exp}(b*x)$	11,65635	-0,01408		$10 \leq x \leq 35,48$	0,094	$y=a+b*\text{Ln}(x)$	23,52912	-4,54181		$35,48 < x \leq 140$	0,021
4	IIa	$y=a+b*x$	6,9658	-0,07148		$10 \leq x \leq 39,35$	0,095	$y=a+b*\text{Ln}(x)$	15,00819	-2,9849		$39,35 < x \leq 140$	0,071
5	IIб	$y=a*\text{Exp}(b*x)+c$	4,41836	-0,00927	-1,1039	$10 \leq x \leq 140$	0,092						

Таблица Ж.9 – Результаты аппроксимации данных графика для определения осредненной величины морозного пучения $I_{\text{пуч.ср.}}$ ($Z_{\text{пр}}=200$ см)

N	Группа грунтов	F(x)	a	b	c	x	S _{ост}	F(x)	a	b	c	x	S _{ост}
1	V	$y=a*\text{Exp}(b*x)+c$	27,75342	-0,01091	-1,7931	$0 \leq x \leq 89,68$	0,153	$y=a*\text{Exp}(b*x)+c$	29,73703	-0,00625	-8,16347	$89,68 < x \leq 200$	1,21
2	IV	$y=a*\text{Exp}(b*x)$	17,52314	-0,0122		$0 \leq x \leq 70,32$	0,156	$y=a*\text{Exp}(b*x)+c$	24,08351	-0,00394	-11,1571	$70,32 < x \leq 200$	0,127
3	III	$y=a+b*x$	11,77235	-0,09525		$0 \leq x \leq 60$	0,057	$y=a+b*\text{Ln}(x)$	26,84396	-5,06299		$60 < x \leq 200$	0,05
4	IIa	$y=a*\text{Exp}(b*x)+c$	9,42978	-0,00671	-2,51459	$0 \leq x \leq 200$	0,075						
5	IIб	$y=a*\text{Exp}(b*x)+c$	4,55885	-0,01464	-0,05517	$0 \leq x \leq 200$	0,162						

Таблица Ж.10 – Результаты аппроксимации данных номограммы для определения требуемого термического сопротивления дорожной одежды $R_{од(тр)}$ (I-X – номера изолиний на карте; I – кривая расчета для 1-го и 2-го типов увлажнения рабочего слоя земляного полотна) (при $l_{доп}/(C_{пуч}C_p \in [0;6])$)

N	Номер изолинии	F(x)	a	b	x	$S_{ост}$	F(x)	a	b	x	$S_{ост}$	F(x)	a	b	x	$S_{ост}$
1	X	$y=1/(a+b*x)$	-	-0,01	$0 \leq x < 1,5$	0,969	$y=a+b/x$	-61,00	-261,00	$1,5 \leq x < 2$	2,070	$y=a+b/x$	-107,2594	-354,2708	$2 \leq x \leq 3,2$	0,478
2	IX	$y=a*Exp(b*x)$	418,79	0,96	$0 \leq x < 1,3$	0,991	$y=a+b/x$	-56,00	-229,00	$1,3 \leq x < 1,84$	1,928	$y=a+b/x$	-95,8939	-303,6915	$1,84 \leq x \leq 3,2$	0,504
3	VIII	$y=x/(a+b*x)$	0,01	0,02	$0 \leq x < 1,26$	0,847	$y=a+b/x$	-56,00	-210,00	$1,26 \leq x < 1,84$	2,523	$y=a+b/x$	-88,4136	-266,1104	$1,84 \leq x \leq 3,2$	0,695
4	VII	$y=a+b*x$	291,5229	170,7586	$0 \leq x < 1,04$	0,653	$y=a*Exp(b*x)$	397,92	1,17	$1,04 \leq x < 1,6$	1,460	$y=a+b/x$	-76,74	-217,23	$1,6 \leq x \leq 3,2$	1,716
5	VI	$y=1/(a+b*x)$	0,00014	-0,00923	$0 \leq x < 0,94$	0,620	$y=a*Exp(b*x)$	399,33	1,34	$0,94 \leq x < 1,44$	1,423	$y=a+b/x$	-73,52	-188,61	$1,44 \leq x \leq 3,2$	2,278
6	V	$y=1/(a+b*x)$	0,00058	-0,01025	$0 \leq x < 0,86$	0,207	$y=a*Exp(b*x)$	378,3909	1,50811	$0,86 \leq x < 1,4$	1,357	$y=a+b/x$	-65,9448	-153,255	$1,4 \leq x \leq 3,2$	2,790
7	IV	$y=a*Exp(b*x)$	341,9896	1,6805	$0 \leq x < 0,9$	0,308	$y=a*Exp(b*x)$	527,252	2,12311	$0,9 \leq x < 1,6$	1,650	$y=a+b/x$	-57,8071	-119,11	$1,6 \leq x \leq 3,2$	2,204
8	III	$y=a*Exp(b*x)$	300,8694	1,9411	$0 \leq x < 0,64$	0,426	$y=a+b/x$	-43,9341	-84,9454	$0,64 \leq x < 1,36$	1,773	$y=a+b/x$	-43,6854	-81,4253	$1,36 \leq x \leq 3,2$	2,876
9	II											$y=a*Exp(b*x)$	277,5364	2,73252	$0 \leq x \leq 3,2$	0,3
10	I											$y=a*Exp(b*x)$	176,3829	3,29162	$0 \leq x \leq 3,2$	0,2

Таблица Ж.11 – Результаты аппроксимации данных номограммы для определения требуемого термического сопротивления дорожной одежды $R_{од(тр)}$ (H_y – глубина залегания расчетного УГВ от низа дорожной одежды, включая морозозащитные слои) (при $l_{доп}/(C_{пуч}C_p \in [0;6])$)

N	H_y	F(x)	a	b	x	$S_{ост}$	F(x)	a	b	x	$S_{ост}$
1	0,5	$y=x/(a+b*x)$	0,01691	0,00633	$0 \leq x \leq 0,1$	0,708	$y=x/(a+b*x)$	0,02181	0,00812	$0,1 < x \leq 6$	2,5
2	1	$y=x/(a+b*x)$	0,01691	0,00633	$0 \leq x \leq 6$	0,492					
3	1,5	$y=x/(a+b*x)$	0,01811	0,00468	$0 \leq x \leq 6$	3,452					
4	2	$y=x/(a+b*x)$	0,01887	0,00399	$0 \leq x \leq 6$	2,979					
5	2,5	$y=x/(a+b*x)$	0,01919	0,00359	$0 \leq x \leq 6$	2,592					
6	3	$y=x/(a+b*x)$	0,01919	0,00359	$0 \leq x \leq 3,4$	2,155	$y=a+b*Ln(x)$	-3,1899	90,07061	$3,4 < x \leq 6$	0,491
7	3,5	$y=x/(a+b*x)$	0,01919	0,00359	$0 \leq x \leq 3,3$	0,000					
							$y=x/(a+b*x)$	0,02776	0,00114	$3,3 < x \leq 6$	0,708

Таблица Ж.12 – Результаты аппроксимации данных номограммы для определения требуемого термического сопротивления дорожной одежды $R_{од(тр)}$ (II-X – номера изолиний на карте) (при $l_{доп}/(C_{пуч}C_p \in [6;30])$)

N	Номер изолиний	F(x)	a	b	c	x	S _{ост}
1	X	$y=a*Exp(b*x)$	35,71127	0,74751	-23,8258	$0 \leq x < 1,6$	0,155
2	IX	$y=a*Exp(b*x)$	34,18499	0,79544		$0 \leq x < 1,6$	0,187
3	VIII	$y=a*Exp(b*x)$	32,5184	0,83541		$0 \leq x < 1,6$	0,299
4	VII	$y=a*Exp(b*x)$	30,48467	0,86951		$0 \leq x < 1,6$	0,273
5	VI	$y=a*Exp(b*x)+c$	50,09896	0,36391		$0 \leq x < 1,6$	0,191
6	V	$y=a*Exp(b*x)$	25,82336	1,05751	-4,91818	$0 \leq x < 1,6$	0,184
7	IV	$y=a*Exp(b*x)+c$	27,55942	0,85809		$0 \leq x < 1,6$	0,156
8	III	$y=a*Exp(b*x)$	19,55611	1,23415		$0 \leq x < 1,6$	0,190
9	II	$y=a+b*x$	16,14545	18		$0 \leq x < 1,6$	0,184

Таблица Ж.13 – Результаты аппроксимации данных номограммы для определения требуемого термического сопротивления дорожной одежды $R_{од(тр)}$ (H_y – глубина залегания расчетного УГВ от низа дорожной одежды, включая морозозащитные слои) (при $l_{доп}/(C_{пуч}C_p \in [6;30])$)

N	H _y	F(x)	a	b	c	x	S _{ост}
1	3,5	$y=a*Exp(b*x)$	10,00457	0,10395	-536,364	$6 \leq x \leq 30$	0,157
2	3	$y=a+b*x$	6,12626	1,89815		$6 \leq x \leq 30$	0,028
3	2,5	$y=a*Exp(b*x)+c$	543,5169	0,00284		$6 \leq x \leq 30$	0,243
4	2	$y=a+b*x$	9,28811	1,13821		$6 \leq x \leq 30$	0,064
5	1,5	$y=a+b*x$	11,66745	0,66737		$6 \leq x \leq 30$	0,326
6	1	$y=a+b*x$	9,56079	0,59907		$6 \leq x \leq 30$	0,503
7	0,5	$y=a+b*Ln(x)$	-2,84763	7,18685		$6 \leq x \leq 30$	0,435

Таблица Ж.14 – Результаты аппроксимации данных графика для определения необходимой толщины теплоизолирующего слоя из пенопласта (R – требуемое термическое сопротивление дорожной одежды)

N	R	F(x)	a	b	x	S _{ост}
1	0,2	$y=a+b*x+1$	-1,515	4,7	$0,4 \leq x \leq 3,4$	0,178
2	0,4	$y=a+b*x+1$	-2,61486	4,88537	$0,4 \leq x \leq 3,4$	0,139
3	0,6	$y=a+b*x+1$	-3,70849	5,03197	$0,4 \leq x \leq 3,4$	0,142
4	0,8	$y=a+b*x+1$	-4,90202	5,20791	$0,4 \leq x \leq 3,4$	0,117
5	1	$y=a+b*x+1$	-6,27484	5,40836	$0,4 \leq x \leq 3,4$	0,020
6	1,2	$y=a+b*x+1$	-7,27821	5,41495	$0,4 \leq x \leq 3,4$	0,021
7	1,4	$y=a+b*x+1$	-8,33252	5,401	$0,4 \leq x \leq 3,4$	0,023
8	1,6	$y=a+b*x+1$	-9,49448	5,44614	$0,4 \leq x \leq 3,4$	0,032
9	1,8	$y=a+b*x+1$	-10,6086	5,43339	$0,4 \leq x \leq 3,4$	0,056
10	2	$y=a+b*x+1$	-11,1989	5,23674	$0,4 \leq x \leq 3,4$	0,021

Таблица Ж.15 – Результаты аппроксимации данных номограммы для расчета толщины дренирующего слоя из песков мелких и средней крупности, а также крупнозернистых с коэффициентом фильтрации менее 10 м/сут (i – поперечный уклон дренирующего слоя)

N	i	F(x)	a	b	x	S _{ост}
1	0,02	$y=a+b*x$	-0,053	20,5	$0,004 \leq x \leq 0,024$	0,002
2	0,04	$y=a+b*x$	-0,08	19	$0,004 \leq x \leq 0,024$	0,004

Таблица Ж.16 – Результаты аппроксимации данных номограммы для расчета дренирующего слоя из крупных песков с коэффициентом фильтрации более 10 м/сут (i – поперечный уклон низа дренирующего слоя)

N	i	$F(x)$	a	b	c	x	$S_{\text{ост}}$
1	0,02	$y=x/(a+b*x)$	0,0146	1,65		$0 \leq x \leq 0,016$	0,007
2	0,03	$y=x/(a+b*x) + c$	0,0165	1,55	-0,024	$0 \leq x \leq 0,016$	0,008
3	0,04	$y=x/(a+b*x) + c$	0,0155	1,6	-0,055	$0 \leq x \leq 0,016$	0,006
4	0,05	$y=x/(a+b*x) + c$	0,016	1,6	-0,08	$0 \leq x \leq 0,016$	0,006

Таблица Ж.17 – Результаты аппроксимации данных номограммы для определения коэффициента $K_{\text{вог}}$ увеличения объема воды в дренирующем слое в местах изменения вогнутого профиля (i_1, i_2 – продольные уклоны выше и ниже перелома профиля)

N	$(i_1-i_2)/i_2$	$F(x)$	a	b	c	x	$S_{\text{ост}}$
1	1	$y=1/(a+b*x)$	0,46035	0,32725		$0 \leq x \leq 1$	0,017
2	0,5	$y=a*\text{Exp}(b*x)+c$	0,58607	-1,59086	1,02181	$0 \leq x \leq 1$	0,007
3	0,3	$y=a*\text{Exp}(b*x)+c$	0,33637	-1,17342	1,00126	$0 \leq x \leq 1$	0,002
4	0,25	$y=1/(a+b*x)$	0,7963	0,13345		$0 \leq x \leq 1$	0,007
5	0,2	$y=a*\text{Exp}(b*x)+c$	0,21027	-1,31	1,00704	$0 \leq x \leq 1$	0,002

Таблица Ж.18 – Результаты аппроксимации данных номограммы для расчета дренирующего слоя конструкции с прикромочным дренажем (a – мелкий песок)

N	L	i	$F(x)$	a	b	x	$S_{\text{ост}}$	$F(x)$	a	b	x	$S_{\text{ост}}$
1	10,5	0,02	$y=a+b*x$	47,38	728,15	$0 \leq x \leq 0,0519$	0,936	$y=a+b*x$	59,91698	499,7921	$0,0519 < x \leq 0,012$	0,323
2	10,5	0,04	$y=a+b*x$	41,91595	739,30507	$0 \leq x \leq 0,0467$	0,951	$y=a+b*x$	54,37016	490,3779	$0,0467 < x \leq 0,012$	0,439
3	7	0,02	$y=a+b*x$	32,8118	516,93646	$0 \leq x \leq 0,0452$	0,577	$y=a+b*x$	41,85772	328,8773	$0,0452 < x \leq 0,012$	0,451
4	7	0,04	$y=a+b*x$	29,77109	496,98348	$0 \leq x \leq 0,0495$	0,348	$y=a+b*x$	38,30472	325,7957	$0,0495 < x \leq 0,012$	0,424
5	5	0,02	$y=a+b*x$	26	336	$0 \leq x \leq 0,059$	0,463	$y=a+b*\text{Ln}(x)$	100	19,4	$0,059 < x \leq 0,012$	0,208
6	5	0,04	$y=a+b*x$	25,97053	269,18273	$0 \leq x \leq 0,012$	1,048					
7	3,5	0,02	$y=a+b*x$	23,0559	175,66923	$0 \leq x \leq 0,012$	0,945					
8	3,5	0,04	$y=a+b*x$	20,92314	170,51669	$0 \leq x \leq 0,012$	1,031					

Таблица Ж.19 – Результаты аппроксимации данных номограммы для расчета дренирующего слоя конструкции с прикромочным дренажем (б – песок средней крупности)

N	L	i	F(x)	a	b	x	S _{ост}	F(x)	a	b	x	S _{ост}
1	10,5	0,02	$y=a+b*x$	43,61738	759,8348	$0 \leq x \leq 0,055$	0,857	$y=a+b*x$	56,08503	514,5008	$0,055 < x \leq 0,012$	0,528
2	10,5	0,04	$y=a+b*x$	36,6673	749,5528	$0 \leq x \leq 0,055$	0,849	$y=a+b*x$	50,44587	494,0073	$0,055 < x \leq 0,012$	0,499
3	7	0,02	$y=a+b*x$	29,84241	491,3098	$0 \leq x \leq 0,069$	0,656	$y=a+b*Ln(x)$	132,4776	26,42283	$0,069 < x \leq 0,012$	0,396
4	7	0,04	$y=a+b*x$	26,88687	449,9696	$0 \leq x \leq 0,06$	0,331	$y=a+b*x$	33,26443	336,966	$0,06 < x \leq 0,012$	0,182
5	5	0,02	$y=a+b*x$	22,18365	339,8127	$0 \leq x \leq 0,055$	0,316	$y=a+b*x$	28,09213	233,4802	$0,055 < x \leq 0,012$	0,285
6	5	0,04	$y=a+b*x$	20,24562	318,4611	$0 \leq x \leq 0,055$	0,584	$y=a+b*x$	24,72586	233,3159	$0,055 < x \leq 0,012$	0,197
7	3,5	0,02	$y=a+b*x$	17,88923	235,4155	$0 \leq x \leq 0,055$	0,577	$y=a+b*Ln(x)$	63,92194	11,57574	$0,055 < x \leq 0,012$	0,023
8	3,5	0,04	$y=a+b*x$	15,59307	220,0182	$0 \leq x \leq 0,055$	0,197	$y=a+b*Ln(x)$	62,54617	12,07067	$0,055 < x \leq 0,012$	0,098

Таблица Ж.20 – Результаты аппроксимации данных графика для определения поправки на влияние суммарной толщины стабильных слоев одежды (1 – для исходной относительной влажности 0,75Wm; 2 – для исходной относительной влажности 0,80Wm; 3 – для исходной относительной влажности 0,85Wm; 4 – для исходной относительной влажности 0,90Wm)

N	Wm	F(x)	a	b	x	S _{ост}
1	0,75	$y=a*Exp(b*x)-0,012$	0,00908	0,47527	$0,6 \leq x \leq 1,8$	0,012
2	0,8	$y=a+b*Ln(x)-0,013$	0,02584	0,04158	$0,6 \leq x \leq 1,8$	0,013
3	0,85	$y=a+b*Ln(x)-0,013$	0,03839	0,08104	$0,6 \leq x \leq 1,8$	0,013
4	0,9	$y=a+b*Ln(x)-0,014$	0,04789	0,11258	$0,6 \leq x \leq 1,8$	0,014

Таблица Ж.21 – Результаты аппроксимации данных графика для определения коэффициента C, используемого для вычисления весенней влажности

F(x)	a	b	x	S _{ост}
$y=a+b/x$	0,8281	0,54711	$0,1 \leq x \leq 3,9$	0,015

Таблица Ж.22 – Результаты аппроксимации данных номограммы для $W_{\text{отн}}$ (отношение осеннего приращения влажности к максимально возможной величине приращения влажности грунта) при значениях ($F_{oh} \in [0,1;1]$)

N	F_{oh}	$F(x)$	a	b	x	$S_{\text{ост}}$
1	1	$y=0,95$			$0,1 \leq x \leq 1$	0
2	0,9	$y=1/(a+b*x)$	1,10834	-0,03176	$0,1 \leq x \leq 1$	0,001
3	0,8	$y=a+b*x$	0,82893	0,07155	$0,1 \leq x \leq 1$	0,001
4	0,7	$y=a*Exp(b*x)$	0,78012	0,10098	$0,1 \leq x \leq 1$	0,001
5	0,6	$y=a+b*x$	0,71537	0,10851	$0,1 \leq x \leq 1$	0,001
6	0,5	$y=a*Exp(b*x)$	0,63956	0,17152	$0,1 \leq x \leq 1$	0,001
7	0,4	$y=1/(a+b*x)$	1,9186	-0,48414	$0,1 \leq x \leq 1$	0,007
8	0,3	$y=a*Exp(b*x)$	0,36354	0,52381	$0,1 \leq x \leq 1$	0,002
9	0,2	$y=a*Exp(b*x)$	0,20227	0,88766	$0,1 \leq x \leq 1$	0,002
10	0,1	$y=a*Exp(b*x)$	0,04058	2,23231	$0,1 \leq x \leq 1$	0,002