

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск
2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово

Научный руководитель: доктор технических наук профессор
Пимонов Александр Григорьевич

Официальные оппоненты: **Ступина Алена Александровна**,
доктор технических наук, профессор,
заведующая кафедрой цифровых технологий
управления Сибирского федерального
университета, г. Красноярск

Медведев Алексей Викторович,
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры фундаментальной математики
Кемеровского государственного университета

Ведущая организация: Сибирский государственный индустриальный
университет, г. Новокузнецк

Защита состоится «09» июня 2022 года в 15:15 на заседании диссертационного совета 24.2.415.02, созданного на базе Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ТУСУР, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУРа по адресу:
г. Томск, ул. Красноармейская, 146
и на сайте: <https://postgraduate.tusur.ru/urls/mhb1dtc2>

Автореферат разослан « » апреля 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Зайченко Татьяна Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 множества доступных для использования дорожно-строительных 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 множества доступных для использования дорожно-строительных 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 множества доступных для использования дорожно-строительных 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 п. 3, 4 и 5 паспорта специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

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 множество доступных для использования дорожно-строительных материалов 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 множества доступных для использования 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 множества доступных для использования 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), Международной конференции «Математика, ее приложения и математическое образование» (Улан-Удэ, 2011, 2014), Международной научно-практической конференции «Программная инженерия: методы и технологии разработки информационно-вычислительных систем» (Донецк, 2018), Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (Новосибирск, 2019) и др.

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 137 страниц основного текста, 20 страниц – приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель, задачи, объект и предмет исследования, дана характеристика научной новизны и практической значимости, отражены результаты внедрения работы и ее апробация, приведены структура и объем диссертации.

В первой главе выполнен обзор отечественных и зарубежных методов проектирования автомобильных дорог, представлен обзор программного обеспечения для расчета конструкций дорожных одежд и результаты анализа известных на сегодняшний день методов расчета оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд, соответствующих действующим на территории РФ нормативным документам. Большой вклад в разработку основных критериев прочности конструкций нежестких дорожных одежд, методов и алгоритмов подбора оптимальных конструкций был внесен отечественными учеными Б.М. Наумовым, В.М. Юмашевым, П.И. Теляевым, В.А. Мазуровым, А.Е. Мерзликиным, Е.И. Масленковой, Г.А. Муромовой, И.Н. Налобиним, Т.Е. Полтарановой, М.Л. Гольденбергом. Существующие методы и алгоритмы позволяют осуществлять подбор конструкции только путем варьирования толщин конструктивных слоев, не гарантируют рассмотрения всех допустимых вариантов конструкций, поиск не является направленным. При большой размерности задачи данные методы могут оказаться неэффективными по времени.

Во второй главе представлены две математические модели оптимизации конструкций нежестких дорожных одежд:

1) математическая модель оптимизации конструкции нежестких дорожных одежд путем варьирования толщин и множества доступных для использования 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.

Согласно ОДН 218.046-01 для обеспечения прочности конструкции в течение заданного срока службы необходимо соответствие следующим условиям:

1. Условие сдвигоустойчивости подстилающего грунта и малосвязных конструктивных слоев:

$$T_{\text{доп}} / T \geq K_{\text{прсд}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{доп}}$ – допустимое напряжение сдвига, обусловленное сцеплением в грунте (МПа); T – активное напряжение сдвига в грунте или слабо-связном материале (МПа).

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

$$R_{\text{доп}} / \sigma_r \geq K_{\text{прс}}, \quad (2)$$

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

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

$$E_{\text{ТР}} / E_{\text{общ}} \geq K_{\text{пру}}, \quad (3)$$

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

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

$$l_{\text{пуч}} \leq l_{\text{доп}}, \quad (4)$$

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

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

$$S = \sum_{i=1}^n c_i h_i \quad (\text{руб./}m^2), \quad (5)$$

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

На основе норм и указания по конструированию и расчету нежестких одежд автомобильных дорог общей сети, приведенных в ОДН 218.046-01, предложена концептуальная модель расчета конструкции нежестких дорожных одежд (рис. 1).



Рисунок 1 – Концептуальная модель расчета конструкции нежестких дорожных одежд

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 (1)-(4). Целевой функцией является стоимость 1 м^2 конструкции дорожной одежды (5). Переменными параметрами являются толщины и идентификаторы материалов конструктивных слоев. Минимальные толщины конструктивных слоев и шаг варьирования регламентируются нормативными документами. Варьирование множества доступных для использования дорожно-строительных материалов конструктивных слоев осуществляется на основе альбомов типовых решений.

$$S(h_1, t_1, h_2, t_2, \dots, h_n, t_n) \rightarrow \min_{h_i, t_i} \quad (6)$$

при ограничениях

$$\begin{cases} f_1(h_1, t_1, h_2, t_2, \dots, h_n, t_n) \geq k_1 \\ f_2(h_1, t_1, h_2, t_2, \dots, h_n, t_n) \geq k_2 \\ f_3(h_1, t_1, h_2, t_2, \dots, h_n, t_n) \geq k_3 \\ f_4(h_1, t_1, h_2, t_2, \dots, h_n, t_n) \leq k_4 \\ h_i \in H_i \\ t_i \in T_i \\ n \geq 3 \end{cases} \quad (7)$$

где k_1 – коэффициент прочности по условию сдвигоустойчивости подстилающего грунта и малосвязных конструктивных слоев (1); $f_1(h_1, t_1, h_2, t_2, \dots, h_n, t_n)$ – отношение допустимого напряжения сдвига к активному напряжению сдвига $T_{\text{доп}} / T$, вычисляется в соответствии с ОДН 218.046-01, k_2 – коэффициент прочности по условию сопротивления монолитных слоев усталостному

разрушению от растяжения при изгибе (2); $f_2(h_1, t_1, h_2, t_2, \dots, h_n, t_n)$ – отношение предельного допустимого растягивающего напряжения к наибольшему растягивающему напряжению в рассматриваемом слое $R_{\text{доп}} / \sigma_r$; k_3 – коэффициент прочности по условию для упругого прогиба (3); $f_3(h_1, t_1, h_2, t_2, \dots, h_n, t_n)$ – отношение требуемого модуля упругости конструкции к общему модулю упругости $E_{\text{ТР}} / E_{\text{общ}}$; k_4 – допускаемое для данной конструкции пучение грунта (4); $f_4(h_1, t_1, h_2, t_2, \dots, h_n, t_n)$ – расчетное (ожидаемое) пучение грунта земляного полотна; h_i – толщина i -го конструктивного слоя; H_i – допустимые толщины для i -го конструктивного слоя; t_i – идентификатор материала i -го конструктивного слоя; T_i – идентификаторы допустимых материалов для i -го конструктивного слоя; n – количество конструктивных слоев дорожной одежды. Блок-схемы алгоритмов вычисления отношений $f_1 - f_4$ приведены в диссертации.

В качестве обобщения математической модели (6)-(7) 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:

$$Q_1 = b \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j} c_i h_i L_j \text{ (руб.)}, \quad (8)$$

где n_j – количество слоев конструкции на j -м участке трассы; $\sum_{i=1}^{n_j} c_i h_i$ – удельная стоимость м^2 конструкции на участке трассы j (руб./ м^2); 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:

$$Q_1(S_1, L_1, S_2, L_2, \dots, S_n, L_n) \rightarrow \min_{S_j L_j}. \quad (9)$$

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:

$$y_j = \begin{cases} 1, & \text{если } j = 1, \text{ или на предыдущем участке используется отличная конструкция;} \\ 0, & \text{если на предыдущем участке используется та же конструкция и } j \neq 1 \end{cases} \quad (10)$$

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

$$Q_2 = \sum_{j=1}^m y_j, \quad (11)$$

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 вариантов конструкции используется. Для получения оптимального варианта конструкции по всей длине автомобильной дороги необходимо решить задачу:

$$Q_2(y_1, y_2, \dots, y_n) \rightarrow \min_{y_i} . \quad (12)$$

Таким образом задача расчета конструкции нежестких дорожных одежд, однотипных по продольному профилю трассы, состоящей из нескольких участков, и с минимальными затратами на сооружение (9), (12), представляет собой задачу многокритериальной оптимизации. Для приведения задачи к однокритериальной выполнена аддитивная свертка критериев (9), (12). Для этого необходимо вычислить соответствующие адаптивные коэффициенты. Адаптивный коэффициент для Q_1 :

$$w_1 = 1 / \max Q_1. \quad (13)$$

Для вычисления адаптивного коэффициента определяется максимальное значение Q_1 из всех рассматриваемых вариантов конструкций нежестких дорожных одежд по продольному профилю трассы, состоящей из нескольких участков.

Адаптивный коэффициент для Q_2 :

$$w_2 = 1 / \max Q_2. \quad (14)$$

Для вычисления адаптивного коэффициента определяется максимальное значение Q_2 из всех рассматриваемых вариантов конструкций нежестких дорожных одежд по продольному профилю трассы, состоящей из нескольких участков.

Тогда целевая функция задачи может быть представлена следующим образом:

$$Q = w_1 Q_1 + w_2 Q_2. \quad (15)$$

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

$$Q(Q_1, Q_2) \rightarrow \min_{y_j, S_j, L_j} \quad (16)$$

при ограничениях

$$\begin{cases} f_{1j}(h_{1j}, t_{1j}, h_{2j}, t_{2j}, \dots, h_{nj}, t_{nj}) \geq k_{1j} \\ f_{2j}(h_{1j}, t_{1j}, h_{2j}, t_{2j}, \dots, h_{nj}, t_{nj}) \geq k_{2j} \\ f_{3j}(h_{1j}, t_{1j}, h_{2j}, t_{2j}, \dots, h_{nj}, t_{nj}) \geq k_{3j} \\ f_{4j}(h_{1j}, t_{1j}, h_{2j}, t_{2j}, \dots, h_{nj}, t_{nj}) \leq k_{4j} \\ h_{ij} \in H_{ij} \\ t_{ij} \in T_{ij} \\ n_j > 3 \\ m > 1 \end{cases} \quad (17)$$

где $k_{1j} - k_{4j}, f_{1j} - f_{4j}$ назначаются и вычисляются аналогично модели (6)-(7); Q – целевая функция, содержащая адаптивные коэффициенты (15); $i = 1, \dots, n_j$; $j = 1, \dots, m$; 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} – идентификатор материала i -го конструктивного слоя на участке j ; T_{ij} – идентификаторы допустимых материалов для i -го конструктивного слоя на участке j .

Математическая модель оптимизации конструкции нежестких дорожных одежд (6)-(7) позволяет получать минимальные по стоимости и удовлетворяющие требованиям прочности и морозоустойчивости конструкции путем варьирования толщин и множества доступных для использования дорожно-строительных материалов конструктивных слоев.

Математическая модель многокритериальной оптимизации конструкции нежестких дорожных одежд (16)-(17) позволяет получать варианты конструкций с минимальными затратами на сооружение и при этом учитывать критерий однотипности конструкции по продольному профилю трассы, состоящей из нескольких участков.

В третьей главе представлены методы и алгоритмы расчета конструкции нежестких дорожных одежд. Расчет оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд представляет собой задачу дискретной оптимизации с нелинейными ограничениями (6)-(7) и (16)-(17), которая не может быть решена аналитически. В рамках исследования рассмотрены численные методы дискретной оптимизации. Для анализа эффективности разработанных методов и алгоритмов были проведены вычислительные эксперименты. Характеристики оборудования и описание используемого для проведения экспериментов программного обеспечения приведены в диссертации. Из результатов вычислительного эксперимента следует, что методы прямого поиска несмотря на гарантию нахождения глобального оптимума могут оказаться неэффективными по времени.

Для расчета оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд предложено использовать генетический алгоритм (ГА). Для проведения вычислительного эксперимента рассмотрено 100 запусков каждой модификации ГА. В рамках вычислительного эксперимента были рассмотрены различные модификации генетического алгоритма (табл. 1) и установлено, что для решения поставленной задачи целесообразно применять ГА со следующими модификациями:

1) варианты конструкций нежестких дорожных одежд представлены в виде хромосом, составляющих популяцию, гены – параметры слоев конструкции (материал и толщина слоя), кодирование осуществляется целыми числами, так как параметры дискретны;

2) первая популяция формируется равномерно распределенной, чтобы охватить максимально большое пространство поиска;

3) новое поколение формируется путем отбора с частичной заменой популяции;

4) при формировании новой популяции все новые варианты конструкций оптимизируются при помощи прямого перебора и только потом записываются в новую популяцию, очередной сдвиг хромосомы осуществляется на основании вычисления евклидова расстояния;

5) работа алгоритма прекращается в случае схождения популяции или при достижении максимального количества поколений.

Таблица 1 – Результаты работы генетических алгоритмов с различными модификациями

	Канонический ГА	Элитарная стратегия	Отбор с частичной заменой популяции	Гибридный алгоритм
Относительная погрешность	0,397	0,146	0,029	0,021
Среднее время работы (с)	38,95	39,60	26,027	15,1
Среднее количество обращений к целевой функции	100	100	31,52	27,8

Работа гибридного ГА сочетает в себе возможность рассмотрения множества вариантов решения с точностью переборных методов для достижения более быстрой сходимости и повышения надежности работы алгоритма. Параллельный запуск ГА позволяет получить высокую точность при меньшем времени расчета (табл. 2).

Таблица 2 – Результаты работы гибридного генетического алгоритма

	Гибридный генетический алгоритм (400 хромосом в популяции)	Гибридный генетический алгоритм (100 хромосом) Параллельный запуск (4 процесса)
Относительная погрешность	0,013	0,011
Среднее время работы (с)	57,473	31,8

В рамках данного исследования предложено использовать метод аддитивной свертки для расчета оптимальной конструкции нежестких одежд по продольному профилю трассы, состоящей из нескольких участков, с адаптивными коэффициентами (16)-(17). Был проведен вычислительный эксперимент с применением гибридного ГА, модифицированного следующим образом:

1) в качестве хромосом популяции представлены конструкции нежестких дорожных одежд, кодирование хромосом осуществляется аналогично приведенным выше модификациям алгоритма;

2) возможные варианты проектов по длине трассы группируются в блоке реализации элитарной стратегии, хромосомы, образующие лучший проект, переходят в новую популяцию, минуя этап селекции;

3) осуществляется оценка хромосомы (конструкции) на соответствие каждому участку трассы и вычисляется стоимость материалов, необходимых для строительства единицы площади конструкции;

4) селекция осуществляется на основе родительской и дочерней популяций: обе популяции объединяются в промежуточную, осуществляется расчет адаптивных весов и оценка целевой функции (функции приспособленности) (15), далее хромосомы ранжируются, и не вошедшие в новое поколение особи отсекаются;

5) работа алгоритма останавливается в случае сходимости популяции или расчета максимального числа поколений, по окончании работы алгоритма из хромосом финальной популяции формируется проект, развернутый по продольному профилю трассы, состоящей из нескольких участков.

В результате вычислительного эксперимента (табл. 3) установлено, что для расчета оптимальных конструкций нежестких дорожных одежд по продольному профилю трассы, состоящей из нескольких участков, целесообразно применение параллельных вычислений для сокращения времени работы алгоритма.

Таблица 3 – Результаты работы гибридного генетического алгоритма для расчета конструкций нежестких дорожных одежд по продольному профилю трассы

	Гибридный генетический алгоритм (200 хромосом в популяции)	Гибридный генетический алгоритм (100 хромосом) Параллельный запуск (4 процесса)
Относительная погрешность	0,017	0,007
Среднее время работы (с)	105,56	50,39

В результате проведенного исследования разработаны модифицированные гибридные генетические алгоритмы для расчета оптимальных конструкций нежестких дорожных одежд на основе оптимизационных моделей (6)-(7) и (16)-(17). Показано, что применение технологии параллельных вычислений позволяет сократить время расчета и относительную погрешность вычислений.

В четвертой главе представлено разработанное с использованием технологии параллельных вычислений программное обеспечение, которое позволяет осуществлять расчет оптимальной конструкции на основе альбомов типовых решений путем варьирования толщин и (или) множества доступных для использования дорожно-строительных материалов конструктивных слоев с применением модифицированного генетического алгоритма и осуществлять расчет оптимальных конструкций нежестких дорожных одежд для автодорог, состоящих из нескольких участков.

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 множества доступных для использования дорожно-строительных материалов конструктивных слоев.

5. Подбор конструкции нежестких дорожных одежд для минимизации ее стоимости с учетом критерия однотипности по продольному профилю трассы, состоящей из нескольких участков.

Разработанное в результате выполнения исследования программное обеспечение позволяет повысить оперативность принятия решений при расчете оптимальной конструкции нежестких дорожных одежд автомобильных дорог общего пользования.

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 множества доступных для использования 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) множества доступных для использования дорожно-строительных 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 ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

**Статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ
для опубликования основных результатов диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук**

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

2. Тайлакова, А.А. Оптимизационные модели расчета конструкции нежестких дорожных одежд / А.А. Тайлакова, А.Г. Пимонов // Вестник КузГТУ. – 2015. – № 3 (109). – С. 149-155.

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

4. 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.

Публикация, индексируемая в международной наукометрической базе данных Scopus

5. 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.

Статьи, опубликованные в сборниках материалов и трудов конференций (всего – 25, представлены основные)

6. 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. 107-108.

7. 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.

8. 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.

9. 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. Новосибирск, Россия 28 октября-1 ноября 2019 г. – Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2019. – С. 80.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ и баз данных

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

Подписано в печать 31.03.2022. Формат 60×84/16
Бумага офсетная. Гарнитура «Times New Roman». Уч.-изд. л. 1,0
Тираж 100 экз. Заказ № 158
Издательский центр Кузбасского государственного технического
университета имени Т. Ф. Горбачева
650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4а