



Цыбин Дмитрий Юрьевич

**МЕТОДЫ ОЦЕНКИ И ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ
ИННОВАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ВОДОПРОПУСКНЫХ
ТРУБ НА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГАХ**

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и
транспортных тоннелей

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель: **Ермошин Николай Алексеевич**
Доктор военных наук, профессор

Официальные оппоненты: **Белый Андрей Анатольевич**
доктор технических наук, доцент, технический директор, ООО «K2 Инжиниринг», г. Москва

Козак Николай Викторович
кандидат технических наук, доцент кафедры транспортных систем и дорожно-мостового строительства ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»

Защита состоится «15» сентября 2026 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета У.2.1.8.53 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, корпус ГК-2, аудитория 411).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (www.spbstu.ru).

Автореферат разослан «15» июля 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета У.2.1.8.53
докт. техн. наук, доцент

Баденко В. Л.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Большое значение для надежной работы автомобильной дороги имеют водопропускные сооружения, в частности водопропускные трубы (ВПТ), предназначенные для пропуска постоянно действующих и временных водотоков. Нарушение технологии строительства водопропускных труб, вариабельность характеристик материалов для их изготовления, изменяющиеся условия работы и недостаточный уровень их обслуживания приводят к преждевременному развитию дефектов водопропускных труб и, как следствие, потере работоспособного состояния. Утрата работоспособности водопропускной трубы приводит к аварийным ситуациям на автомобильной дороге и дополнительным материальным затратам на восстановление самой трубы, земляного полотна, дорожной одежды, а также экономическому ущербу от снижения объемов грузопассажирских перевозок. В практике проектирования не всегда учитываются условия работы водопропускных труб, воспринимающих транспортные нагрузки, передаваемые через дорожную одежду и земляное полотно автомобильной дороги, гидравлические нагрузки, взаимодействие с грунтом основания и грунтовой обоймой засыпки трубы, необходимость укрепления входного и выходного русел. Многообразие условий работы ВПТ, возможность применения инновационных материалов в их конструкции, не позволяют в полной мере использовать типовые конструктивные решения. В целях повышения надежности работы таких водопропускных сооружений требуется разработка методов оценки и повышения надежности инновационных конструкций водопропускных труб на автомобильных дорогах.

Надежность инновационных конструкций водопропускных труб должна быть обеспечена на всех стадиях их жизненного цикла, включая проектирование, изготовление, хранение, транспортирование, монтаж, эксплуатацию, ремонт и реконструкцию. Обеспечение основных требований к надежности должно гарантироваться достоверными данными изысканий, которые используются в проектной документации и строительном производстве, техническими и технологическими решениями, обоснованными расчетами, применением качественных материалов, квалифицированными действиями строителей и эксплуатационных служб, а также контролем качества при строительстве и эксплуатации.

Степень разработанности. Исследованию работоспособности водопропускных труб, посвящены работы ученых ПГУПС, СПбГАСУ, МАДИ, ДВГУПС, УрГУПС, КГАСУ, ТГАСУ и других ведущих научных и образовательных организаций. Большой вклад в разработку теории и практики оценки надежности работы малых водопропускных сооружений внесли Г.К. Клейн, Н.М. Колоколов, О.Е. Бугаева, О.А. Янковский, К.Б. Щербина, В.М. Лисов, И.Г. Овчинников, Ю.Г. Лазарев, Ю.В. Волкова, В.Л. Баденко, Н.А. Ермошин, А. А. Белый, Н.В. Козак, Д.А. Шестовицкий, Bhandari S, Ezzeldin I, Yang J, Haghani R, Cao L, Bai R. и др. Однако, анализ

выполненных исследований в области разработки технических и технологических решений по повышению надежности ВПТ, их проектирования, строительства и ремонта показал, что к настоящему времени не выявлены закономерности между прочностью и надежностью конструктивных элементов водопропускных труб при вероятностном характере физико-механических характеристик применяемых строительных материалов и конструкций, воздействии транспортного потока и увеличивающихся массогабаритных характеристик транспортных нагрузок, а также влияние на долговечность агрессивного воздействия водотока.

Анализ условий работы водопропускных труб, требований к их конструктивным элементам, существующих методов оценки надежности и нормируемых показателей надежности позволил выявить следующие противоречия в теории и практике обеспечения надежной работы ВПТ:

1. Противоречие в теории заключается в том, что существующие принципиальные подходы к назначению нормируемых показателей надежности водопропускных труб основаны на субъективном или полусубъективном назначении коэффициентов надежности (по нагрузке, материалу и т.д.) без строгого аналитического обоснования взаимосвязи между надежностью и прочностью конструктивных элементов водопропускных сооружений, что вызывает либо перерасход ресурсов при завышении прочности, либо необходимость выполнения преждевременных ремонтов при её занижении;

2. Противоречие в практике состоит в рассогласованности между требованиями к уровню надежности работы водопропускных труб и ограничениями на финансирование инженерных изысканий их проектирование, строительство и эксплуатацию;

3. Противоречие между теорией и практикой заключается в том, что существующие методы оценки и повышения надежности водопропускных труб предполагают стабильные и прогнозируемые условия их работы, тогда как в реальной эксплуатации они функционируют в изменяющихся, часто более сложных и неблагоприятных условиях, что может стать причиной разрушения конструкций.

Указанные обстоятельства определяют цель, предмет, объект исследования и его научную задачу.

Цель диссертационного исследования заключается в разработке методов обоснования технических и технологических решений повышения надежности инновационных конструкций водопропускных труб на автомобильных дорогах.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности 2.1.8 «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей» по пункту 6: совершенствование методов расчета конструкций, сооружений и их элементов: земляного полотна, пути, оснований, опор, дорожного и аэродромного покрытий, пролетных строений, защитных покрытий, тоннельной обделки, несущих, подпорных и ограждающих конструкций,

средств организации движения, водопропускных труб, галерей и т.п., на статические и динамические воздействия природного и техногенного происхождения, включая расчеты напряженно-деформированного состояния и водно-теплового режима, грунтовых массивов, металлических, бетонных и железобетонных конструкций, гидравлического и ледового режимов акваторий мостовых переходов; по пункту 14: разработка новых и совершенствование существующих методов и средств математического и физического моделирования работы конструкций, технологических процессов, организации и оперативного управления строительным производством, режимов эксплуатации и оценки технических и экологических рисков при строительстве, эксплуатации и реконструкции транспортных сооружений, их элементов, объектов и производств.

Объект исследования: конструкции водопропускных труб на автомобильных дорогах.

Предмет исследования: методы, модели, методики, технические и технологические решения исследования и повышения надежности водопропускных труб на автомобильных дорогах.

Научная задача исследования заключается в разработке методов теоретических и экспериментальных исследований, показателей оценки и повышения надежности конструкций водопропускных труб на основе имитационного моделирования их работы, взаимодействия с грунтом основания и насыпи автомобильной дороги.

Для достижения поставленной цели определены и решены следующие **задачи:**

- выполнен анализ теории и практики обоснования проектных решений водопропускных искусственных сооружений на автомобильных дорогах;
- исследованы возможности применения инновационных материалов в конструкциях водопропускных труб;
- разработана имитационная модель работы водопропускных круглых металлических гофрированных и композитных труб;
- разработан метод оценки надежности инновационных конструкций водопропускных труб по прочности, устойчивости и деформациям;
- выполнена экспериментальная проверка методов оценки и повышения надежности инновационных конструкций водопропускных труб на автомобильных дорогах;
- разработан алгоритм практической реализации имитационной модели работы инновационных конструкций водопропускных труб на автомобильных дорогах для обоснования мероприятий по повышению их надежности;
- выполнена технико-экономическая оценка технических и технологических решений по повышению надежности водопропускных труб на автомобильных дорогах.

Научная новизна диссертации определяется разработкой методов оценки и повышения надежности инновационных конструкций водопропускных труб на автомобильных дорогах, *учитывающих*

стохастический характер физико-механических характеристик материалов и изделий водопропускных труб, взаимодействия конструктивных элементов труб с грунтом основания и насыпи автомобильной дороги, условий строительства и эксплуатации водопропускных сооружений, агрессивности пропускаемого потока воды; *отличающихся* применением принципов системного подхода, методов имитационного моделирования и математической теории надежности, планирования эксперимента, теории упругости и прочности, механики грунтов и строительной механики; *позволяющих* выявить закономерности влияния физико-механических и эксплуатационных характеристик конструкционных материалов водопропускных труб, вариации нагрузок, модуля деформации грунтовой обоймы на вероятность безотказной работы сооружения, а также определить комплекс технических, технологических и организационно-экономических решений по повышению надежности работы водопропускных труб.

Теоретическая значимость результатов диссертации заключается в том, что выявленные закономерности влияния параметров грунтовой обоймы, обеспечивающих прочность и устойчивость конструктивных элементов труб, вероятность безотказной работы, и геометрическую неизменяемость конструкции водопропускных сооружений являются дальнейшим развитием теории надежности в проектировании и строительстве дорог. Разработанные теоретические положения позволяют исследовать надежность работы инновационных конструкций водопропускных труб на автомобильных дорогах как сложной технической системы, состоящей из «стареющих элементов».

Практическая значимость результатов исследования заключается в снижении негативного влияния поверхностного стока воды на работу дорожных конструкций, возможности сокращения издержек на строительство, содержание, ремонт и реконструкцию искусственных водопропускных сооружений за счет принятия научно-обоснованных проектных решений с учетом оценки надежности работы водопропускных труб при заданных параметрах засыпки, технических решений по обеспечению прочности инновационных конструкций труб и предотвращению их разрушений от агрессивного воздействия водотока, увеличения абразивной и коррозионной стойкости.

Положения, выносимые на защиту:

1. Имитационная модель работы водопропускных круглых металлических гофрированных и композитных труб.
2. Метод оценки надежности инновационных конструкций водопропускных труб по прочности, устойчивости и деформациям.

Методология и методы исследований. Для решения поставленных в работе задач применялись методы теории надежности, механики грунтов, строительной механики, теории вероятностей и математической статистики на основе которых разработаны имитационная модель и метод оценки надежности инновационных конструкций водопропускных труб на автомобильных дорогах.

Достоверность научных результатов обеспечивается соответствием исходных данных при имитационном моделировании существующим конструктивным решениям водопропускных труб и требованиям к их конструктивным элементам; применением апробированных методов теории надежности, теории вероятностей и математической статистики; согласованностью эмпирического распределения показателей надежности водопропускных труб с теоретическими законами распределения; воспроизводимостью результатов экспериментальных исследований; проверкой адекватности результатов имитационного моделирования реальным условиям работы водопропускных труб и показателям их геометрической неизменяемости. Научные выводы и рекомендации диссертации основываются на результатах фундаментальных исследований по математической теории надежности.

Вклад автора в проведенное исследование заключается в том, что он лично обосновал цель, объект, предмет, научную задачу, научную новизну, теоретическую и практическую значимости исследования. Выполнил анализ условий работы малых искусственных водопропускных сооружений и требований к их конструктивным элементам, обосновал показатели надежности работы малых искусственных водопропускных сооружений на автомобильных дорогах, проанализировал существующие методы оценки и повышения надежности их работы. Выполнил исследование возможности применения инновационных материалов в конструкциях водопропускных труб. Разработал имитационную модель работы водопропускных круглых металлических гофрированных и композитных труб и метод оценки надежности инновационных конструкций водопропускных труб по прочности, устойчивости и деформациям. Провел экспериментальную проверку методов оценки и повышения надежности инновационных конструкций водопропускных труб на автомобильных дорогах. Разработал алгоритм практической реализации имитационной модели работы водопропускных круглых металлических гофрированных и композитных труб для обоснования мероприятий по повышению их надежности и выполнил технико-экономическую оценку технических и технологических решений. Принял непосредственное участие в написании и публикации научных статей, содержащих основные результаты исследования, а также в выступлениях с докладами на научных конференциях и семинарах.

Апробация работы. Работа выполнена автором в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого. Материалы диссертационной работы апробированы на конференциях: Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова: Сборник докладов, Белгород, 16–17 мая 2023 года. Том Часть 9. – Белгород; Неделя науки ИСИ: Сборник материалов всероссийской конференции, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 01–04 апреля 2024 года; Неделя науки Инженерно-строительного института – 2025: Сборник

материалов Всероссийской конференции, Санкт-Петербург, 01–04 апреля 2025 года.

Внедрение результатов работы подтверждено 2 актами реализации результатов исследования.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 8 статей в научных изданиях, из них 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и пяти приложений. Общий объем составляет 152 страницы, работа содержит 39 рисунков и 39 таблиц. Список литературы содержит 105 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится степень разработанности темы диссертации, определяющая выявленные противоречия в теории и практике обеспечения надежной работы водопропускных труб, что обосновывает актуальность темы диссертации. Сформулированы научная и частные задачи диссертации, определены объект и предмет исследования. Раскрыты научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методы и достоверность результатов исследования, изложены положения, выносимые на защиту, сведения об апробации и внедрении основных положений диссертации.

В первой главе проанализированы условия работы водопропускных труб. Установлено, что требования к конструкциям ВПТ определяются топографическими, гидрологическими, геологическими, погодноклиматическими условиями, параметрами транспортного потока, техническими параметрами автомобильной дороги и условиями ресурсного обеспечения строительства, эксплуатации и ремонта, а также нормами, предусмотренными нормативно-технической базой дорожного строительства. Следует отметить, что довольно сложно выделить наиболее важную группу условий и требований к конструкциям ВПТ, что говорит о том, что все требования к конструкциям, должны рассматриваться совместно. Нарушение этих требований, вызванное ненадлежащим учетом условий, может привести к необоснованному и экономически нецелесообразному выбору конструкций, потере их надежности и работоспособного состояния, ведущему к повышению затрат на содержание и ремонт.

Наиболее распространенными причинами отказов являются: отклонения характеристик сооружения от проектных значений, рост транспортных нагрузок, нарушение технологии строительства, низкое качество используемых материалов, низкая коррозионная стойкость защитных покрытий.

В этой же главе обоснованы основные показатели безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости ВПТ. Для оценки надежности наиболее детального учета требований к показателям безотказности и долговечности обоснованы определения терминов

надежности применительно к ВПТ. Определены показатели их оценки по прочности, устойчивости, развития предельно допустимых деформаций и воздействия агрессивных сред воды и грунта основания, на основе которых сформулировано условие безотказной работы металлических гофрированных труб:

$$P \left\{ \begin{array}{l} q \leq q_p \\ \frac{N}{\varphi F} \leq m_2 R_0 \\ \Delta D \leq 0,05D \end{array} \right\} \leq P_{\text{доп}}, \quad (1)$$

где q – интенсивность вертикального давления грунта от постоянных и временных нагрузок, кН/м²;

q_p – расчетная несущая способность трубы в грунте кН/м²;

N – расчетное осевое сжимающее усилие на единицу длины стенки, кН/м²;

F – площадь продольного сечения стенки на единицу длины трубы, м²/м;

R_0 – основное расчетное сопротивление стали при действии осевых сил, кН/м²;

φ – коэффициент понижения несущей способности, вводимый для предотвращения потери устойчивой формы равновесия гибкой МГТ в упругой грунтовой среде;

ΔD – относительное изменение диаметра трубы.

$P_{\text{доп}}$ – допустимая вероятность отказа, которая может быть задана исходя из уровня ответственности и прогнозируемого срока службы водопропускной трубы;

Условие безотказной работы композитных труб:

$$P \left\{ \begin{array}{l} \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_{pp}} + \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{pn}} \leq 1 \\ K_{\text{уг}} K_{\text{об}} \sqrt{E_{\text{гр}} G_t} \geq p \\ \frac{0,11p}{8SR + 0,061E_{\text{гр}}} \leq 0,035D \end{array} \right\} \leq P_{\text{доп}}, \quad (2)$$

где ε_p – максимальное значение относительной деформации растяжения материала в стенке трубы из-за овальности ее поперечного сечения под действием грунтов и временной нагрузки;

ε_{pp} – предельно допустимое значение относительной деформации растяжения материала в стенке трубы в условиях релаксации напряжений;

ε_c – относительная степень сжатия материала стенки трубы от воздействия грунта и временной нагрузки;

ε_{pn} – предельно допустимое значение относительной деформации растяжения материала в стенке трубы в условиях ползучести;

$K_{\text{уг}}$ – коэффициент, учитывающий влияние засыпки грунта на устойчивость трубы;

$K_{ОВ}$ – коэффициент, учитывающий деформации поперечного сечения трубы;

G_t – долговременная кольцевая жесткость трубы, МПа;

$E_{ГР}$ – модуль деформации грунта, МПа;

p – суммарная постоянная и временная нагрузка, кН/м²;

SR – величина, характеризующая кольцевую жесткость трубы, кН/м².

На основе анализа условий эксплуатации, требований к конструктивным элементам, существующих методов оценки надежности водопропускных труб выявлены противоречия в теории и практике строительства и эксплуатации ВПТ. Суть этих противоречий состоит в несоответствии точности и достоверности существующих методов оценки и повышения надежности инновационных конструкций водопропускных труб объективным потребностям практики их проектирования, строительства, содержания и ремонта.

Во второй главе диссертации исследованы возможности применения инновационных материалов в конструкциях водопропускных труб и способы повышения надежности их работы. К ним относятся увеличение толщины стенки трубы и защитного покрытия, применение инновационных материалов, усиление конструкций ВПТ, применение многослойных защитных покрытий и повышение коррозионной стойкости путем применения заменяемых элементов конструкций.

В этой главе разработаны положения, выносимые на защиту. **Первым положением** является имитационная модель работы инновационных конструкций водопропускных труб по прочности, устойчивости и деформациям. Сущность имитационной модели состоит в том, что проверки расчетных условий выполняются с учетом случайных значений величин проектных параметров водопропускной трубы и применяемых материалов, а также действующих нагрузок в принятых интервалах их варьирования с установленными законами распределения.

Научная новизна имитационной модели заключается в том, что в отличие от известных методов исследования работы водопропускных труб, она позволяет разработать технические решения инновационных конструкций с применением инновационных материалов, включения в состав конструкции дополнительных усиливающих элементов, элементов, предотвращающих коррозионное разрушение от агрессивного воздействия водотока за счет учета стохастического характера физико-механических характеристик применяемых материалов, армирования грунтовой обоймы и взаимодействия её с конструктивными элементами трубы.

Вероятность безотказной работы конструкций определяется исходя из выполнения или невыполнения расчетных критериев. В исследовании рассматриваются критерии прочности, устойчивости и наступления предельных деформаций.

Параметры необходимые для проверки расчетных условий представлены в таблице 1. Алгоритм и блок-схема имитационной модели представлены на рисунках 1,2.

Таблица 1 – Параметры материалов конструкции водопропускных труб

Параметры, определяющие интенсивность вертикального давления						
№	Параметр	Обозначение	Ед. изм.	Закон распределения	Нормативное (исходное значение)	Диапазон имитируемых значений
1	Удельный вес грунта насыпи	γ	кН/м ³	нормальный	17,70	15,05-20,36
2	Удельный вес материала трубы	γ_c	кН/м ³	нормальный	76,98	76,83-77,13
3	Средний радиус поперечного сечения трубы	r	м	нормальный	0,757	0,749-0,823
4	Высота засыпки	H	м	нормальный	10	9,09-10,1
5	Временная транспортная нагрузка Н14		кН/м	экспоненциальный	233	233-256,3
Параметры, определяющие несущую способность и устойчивость конструкции гофрированных труб						
6	Момент сопротивления продольного сечения	W	м ³	нормальный	$16,8 \cdot 10^{-8}$	$15,1 \cdot 10^{-8}$ - $18,5 \cdot 10^{-8}$
7	Модуль деформации грунта засыпки	$E_{гр}$	МПа	нормальный	18	16,2-19,8
8	Предел текучести стали	σ_T	МПа	нормальный	304	273,606- 334,407
9	Расчетное сопротивление стали при действии осевых сил	R_0	МПа	нормальный	23	211,824- 258,896
Параметры, определяющие несущую способность и устойчивость конструкции композитных труб						
10	Толщина стенки трубы	δ	м	нормальный	0,0015	0,0151-0,0159
11	Начальный модуль упругости при растяжении материала трубы	E_0	МПа	нормальный	24200	26620-21780
12	Расчетная прочность при растяжении материала трубы в поперечном направлении оси трубы	σ_0	МПа	нормальный	14,3	12,87-15,73
13	Долговременный модуль упругости при растяжении материала трубы	E_t	МПа	нормальный	5803,4	5223,02- 6383,69
14	Модуль деформации грунта в пазухах траншеи	$E_{гр}$	МПа	нормальный	18	16,20-19,80
15	Коэффициент Пуассона материала трубы	ν		нормальный	0,3	0,27-0,33

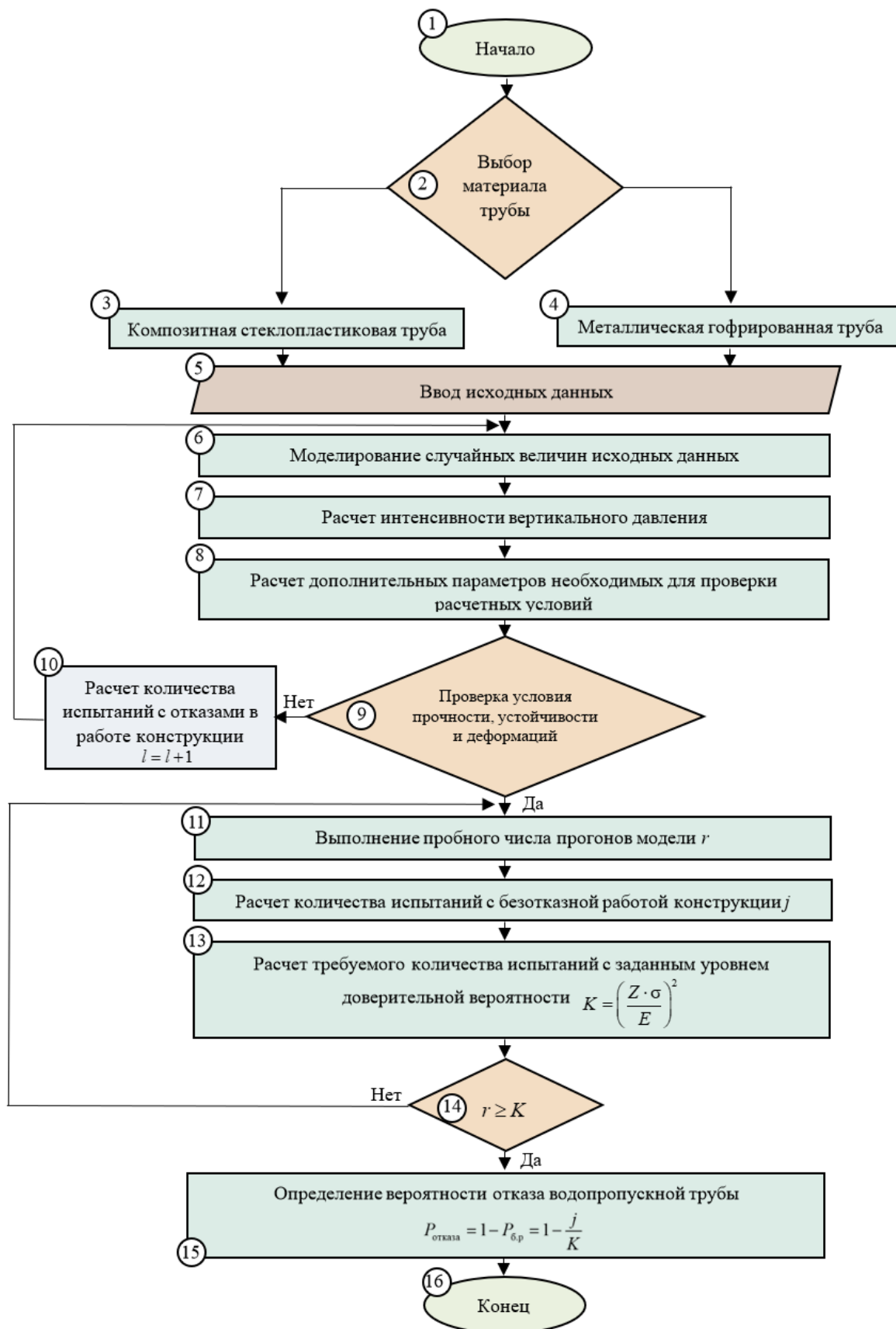


Рис. 1 – Алгоритм имитационной модели

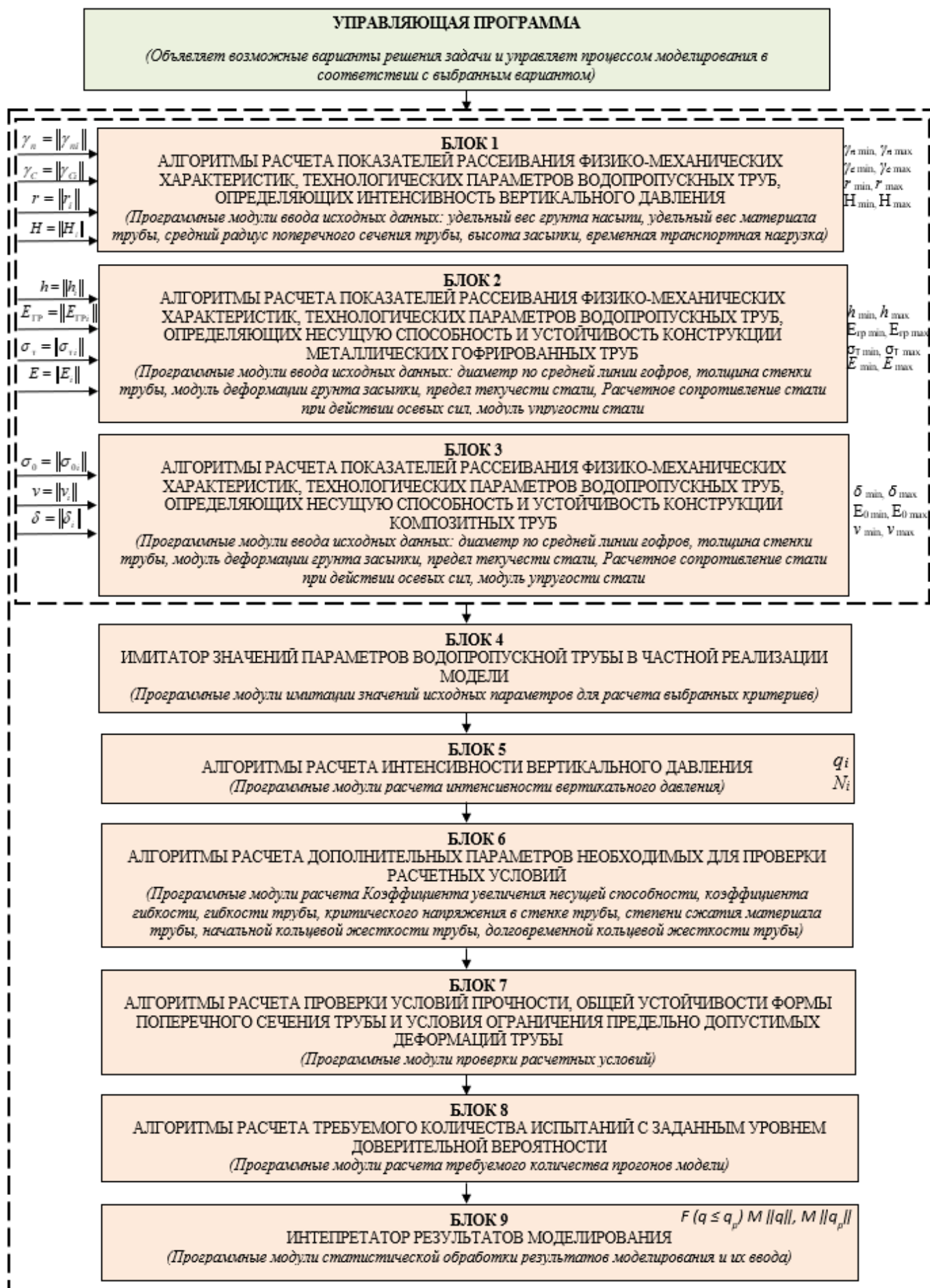


Рис. 2– Блок схема имитационной модели работы водопропускных труб

Предназначение блоков имитационной модели состоит в следующем.

Блок 1. Рассчитываются показатели рассеивания физико-механических характеристик и технологических параметров водопропускных труб, определяющих интенсивность вертикального давления.

Блоки 2 и 3. В зависимости от выбранного материала рассчитываются показатели рассеивания случайных величин исходных данных параметров, определяющих несущую способность и устойчивость металлических гофрированных и композитных труб, относительно их средних значений, а также определяются абсолютные и стандартные отклонения этих параметров.

Блок 4. Имитируются значения исходных параметров с использованием вычисленных значений среднего и стандартного отклонений.

Блок 5. На основе имитируемых данных исходных параметров вычисляется интенсивность вертикального давления на трубу:

$$q = G_c + g_v + p_v = 2\pi\gamma_c rH + C_\gamma \gamma h + \frac{\Psi}{a_0 + h} \quad (3)$$

где γ_c - объемный вес материала трубы;

r - средний радиус поперечного сечения трубы, м;

H - толщина стенки трубы, м;

h — высота засыпки, м;

γ - удельный вес грунта насыпи, кН/м³;

C_γ - коэффициент вертикального давления;

Ψ — линейная нагрузка для нагрузки Н14, кН/м;

a_0 - длина участка распределения, м.

Блок 6. С использованием данных частной реализации модели выполняется расчет дополнительных параметров, необходимых для проверки расчетных условий.

Блок 7. Выполняется проверка расчетных условий прочности, устойчивости и предельно-допустимых деформаций в частной реализации модели (для металлических гофрированных труб по соотношению 1, для композитных труб по соотношению 2)

Блок 8. Оценка вероятности отказа конструкции по рассматриваемым критериям с предварительной подготовкой матрицы прогонов модели, а также вычислением стандартных отклонений полученных выборок. Расчет требуемого количества испытаний по предварительной выборке выполняется по формуле:

$$K = \frac{Z_{a/2}^2 \sigma^2}{d^2}, \quad (4)$$

где $Z_{a/2}$ - критическое значение для заданного уровня доверия (95%);

σ - стандартное отклонение для выборки пробного числа испытаний;

d - максимально допустимая погрешность.

Блок 9. В ходе интерпретации результатов моделирования определяется вероятность отказа конструкций на основе анализа результатов имитационного моделирования (построенной матрицы прогонов модели) по формуле:

$$P_{\text{отказа}} = 1 - P_{\text{б.р}} = 1 - \frac{j}{K}, \quad (5)$$

где $P_{\text{б.р}}$ – вероятность безотказной работы конструкции;
 j – количество испытаний при работоспособном состоянии;
 K – общее число испытаний (прогонов модели).

Результаты расчета вероятности безотказной работы металлических гофрированных и композитных труб в зависимости от высоты засыпки над трубой, полученные в ходе имитационного моделирования представлены на рисунках 3,4.

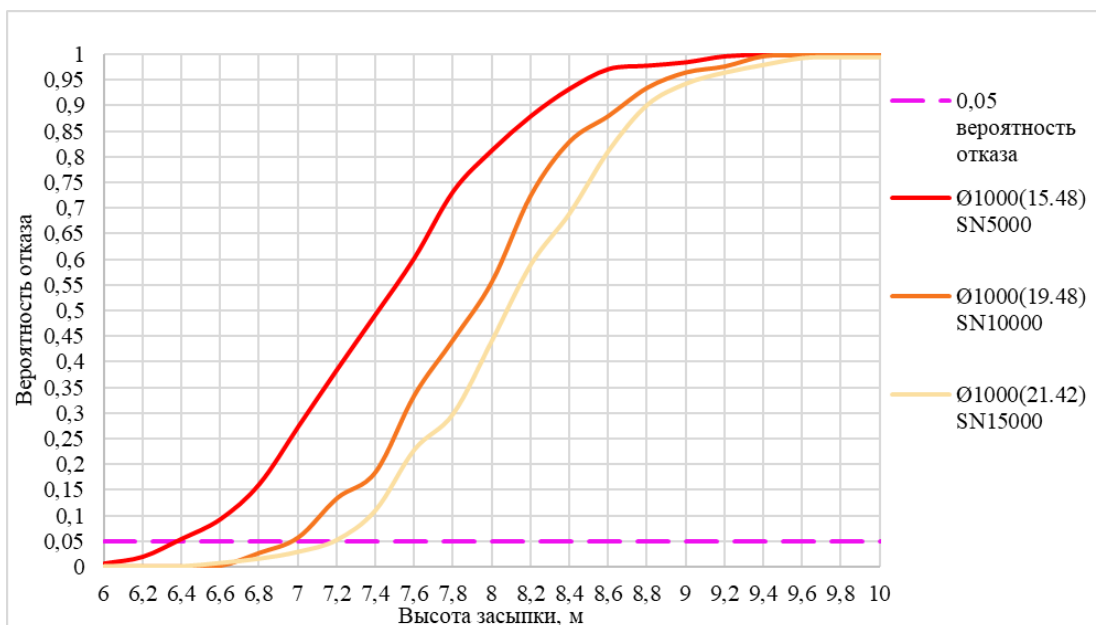


Рис. 3 График зависимости изменения вероятности отказа металлических гофрированных труб отв. 1,0м от высоты засыпки по условию прочности

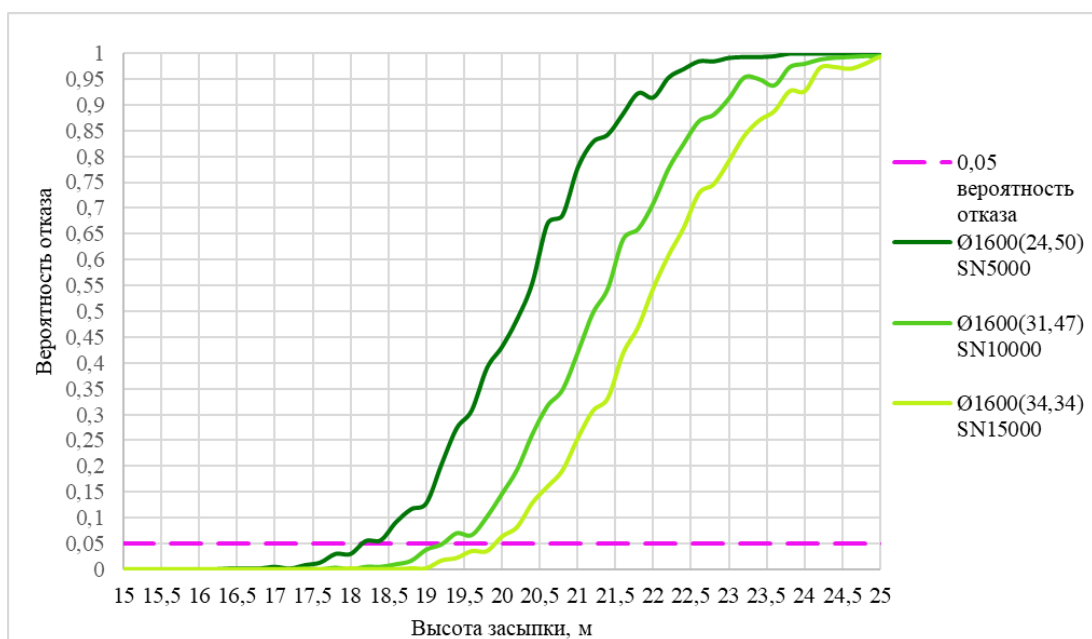


Рис. 4 График зависимости изменения вероятности отказа по условию допустимой относительной деформации композитных труб отв. 1,6 м от высоты засыпки

Вторым положением выносимым на защиту, является метод оценки надежности инновационных конструкций водопропускных труб по прочности, устойчивости и деформациям. Алгоритм реализации метода, показан на рисунке 5. Сущность метода оценки надежности заключается в комплексной оценке вероятности безотказной работы водопропускных труб с учетом вероятностного характера исходных параметров конструкций, путем расчета вероятности совместного выполнения условий прочности, устойчивости и ограничения предельно допустимых деформаций, что позволяет полностью оценить надежность сооружения.

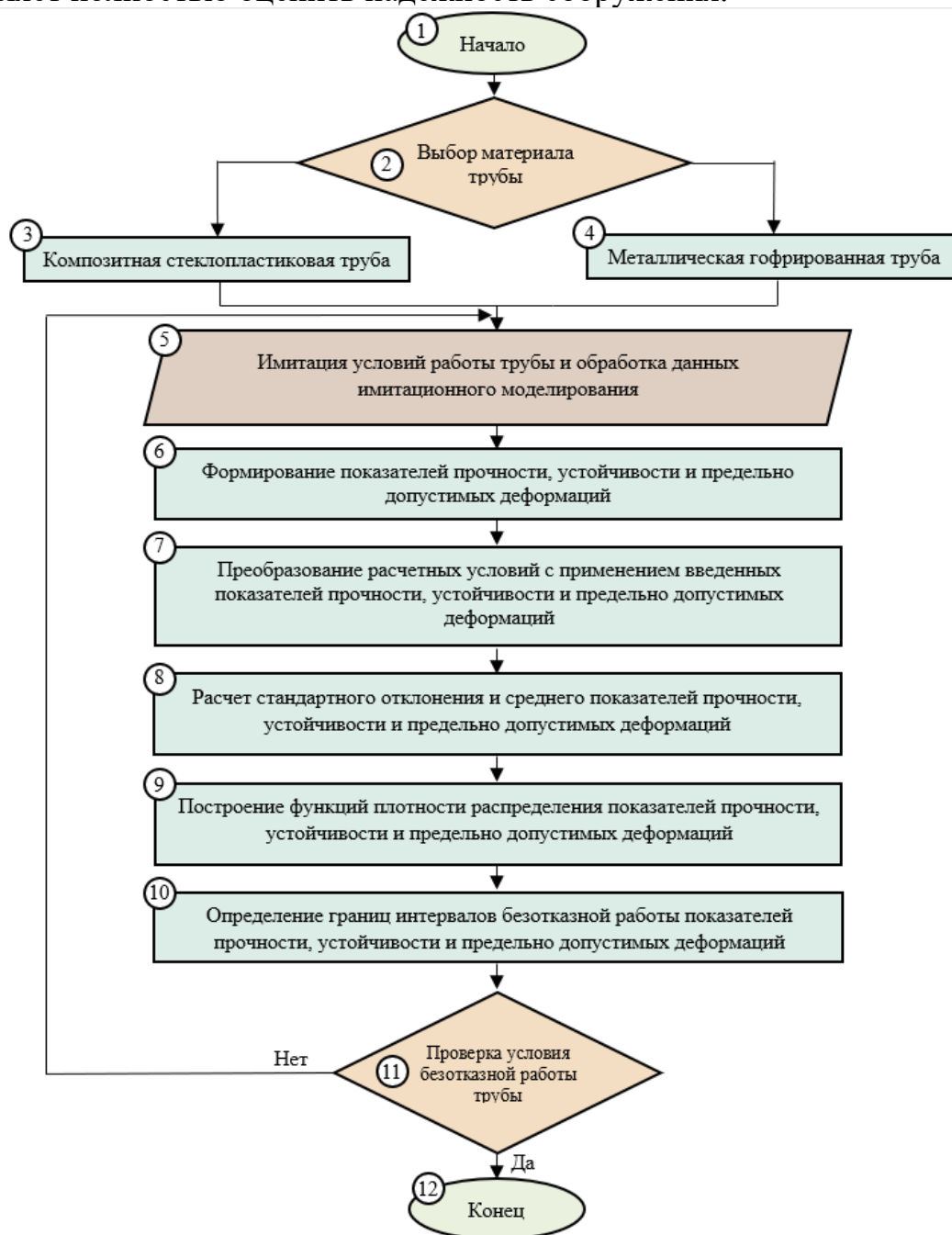


Рис. 5 – Укрупненная блок-схема алгоритма метода оценки надежности инновационных конструкций водопропускных труб по прочности, устойчивости и деформациям

Так как показатели прочности, устойчивости и предельно допустимых деформаций не могут быть детерминированными величинами, в связи со

случайными значениями воздействующих на работу труб факторов, в расчетах надежности необходимо оперировать не их конкретными значениями, а вероятностью того, что они примут такие значения. Изначально неизвестно в какой степени, или как отклонение того или иного параметра влияет на результаты расчета по условиям прочности, устойчивости и деформаций. Однако, применение имитационной модели позволяет оценить это влияние на основе установления функции плотности распределения показателей прочности, устойчивости формы поперечного сечения и предельно допустимых деформаций.

В результате построения функций плотности вероятности показателей прочности, устойчивости и предельно допустимых относительных деформаций, представленных на рисунках 3,4, установлено, что повышение интенсивности вертикального давления характеризует смещение функций плотности распределения показателей прочности, устойчивости и предельно допустимых деформаций в зону отказа конструкции.

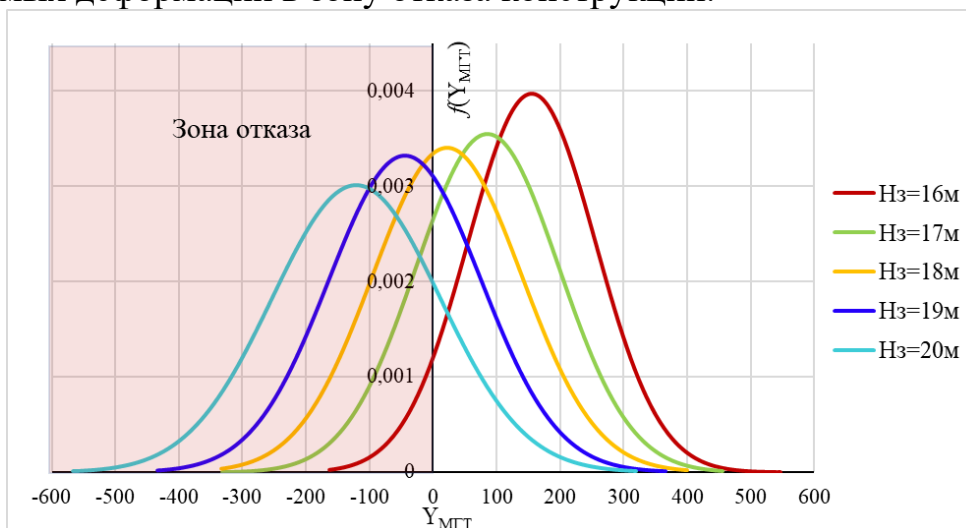


Рис. 3 – Функции плотности распределения показателя устойчивости МГТ отверстием 2,0м и толщиной стенки 2,5 мм.

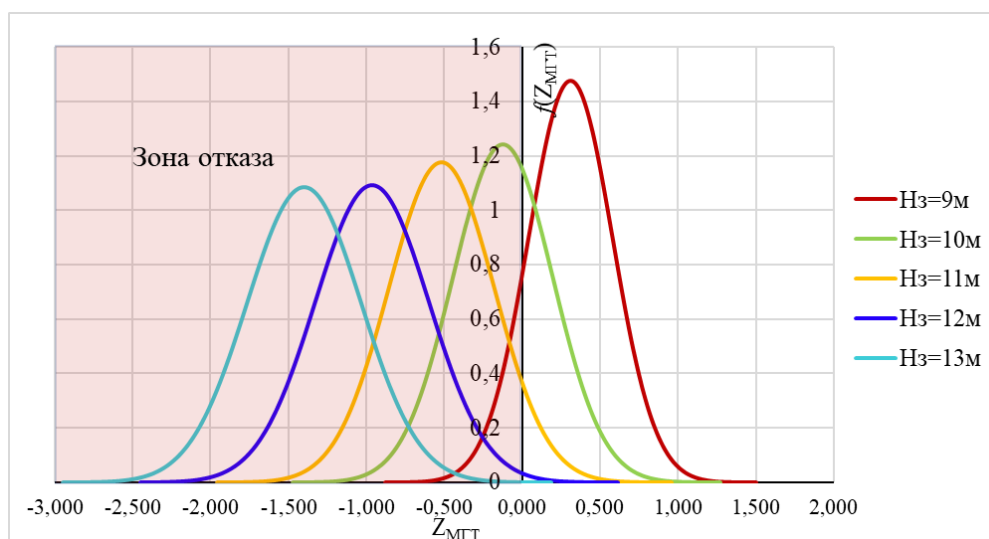


Рис. 4 – Функции плотности распределения показателя предельно допустимых относительных деформаций диаметра МГТ отверстием 2,0м и толщиной стенки 2,5 мм.

Исходя из этого требуется определить вероятность попадания случайной величины показателей прочности, устойчивости и предельно допустимых деформаций труб в интервалы значений показателей, обеспечивающих работоспособное состояние конструкций.

Начальная граница интервалов назначается равной 0. Для ограничения конечной границы интервалов применяется правило трех сигм:

$$b_i = \mu_i + 3\sigma_i, \quad (5)$$

где b_i – граница конечного интервала i -го показателя прочности, устойчивости и предельно допустимых деформаций для металлических гофрированных и композитных труб ($i=1 \dots 6$);

μ_i – среднее выборки i -го показателя прочности, устойчивости и предельно допустимых деформаций для металлических гофрированных и композитных труб ($i=1 \dots 6$);

σ_i – стандартное отклонение выборки i -го показателя прочности, устойчивости и предельно допустимых деформаций для металлических гофрированных и композитных труб ($i=1 \dots 6$);

Вероятность попадания случайной величины в заданный интервал от минимального (a) до максимального (b) значения показателя x_i определяется по формуле:

$$P(a < x_i < b) = \Phi^* \left(\frac{b_i - \mu_i}{\sigma_i} \right) - \Phi^* \left(\frac{a_i - \mu_i}{\sigma_i} \right), \quad (6)$$

где a_i и b_i – минимальное и максимальное значение показателя x_i .

Однако, для обеспечения безотказной работы водопропускных труб, условия прочности, устойчивости и предельно допустимых деформаций диаметра водопропускных труб должны выполняться совместно. Исходя из этого следует рассматривать систему трех случайных величин показателей прочности, устойчивости и предельно допустимых деформаций диаметра труб.

Тогда условие безотказной работы металлических гофрированных труб имеет вид:

$$P(0 < X_{МГТ} < 3\sigma_{X_{МГТ}}, 0 < Y_{МГТ} < 3\sigma_{Y_{МГТ}}, 0 < Z_{МГТ} < 3\sigma_{Z_{МГТ}}) = \left[\Phi^* \left(\frac{\mu_{X_{МГТ}} + 3\sigma_{X_{МГТ}}}{\sigma_{X_{МГТ}}} \right) - \Phi^*(0) \right] \cdot \left[\Phi^* \left(\frac{\mu_{Y_{МГТ}} + 3\sigma_{Y_{МГТ}}}{\sigma_{Y_{МГТ}}} \right) - \Phi^*(0) \right] \cdot \left[\Phi^* \left(\frac{\mu_{Z_{МГТ}} + 3\sigma_{Z_{МГТ}}}{\sigma_{Z_{МГТ}}} \right) - \Phi^*(0) \right], \quad (7)$$

Условие безотказной работы композитных труб имеет вид:

$$P(0 < X_{СТКП} < 3\sigma_{X_{СТКП}}, 0 < Y_{СТКП} < 3\sigma_{Y_{СТКП}}, 0 < Z_{СТКП} < 3\sigma_{Z_{СТКП}}) = \left[\Phi^* \left(\frac{\mu_{X_{СТКП}} + 3\sigma_{X_{СТКП}}}{\sigma_{X_{СТКП}}} \right) - \Phi^*(0) \right] \cdot \left[\Phi^* \left(\frac{\mu_{Y_{СТКП}} + 3\sigma_{Y_{СТКП}}}{\sigma_{Y_{СТКП}}} \right) - \Phi^*(0) \right] \cdot \left[\Phi^* \left(\frac{\mu_{Z_{СТКП}} + 3\sigma_{Z_{СТКП}}}{\sigma_{Z_{СТКП}}} \right) - \Phi^*(0) \right]. \quad (8)$$

В результате применения метода построены таблицы вероятностных характеристик показателей прочности, устойчивости и предельно допустимых деформаций труб для различных высот засыпки над трубой,

которые могут быть использованы в проектировании для обоснования толщины стенки трубы.

Научная новизна метода оценки надежности инновационных конструкций водопропускных труб по прочности, устойчивости и деформациям заключается в том, что разработанный метод, по сравнению с имеющимися, *учитывает* совместное влияние на вероятность отказа случайных значений показателей прочности, устойчивости и предельно допустимых деформаций, *отличается* от известных методов полученной аналитической зависимостью многомерной функции плотности распределения отказа водопропускных труб при случайных значениях физико-механических характеристик применяемых материалов; *позволяет* оценить вероятность отказа инновационных конструкций водопропускных труб.

В третьей главе выполнена проверка адекватности имитационной модели и гипотезы о том, что распределение выборки по результатам имитационного моделирования соответствует распределению опытных данных и нормальному закону распределения с помощью F-критерия и критерия согласия Пирсона на основе построенной гистограммы частот. Итоговые результаты расчета ожидаемых частот относительных вертикальных деформаций металлических гофрированных труб диаметром 1,5 м в ходе имитационного моделирования, наблюдаемых частот относительной вертикальной деформации труб диаметром 1,5 м по данным обследования и ожидаемых частот для нормального распределения, вычисленные значения критерия Пирсона χ^2 и критического значения представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты расчета χ^2

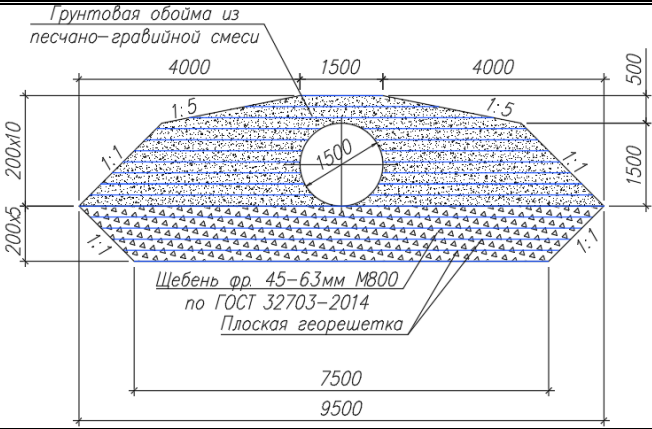
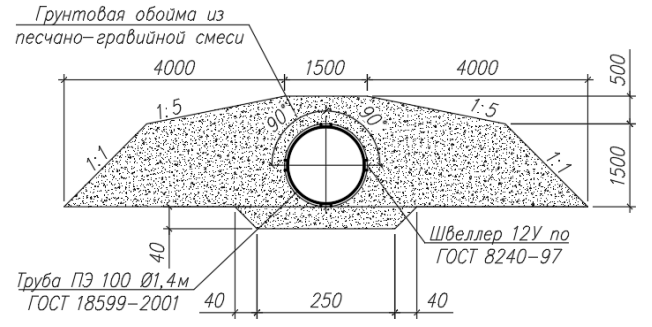
№	от	до	Наблюдаемая частота	Ожидаемая частота по имитационной модели	Вероятность попадания случайной величины в интервал по нормальному распределению	Ожидаемая частота по нормальному распределению	Значение критерия Пирсона при сравнении с распределением по имитационной модели	Значение критерия Пирсона при сравнении с нормальным распределением
			O_j	E_k	P_j	T_j	χ^2	χ^2
1	1,44	1,65	5	3,780	0,185	5,542	0,394	0,053
2	1,65	1,76	12	12,472	0,328	9,847	0,018	0,471
3	1,76	1,86	8	11,717	0,319	9,574	0,689	0,259
4	1,86	2,07	5	3,032	0,168	5,037	1,278	0,000
Σ			30	30	1,0	30	2,378	0,783
							$\chi_{кр}^2=3,841$	

Согласно полученным результатам $F_{расч}=1,024$, а $F_{кр}=1,9$, что свидетельствует об адекватности разработанной имитационной модели.

В этой же главе выполнена технико-экономическая оценка технических решений по повышению надежности металлических гофрированных водопропускных труб: с армированной грунтовой обоймой плоскими

георешетками; с заменяемой внутренней полимерной трубой и усиленная швеллерами 12У, как представлено в Таблице 3.

Таблица 3 – Варианты модернизации конструкций водопропускных труб

Общий вид	Описание
	Конструкция грунтовой обоймы и основания трубы усилена плоскими георешетками с целью обеспечения большего отпора грунта, обеспечивающего устойчивость формы сечения трубы
	Конструкция трубы усилена швеллерами 12У в четырех точках с углом 90 °, с целью обеспечения большей жесткости конструкции, с применением внутренней трубы ПЭ 100, отверстием 1,4м для обеспечения долговечности конструкции

Построены графики сравнения вероятности отказа конструкции по условию прочности от высоты засыпки над трубой для армированных плоскими герешетками прочностью при 5% удлинении 22кН/м с шагом по высоте 0,20 м, а также для усиленных швеллерами труб диаметром 1,5 м с толщиной стенки 2,5мм, представленные на рисунках 5,6.

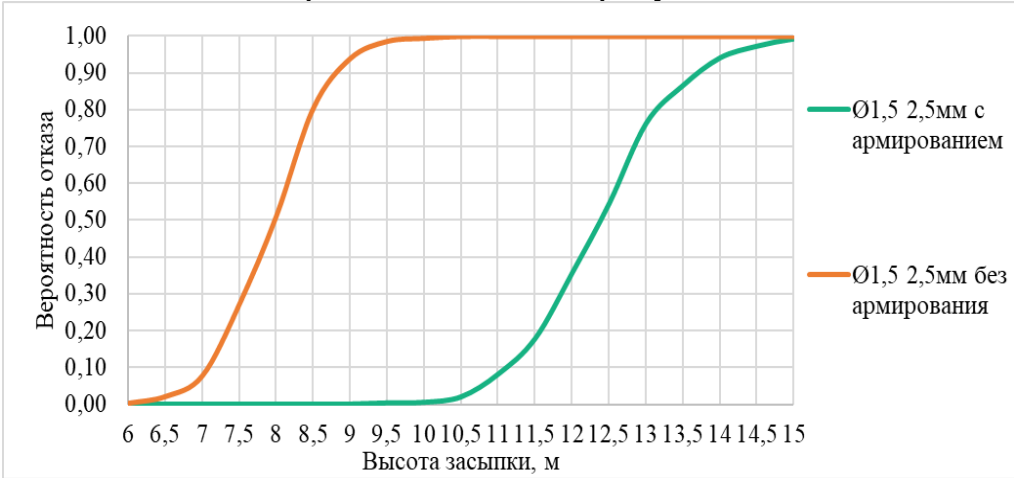


Рис. 5 – График сравнения вероятности отказа труб отв. 1,5м и толщиной стенки 2,5мм от высоты засыпки по условию прочности с армированием грунтовой обоймы и без армирования

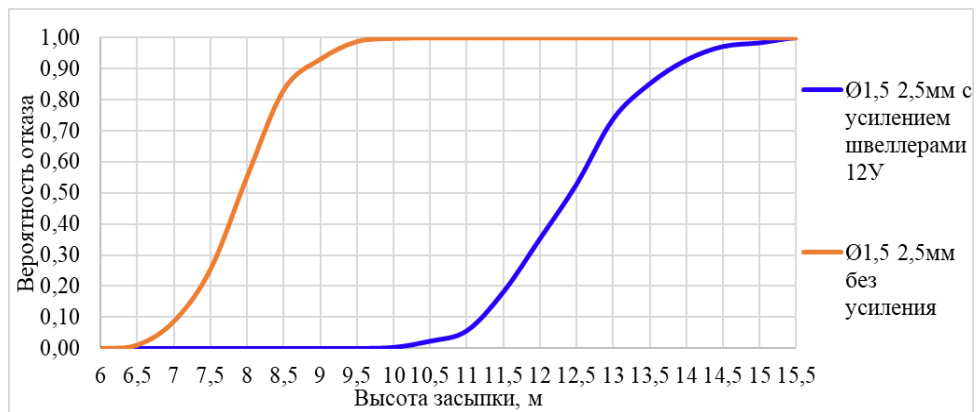


Рис. 6 – График сравнения вероятности отказа труб отв. 1,5м и толщиной стенки 2,5мм от высоты засыпки по условию прочности с усилением швеллерами 12У и без усиления

Технико-экономическая оценка технических решений по повышению надежности выполнена для конструкций водопропускных труб отверстием 1,5м: металлическая гофрированная труба, с толщиной стенки 2,5мм; металлическая гофрированная труба с толщиной стенки 2,5мм и усиленной грунтовой обоймой геосинтетическими материалами; металлическая гофрированная труба, усиленная швеллерами с внутренней полимерной трубой; композитная стеклопластиковая труба. В качестве математической основы технико-экономической оценки использовалась аддитивная свертка частных показателей эффективности мероприятий повышения надежности ВПТ. При этом в качестве частных показателей эффективности мероприятий повышения надежности водопропускных труб использовались: стоимость одного метра ВПТ; срок службы ВПТ; вероятность отказа конструкции по условию прочности; трудоемкость строительства ВПТ; потребность в машинах и механизмах. Трудоемкость строительства и потребность в машинах и механизмах определена с использованием государственных элементных сметных норм для работ по устройству секций и звеньев труб.

Технико-экономический эффект $\mathcal{E}$ рассчитывался как взвешенная сумма частных показателей эффективности:

$$\mathcal{E} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot K_i'' + \sum_{j=1}^m \alpha_j \frac{1}{K_j''} \quad (9)$$

где α_i – вес (значимость) i -го частного показателя технико-экономической эффективности мероприятий повышения надежности ВПТ, стремящегося к максимальному значению в интегральном показателе;

K_i'' – нормированное значение i -го частного показателя технико-экономической эффективности мероприятий повышения надежности ВПТ, стремящегося к максимальному значению в интегральном показателе;

α_j – вес (значимость) j -го частного показателя технико-экономической эффективности мероприятий повышения надежности ВПТ, стремящегося к минимальному значению в интегральном показателе;

K_j^n – нормированное значение i -го частного показателя технико-экономической эффективности мероприятий повышения надежности ВПТ, стремящегося к минимальному значению в интегральном показателе.

Нормированные значения показателей и рассчитанный технико-экономический эффект мероприятий повышения надежности водопропускных труб представлены в Таблице 4.

Таблица 4 – Нормированные значения показателей эффективности мероприятий повышения надежности водопропускных труб

Показатели	Ед. изм		Варианты конструкций			
			1	2	3	4
Срок службы ВПТ	K_1	лет	0,275	0,183	0,183	0,275
Вероятность отказа конструкции при высоте засыпки 10м	K_2	%	0,275	0,002	0,103	0,206
Стоимость 1м трубы	K_3	тыс. руб.	0,200	0,198	0,171	0,172
Трудоемкость строительства	K_4	чел-ч.	0,150	0,140	0,133	0,140
Потребность в машинах и механизмах	K_5	маш-ч.	0,100	0,067	0,067	0,067
Обобщенный технико-экономический эффект $\mathcal{E}_i$			0,590	0,658	0,859	0,523

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен анализ теории и практики обоснования проектных решений водопропускных искусственных сооружений на автомобильных дорогах. Требования к их конструкциям устанавливаются топографическими, гидрологическими, геологическими, погодно-климатическими условиями, условиями транспортного потока, геометрическими параметрами автомобильной дороги и экономическими условиями на участке возведения сооружения. По результатам анализа наиболее часто встречающихся дефектов водопропускных труб сформулирована классификация отказов, учитывающая причины возникновения и характер их проявления, а также возможность дальнейшей эксплуатации сооружения. На основании анализа требований к конструкциям с учетом их условий работы выявлены преимущества и недостатки конструкций водопропускных труб.

2. Проанализированы существующие методы оценки и повышения надежности работы малых искусственных водопропускных сооружений на автомобильных дорогах. Выявлено, что они не учитывают стохастический характер физико-механических характеристик материалов и изделий водопропускных труб, взаимодействия конструктивных элементов труб с грунтом основания и насыпи автомобильной дороги, агрессивности пропускаемого потока воды, условий строительства и эксплуатации водопропускных сооружений, в связи с чем необходима разработка новых методов оценки и повышения надежности водопропускных труб.

3. Исследованы возможности применения инновационных материалов в конструкциях водопропускных труб, а также основные способы повышения надежности работы, в целях обеспечения их более высокой долговечности за счет повышения прочности и деформативных характеристик конструкционных материалов, с учетом особенностей изготовления конструктивных элементов и технологии производства инновационных конструкций водопропускных труб.

4. Разработана имитационная модель работы водопропускных круглых металлических гофрированных и композитных труб. Теоретическая значимость имитационной модели состоит в том, что она является развитием методов исследования проблем надежности водопропускных труб и автомобильных дорог в интересах повышения безопасности дорожного движения. Практическая значимость имитационной модели заключается в том, что она позволяет принять обоснованное конструктивное решение водопропускной трубы и разработать типовые варианты инновационных конструкций водопропускных труб для характерных условий проектирования.

5. Разработан метод оценки надежности инновационных конструкций водопропускных труб по прочности, устойчивости и деформациям. Теоретическая значимость метода оценки надежности инновационных конструкций водопропускных труб по прочности, устойчивости и деформациям состоит в том, что в отличие от полувероятностных методов оценки надежности, таких как метод расчета по предельным состояниям, в котором учет влияния отклонений нормативных физико-механических характеристик материалов сооружения и действующих нагрузок выполняется путем применения частных коэффициентов надежности, разработанный метод более комплексно описывают работу конструкций и влияние рассматриваемых отклонений. Практическая значимость метода оценки надежности инновационных конструкций водопропускных труб по прочности, устойчивости и деформациям заключается в том, что он позволяет принять обоснованную толщину стенки водопропускной трубы и разработать типовые варианты инновационных конструкций водопропускных труб с учетом совместного выполнения условий прочности, устойчивости и предельно допустимых деформаций.

6. Выполнена экспериментальная проверка методов оценки и повышения надежности инновационных конструкций водопропускных труб на автомобильных дорогах с применением критерия согласия Пирсона и Фишера на основе гистограммы частот высоты засыпки над трубой и относительных деформаций диаметра металлических гофрированных труб отверстием 1,5 м и толщиной стенки 2,5 мм. Экспериментальная проверка результатов моделирования показала соответствие распределения результатов экспериментальных измерений, полученных в ходе обследования, распределению полученному с помощью имитационного моделирования.

7. Разработан алгоритм практической реализации имитационной модели работы инновационных конструкций водопропускных труб на автомобильных дорогах для обоснования мероприятий по повышению их надежности. Основные этапы алгоритма: выбор материала трубы; расчет показателей рассеяния случайных величин исходных данных параметров, определяющих интенсивность вертикального давления и несущую способность трубы относительно их средних значений, а также абсолютные и стандартных отклонений этих параметров; имитация значений исходных параметров, по методу Монте-Карло с использованием вычисленных значений среднего и стандартного отклонений; расчет дополнительных параметров с использованием данных частной реализации модели для проверки расчетных условий; проверка расчетных условий прочности, устойчивости и предельно-допустимых деформаций в частной реализации модели; расчет требуемого числа прогонов модели; вычисление вероятности отказа конструкции и интерпретация результатов моделирования.

8. Выполнена технико-экономическая оценка мероприятий по повышению надежности металлической гофрированной трубы, с армированной грунтовой обоймой с плоскими георешетками и с усилением швеллерами 12У и внутренним заменяемым вкладышем из полимерной трубы. Выполнен расчет обобщенного технико-экономического эффекта с учетом срока службы конструкций, вероятности отказа при высоте засыпки 10м, стоимости одного метра трубы, трудоемкости строительства и потребности в машинах и механизмах. Наиболее эффективной конструкцией является труба, усиленная швеллерами 12У с внутренней заменяемой полимерной трубой, обобщенный показатель эффективности которой на 45,6% выше, чем у конструкции трубы без мероприятий по повышению надежности.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки России

1. Цыбин, Д. Ю. Анализ методов расчета водопропускных труб как методов обеспечения надежности на стадии проектирования / Д. Ю. Цыбин, Н. А. Ермошин // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2024. – Т. 10, № 3. – С. 320-337. – DOI 10.17816/transsyst634982.
2. Цыбин, Д. Ю. Имитационная модель работы водопропускных круглых металлических гофрированных труб / Д. Ю. Цыбин, Н. А. Ермошин // Инновации и инвестиции. – 2025. – № 8. – С. 523-527.
3. Цыбин, Д. Ю. Частные имитационные модели работы полимерных водопропускных труб / Д. Ю. Цыбин // Транспортные сооружения. – 2025. – Т. 12, № 1. – DOI 10.15862/15SATS125.
4. Цыбин, Д. Ю. Усиление металлических гофрированных водопропускных труб георешетками / Д. Ю. Цыбин, Н. А. Ермошин // Инновации и инвестиции. – 2025. – № 9. – С. 490-493.