

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Инженерно-строительный институт
Кафедра «Автомобильные дороги и городские сооружения»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

_____ В.В. Серватинский

« ____ » _____ 20__ г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Исследование надежности дорожной насыпи, проектируемой
в криолитозоне по второму принципу

08.04.01 Строительство

08.04.01.11 Проектирование, строительство и эксплуатация транспортных
сооружений в суровых природно-климатических условиях Сибири

Научный руководитель _____ доцент, канд. техн. наук Т.В. Гавриленко

Выпускник _____ А.С. Михайлова

Рецензент _____ С.В. Копылов


Красноярск 2023

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Инженерно-строительный институт
Кафедра «Автомобильные дороги и городские сооружения»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

 В.В. Серватинский

«24» 04 2023 г.

ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме магистерской диссертации

Красноярск 2023

Студенту Михайловой Александре Сергеевне
Группа СФ21-11М Направление (специальность) 08.04.01 «Строительство»
08.04.01.11 «Проектирование, строительство и эксплуатация транспортных
сооружений в суровых природно-климатических условиях Сибири»
Тема магистерской диссертации «Исследование надежности дорожной
насыпи, проектируемой в криолитозоне по второму принципу»
Утверждена приказом по университету №17732/с от 30.11.2021 г.
Руководитель магистерской диссертации Т.В. Гавриленко, доцент кафедры
«АДиГС», канд. техн. наук.

Исходные данные для магистерской диссертации: нормативно-правовые документы, учебная и справочная литература, журнальные статьи и научные доклады, отчеты, материалы конференции и семинаров, справочные данные сети Internet, материалы научно-исследовательской практики.

Перечень разделов магистерской диссертации:

- Введение;
- Глава 1. Состояние вопроса и задачи исследований;
- Глава 2. Применение теории надежности к задаче устойчивости насыпи, проектируемой по второму принципу;
- Глава 3. Оценка надежности насыпи методом Монте-Карло.
- Заключение;
- Приложение А. Сертификаты участника конференции;
- Приложение Б. Публикации.

Руководитель ВКР



Т.В. Гавриленко

Задание принял к исполнению



А.С. Михайлова

« 1 » октября 2021 г.

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация имеет объем 58 страниц, содержит введение, 3 главы, заключение, список используемых источников, 2 приложения. В тексте содержится 4 рисунка, 2 таблицы, 26 формул. Список используемых источников содержит 36 литературных ссылок.

Цель магистерской диссертации – развить методику оценки параметрической надежности дорожной насыпи в районе распространения многолетнемерзлых грунтов, запроектированной по второму принципу, с помощью внедрения метода статистических испытаний (метода Монте-Карло).

В ходе выполнения работы было проведено исследование надежности насыпи, проектируемой в криолитозоне по второму принципу. Для этого были рассмотрены принципы проектирования насыпей в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов, основные положения методики проектирования по второму принципу, выполнен литературный обзор. Описаны критерии надежности и критерии отказа насыпи, сделано обоснование выбора относительной влажности грунта в качестве входного параметра системы и выполнены статистические испытания (расчеты по методу Монте-Карло).

В итоге было вычислено значение вероятности безотказной работы, которое составило 0,6443, что является ниже нормативного значения, равного 0,99953, хотя нормативный критерий устойчивости в детерминистической постановке задачи выполняется.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
ГЛАВА 1. Состояние вопроса и задачи исследований.....	8
1.1 Проектирование насыпей в зоне многолетней мерзлоты.....	8
1.1.1 Три принципа проектирования насыпей.....	8
1.1.2 Проектные решения дорожных насыпей на севере Сибири.....	10
1.2 Методика проектирования дорожной насыпи по второму принципу...	11
1.2.1 Консолидируемая и неконсолидируемая зона в теле насыпи.....	13
1.2.2 Суммарная осадка насыпи.....	15
1.3 Критерии устойчивости насыпи, проектируемой по второму принципу.....	16
1.4 Случайные факторы, влияющие на устойчивость насыпи.....	16
1.5 Литературный обзор.....	17
ГЛАВА 2. Применение теории надежности к задаче устойчивости насыпи, проектируемой по второму принципу.....	21
2.1 Параметрическая теория надежности.....	21
2.1.1 Критерии надежности и критерии отказа насыпи.....	22
2.1.2 Задача о нахождении параметрической надежности.....	23
2.1.3 Обоснование выбора относительной влажности грунта в качестве входного параметра системы.....	23
2.1.4 Осадок насыпи – выходной случайный параметр системы.....	24
2.2 Оценка характеристик случайного выходного параметра различными методами.....	24
2.2.1 Метод линеаризации.....	24
2.2.2 Метод Монте-Карло.....	25
2.2.3 Нормирование значений надежности.....	26
ГЛАВА 3. Оценка надежности насыпи методом Монте-Карло.....	28
3.1 Постановка задачи.....	28
3.2 Моделирование случайной величины относительной влажности.....	29

3.2.1 Обоснование принятия нормального закона распределения для относительной влажности.....	29
3.2.2 Моделирование выборки значений относительной влажности парой случайных чисел.....	30
3.2.3 Оценка необходимого числа испытаний.....	30
3.2.4 Построение гистограммы и проверка гипотезы о нормальном законе распределения по критерию «хи-квадрат»...	31
3.3 Статистическая оценка характеристик случайной величины осадки насыпи.....	32
3.3.1 Построение гистограммы и выбор закона распределения.....	32
3.4 Оценка надежности насыпи.....	34
3.4.1 Вычисление вероятности безотказной работы.....	34
Заключение.....	37
Список используемых источников.....	38
Приложение А Сертификаты участника конференций.....	43
Приложение Б Публикации.....	46
Приложение В Расчет устойчивости насыпи, запроектированной по второму принципу.....	60

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Опыт строительства и эксплуатации транспортных сооружений в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов показывает наличие нерешенных задач, связанных с обеспечением надежности, устойчивости и стабильности основания земляного полотна автомобильной дороги. Таким образом, тема исследования является актуальной и заключается в усовершенствовании методики оценки надежности, устойчивости и стабильности основания насыпи автомобильной дороги, запроектированной в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов.

Объектом исследования является дорожная насыпь. В качестве предмета исследования выступает надежность дорожной насыпи.

Цель: развить методику оценки параметрической надежности дорожной насыпи в районе распространения многолетнемерзлых грунтов, запроектированной по второму принципу, с помощью внедрения метода статистических испытаний (метода Монте-Карло).

Задачи:

- рассмотреть основные положения и методы теории надежности строительных объектов;
- проанализировать случайные факторы, влияющие на надежность насыпей, запроектированных по второму принципу, и критерии надежности;
- разработать методику применения метода статистических испытаний (метода Монте-Карло) для получения показателей надежности насыпи;
- провести численные эксперименты с помощью метода Монте-Карло и получить статистические оценки показателей надежности;
- наметить пути совершенствования методики оценки надежности насыпи, проектируемой по второму принципу.

Научная новизна исследования. Разработана методика применения метода Монте-Карло для получения показателей, характеризующих надежность насыпи. Проведены численные эксперименты и получены статистические оценки показателей надежности. Определены пути совершенствования методи-

ки оценки надежности насыпи, проектируемой по второму принципу.

Теоретическая и практическая значимость работы. Полученная методика может быть применена при проектировании новых автомобильных дорог в криолитозоне.

Положения, выносимые на защиту:

- обоснование выбора в качестве случайного фактора относительной влажности;
- моделирование случайной выборки значений относительной влажности парой случайных чисел;
- применение метода статистических испытаний для получения случайной выборки выходного параметра – осадки насыпи;
- построение законов распределения входного и выходного параметра;
- вычисление вероятности безотказной работы.

Апробация результатов исследования. Результаты исследований докладывались на научных конференциях:

- XVIII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективны Свободны – 2022» (Сибирский федеральный университет, г. Красноярск), тема доклада: «Исследование надежности насыпи, проектируемой в криолитозоне по второму принципу»;
- Всероссийская научно-практическая конференция, посвященная 40-летию создания Инженерно-строительного института, «Актуальные вопросы строительства: взгляд в будущее - 2022» (19-21 октября 2022 г.) / Сибирский федеральный университет, г. Красноярск; тема доклада: «Исследование надежности насыпей в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов»;
- «Магистратура – автотранспортной отрасли – 2022» : VII Всероссийская межвузовская конференция «Магистерские слушания» (25-26 октября 2022 г.) / Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.); тема доклада «Исследование надежности насыпи, проектируемой в криолитозоне по второму принципу»;
- Всероссийская научно-практическая конференция «Автомобильные до-

роги I дорожно-климатической зоны» (23 марта 2023 г.) / Северо-Восточный федеральный университет, г. Якутск; тема доклада: «Исследование надежности дорожной насыпи, проектируемой в первой дорожно-климатической зоне, методом Монте-Карло»;

- XIX Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспектив – 2023» (Сибирский федеральный университет, г. Красноярск), тема доклада: «Исследование надежности дорожной насыпи, проектируемой в суровых климатических условиях, методом Монте-Карло».

Сертификаты участника приведены в приложении А.

Публикации

Результаты исследований опубликованы в сборниках материалов конференций:

- Исследование надежности насыпей в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов / Т.В. Гавриленко, А.С. Михайлова // «Актуальные вопросы строительства: взгляд в будущее»: сборник научных статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 40-летию создания Инженерно-строительного института (19-21 октября 2022 г.) / Инженерно-строительный институт. – Красноярск, 2022. – С. 19–22;

- Исследование надежности насыпи, проектируемой в криолитозоне по второму принципу / Т.В. Гавриленко, А.С. Михайлова // Магистратура – автомобильной отрасли : материалы VII Всероссийской межвузовской конференции «Магистерские слушания» (25-26 октября 2022 г.) / Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – Санкт-Петербург, 2022. – С. 21–26;

- Исследование надежности дорожной насыпи, проектируемой в первой дорожно-климатической зоне, методом Монте-Карло / Т.В. Гавриленко, А.С. Михайлова // Автомобильные дороги I дорожно-климатической зоны : сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции / Северо-Восточный федеральный университет. – Якутск, 2023. – С. 5–9.

Тексты статей приведены в приложении Б.

Объем и структура диссертации

Магистерская диссертация имеет объем 58 страниц, содержит введение, 3 главы, заключение, список используемых источников, 2 приложения. В тексте содержится 4 рисунка, 2 таблицы, 26 формул. Список используемых источников содержит 36 литературных ссылок.

ГЛАВА 1 Состояние вопроса и задачи исследований

1.1 Проектирование насыпей в зоне многолетней мерзлоты

Развитие территорий Крайнего Севера в России имеет особое значение. Основной проблемой освоения данных районов является неразвитая транспортная инфраструктура. Проектирование и строительство автомобильных дорог – первостепенная задача, требующая поиска правильного решения.

При проектировании, строительстве и эксплуатации транспортных сооружений необходимо учитывать следующие важные факторы:

- особые климатические условия;
- переувлажненные территории (болота, озера);
- наличие явлений наледи, морозного пучения, подземных льдов, солифлюкции, термокарстов;
- распространенность глинистых и пылеватых грунтов, малопригодных для строительства насыпей;
- высокая стоимость рабочей силы, обоснованная слабой заселенностью территорий [1].

Кроме того, важной особенностью при сооружении земляного полотна в условиях многолетней мерзлоты является дефицит песчаных и крупнообломочных грунтов. Применение в земляном полотне глинистых грунтов ограничивается состоянием их повышенной влажности, что влечет снижение несущей способности [2].

1.1.1 Три принципа проектирования насыпей

При проектировании земляного полотна в многолетнемерзлой зоне руководствуются тремя принципами [7]. Первый принцип предусматривает обеспечение поднятия верхней границы многолетнемерзлых грунтов не ниже подошвы насыпи и его сохранение на этом уровне в течение всего периода эксплуатации сооружения. Другими словами, данный принцип предусматривает сохране-

ние основания насыпи в мёрзлом состоянии на протяжении всего периода эксплуатации автомобильной дороги.

В основном данный принцип используется на особо сложных по мерзлотно-грунтовым условиям участках с низкотемпературными глинистыми просадочными грунтами высокой влажности (выше предела текучести). Положение верхней границы многолетнемерзлых грунтов обеспечивается назначением высоты насыпи, при которой не будет допущено оттаивание основания и мерзлого ядра насыпи, или при помощи комплексного метода предотвращения оттаивания частично за счет самой насыпи, а частично за счет применения теплоизолирующих материалов, таких как торф, шлаки, пенополистирол, которые располагают в основании или теле насыпи [3]. Строительство дорог в России по этому принципу достаточно трудоемко и неэкономично в связи с отсутствием сыпуче- и сухомерзлых грунтов для возведения насыпей.

Существует множество технических решений, применяемых в проектировании земляного полотна по первому принципу. Так, например, в [4] предлагается устройство продольной траншеи шириной не менее 0,5 м и глубиной ниже деятельного слоя. Далее размещаются геосинтетические и теплоизоляционные материалы в откосных частях и непосредственно в саму траншею вертикально укладывается армирующий водонепроницаемый геосинтетический материал. Данное решение повышает устойчивость земляного полотна, уменьшая вертикальные и горизонтальные деформации покрытия.

Другое решение проблемы осадки земляного полотна описано в [5]. В земляное полотно железной дороги включается теплоизолирующий слой из материала пористой структуры, армирующее покрытие из синтетического нетканого материала, изолирующая прокладка из пыленепроницаемого материала. Последняя располагается между защитным слоем и насыпью, при этом теплоизолирующий слой помещается в армирующее покрытие и укладывается на глубину деятельного слоя. В зимний период происходит понижение температуры за счет теплообмена «атмосфера – грунтовое основание», летом – «грунтовое основание – атмосфера». Преимуществом изобретения является способ-

ность круглогодичного равномерного промораживания основания и исключение возникновения порового давления в грунтах основания.

Второй принцип проектирования земляного полотна допускает расположение верхней границы многолетнемерзлых грунтов ниже подошвы насыпи. В этом случае допускается сезонное оттаивание части основания насыпи в пределах так называемого деятельного слоя. При этом возрастают требования к дорожной одежде и накладываются ограничения на вертикальные необратимые деформации насыпи предельно допустимыми нормативными значениями. Осадка насыпи при оттаивании при промерзании не должна превышать допустимой величины согласно теплотехническим расчетам.

Проектирование автомобильных дорог по второму принципу ведется на сложных по мерзлотно-грунтовым условиям участках местности, на глинистых и песчаных малопросадочных грунтах, обладающих влажностью менее предела текучести. Высоту насыпи назначают из условия снегонезаносимости. Выемки допускаются лишь в исключительных случаях. Земляное полотно следует возводить из местных глинистых грунтов с закладкой сосредоточенных или при-трассовых резервов, при этом запрещено убирать или разрушать растительный покров в основании насыпи.

В случае использования третьего принципа проектирования основание насыпи находится в талом состоянии. Грунты предварительно оттаивают и осушают в пределах придорожной полосы, а только затем используют при возведении насыпи. Проектирование ведется на легкоосушаемых грунтах с влажностью менее предела текучести, на сухих и сырых участках местности [6, 7].

1.1.2 Проектные решения дорожных насыпей на севере Сибири

Был проанализирован проект строительства автомобильной дороги на севере Красноярского края: Дудинка – Караул – Воронцово на участке в п. Караул. Категория автомобильной дороги V. Дорожная одежда переходного типа.

Высота земляного полотна составляет до 0,5 м. Сама насыпь отсыпана из

строительного мусора и котельного шлака, встречается суглинок.

Мощность деятельного слоя составляет от 0,6 до 1 метра.

Незначительная высота насыпи и отсутствие теплоизоляционных слоев в основании приводят к нарушению водно-теплового баланса и в конечном итоге к осадке насыпи.

В качестве альтернативного примера в [8] был выполнен анализ развития и особенностей строительства насыпей железных дорог в условиях российского Заполярья. Чтобы обеспечить устойчивость, аналогично автодорожным насыпям, необходимо учитывать условия сохранения мерзлых грунтов в основании. Проектным решением стало применение послойной системы термоизоляции грунтовых слоев в обоймах из геосинтетических материалов.

1.2 Методика проектирования дорожной насыпи по второму принципу

При проектировании насыпи по второму принципу высоту насыпи устанавливают исходя из результатов теплофизических расчетов и расчетов суммарной осадки основания и нестабильных слоев насыпи.

С помощью регулирования высоты насыпи при проектировании обеспечивается ее устойчивость. В качестве исходного материала служит ореол границы оттаивания в основании и теле земляного полотна.

Чтобы оценить ореол оттаивания, необходимо аналитическим способом определить глубину оттаивания в характерных сечениях насыпи, а именно по оси, по бровке, в середине откоса и подошве. Далее определяется расстояние от подошвы до ореола оттаивания и строятся графики глубины оттаивания в поперечном сечении насыпи.

Если конструкция имеет n слоёв, которые отличаются по своим характеристикам, то глубину сезонного оттаивания определяют с помощью метода эквивалентных слоев по формуле:

$$H_K = H_{cn} + h_1 \left(1 - \frac{H_{cn}}{H_{c1}}\right) + h_2 \left(1 - \frac{H_{cn}}{H_{c2}}\right) + \dots + h_n \left(1 - \frac{H_{cn}}{H_{c \cdot (n-1)}}\right), \quad (1)$$

где H_K – глубина оттаивания слоистого полупространства, м;

H_{cn} – глубина сезонного оттаивания деятельного слоя, м;

H_{c1} – глубина сезонного оттаивания покрытия дорожной одежды, м;

H_{c2} – глубина сезонного оттаивания основания дорожной одежды, м;

$h_{1,2,\dots,n}$ – толщина конструктивного слоя, м;

$H_c(n - 1)$ – глубина сезонного оттаивания нижнего слоя грунта земляного полотна, м.

Для определения глубины оттаивания в характерных сечениях используют следующую формулу:

$$H_{от} = \psi\beta H_K, \quad (2)$$

где H_K – глубина оттаивания слоистого полупространства, м;

ψ – коэффициент, зависящий от экспозиции откоса;

β – коэффициент, учитывающий геометрию земляного полотна.

После выполнения расчетов для каждого сечения переходят к построению графиков глубины оттаивания. Расстояние от подошвы насыпи до ореола оттаивания определяют по формуле:

$$h_{от} = H_{от} - H, \quad (3)$$

где $H_{от}$ – определяется по формуле (2);

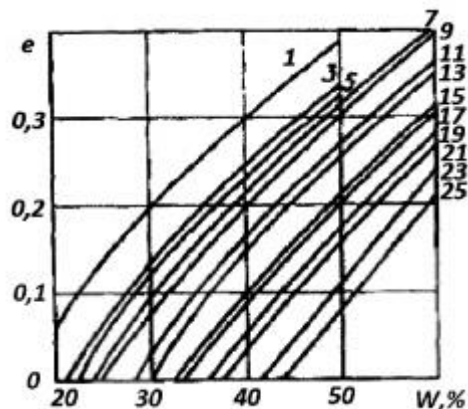
H – высота насыпи, м.

В конечном итоге величина осадки основания насыпи определится по формуле:

$$S_{осн} = e h_{от}, \quad (4)$$

где e – относительная осадка грунта основания после оттаивания под нагрузкой.

Относительная осадка грунта основания после оттаивания под нагрузкой определяется по графикам [7, рис. 15 и 16]. Относительная осадка e глинистых грунтов приведена на рисунке 1.



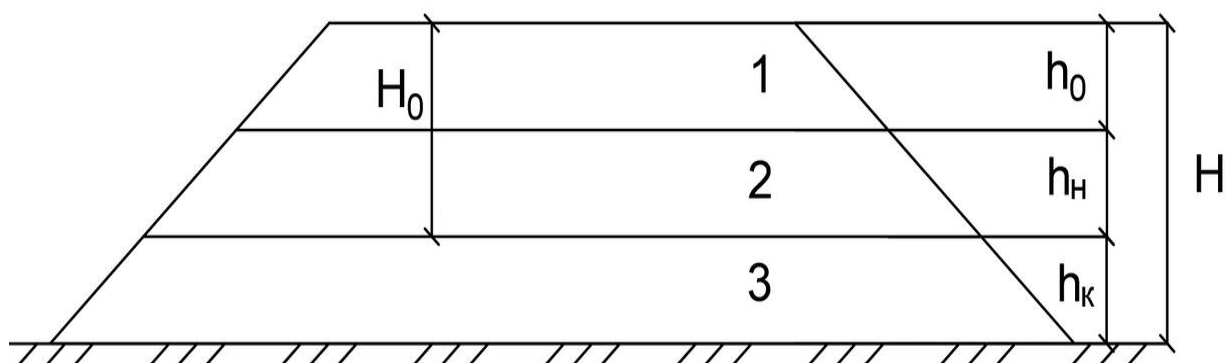
Цифры у кривых – число пластичности глинистого грунта

Рисунок 1 – Относительная осадка e глинистых грунтов при оттаивании под нагрузкой $0,075$ МПа

1.2.1 Консолидируемая и неконсолидируемая зона в теле насыпи

В зонах распространения многолетнемерзлых грунтов конструкция насыпи включает в себя две части: верхнюю и нижнюю.

На рисунке 2 представлен поперечный профиль насыпи с разметкой на отдельные зоны верхней и нижней части.



1 – верхняя часть насыпи; 2 – неконсолидируемая зона; 3 – консолидируемая зона

Рисунок 2 – Поперечный профиль насыпи из грунта с повышенной степенью влажности с выделением неконсолидируемой и консолидируемой зон

Верхняя часть состоит из слоя дорожной одежды и слоя грунта, который обеспечивает прочность и стабильность конструкции дорожной одежды. Его устраивают из непучинистых и слабопучинистых грунтов допустимой влажности с уплотнением до требуемой плотности. Непучинистыми называют грунты, относительная степень деформации морозного пучения которых менее 0,01. Слабопучинистые грунты имеют относительную степень деформации морозного пучения в пределах от 0,01 до 0,035. Допустимая влажность – это влажность, позволяющая уплотнить грунт до требуемого коэффициента уплотнения. Толщина верхнего слоя обозначена h_0 .

Нижняя часть может включать в себя две зоны: неконсолидируемую (пассивную) и консолидируемую (активную). В неконсолидируемой зоне отсутствует процесс уплотнения связных грунтов во времени под действием их собственной массы. Связными грунтами называют дисперсный грунт с физическими и физико-химическими структурными связями. Толщина неконсолидируемой зоны обозначена величиной h_n , толщина консолидируемой – h_k .

Определяется h_n по формуле:

$$h_n = \frac{P_0}{\gamma_w}, \quad (5)$$

где γ_w – средний объемный вес грунта, Н/м³;

P_0 – величина предельной пороговой нагрузки на грунт, с которой начинается процесс их консолидации, Па.

Величиной H_0 обозначена суммарная мощность верхнего слоя и неконсолидируемой зоны:

$$H_0 = (h_0 + h_n), \quad (6)$$

где h_0 – толщина верхнего слоя, м;

h_n – толщина неконсолидируемой зоны, м.

Если высота насыпи $H \leq H_0$, то такая насыпь существенно не будет уплотняться под действием собственной массы. Тогда значения предельной высоты H_0 определяются по специальной таблице.

Если присутствует консолидируемая зона, то есть $H \geq H_0$, нижняя часть насыпи будет испытывать осадку, происходящую за счет уплотнения во времени грунтов повышенной влажности в зоне консолидации h_k . Толщина зоны консолидации определяется по формуле:

$$h_k = H - H_0, \quad (7)$$

где H – высота насыпи, м;

H_0 – суммарная мощность верхнего слоя и неконсолидируемой зоны, м.

1.2.2 Суммарная осадка насыпи

Суммарная осадка насыпи и основания определяется по формуле:

$$S = S_{\text{осн}} + S_{\text{н}} + S_{\text{к}}, \quad (8)$$

где $S_{\text{осн}}$ – осадка основания насыпи, см, определяется по формуле (4);

$S_{\text{н}}$ – осадка нестабильных слоев из переувлажненного глиниста грунта неконсолидируемой зоны, см;

$S_{\text{к}}$ – осадка глинистого грунта консолидируемой зоны нестабильного слоя насыпи, см.

При наличии нестабильных слоев из переувлажненного глинистого грунта в неконсолидируемой зоне насыпи осадка определяется по формуле:

$$S_{\text{н}} = h_{\text{н}} \left(1 - \frac{K_{\text{у}}^{\text{мерз}}}{K_{\text{у}}^{\text{тал}}} \right), \quad (9)$$

где $h_{\text{н}}$ – толщина слоя мерзлого грунта насыпи, см;

$K_{\text{у}}^{\text{мерз}}$ – минимальный прогнозируемый коэффициент уплотнения мерзлого грунта;

$K_{\text{у}}^{\text{тал}}$ – минимальный требуемый коэффициент уплотнения после оттаивания мерзлого грунта.

Определение величины осадки $S_{\text{к}}$ уплотнения активного слоя грунта $h_{\text{к}}$ определяют по результатам компрессионных испытаний с учетом значения модуля осадки и толщины консолидируемого слоя.

Если проводится оценка устойчивости невысокой насыпи, в которой нет консолидируемой и неконсолидируемой части, то осадка насыпи будет определяться по формуле:

$$S = S_{\text{осн}}. \quad (9)$$

1.3 Критерии устойчивости насыпи, проектируемой по второму принципу

Согласно [7], общую устойчивость насыпи, запроектированной по второму принципу, можно оценить с помощью трех критериев устойчивости.

Первый критерий ограничивает разность величин осадки основания насыпи по двум створам. Он формулируется условием

$$|\Delta S_{\text{осн}}| \leq h_{\text{доп}}, \quad (10)$$

где $\Delta S_{\text{осн}}$ – разность осадок основания насыпи в сечениях, проведенных по бровке и в середине откоса, м;

$h_{\text{доп}}$ – допустимое значение разности осадок насыпи, м.

Второй критерий устойчивости позволяет оценить суммарную конечную осадку сооружения. Он описывается неравенством

$$S \leq S_{\text{доп}}, \quad (11)$$

где S – суммарная осадка нестабильных слоев и основания насыпи, м, определяемая по формуле (8) или (9);

$S_{\text{доп}}$ – допустимая величина осадки, м.

Третий критерий оценивает форму ореола оттаивания земляного полотна. Критерий устойчивости выполняется, если форма ореола оттаивания земляного полотна (граница между мерзлотой и талой зонами) выпуклая вверх и имеет пологое очертание.

1.4 Случайные факторы, влияющие на устойчивость насыпи

К случайным факторам относятся:

- относительная влажность грунта;
- величина нагрузки;
- конструкция дорожной одежды;
- тип грунта основания насыпи;
- мощность деятельного слоя;
- температурный режим;
- льдистость многолетнемерзлых грунтов.

Действие отрицательных температур и сезонные изменения погоды вызывают колебания влажности грунтов. Поверхность грунта при его промерзании неравномерно приподнимается на несколько сантиметров. Это является результатом подтягивания в промерзшую зону грунта влаги. При оттаивании грунт оказывается чрезмерно размягченным, и его сопротивление нагрузкам достаточно снижается. Таким образом, появляется опасность появления деформаций земляного полотна и дорожной одежды.

1.5 Литературный обзор

Арктическая и субарктическая зоны имеют по-настоящему экстремальные климатические условия. Температура воздуха в течение всего года остается низкой. Метели, порывы ветра, динамичные погодные изменения являются неотъемлемыми характеристиками таких зон. Строительство автомобильных дорог ведется, практически, на ледяном панцире. Грунты в условиях многолетней мерзлоты ведут себя абсолютно непредсказуемо. Образующееся при движении транспорта тепло нагревает земляное полотно, в результате чего теряется монолитность системы, и она претерпевает деформации в процессе таяния.

Бедрин Е.А. в своей статье [9] как раз описывает существующие проблемы строительства автомобильных дорог в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов, связанные с глобальным потеплением, возникновением термокарстов и использованием некачественных грунтов. Также автор выдвигает свои идеи для решения существующих проблем проектирования автомобиль-

ных дорог в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов.

В статье [6] Шуваева А.Н., Панова М.В. и Картавого С.В. подробно описаны три существующих принципа проектирования грунтовых насыпей на многолетней мерзлоте, изображены и описаны схемы замораживания-оттаивания насыпи и деятельного слоя. Кроме того, авторы описывают влияние геометрических размеров насыпи на водно-тепловой режим.

Автор статьи [10] Халиулина Л.Э. приводит подробную методику расчета устойчивости насыпи при проектировании по первому принципу, при котором осадка основания насыпи в процессе эксплуатации автомобильной дороги не допускается. В результате расчета получают высоту насыпи, которая позволит поднять верхний горизонт многолетнемерзлых грунтов не ниже подошвы насыпи с сохранением его на данном уровне в течение всего периода эксплуатации автомобильной дороги.

Методика расчета устойчивости насыпи по второму принципу проектирования приведена в статье Жуланова Н.А. [11]. Автором подробно расписана последовательность и приведен пример расчета. По окончании расчета было выполнено построение графика границы оттаивания, которая должна иметь выпуклую форму и пологое очертание.

Смоляницкий Л.А. в своей статье [12] рассмотрел известные методы расчета устойчивости земляного полотна, а также испытания моделей земляного полотна под динамической нагрузкой. Был предложен новый метод точечной оценки устойчивости насыпи.

При создании конструкций транспортных сооружений одной из главных задач является обеспечение высокого качества. Важнейшим свойством, которое характеризует качество транспортных сооружений, является надежность. Сложность строительства в районах распространения многолетнемерзлых грунтов обусловлена наличием таких грунтов в основаниях сооружений, большим количеством естественных природных преград, экстремальным климатом и отсутствием инфраструктуры. Имеющийся опыт строительства и эксплуатации транспортных сооружений в криолитозоне показывает наличие нерешен-

ных задач, связанных с обеспечением надежности, устойчивости и стабильности основания.

Теория надежности и методы ее расчета обоснованы в статье Краснощекова Ю.В. и Заполева М.Ю. [13]. Помимо теоретических аспектов приведен пример расчета.

В статье Валиева Ш.Н. и Васильева А.И. рассмотрена оценка параметрической надежности эксплуатируемых мостовых сооружений [14]. Определены дестабилизирующие факторы, влияющие на конструкцию мостовых сооружений в процессе эксплуатации, к которым относят температуру и влажность воздуха, атмосферные осадки и другие природные факторы, а также временные нагрузки. Так самым рациональным методом определения надежности рекомендован метод параметрической теории надежности, который позволяет определить оптимальные условия эксплуатации.

Данный вопрос также был рассмотрен применительно к насыпи, проектируемой в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов Гавриленко Т.В. и Ивановой О.А. в статьях [15, 16]. Авторы в [15] обосновали необходимость применения вероятностного подхода к оценке устойчивости насыпи в криолитозоне, сформулировали критерии отказа земляного полотна, проектируемого по второму принципу, и предложили пути вычисления количественной оценки надежности как вероятности безотказной работы сооружения. В статье [16] была предложена методика оценки вероятности безотказной работы насыпи в рамках теории параметрической надежности. В качестве критерия отказа насыпи, запроектированной по второму принципу, рассматривалось условие допустимой величины осадки насыпи. При этом случайной величиной (входным параметром задачи) считалась относительная влажность, а выходным параметром задачи являлась величина осадки земляного полотна. Вероятностные характеристики осадки земляного полотна определялись методом статистической линеаризации.

Помимо метода статистической линеаризации для определения вероятностных характеристик выходного параметра используется еще один метод –

Монте-Карло. Раменская А.В. и Пивоварова К.В. в методических указаниях [17] демонстрируют теорию метода Монте-Карло, его реализацию в современных программах. Монте-Карло – это численный метод решения различных задач при помощи моделирования случайных событий. В его основе – получение большого числа реализаций случайных величин, которые формируются так, чтобы их вероятностные характеристики совпадали с аналогичными величинами решаемой задачи.

Данный метод находит применение в самых различных научных сферах. К примеру, Гавриленко Т.В. и Шрайнер М.И. в статье [18] используют метод Монте-Карло в целях исследования загрязнения стоков с проезжей части городской улицы нефтепродуктами.

Второй пример использования – в статье Перепухова В.А. [19]. В ней приводится решение методом Монте-Карло модельного кинетического уравнения для задачи о теплопередаче между двумя параллельными пластинками.

В качестве третьего примера применения метода Монте-Карло может быть рассмотрена статья Степанова С.А. [20], в которой определяется надежность балки.

Таким образом, можно сделать вывод, что применение метода Монте-Карло обширно и приносит достоверные результаты как в области строительства, так и в области физики.

ГЛАВА 2 Применение теории надежности к задаче устойчивости насыпи, проектируемой по второму принципу

2.1 Параметрическая теория надежности

Под теорией надежности понимается наука, которая изучает закономерности отказов технических систем. Основные понятия, показатели и характеристики надежности носят универсальный характер и могут быть применены к объектам различной области, например, к оценке прочности и ресурса конструкций зданий или сооружений и их элементов.

Параметрическая теория надежности трактует отказ объекта как выход параметров, которые характеризуют работоспособность объекта, за некоторые установленные пределы.

Данная теория основывается на объединении методологии предельных состояний с методами теории вероятностей. Условие непревышения предельного состояния любого строительного объекта в общем виде записывается неравенством:

$$\Psi(\gamma_f, \gamma_m, \gamma_n, \gamma_c, F_n, R_n) \geq 0, \quad (12)$$

где функция Ψ зависит от параметров:

γ_f – нормативного коэффициента надежности по нагрузке;

γ_m – нормативного коэффициента надежности по материалу;

γ_n – коэффициента ответственности сооружения;

γ_c – коэффициента условий работы;

F_n – нормативного значения обобщенного силового воздействия;

R_n – нормативного значения сопротивления материала.

В соответствии с условием (12) в параметрической теории надежности формулируются критерии надежности и критерии отказа исследуемого сооружения и вычисляется вероятность безотказной работы и вероятность наступления отказа.

В случае применения параметрической теории надежности к оценке устойчивости насыпи, проектируемой по второму принципу, в основу положена

методика, изложенная в [7].

2.1.1 Критерии надежности и критерии отказа насыпи

Критерии отказа насыпи, запроектированной по второму принципу, могут быть выведены из критериев устойчивости, приведенных в п. 1.3.

Отказ по первому критерию определится как невыполнение критерия (10), т.е. первый критерий отказа запишется неравенством

$$|\Delta S_{\text{осн}}| > h_{\text{доп}}, \quad (13)$$

где $\Delta S_{\text{осн}}$ – разность осадок основания насыпи в сечениях, проведенных по бровке и в середине откоса, м;

$h_{\text{доп}}$ – допустимое значение разности осадок насыпи, м.

Исходя из условия (11) определится отказ по второму критерию как неравенство

$$S > S_{\text{доп}}, \quad (14)$$

где S – суммарная осадка нестабильных слоев и основания насыпи, м;

$S_{\text{доп}}$ – допустимая величина осадки, м.

Отказом для третьего критерия будет считаться выпуклая вниз форма ореола оттаивания. Критерий отказа был сформулирован в [15]. Если обозначить участок, на котором возникает ореол оттаивания, отрезком $[a; b]$, то аргумент функции $f(x)$, аппроксимирующей границу между талым и мерзлым грунтом, принадлежит этому отрезку, т.е. $a \leq x \leq b$. Такой функцией может быть парабола или кубический сплайн. Тогда условие выпуклости вниз функции имеет вид:

$$f\left(\frac{x_1 + x_2}{2}\right) \leq \frac{f(x_1) + f(x_2)}{2}, \quad (15)$$

где x_1 и x_2 любые две точки из интервала $[a; b]$. Геометрически это означает, что середина любой хорды графика функции $f(x)$ лежит либо над графиком, либо на нём [33].

Если аппроксимирующая функция дважды дифференцируема на интервале, то для того чтобы она была выпуклой вниз, необходимо и достаточно, чтобы в пределах интервала $[a; b]$ её вторая производная была неотрицательной, т. е.

$$f''(x) \geq 0. \quad (16)$$

2.1.2 Задача о нахождении параметрической надежности

Для поиска решения задачи о параметрической надежности ее необходимо представить в виде системы с входными и выходными параметрами. Параметры, непосредственно влияющие на надежность сооружения (климатические, грунтовые, гидрологические и другие определяющие характеристики), располагают на входе. Величина осадки в различных сечениях земляного полотна является параметром на выходе [22].

На основных этапах расчета необходимо:

- составить уравнения связи между входными и выходными характеристиками;
- разделить входные параметры на случайные и неслучайные;
- определить вероятностные характеристики выходных параметров (законы распределения случайных величин);
- выбрать и обосновать области допустимых состояний земляного полотна;
- определить и оценить надежность сооружения.

2.1.3 Обоснование выбора относительной влажности грунта в качестве входного параметра системы

Земляное полотно, проектируемое в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов, подвержено деформациям, вызванным оттаиванием грунтов оснований и их переувлажнением [23].

Согласно пункту 1.4, на величину осадки насыпи влияет множество случайных факторов. Однако их совместное рассмотрение делает решение задачи очень сложным, поэтому в рамках данной научной работы в качестве входного случайного фактора взят только один фактор – относительная влажность грунта. Она выбрана потому, что в вероятностной постановке задачи должен использоваться параметр, вариативность которого можно достоверно оценить экспериментальным путем. Также в методике [7] от данного параметра можно получить математические зависимости величины выходного параметра системы (осадки насыпи), т.е. обобщенное уравнение связи, на котором базируется возможность применения параметрической теории надежности.

2.1.4 Осадка насыпи – выходной случайный параметр системы

Осадкой насыпи называется свойство земляного полотна автомобильной дороги уменьшаться в объеме под действием случайных факторов. При решении задачи о поиске надежности насыпи именно осадка насыпи является итоговым значением, величина которого и определяет надежность и работоспособность сооружения.

2.2 Оценка характеристик случайного выходного параметра различными методами

2.2.1 Метод линеаризации

Статистическое исследование нелинейных систем – сложная задача. Методы линеаризации возникли для определения точности нелинейных систем.

Одним из простейших видов линеаризации является разложение всех нелинейных функций в составе уравнения связи в ряд Тейлора и отбрасывание всех членов ряда выше первой степени, а каждая нелинейная функция при этом заменяется приближенной линейной:

$$\varphi(x) \approx \varphi(m_x) + \varphi'(m_x)(x - m_x), \quad (17)$$

где m_x – математическое ожидание случайной функции x .

При этом, с помощью эквивалентных линейных коэффициентов, нелинейная функция аппроксимируется [24].

Методика расчета осадки насыпи методом статистической линеаризации подробно изложена в [16].

2.2.2 Метод Монте-Карло

Методом Монте-Карло называют численный метод решения различного рода задач с помощью моделирования случайных событий. Этот метод позволяет решать задачи с элементами неопределенности [25]. Он основан на получении множества случайных величин, при этом вероятностные характеристики полученных величин должны совпадать с аналогичными величинами решаемой задачи.

Используется данный метод при моделировании сложных операций, где взаимодействует одновременно несколько случайных факторов.

Основные этапы метода Монте-Карло:

- установить взаимосвязь входного и выходного параметра системы (в нашем случае относительной влажности и осадки насыпи соответственно) в виде формирования математической модели;
- смоделировать выборку значений входного параметра с помощью генератора случайных чисел;
- провести расчет математической модели осадки насыпи на основе полученной выборки значений относительной влажности;
- задать закон распределения случайной величины;
- провести расчет основных характеристик входного и выходного параметра и проверить гипотезы о характере распределения;
- сделать анализ полученных результатов [17].

2.2.3 Нормирование значений надежности

Нормирование значений надежности – это процесс ее выражения в процентной форме. Нормирование необходимо для сравнения надежности различных транспортных сооружений.

Нормирование допустимого (нормативного) уровня надежности играет важную роль в задачах о поиске надежности элементов автомобильной дороги. В [31; табл. 2] предложены значения допустимой вероятности безотказной работы следующих транспортных сооружений:

- автодорожных мостов;
- городских мостов;
- конструкций тоннелей;
- противообвальных защитных сооружений.

Отказ данных сооружений приводит к полной остановке движения транспортных средств на участке дороги, где непосредственно они установлены.

Уровень надежности автомобильных дорог напрямую связан с надежностью отдельного их элемента, а именно дорожных одежд. Надежность автомобильной дороги формулируется как «способность обеспечить безопасное движение со средней скоростью (близкой к оптимальной) в течение нормативного или заданного срока службы». Оценка вероятности безотказной работы дорожных одежд капитального типа в течение межремонтного периода эксплуатации автомобильной дороги была рассчитана в [32] и составляет 0,95.

В [16] говорится о том, что уровень надежности автомобильной дороги должен быть выше в связи с тем, что он зависит не только от надежности дорожных одежд, но и от надежности земляного полотна. Отказ земляного полотна обусловлен его деформациями, что часто приводит к необходимости полного прекращения движения автомобильного транспорта на аварийно-опасном участке. Таким образом, нормативный уровень надежности земляного полотна должен быть поставлен в один ряд с уровнем надежности транспортных сооружений, а именно – противообвальных сооружений. Они воспринимаются как

элемент защиты земляного полотна, при этом их значения зависят от класса надежности, а класс – от категории дороги [31, табл.1]:

- I и II категории соответствуют 1 классу;
- III и IV категории соответствуют 2 классу.

Для 1 класса надежности вероятность безотказной работы составляет 0,999953, для 2 класса – 0,99953, для 3 класса – 0,9953. Между собой 2 и 3 классы отличаются типом дорожных одежд.

ГЛАВА 3 Оценка надежности насыпи методом Монте-Карло

3.1 Постановка задачи

Оценку надежности насыпи методом Монте-Карло проведем для условий примера, приведённого в [16], для того, чтобы сравнить результаты расчётов надежности, выполненные разными методами (методом линеаризации и методом Монте-Карло).

Дана автомобильная дорога III категории, нормативный уровень надежности которой принят равным 0,99953. Дорога расположена в дорожно-климатической зоне I₁. Ориентация автомобильной дороги по оси: юг – север.

Дорожные одежды – облегченные. Верхний слой покрытия – асфальтобетон мелкозернистый толщиной 8 см; нижний слой покрытия – черный щебень – 12 см; верхний слой основания – щебень фракционированный 40-80 мм с заклинойкой мелким щебнем – 15 см; нижний слой основания – щебеночно-песчаная смесь – 25 см; дополнительный слой основания – песок среднезернистый – 0,35 м.

В насыпи отсутствуют неконсолидируемая и консолидируемая зоны. Рабочая отметка (как разность отметок оси дороги и рельефа по оси дороги) составляет 1,5 м. Земляное полотно выполнено из суглинка легкого пылеватого с крутизной откосов 1:4. Откосы и подошва насыпи укреплены торфо-песчаной смесью. Толщина укрепления на откосе и у подошвы составляет соответственно 0,25 м и 0,3 м.

Грунт деятельного слоя в основании насыпи – также суглинок легкий пылеватый с числом пластичности $I_p = 17$ %. Расчётное значение относительной влажности грунта $W_p = 40$ %.

3.2 Моделирование случайной величины относительной влажности

3.2.1 Обоснование принятия нормального закона распределения для относительной влажности

При использовании метода Монте-Карло необходимо построить конечную выборку значений входного параметра системы, которым в нашем случае является относительная влажность W . Сначала нужно задать закон распределения, которому подчиняется случайная величина относительной влажности. В его качестве принимаем нормальный закон распределения (закон Гаусса). Он имеет следующие преимущества:

- описывается двумя параметрами (математическим ожиданием и дисперсией), для которых достаточно просто получить статистические оценки;
- ему подчиняются случайные величины, отклонение которых от средних значений вызывается совокупностью случайных факторов (при этом каждый из них по отдельности является незначительным) [22];
- опыт расчета надежности гидротехнических сооружений показывает, что показатели свойств природных и искусственных грунтов могут быть распределены по нормальному закону [26].

В рамках применяемой параметрической теории надежности мы должны задать область определения для входного параметра. Согласно рисунку 1 при числе пластичности $I_p = 17\%$ относительная влажность определена на интервале от 32 % до 60 %. Чтобы выполнить оценку математического ожидания и стандарта отклонения случайной величины относительной влажности, воспользуемся правилом «3 сигма» [28]. Согласно ему с вероятностью 0,9973 значения случайной величины попадают в указанный интервал. Тогда в качестве оценки математического ожидания случайной величины W принимаем середину интервала: $M(W) = 46\%$. Стандарт отклонения, как следует из правила, составит 1/6 от длины интервала: $\sigma_w = 6\%$.

3.2.2 Моделирование выборки значений относительной влажности парой случайных чисел

На следующем этапе с помощью датчика случайных чисел необходимо построить последовательность значений случайной величины относительной влажности по специальному правилу. Последовательность строится с помощью пары независимых стандартных нормальных (то есть гауссовских с нулевым средним и единичной дисперсией) случайных величин ξ и η , которые определяются по формулам:

$$\xi = \sqrt{-2 \ln \alpha} \cdot \cos(2\pi\beta), \quad (18)$$

$$\eta = \sqrt{-2 \ln \alpha} \cdot \sin(2\pi\beta), \quad (19)$$

где α и β – случайные равномерно распределенные величины из интервала от 0 до 1, генерируемые датчиком псевдослучайных чисел в программе Excel [36].

В ходе расчетов была получена выборка из 100 значений относительной влажности.

3.2.3 Оценка необходимого числа испытаний

Необходимое минимальное количество испытаний для получения репрезентативной выборки определяется по формуле:

$$n_n = t^2 \frac{\sigma_w^2}{(p_s M(W))^2}, \quad (20)$$

где p_s – предельная относительная ошибка;

t – параметр распределения Стьюдента, задаваемый по специальной таблице из [28].

При предельной относительной ошибке 0,05; $t = 1,99$ (для уровня значимости 0,05 и 100 проведенных численных экспериментов) минимально необходимое количество статистических испытаний составило 27.

3.2.4 Построение гистограммы и проверка гипотезы о нормальном законе распределения по критерию «хи-квадрат»

На рисунке 3 представлена гистограмма, построенная по выборке значений случайной величины относительной влажности, и функция плотности нормального распределения.

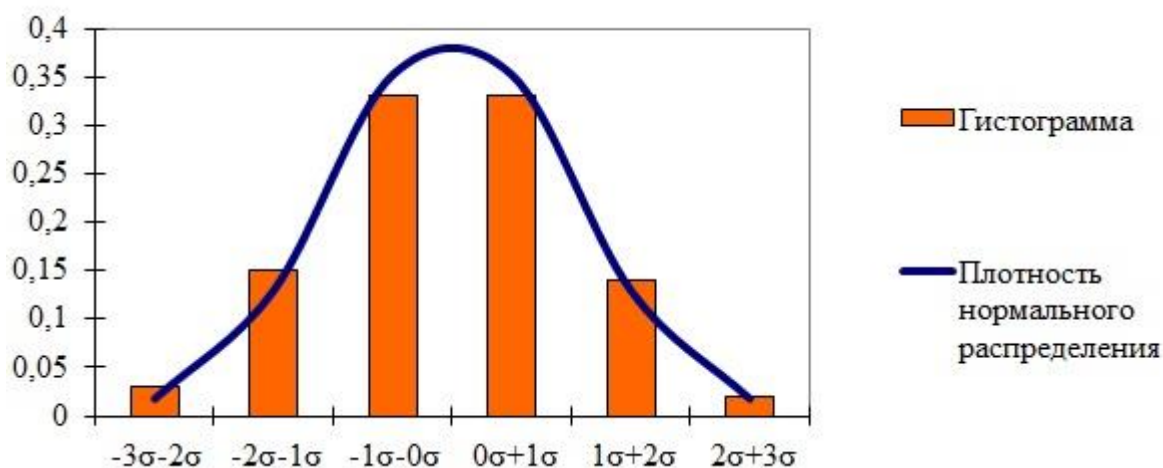


Рисунок 3 – Гистограмма, построенная по выборке значений случайной величины относительной влажности

Из рисунка видно, что гистограмма хорошо согласуется с теоретическим нормальным законом распределения, следовательно, случайная величина относительной влажности подчиняется нормальному закону.

Для проверки гипотезы о нормальном распределении воспользуемся критерием «хи-квадрат», определяемым по формуле:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(f_i - f_{Ti})^2}{f_{Ti}}, \quad (21)$$

где f_i – наблюдаемая частота признака в i -м интервале;

f_{Ti} – теоретическая частота в i -м интервале.

Расчеты параметра χ^2 приведены в таблице 1. В ней наблюдаемая частота признака в i -м интервале $f_i = n_i$, теоретическая частота $f_{Ti} = np_i$, число испытаний $n = 100$. Расчетное значение критерия $\chi^2 = 0,7601$.

Таблица 1 – Расчеты параметра χ^2 для выборки относительной влажности

Интервалы	Частость n_i	Вероятность попадания в интервал p_i	np_i	$(n_i - np_i)^2$	$(n_i - np_i)^2 / (np_i)$
$-\infty..-2$	3	0,0228	2,28	0,5184	0,2274
$-2..-1$	13	0,1359	13,59	0,3481	0,0256
$-1..0$	34	0,3413	34,13	0,0169	0,0005
$0..1$	32	0,3413	34,13	4,5369	0,1329
$1..2$	15	0,1359	13,59	1,9881	0,1463
$2..+\infty$	3	0,0228	2,28	0,5184	0,2274
	100		100		0,7601

Согласно таблицам [35] при принятом уровне значимости 0,05 и числе степеней свободы 3 табличное значение критерия χ^2 составляет 7,81. Так как табличное значение превосходит расчетное, то критерий «хи-квадрат» выполняется. Следовательно, гипотеза о нормальном распределении случайной величины относительной влажности, выборка значений которой была построена по формулам (18) и (19), принимается.

Далее на основе полученной выборки относительной влажности выполняется расчет осадки по методике [7].

3.3 Статистическая оценка характеристик случайной величины осадки насыпи

3.3.1 Построение гистограммы и выбор закона распределения

В результате проведения 100 вычислений была получена выборка, по значениям которой определены статистические оценки математического ожидания для 8,6 см и стандартного отклонения 3,7 см случайной величины осадки насыпи.

Для оценки закона распределения случайной величины осадки необходимо также построить гистограмму. Она приведена на рисунке 4.

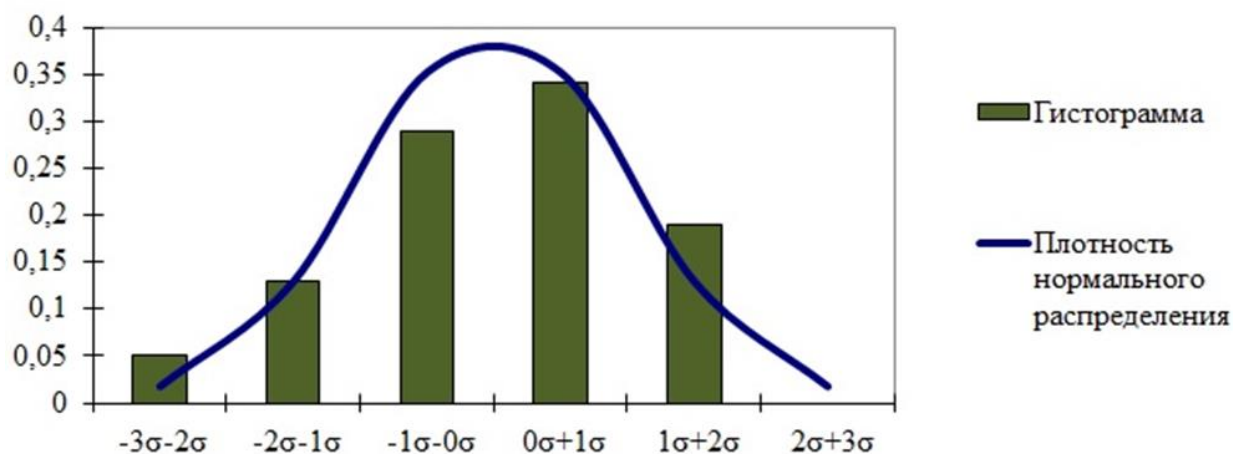


Рисунок 4 – Гистограмма, построенная по выборке значений случайной величины осадки насыпи

Из рисунка 4 видно, что принятие гипотезы о законе нормального распределения не совсем очевидно. Гистограмма асимметрична, центр симметрии смещен вправо (коэффициент асимметрии равен -0,2). Тогда требуется проверка по нескольким критериям.

Сначала воспользуемся критерием Романовского, который определяется по формуле из [29]:

$$\rho = \frac{\chi^2 - (n-3)}{\sqrt{2(n-3)}}, \quad (22)$$

где n – количество интервалов в гистограмме;

χ^2 – расчётное значение критерия «хи-квадрат», определяемое по формуле (21).

Если $\rho \leq 3$, то гипотеза о нормальном характере распределения данных принимается.

Расчеты параметра χ^2 для осадки насыпи приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Расчеты параметра χ^2 для осадки насыпи

Интервалы	Частость n_i	Вероятность попадания в интервал p_i	np_i	$(n_i - np_i)^2$	$(n_i - np_i)^2 / (np_i)$
$-\infty..-2$	5	0,0228	2,28	7,3984	3,2449
$-2..-1$	13	0,1359	13,59	0,3481	0,0256
$-1..0$	29	0,3413	34,13	26,317	0,7711
$0..1$	34	0,3413	34,13	0,0169	0,0005
$1..2$	19	0,1359	13,59	29,268	2,1536
$2..+\infty$	0	0,0228	2,28	5,1984	2,2800
	100		100		8,4757

В результате расчетов по формулам (19) и (20) для $n = 6$ получились значения $\chi^2 = 8,47$ и $p = 2,24$. Значит, по критерию Романовского гипотеза о нормальном законе распределения подтверждается.

Воспользуемся также критерием «хи-квадрат». При уровне значимости 0,05 расчетное значение критерия 8,47 превышает табличное значение 7,81, следовательно, при таком уровне значимости гипотеза не подтверждается. Однако при уровне значимости 0,02 табличное значение критерия составляет 9,837, т.е. полученное расчетное значение 8,47 меньше табличного.

Таким образом, при использовании критерия «хи-квадрат» гипотеза о нормальном распределении случайной величины осадки справедлива при уровне значимости 0,02 [30].

3.4 Оценка надежности насыпи

3.4.1 Вычисление вероятности безотказной работы

Чтобы измерить надежность, необходимо задать ей показатель измерения. Так примем за меру надежности вероятность безотказной работы насыпи. Вероятность безотказной работы сооружения – это вероятность того, что оно будет функционировать в течение заданного срока эксплуатации в заданном режиме без наступления отказа [16]. В нашей постановке задачи вероятность безотказной работы – это вероятность выполнения критерия (11):

$$P = P(S \leq S_{\text{доп}}). \quad (23)$$

Величину допускаемой осадки насыпи $S_{\text{доп}}$, выведенную на основе практического инженерного опыта, также следует рассматривать как случайную, распределенную по нормальному закону. Тогда предлагаемые в нормативном документе их значения следует трактовать как математическое ожидание. Количественная оценка рассеяния допускаемых нормативных параметров требует отдельного исследования, поэтому в данной работе мы ограничимся предположением о коэффициенте вариации – 0,1 (как нижней границей для принятия гипотезы о нормальном законе распределения).

Значения вероятностей случайных величин, распределенных по нормальному закону, определяются с помощью функции Лапласа $\Phi(x)$ и тогда вероятность безотказной работы можно записать в виде:

$$P = P(S \leq S_{\text{доп}}) = 0,5 + \Phi\left(\frac{M(S_{\text{доп}}) - M(S)}{\sqrt{\sigma_{\text{доп}}^2 + \sigma_s^2}}\right), \quad (24)$$

где $\Phi(\cdot)$ – функция Лапласа, значения которой определяются по специальным таблицам [4];

$M(S)$ и σ_s – соответственно среднее и стандарт отклонения случайной величины осадки S ;

$M(S_{\text{доп}})$ и $\sigma_{\text{доп}}$ – соответственно среднее и стандарт отклонения случайной величины допускаемой величины осадки $S_{\text{доп}}$.

Вычислим вероятность безотказной работы насыпи исходных данных, изложенных в п.3.1, т.е. при относительной влажности 40 %. Тогда вероятность безотказной работы насыпи определится как условная вероятность выполнения критерия (11) при условии, что расчетная относительная влажность $W_p = 40\%$:

$$P = P(S \leq S_{\text{доп}} | W_p = 40\%) = P(S(W_p) \leq S_{\text{доп}}) . \quad (25)$$

Обозначим $S(W_p) = S_p$. Тогда формула (24) примет вид

$$P = P(S_p \leq S_{\text{доп}}) = 0,5 + \Phi\left(\frac{M(S_{\text{доп}}) - M(S_p)}{\sqrt{\sigma_{\text{доп}}^2 + \sigma_s^2}}\right) . \quad (26)$$

В результате расчетов по методике [7] при таком значении относительной влажности получаем, что величина осадки составила 4,6 см, т.е. можно принять $M(S_p) = 4,6$ см. Стандарт отклонения, найденный по выборке значений осадки насыпи, $\sigma_s = 3,7$ см.

В качестве оценки математического ожидания случайной величины $S_{\text{доп}}$ примем ее нормативное значение для земляного полотна с облегченными дорожными одеждами $M(S_{\text{доп}}) = 6$ см. Дисперсию найдем по правилу, связывающему стандарт отклонения с коэффициентом вариации [34, 35]:

$$\sigma_{\text{доп}} = M(S_{\text{доп}}) \cdot C_v = 6 \cdot 0,1 = 0,6 \text{ см.}$$

Тогда, подставляя данные значения в формулу (26) получим, что

$$P = P(S_p \leq S_{\text{доп}}) = 0,5 + \Phi\left(\frac{6 - 4,6}{\sqrt{0,6^2 + 3,7^2}}\right) = 0,6443.$$

Сравнивая его с нормативным значением вероятности безотказной работы 0,99953, получаем достаточно низкое значение меры надежности, хотя нормативный критерий устойчивости в детерминистической постановке задачи выполняется.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения магистерской диссертации было проведено исследование надежности насыпи, проектируемой в криолитозоне по второму принципу.

В первой главе были рассмотрены принципы проектирования насыпей в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов, основные положения методики проектирования по второму принципу, выполнен литературный обзор.

Во второй главе описаны критерии надежности и критерии отказа насыпи, сделано обоснование выбора относительной влажности грунта в качестве входного параметра системы.

В третьей главе выполнены статистические испытания (расчеты по методу Монте-Карло). Для чего было произведено моделирование случайной величины относительной влажности, построена гистограмма и с помощью критерия «хи-квадрат» обосновано принятие нормального закона распределения для нее. После этого были выполнены расчеты осадки насыпи для каждого члена выборки значений относительной влажности, построена гистограмма и выбран закон распределения случайной величины осадки насыпи.

По выборке значений осадки насыпи была вычислена вероятность безотказной работы. Значение меры надежности составило 0,6443, что является ниже нормативного значения, равного 0,99953, хотя нормативный критерий устойчивости в детерминистической постановке задачи выполняется.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Преснов, О.М. Особенности строительства автомобильных дорог на многолетнемерзлых грунтах / О.М. Преснов, Е.А. Киль // Инновации и инвестиции. – 2022. – №3. – С. 171–173.
2. Иванова, О.А. Исследование надежности оснований сооружений в северной климатической зоне : специальность 08.04.01 «Строительство» : магистерская диссертация / Иванова Ольга Анатольевна ; Сибирский федеральный университет. – Красноярск, 2020. – 66 с.
3. Гавриленко, Т.В. Исследование надежности насыпи, проектируемой в криолитозоне по второму принципу / Т.В. Гавриленко, А.С. Михайлова // Магистратура – автотранспортной отрасли : материалы VII Всероссийской межвузовской конференции «Магистерские слушания» (25-26 октября 2022 г.) / Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – Санкт-Петербург, 2022. – С. 21–26.
4. Патент № 2732774 Российская Федерация, МПК E01C 3/06 (2006.01), СПК E01C 3/06 (2020.02). Автомобильная дорога на многолетнемерзлых грунтах : № 2019135385 : заявл. 05.11.2019 : опубл. 22.09.2020 / Краев А.Н., Краев А.Н., Шанхоев З.Ш., Макаров А.С. – 11 с.
5. Патент № 2160336 Российская Федерация, МПК E01C 3/06 (2000.01). Земляное полотно на вечноммерзлом основании : № 99104110 : заявл. 01.03.1999 : опубл. 10.12.2000 / Жданова С.М. ; заявитель : ДГУПС. – 8 с.
6. Шуваев, А.Н. Анализ принципов проектирования земляного полотна автомобильных дорог в районах распространения вечноммерзлых грунтов в Западной Сибири / А.Н. Шуваев, М.В. Панова, С.В. Картавый // Нефть и газ. – 2020. – №1. – С. 114–121.
7. ОДМ 218.2.094-2018. Методические рекомендации по проектированию земляного полотна автомобильных дорог общего пользования из местных талых и мерзлых переувлажненных глинистых и торфяных грунтов в зонах распространения многолетнемерзлых грунтов / Федеральное дорожное агентство (Росавтодор). – М., 2018. – 49 с.

8. Вильгельм, А.С. Транспортное развитие северных территорий России / А.С. Вильгельм, А.И. Шкулов // Известия Транссиба. – 2021. – №3. – С. 115–129.
9. Бедрин, Е.А. Определение направлений по обеспечению устойчивости земляного полотна дорог в зоне вечной мерзлоты / Е.А. Бедрин // Вестник СибаДИ. – 2011. – №2. – С. 15–21.
10. Халиулина, Л.Э. О многолетнемерзлых грунтах / Л.Э. Халиулина // Научные исследования. – 2018. – №3. – С. 10–12.
11. Жуланов, Н.А. Расчет устойчивости насыпи, запроектированной на вечноммерзлых грунтах / Н.А. Жуланов // Химия. Экология. Урбанистика. – 2019. – Т.2. – С. 79–83.
12. Смоляницкий, Л.А. Оценка устойчивости земляных сооружений / Л.А. Смоляницкий // ВЕСТНИК ВГУ, СЕРИЯ: ГЕОЛОГИЯ. – 2006. – №2. – С. 225–239.
13. Краснощеков, Ю.В. Вероятностное проектирование конструкций по заданному уровню надежности / Ю.В. Краснощеков, М.Ю. Заполева // Вестник СибаДИ. – 2015. – №1. – С. 68–73.
14. Валиев, Ш.Н. Оценка параметрической надежности мостовых сооружений / Ш.Н. Валиев, А.И. Васильев // Транспортное строительство. – 2/2022. – С. 4-7.
15. Гавриленко, Т.В. Применение вероятностного подхода к оценке надежности основания насыпи в северной климатической зоне / Т.В. Гавриленко, О.А. Иванова // Национальная ассоциация ученых (НАУ): научно-технический журнал. – 2020. – №54. – С. 15–17.
16. Гавриленко, Т.В. Оценка параметрической надежности насыпи, проектируемой в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов по второму принципу / Т.В. Гавриленко, О.А. Иванова // Дороги и мосты. – 2020. – №2. – С. 74–90.

17. Раменская, А. В. Метод Монте-Карло и инструментальные средства его реализации / К.В. Пивоварова; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2018 – 58 с.

18. Шрайнер, М.И. Исследование загрязнения стоков с проезжей части городской улицы нефтепродуктами методом Монте-Карло // Проблемы социального и научно-технического развития в современном мире: материалы XIII Всероссийской научн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (19-20 апреля 2011г.) / Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2011. – С.40–42.

19. Перепухов, В.А. Решение методом Монте-Карло модельного кинетического уравнения / В.А. Перепухов // Ученые записки. – 1972. – №4. – С. 114–117.

20. Степанов, С.А. Использование метода Монте-Карло при определении надежности балки / С.А. Степанов // MODERN SCIENCE. – 2020. – №10-2. – с. 536–540.

21. Гавриленко, Т.В. Исследование надежности насыпей в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов / Т.В. Гавриленко, А.С. Михайлова // «Актуальные вопросы строительства: взгляд в будущее»: сборник научных статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 40-летию создания Инженерно-строительного института (19-21 октября 2022 г.) / Инженерно-строительный институт. – Красноярск, 2022. – С. 19–22.

22. Стефанишин, Д.В. Проблемы надежности гидротехнических сооружений / Д.В. Стефанишин, С.Г. Шульман. – СПб: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1991. – 52 с.

23. Скрыльников, И.Г. Проектирование и эксплуатация земляного полотна автомобильных дорог в районах распространения многолетнемерзлых грунтов (с использованием теории риска) : специальность 05.23.11 : автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук / Скрыльников Илья Геннадьевич ; Пермский государственный технический университет. – г. Пермь, 2012. – 23 с.

24. Райзер, В.Д. Методы теории надежности в задачах нормирования расчетных параметров строительных конструкций / В.Д. Райзер. – М.: Стройиздат, 1986. – 192 с.
25. Паньгина, Н.Н. Статистическое моделирование: Метод Монте-Карло. / Н.Н. Паньгина // Компьютерные инструменты в образовании. – 2002. – №5. – с. 30.
26. Векслер, А.Б. Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений / А.Б. Векслер, Д.А. Ивашинов, Д.В. Стефанишин. – СПб.: Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2002. – 592 с.
27. Половко, А.М. Основы теории надежности / А.М. Половко, С.В. Гуров. – СПб.: БХВ-Петербург, 2008. – 704 с.
28. Горелова, Г.В., Кацко, И.А. Теория вероятностей и математическая статистика в примерах и задачах с применением Excel: учеб. пособие для вузов. – Ростов н/Д: Феникс, 2005. – 480 с.
29. Романовский, В.И. Применения математической статистики в опытном деле / В.И. Романовский. – Гостехиздат, М.-Л., 1947. – 248 с.
30. Гавриленко, Т.В. Исследование надежности дорожной насыпи, проектируемой в первой дорожно-климатической зоне, методом Монте-Карло / Т.В. Гавриленко, А.С. Михайлова // Автомобильные дороги I дорожно-климатической зоны : сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции / Северо-Восточный федеральный университет. – Якутск, 2023. – С. 5–9.
31. Рекомендации по оценке и обеспечению надежности транспортных сооружений. Актуализ. редакция от 01.10.2008 / ЦНИИС Минтрансстроя СССР. – М., 2008. – 73 с.
32. Золотарь, И.А. Экономико-математические методы в дорожном строительстве / И.А. Золотарь. – М.: Транспорт, 1974. – 248 с.
33. Математическая Энциклопедия /под ред. И.М. Виноградова. – М.: Советская Энциклопедия, 1977. Т.1. – 1152 с.

34. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Наука, 1991. – 384 с.

35. Горелова, Г.В. Теория вероятностей и математическая статистика в примерах и задачах с применением Excel / Г.В. Горелова, И.А. Кацко: учеб. пособие для вузов. – Ростов н/Д: Феникс, 2005. – 480 с.

36. Гавриленко, Т.В. Оценка экологической безопасности атмосферного воздуха на основе решения уравнений Колмогорова / Т.В. Гавриленко, О.В. Адмаев // Вестник КемГУ. – 2012. – № 4(52). – Т. 2. – С. 37-42.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Сертификаты участника конференций



СЕРТИФИКАТ

очного участия

Михайлова Александра Сергеевна
Секция «Городские инженерные сооружения,
автомобильные дороги, основания и
фундаменты»

принял(-а) участие в XVIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Проспект свободный – 2022», посвященной Международному году фундаментальных наук в интересах устойчивого развития

Ответственный секретарь

В.Ю. Серёгина / 



СЕРТИФИКАТ участника

настоящим подтверждается, что

Михайлова Александра Сергеевна

принял(а) участие в работе Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы строительства: взгляд в будущее», посвященной 40-летию создания инженерно-строительного института СФУ

Председатель организационного комитета



И.В. Тарасов

Красноярск
19–21 октября 2022 года



Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет»

Автомобильно-дорожный факультет

СЕРТИФИКАТ

Настоящий сертификат подтверждает, что

Михайлова Александра Сергеевна

приняла участие в

VII-й всероссийской межвузовской конференции

«Магистерские слушания»

25-26 октября 2022 года

с докладами на тему

*«Исследование надёжности насыпи, проектируемая
в крио-мезозоне по второму принципу»*

Декан Автомобильно-дорожного
факультета СПбГАСУ
к.т.н., доцент



А.В. Зазыкин

Санкт-Петербург 2022



ДНИ СТУДЕНЧЕСКОЙ НАУКИ - 2023

СЕРТИФИКАТ

вручается

Михайловой Александре Сергеевне
студенту ИСИ СФУ
кафедры «Автомобильные дороги
и городские сооружения»

за участие во Всероссийской научно-практической конференции
«Автомобильные дороги I дорожно-климатической зоны»

Председатель
оргкомитета

С.В. Копылов

г. Якутск, 23 марта 2023 г.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Публикации

УДК 625.731.1:624.139

ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ НАСЫПЕЙ В ЗОНЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

Т.В. Гавриленко, канд. техн. наук, доцент, А.С. Михайлова, магистрант

Сибирский федеральный университет, Красноярск

Аннотация: излагается методика оценки надежности насыпи, проектируемой в зоне многолетнемерзлых грунтов по второму принципу. В качестве критерия отказа принято условие непревышения осадкой насыпи нормативного значения. Случайными величинами приняты относительная влажность и осадка основания насыпи. Ввиду того, что осадка основания насыпи зависит параметрически от относительной влажности, использована методика параметрической теории надежности. Задача решается методом Монте-Карло.

Ключевые слова: основание насыпи, устойчивость откосов, многолетнемерзлые грунты, критерии отказа, вероятность безотказной работы

Имеющийся опыт строительства и эксплуатации транспортных сооружений в криолитозоне показывает наличие нерешенных задач, связанных с обеспечением надежности, устойчивости и стабильности основания земляного полотна [1].

Актуальность данной работы заключается в усовершенствовании методики оценки надежности, устойчивости и стабильности основания насыпи автомобильной дороги, запроектированной в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов.

В зоне распространения многолетней мерзлоты существует три принципа проектирования насыпи. Первый принцип предполагает поддержание основания насыпи в стабильно мерзлом состоянии на протяжении всего срока эксплуатации автомобильной дороги, когда не допускается оттаивание грунта основания, так как это обуславливает появление различных деформаций земляного полотна и разрушений дорожной одежды. Второй принцип допускает частичное оттаивание грунта деятельного слоя в основании насыпи в период эксплуатации дороги при условии ограничения осадок в допустимых предельных значениях. Земляное полотно по принципу ограничения глубины оттаивания грунтов основания проектируют исходя из допустимых деформаций согласно поперечным профилям. Третий принцип предусматривает полное предварительное оттаивание мерзлого грунта и осушения дорожной полосы и только затем возведение земляного полотна [2].

Цель нашего исследования заключается в развитии методики расчетов устойчивости дорожной насыпи в районе распространения многолетнемерзлых грунтов, запроектированной по второму принципу, с помощью внедрения методов параметрической теории надежности.

Надежность – это свойство объекта выполнять свои функции на протяжении заданного срока эксплуатации в заданном режиме. Данное понятие относительно автомобильной дороги объясняется как комплексное свойство, которое обеспечивает безаварийное движение транспорта с расчетной скоростью и интенсивностью движения в течение заданного межремонтного периода при условии соблюдения эксплуатационных правил, и формулируется в [3]. При этом за меру надежности принимается величина безотказной работы или вероятности того, что за период строительных работ и в течение срока эксплуатации сооружения не наступит отказ.

Одним из критериев отказа основания насыпи, запроектированной по второму принципу, в соответствии с [2] является превышение величины осадки насыпи допустимых значений. Он выражается неравенством

$$S \geq S_{\text{доп}}, \quad (1)$$

где s – осадка насыпи, $S_{\text{доп}}$ – допустимая величина осадки. Тогда критерий надежности насыпи сформулируется условием

$$S < S_{\text{доп}}, \quad (2)$$

и вероятность безотказной работы насыпи – это вероятность выполнения условия (2).

В случае невысокой насыпи, в которой отсутствуют нестабильные слои, осадка земляного полотна будет определяться только деформациями основания насыпи:

$$S = S_{\text{осн}}. \quad (3)$$

На просадочных грунтах величины осадок основания земляного полотна в различных сечениях поперечного профиля рассчитывают по зависимости:

$$S = e h_{\text{от}}, \quad (4)$$

где e – относительная осадка грунта основания после его оттаивания под нагрузкой, $h_{\text{от}}$ – расстояние от подошвы насыпи до ореола оттаивания [2].

Вероятность безотказной работы насыпи можно оценить методами параметрической теории надежности. В этом случае объект рассматривается как система с входными и выходными параметрами, которые связаны параметрически и являются случайными величинами. На входе – параметры, влияющие на надежность сооружения, а на выходе – величина осадки сооружения.

Рассмотрим самую простую постановку задачи, когда только один входной параметр является случайной величиной. Он необязательно должен вносить самый весомый вклад в величину осадки насыпи, но его вариативность можно достоверно оценить на основании экспериментальных или натурных данных. Кроме того, входной параметр должен помочь получить математически обоснованные стохастические характеристики величины осадки как выходного параметра системы. В его качестве, принимаем относительную влажность грунта деятельного слоя W [3], т.к., во-первых, можно достоверно оценить ее вариативность. Во-вторых, от нее параметрически зависят величины e и $h_{\text{от}}$, по которым в соответствии с зависимостью (4) находим величину осадки S . Тогда уравнение связи между относительной влажностью и осадкой насыпи может быть записано в виде зависимости

$$S = \varphi(W). \quad (5)$$

Закон распределения случайной величины относительной влажности принят нормальным.

Вероятностные характеристики входного параметра обычно получают по статистическим данным или экспертным оценкам, а для выходного параметра используют различные методы рандомизации, например метод статистической линеаризации

или метод статистических испытаний (Монте-Карло). Первый метод был применен в [3]. Основной его недостаток заключается в том, что он может быть применен только на узком интервале, в пределах которого допускается замена зависимостей линейными функциями.

Более универсальным является метод Монте-Карло. Его суть состоит в том, что для входного параметра W с помощью генератора случайных чисел моделируется случайная выборка значений. Далее многократно (для каждого значения относительной влажности из выборки) просчитывается математическая модель осадки насыпи. Тем самым на выходе получается выборка значений S , по которой получают статистические оценки параметров закона распределения случайной величины осадки.

Моделирование выборки значений случайной величины относительной влажности может быть выполнено с помощью пары независимых стандартных нормальных (т.е. гауссовских с нулевым средним и единичной дисперсией) случайных величин ξ и η , определяемых по формулам:

$$\xi = \sqrt{-2 \operatorname{Ln} \alpha} \cos(2\pi\beta), \quad (6)$$

$$\eta = \sqrt{-2 \operatorname{Ln} \alpha} \sin(2\pi\beta), \quad (7)$$

где α и β – случайные равномерно распределенные величины из интервала от 0 до 1, генерируемые датчиком псевдослучайных чисел в программе Excel [4].

Проверка правдоподобия гипотезы о нормальности распределения производится по критерию согласия Пирсона [5]. Для получения выборки для осадки проведём многократные расчеты осадки по методике [2]. Необходимое количество статистических испытаний оценивается по критерию Стьюдента и составляет

$$n_u = t^2 \frac{\sigma_s^2}{(p_s M(S))^2}, \quad (8)$$

где p_s – предельная относительная ошибка; $M(S)$ – среднее статистической выборки значений случайной величины S ; σ_s – стандарт отклонения от него; t – параметр распределения Стьюдента, задаваемый по специальной таблице [5].

Введение гипотезы о нормальном распределении случайных величин позволяет оценить вероятность безопасного состояния системы по формуле

$$P = P(S < S_{\text{доп}}) = 0,5 + \Phi \left(\frac{M(S_{\text{доп}}) - M(S)}{\sqrt{\sigma_{\text{доп}}^2 + \sigma_s^2}} \right), \quad (9)$$

где $\Phi(\cdot)$ – функция Лапласа, значения которой определяются по специальным таблицам [4]; $M(S_{\text{доп}})$ и σ_s – среднее и стандарт отклонения случайной величины $S_{\text{доп}}$.

Список литературы

1. Халиуллина Л.Э. О многолетнемерзлых грунтах // Научные исследования. 2018. № 3. С. 10–12.
2. ОДМ 218.2.094-2018. Методические рекомендации по проектированию земляного полотна автомобильных дорог общего пользования из местных талых и мерзлых переувлажненных глинистых и торфяных грунтов в зонах распространения многолетнемерзлых грунтов / Федеральное дорожное агентство (Росавтодор). Москва, 2018. С. 49.
3. Гавриленко Т.В. Оценка параметрической надежности насыпи, проектируемой в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов по второму принципу / Т.В. Гавриленко, О.А. Иванова // Дороги и мосты. 2020. № 2. С. 74–90.
4. Половко А.М. Основы теории надежности / А.М. Половко, С.В. Гуров. – СПб.: БХВ-Петербург, 2008. – 704 с.
5. Горелова Г.В., Кашко И.А. Теория вероятностей и математическая статистика в примерах и задачах с применением Excel: учеб. пособие для вузов. – Ростов н/Д: Феникс, 2005. – 480 с.

УДК 625.731.1:624.139

Татьяна Валентиновна Гавриленко,

канд. техн. наук, доцент

Александра Сергеевна Михайлова,

студент

(Сибирский федеральный университет)

E-mail: tvgavrilenko@sfu-kras.ru,

amikhaylova-sf21@stud.sfu-kras.ru

Tatiana Valentinovna Gavrilenko,

PhD in Sci. Tech., Associate Professor

Alexandra Sergeevna Mikhailova,

student

(Siberian Federal University)

E-mail: tvgavrilenko@sfu-kras.ru,

amikhaylova-sf21@stud.sfu-kras.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ НАСЫПИ, ПРОЕКТИРУЕМОЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ ПО ВТОРОМУ ПРИНЦИПУ

INVESTIGATION OF THE RELIABILITY OF THE EMBANKMENT DESIGNED IN THE CRYOLITHOZONE ACCORDING TO THE SECOND PRINCIPLE

В статье изложена методика оценки надежности дорожной насыпи, проектируемой в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов по второму принципу. Критерием отказа принято условие непревышения осадкой насыпи нормативного значения. В качестве случайных величин приняты относительная влажность и осадка основания насыпи. Так как осадка основания параметрически зависит от относительной влажности грунта, использована методика параметрической теории надежности. Эта задача решается с помощью метода Монте-Карло.

Ключевые слова: основание насыпи, устойчивость откосов, многолетнемерзлые грунты, критерии отказа, вероятность безотказной работы.

The article describes a methodology for assessing the reliability of a road embankment designed in the permafrost distribution zone according to the second principle. The criterion of refusal is the condition of not exceeding the normative value of the embankment sediment. The relative humidity and sediment of the embankment base are taken as random variables. Since the sediment of the base parametrically depends on the relative humidity of the soil, the method of parametric reliability theory is used. This problem is solved using the Monte Carlo method.

Keywords: embankment base, slope stability, permafrost soils, failure criteria, probability of failure-free operation.

Имеющийся опыт строительства и эксплуатации транспортных сооружений в криолитозоне показывает наличие нерешенных задач, связанных с обеспечением надежности, устойчивости и стабильности основания земляного полотна [1].

Актуальность данной работы заключается в усовершенствовании методики оценки надежности, устойчивости и стабильности основания насыпи автомобильной дороги, запроектированной в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов.

В зоне распространения многолетней мерзлоты применяют три принципа проектирования насыпи. Первый принцип предполагает поддержание основания насыпи в стабильно мерзлом состоянии на протяжении всего срока эксплуатации автомобильной дороги, когда не допускается оттаивание грунта основания, так как это обуславливает появление различных деформаций земляного полотна и разрушений дорожной одежды. Второй принцип допускает частичное оттаивание грунта деятельного слоя в основании насыпи в период эксплуатации дороги при условии ограничения осадок допустимыми предельными значениями. Третий принцип предусматривает полное предварительное оттаивание мерзлого грунта и осушение дорожной полосы и только затем возведение земляного полотна [2].

Цель нашего исследования заключается в развитии методики расчетов устойчивости дорожной насыпи в районе распространения многолетнемерзлых грунтов, запроектированной по второму принципу, с помощью внедрения методов параметрической теории надежности.

Надежность – это свойство объекта выполнять свои функции на протяжении заданного срока эксплуатации в заданном режиме. Данное понятие применительно к автомобильной дороге сформулировано в [3]. Надежность автомобильной дороги – это комплексное свойство, которое обеспечивает безаварийное движение транспорта с расчетной скоростью и интенсивностью движения в течение заданного межремонтного периода при условии соблюдения эксплуатационных правил. При этом за меру надежности принята вероятность безотказной работы или вероятность того, что за период строительных работ и в течение срока эксплуатации сооружения не наступит отказ.

Одним из критериев отказа основания насыпи, запроектированной по второму принципу, в соответствии с [2] является превыше-

ние величины осадки насыпи допустимых значений. Он выражается неравенством

$$S \geq S_{\text{доп}}, \quad (1)$$

где S – осадка насыпи; $S_{\text{доп}}$ – допустимая величина осадки. Тогда критерий надежности насыпи сформулируется неравенством

$$S < S_{\text{доп}}, \quad (2)$$

и вероятность безотказной работы насыпи – это вероятность выполнения условия (2).

При расчете невысокой насыпи (нестабильные слои отсутствуют) осадка земляного полотна определяется деформациями только основания насыпи

$$S = S_{\text{осн}}, \quad (3)$$

Согласно рекомендациям [2] осадку насыпи на просадочных грунтах в различных поперечных сечениях земляного полотна определяют по формуле

$$S = e \cdot h_{\text{от}}, \quad (4)$$

где e – относительная осадка грунта основания после его оттаивания под нагрузкой; $h_{\text{от}}$ – расстояние от подошвы насыпи до ореола оттаивания.

Вероятность безотказной работы насыпи оценивается методами параметрической теории надежности, когда исследуемый объект рассматривается как система с входными и выходными параметрами, связанными параметрически, то есть уравнением связи. Параметры, которые влияют на надежность насыпи, задаются как входные и являются случайными величинами. Выходной параметр – осадка насыпи, которая также рассматривается как случайная величина.

Рассмотрим случай, когда лишь один входной параметр принимается случайной величиной. В его качестве должен быть взят фактор, который не только оказывает влияние на величину осадки, но и имеет стохастические свойства, достоверно оцениваемые либо

по экспериментальным или натурным данным, либо в результате математического моделирования. Тогда в качестве входного параметра принимаем относительную влажность грунта деятельного слоя W , так как она подходит под описание нужного параметра для поиска осадки и от нее параметрически зависят величины e и $h_{от}$ [3].

Уравнение связи между относительной влажностью и осадкой насыпи может быть записано в виде зависимости

$$S = \varphi(W). \quad (5)$$

В качестве закона распределения случайной величины относительной влажности принимается нормальный закон.

По статистическим данным или с помощью метода экспертных оценок получают вероятностные характеристики входного параметра. Выходной параметр оценивается методами рандомизации, например методом статистической линейаризации или методом статистических испытаний (Монте-Карло). Первый метод был применен в [3]. Основной недостаток метода статистической линейаризации заключается в том, что он применяется на узком интервале, в пределах которого допускается замена зависимостей линейными функциями.

Метод Монте-Карло в этом вопросе является более универсальным. Суть его заключается в том, что для входного параметра W с помощью генератора случайных чисел моделируется случайная выборка значений. Далее для каждого значения осадки насыпи (многократно) просчитывается математическая модель осадки насыпи. На выходе получается выборка значений S , по которой получают статистические оценки параметров закона распределения случайной величины осадки.

Моделирование выборки значений случайной величины относительной влажности выполняется с помощью пары независимых стандартных нормальных (то есть гауссовских с нулевым средним и единичной дисперсией) случайных величин ξ и η , определяемых по формулам

$$\xi = \sqrt{-2 \ln \alpha} \cos(2\pi\beta), \quad (6)$$

$$\eta = \sqrt{-2 \ln \alpha} \sin(2\pi\beta), \quad (7)$$

где α и β – случайные равномерно распределенные величины из интервала от 0 до 1, генерируемые датчиком псевдослучайных чисел в программе Excel [4].

С помощью критерия согласия Пирсона проводится проверка правдоподобия гипотезы о нормальности распределения. Чтобы получить значения выборки случайной величины осадки насыпи, необходимо провести многократные ее расчеты по методике [2]. Необходимое количество статистических испытаний оценивается по критерию Стьюдента и составляет

$$n_u = t^2 \frac{\sigma_s^2}{(p_s M(S))^2}, \quad (8)$$

где p_s – предельная относительная ошибка; $M(S)$ – среднее статистической выборки значений случайной величины S ; σ_s – стандарт отклонения от него; t – параметр распределения Стьюдента, задаваемый по специальной таблице [5].

Введение гипотезы о нормальном распределении случайных величин позволяет оценить вероятность безопасного состояния системы по формуле

$$P = P(S < S_{\text{доп}}) = 0,5 + \Phi \left(\frac{M(S_{\text{доп}}) - M(S)}{\sqrt{\sigma_{\text{доп}}^2 + \sigma_S^2}} \right), \quad (9)$$

где $\Phi(\cdot)$ – функция Лапласа, значения которой определяются по специальным таблицам.

Основные выводы:

1. Рассмотрены основные принципы проектирования насыпи в многолетнемерзлой зоне и понятие надежности автомобильной дороги.
2. Сформулирован критерий отказа основания насыпи.
3. Выведено уравнение связи между относительной влажностью и осадкой насыпи.
4. Описана методика решения задачи с помощью метода Монте-Карло.

Литература

1. Халупина Л. Э. О многолетнемерзлых грунтах // Научные исследования. 2018. № 3. С. 10–12.
2. ОДМ 218.2.094-2018. Методические рекомендации по проектированию земляного полотна автомобильных дорог общего пользования из местных талых и мерзлых переувлажненных глинистых и торфяных грунтов в зонах распространения многолетнемерзлых грунтов / Федеральное дорожное агентство (Росавтодор). Москва, 2018. С. 49.
3. Гавриленко Т. В. Оценка параметрической надежности насыпи, проектируемой в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов по второму принципу / Т. В. Гавриленко, О. А. Иванова // Дороги и мосты. 2020. № 2. С. 74–90.
4. Половко А. М. Основы теории надежности / А. М. Половко, С. В. Гуров. – СПб. : БХВ-Петербург, 2008. – 704 с.
5. Горелова Г. В., Кацко И. А. Теория вероятностей и математическая статистика в примерах и задачах с применением Excel: учеб. пособие для вузов. – Ростов н/Д : Феникс, 2005. – 480 с.

¹ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет, Инженерно-строительный институт,
Красноярск, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ДОРОЖНОЙ НАСЫПИ, ПРОЕКТИРУЕМОЙ В ПЕРВОЙ ДОРОЖНО-КЛИМАТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ, МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

Аннотация: В статье рассмотрена методика оценки надежности насыпи, проектируемой по второму принципу, с помощью метода Монте-Карло. В качестве входного случайного параметра системы рассматривается относительная влажность грунта деятельного слоя, а выходного - осадка насыпи. Предполагается, что случайные величины подчиняются нормальному закону распределения. Выборка случайных значений относительной влажности моделируется с помощью генератора случайных чисел, а случайная последовательность значений осадки насыпи строится путем многократных вычислений при значениях относительной влажности из выборки. Гипотеза о нормальном распределении случайных величин подтверждается приведенными гистограммами и оценкой по критериям согласия хи-квадрат и Романовского.

Ключевые слова: основание насыпи, деятельный слой, критерии отказа, вероятность безотказной работы, метод статистических испытаний

Имеющийся опыт строительства и эксплуатации транспортных сооружений в зоне многолетнемерзлых грунтов показывает наличие нерешенных задач, связанных с обеспечением надежности, устойчивости и стабильности основания земляного полотна [1].

Актуальность данной работы заключается в усовершенствовании методики оценки надежности, устойчивости и стабильности основания насыпи автомобильной дороги, в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов.

В зоне распространения многолетней мерзлоты применяют три принципа проектирования насыпи. Первый принцип предполагает поддержание основания насыпи в стабильно мерзлом состоянии на протяжении всего срока эксплуатации автомобильной дороги, когда не допускается оттаивание грунта основания, так как это обуславливает появление различных деформаций земляного полотна и разрушений дорожной одежды. Второй принцип допускает частичное оттаивание грунта деятельного слоя в основании насыпи в период эксплуатации дороги при условии ограничения осадок допустимыми предельными значениями. Третий принцип предусматривает полное предварительное оттаивание мерзлого грунта и осушение дорожной полосы и только затем возведение земляного полотна [2].

Цель нашего исследования заключается в развитии методики расчетов устойчивости дорожной насыпи в районе распространения многолетнемерзлых грунтов, запроектированной по второму принципу, с помощью внедрения методов параметрической теории надежности.

Надежность – это свойство объекта выполнять свои функции на протяжении заданного срока эксплуатации в заданном режиме. Данное понятие применительно к автомобильной дороге сформулировано в [3]. Надежность автомобильной дороги – это комплексное свойство, которое обеспечивает безаварийное движение транспорта с расчетной скоростью и интенсивностью движения в течение заданного межремонтного периода при условии соблюдения эксплуатационных правил. При этом за меру надежности может быть принята вероятность безотказной работы или вероятность того, что за период строительных работ и в течение срока эксплуатации сооружения не наступит отказ.

Потеря способности сооружения обеспечить безопасное движение автомобильного транспорта с заданной расчетной скоростью и есть отказ. Критерий отказа – это заранее принятые признаки нарушения работоспособного состояния сооружения, по которым в дальнейшем принимают решение о наступлении отказа [4].

Одним из критериев отказа основания насыпи, запроектированной по второму принципу, в соответствии с [2] является превышение величины осадки насыпи допустимых значений. Он выражается неравенством

$$S \geq S_{\text{доп}} \quad (1)$$

где S – осадка насыпи; $S_{\text{доп}}$ – допустимая величина осадки, значения которой приведены в [2, табл. 8] Тогда критерий надежности насыпи может быть сформулирован неравенством

$$S < S_{\text{доп}} \quad (2)$$

и вероятность безотказной работы насыпи – это вероятность выполнения условия (2).

При расчете невысокой насыпи (нестабильные слои отсутствуют) осадка земляного полотна определяется деформациями только основания насыпи

$$S = S_{\text{осн}} \quad (3)$$

Согласно рекомендациям [2] осадку насыпи на просадочных грунтах в различных поперечных сечениях земляного полотна определяют по формуле

$$S = e \cdot h_{\text{от}} \quad (4)$$

где e – относительная осадка грунта основания после его оттаивания под нагрузкой; $h_{\text{от}}$ – расстояние от подошвы насыпи до ореола оттаивания.

Вероятность безотказной работы насыпи оценивается методами параметрической теории надежности, когда исследуемый объект рассматривается как система с входными и выходными параметрами, связанными параметрически, то есть уравнением связи. Факторы, которые оказывают влияние на надежность насыпи, задаются как входные и являются случайными величинами. Выходной параметр – осадка насыпи, которая также рассматривается как случайная величина.

К случайным факторам относятся:

- относительная влажность грунта;
- величина нагрузки;
- характеристики материалов в конструкции дорожной одежды;
- тип грунта основания насыпи;
- мощность деятельного слоя;
- температурный режим;
- льдистость многолетнемерзлых грунтов.

Рассмотрим случай, когда лишь один входной параметр принимается случайной величиной. В его качестве должен быть взят фактор, который не только оказывает влияние на величину осадки, но и имеет стохастические свойства, достоверно оцениваемые либо по экспериментальным или натурным данным, либо в результате математического моделирования. Тогда в качестве входного параметра примем относительную влажность грунта деятельного слоя W , так как она обладает некоторой статистической неопределенностью и от нее параметрически зависят величины e и $h_{\text{от}}$ [3]. Так величина e определяется по специальным графикам зависимости e от W [2, рис. 15 и 16]. В случае глинистых грунтов график представляет собой несколько кривых связи между e и W , построенных при разных значениях числа пластичности I . Например, при $I = 17\%$ относительная осадка может принимать значения от 0 до 0,3 для значений относительной влажности из диапазона от 32 % до 60 %.

Уравнение связи между относительной влажностью и осадкой насыпи может быть записано в виде зависимости

$$S = \phi(W) \quad (5)$$

Вероятностные характеристики входной случайной величины W могут быть получены по статистическим данным или с помощью метода экспертных оценок. Выходной параметр оценивается методами рандомизации, например методом статистической линеаризации или методом статистических испытаний (Монте-Карло). Первый метод был применен в [3].

Основной недостаток метода статистической линеаризации заключается в том, что он применяется на узком интервале, в пределах которого допускается замена зависимостей линейными функциями. Метод Монте-Карло является более универсальным. Суть его состоит в том, что для входного параметра W с помощью генератора случайных чисел строится выборка случайных значений относительной влажности и для каждого значения из выборки просчитывается математическая модель осадки насыпи. В результате получается выборка

значений S , по которой получают статистические оценки параметров закона распределения случайной величины осадки.

Предполагаем, что случайная величина относительной влажности подчиняется нормальному закону распределения [3], для которого требуется задать вероятностно-статистические оценки математического ожидания $M(W)$ и стандартного отклонения от него σ_W . Воспользуемся правилом «3 сигма», по которому приблизительно с вероятностью 0,9973 значение нормально распределенной случайной величины лежит в интервале: $M(W) \pm 3\sigma_W$. Если в качестве грунта деятельного слоя взять, например, суглинок легкий пылеватый с числом пластичности $I_p = 17\%$, то, как уже отмечалось выше, область определения W – интервал от 32 % до 60 %. Тогда $M(W) = 46\%$ и $\sigma_W = 6\%$.

Моделирование выборки ее случайных значений выполним с помощью пары независимых стандартных нормальных (то есть гауссовских с нулевым средним и единичной дисперсией) случайных величин ξ и η , определяемых по формулам

$$\xi = \sqrt{-2 \ln \alpha} \cdot \cos(2\pi\beta), \quad (6)$$

$$\eta = \sqrt{-2 \ln \alpha} \cdot \sin(2\pi\beta), \quad (7)$$

где α и β – случайные равномерно распределенные величины из интервала от 0 до 1, генерируемые датчиком псевдослучайных чисел в программе Excel [5].

Была получена выборка из 100 значений относительной влажности и проведена оценка её соответствия нормальному закону распределения по критерию «хи-квадрат» [6]. При уровне значимости 0,05 критерий выполняется.

На рис. 1. приведены эмпирический (гистограмма, построенная по выборке значений случайной величины относительной влажности) и теоретический законы нормального распределения.

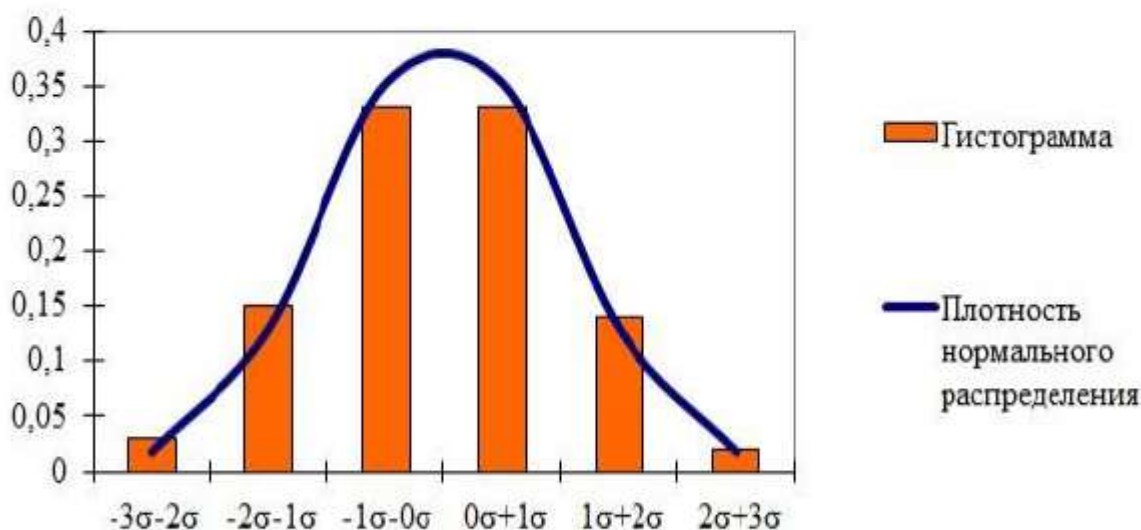


Рис. 1. Гистограмма, построенная по выборке значений случайной величины относительной влажности

Также было оценено минимальное количество статистических испытаний, необходимых для того, чтобы полученная выборка была репрезентативной, n_u по формуле

$$n_u = t^2 \frac{\sigma_W^2}{(p_s M(W))^2}, \quad (8)$$

где p_s – предельная относительная ошибка; t – параметр распределения Стьюдента, задаваемый по специальной таблице [6].

При предельной относительной ошибке 0,05; $t = 1,99$ (для уровня значимости 0,05 и 100 проведенных численных экспериментов) минимально необходимое количество статистических испытаний составило 27.

Таким образом, построенная выборка значений относительной влажности является репрезентативной, т.е. получаемые по ней статистические оценки вероятностных характеристик случайной величины W являются достоверными с заданным уровнем ошибки.

Как уже отмечалось выше, чтобы получить выборку значений случайной величины осадки насыпи, необходимо провести для каждого значения относительной влажности из выборки расчет осадки по методике [2]. Такие расчеты были проведены при следующих исходных данных. Дорога III категории расположена в дорожно-климатической зоне I₁. Ориентация автомобильной дороги по оси: юг – север. Дорожные одежды – облегченные. Верхний слой покрытия – асфальтобетон мелкозернистый толщиной 8 см; нижний слой покрытия – черный щебень – 12 см; верхний слой основания – щебень фракционированный 40-80 мм с заклинкой мелким щебнем – 15 см; нижний слой основания – щебеночно-песчаная смесь – 25 см; дополнительный слой основания – песок среднезернистый – 0,35 м. В насыпи отсутствуют неконсолидируемая и консолидируемая зоны. Рабочая отметка (как разность отметок оси дороги и рельефа по оси дороги) составляет 1,5 м. Земляное полотно выполнено из суглинка легкого пылеватого с крутизной откосов 1:4. Откосы и подошва насыпи укреплены торфо-песчаной смесью. Толщина укрепления на откосе и у подошвы составляет соответственно 0,25 м и 0,3 м.

В результате проведения 100 вычислений была получена выборка, по значениям которой определены статистические оценки математического ожидания $M(S)$ и стандартного отклонения σ_S случайной величины осадки насыпи: $M(S) = 0,09$ м и $\sigma_S = 0,04$ м. С целью оценки закона распределения случайной величины S была построена гистограмма, приведенная на рис. 2.

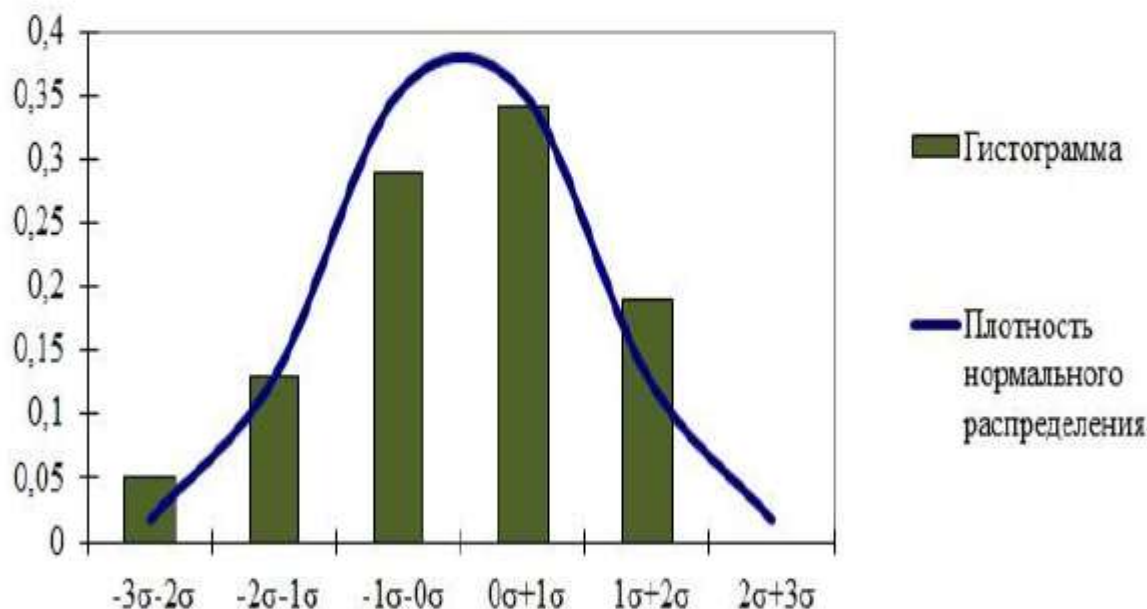


Рис.2. Гистограмма, построенная по выборке значений случайной величины осадки насыпи

Как видно из рис. 2, принятие гипотезы о нормальном распределении случайной величины осадки не является очевидным. Гистограмма асимметрична, центр симметрии смещен вправо (коэффициент асимметрии равен -0,2), поэтому требуется ее проверка по различным критериям. Воспользуемся критерием Романовского:

$$\rho = \frac{\chi^2 - (n-3)}{\sqrt{2(n-3)}}, \quad (9)$$

где n – количество интервалов в гистограмме; χ^2 – расчётное значение критерия «хи-квадрат», определяемое по формуле

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(f_i - f_T)^2}{f_T}. \quad (10)$$

В ней f_i – наблюдаемая частота признака (величина осадки) в i -м интервале, f_T – теоретическая частота. Если $\rho \leq 3$, то гипотезу о нормальном характере распределения данных можно принять.

В результате расчетов по формулам (9) и (10) для $n = 6$ получились значения $\chi^2 = 8,47$ и $\rho = 2,24$. Значит, по критерию Романовского гипотеза о нормальном законе распределения подтверждается.

При использовании критерия «хи-квадрат» гипотеза о нормальном распределении случайной величины осадки принимается при уровне значимости 0,02.

Таким образом, гипотеза о нормальном распределении случайной величины осадки насыпи принимается.

Основные выводы:

1. Описана методика решения задачи с помощью метода Монте-Карло.
2. Построены выборки случайных значений для входного (относительной влажности грунта деятельного слоя) и выходного (осадки насыпи) параметра в параметрической модели надежности насыпи.
3. Подтверждены гипотезы о нормальном законе распределения случайных величин.

Библиография

1. Халиулина Л.Э. О многолетнемерзлых грунтах // Научные исследования. 2018. № 3. С. 10–12.
2. ОДМ 218.2.094-2018. Методические рекомендации по проектированию земляного полотна автомобильных дорог общего пользования из местных талых и мерзлых переувлажненных глинистых и торфяных грунтов в зонах распространения многолетнемерзлых грунтов / Федеральное дорожное агентство (Росавтодор). Москва, 2018. С. 49.
3. Гавриленко Т.В. Оценка параметрической надежности насыпи, проектируемой в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов по второму принципу / Т.В. Гавриленко, О.А. Иванова // Дороги и мосты. 2020. № 2. С. 74–90.
4. Гавриленко, Т.В. Применение вероятностного подхода к оценке надежности основания насыпи в северной климатической зоне / Т.В. Гавриленко, О.А. Иванова // Национальная ассоциация ученых (НАУ): научно-технический журнал. – 2020. – №54. – С. 15–17.
5. Половко А.М. Основы теории надежности / А.М. Половко, С.В. Гуров. – СПб.: БХВ-Петербург, 2008. – 704 с.
6. Горелова Г.В., Кацко И.А. Теория вероятностей и математическая статистика в примерах и задачах с применением Excel: учеб. пособие для вузов. – Ростов н/Д: Феникс, 2005. – 480 с.

Сведения об авторах

1. Гавриленко Татьяна Валентиновна, к.т.н., доцент кафедры Автомобильные дороги и городские сооружения ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет, Инженерно-строительный институт, tvavrilenko@sfu-kras.ru.

2. Михайлова Александра Сергеевна, студент кафедры Автомобильные дороги и городские сооружения ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет, Инженерно-строительный институт, sasha_mikhailova.22.12.1999@mail.ru.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Расчет устойчивости насыпи, запроектированной по второму принципу

Общие параметры		Обозначение	Значение
Категория дороги			3
Дорожно-климатическая зона			I ₁
Экспозиция откосов	ориентация дороги по оси		Юг-Север
	откос слева (С, В, Ю или З)		З
	откос справа (С, В, Ю или З)		В
Деятельный слой	грунт		суглинок лёгкий пылеватый
	к-нт пластичности, %	I_p	17
	влажность грунта, %	W	40,0
	отн. осадка	e	0,080

случайные величины:

$W, \%$

входной параметр

40,00

осадка

$S_{оск}, \text{М}$

выходной параметр

0,046

Входной параметр

Вычисляется по формуле: $e = A + B * W + C * W^2 + D * W^3$

$A =$	-7,64113E-06
$B =$	-0,014595687
$C =$	0,000598322
$D =$	-4,5348E-06

Земляное полотно

Элементы земляного полотна		Обозначение	Значение параметра
Грунт	грунт ЗП		суглинок лёгкий пылеватый
	влажность грунта ЗП, %	W	40,0
Конструкция насыпи	заложение откосов (1:m)	m	4
	ширина ЗП по верху, м	B	12
	ширина ЗП по низу, м	B_n	24
Укрепление откосов и подошвы насыпи	торфо-песчаная смесь		
	толщина укрепления на откосе, м		0,25
Рабочая отметка насыпи	то же в основании, м		0,3
	по оси дороги, м	$H_{твс}$	1,5
	по бровке, м	$H_{бр}$	1,38
	Высота верхнего слоя насыпи, м	H_n	1,5
	Высота нижнего слоя насыпи, м	H_n	0,0
	Толщина подстилающего слоя $H-h_{до}$		0,55
	Толщина дорожной одежды, м		0,95
	Ширина дорожной одежды, м	$B_{до}$	8,0
	Поперечный уклон дорожной одежды, тысячные	$i_{до}$	0,015
	Поперечный уклон обочины, тысячные	$i_{об}$	0,03

Конструкция основания насыпи

Слой	Материал	Толщина слоя $h, \text{м}$	Влажность W		Поправочный коэффициент на расчётную влажность K_W	Коэффициент, учитывающий интенсивность оттаивания материала ДО K_{II}	Нормативная глубина сезонного оттаивания слоев $H_{ci}^{норм}$	Глубина сезонного оттаивания слоев H_{ci}
			%	в долях				

Основание насыпи	суглинок лёгкий пылеватый		40	0,4	0,85	1,0	1,8	1,53
------------------	---------------------------	--	----	-----	------	-----	-----	-------------

Конструкция по оси

Слой	Материал	Толщина слоя h , м	Влажность W		Поправочный коэффициент на расчётную влажность K_{II}	Коэффициент, учитывающий интенсивность оттаивания материала ДО K_{II}	Нормативная глубина сезонного оттаивания слоев $H_{ci}^{норм}$	Глубина сезонного оттаивания слоев H_{ci}	$h_i(1-H_{cn}/H_{ci})$
			%	в долях					
Покрытие	асфальтобетон м.з.	0,08	1	0,01	1,08	1,3	3,20	4,49	0,05
	черный щебень	0,12	4	0,04	1,02	1,25	3,20	4,08	0,08
Основание	щебень, фракционированный 40..80 с заклиной мелким	0,15	4	0,04	1,02	1,25	3,20	4,08	0,09
	ЩПС	0,25	5	0,05	1,00	1,25	3,20	4,00	0,15
Доп. слой основания	песок среднезернистый	0,35	8	0,08	0,95	1,0	3,20	3,04	0,17
Грунт насыпи	суглинок лёгкий пылеватый	0,55	40	0,4	0,85	1,0	1,80	1,53	0,00
Сумма		1,50							0,55

$$H_{ci} = H_{ci}^{норм} K_W K_{II}$$

песчаные

$$K_W(W) = 1,10 - 2,15W + 4,53W^2 - 4,13W^3$$

глинистые

$$K_{II}(W) = 1,24 - 2,44W + 5,22W^2 - 3,87W^3$$

Конструкция по борвке

Слой	Материал	Толщина слоя h , м	Влажность W		Поправочный коэффициент на расчётную влажность K_{II}	Коэффициент, учитывающий интенсивность оттаивания материала ДО K_{II}	Нормативная глубина сезонного оттаивания слоев $H_{ci}^{норм}$	Глубина сезонного оттаивания слоев H_{ci}	$h_i(1-H_{cn}/H_{ci})$
			%	в долях					
Присыпная обочина	песок среднезернистый	0,48	8	0,08	0,95	1,0	3,20	3,04	0,24
Доп. слой основания	песок среднезернистый	0,35	8	0,08	0,95	1,0	3,20	3,04	0,17
Грунт насыпи	суглинок лёгкий пылеватый	0,55	40,00	0,4	0,85	1,0	1,80	1,53	0,00
Сумма		1,38							0,41

Конструкция по середине откоса

Слой	Материал	Толщина слоя h , м	Влажность W		Поправочный коэффициент на расчётную влажность K_{II}	Коэффициент, учитывающий интенсивность оттаивания материала ДО K_{II}	Нормативная глубина сезонного оттаивания слоев $H_{ci}^{норм}$	Глубина сезонного оттаивания слоев H_{ci}	$h_i(1-H_{cn}/H_{ci})$
			%	в долях					
Присыпная обочина	песок среднезернистый	0,34	8	0,08	0,95	1,0	3,20	3,04	0,17

Доп. слой основания	песок среднезернистый	0,14	8	0,08	0,95	1,0	3,20	3,04	0,07
Грунт насыпи	суглинок лёгкий пылеватый	0,55	40	0,4	0,85	1	1,8	1,53	0,00
Сумма		1,03							0,24

Глубина сезонного оттаивания в характерных сечениях, м

Характерные сечения:		Подошва откоса слева	Середина откоса слева	Бровка слева	Ось	Бровка справа	Середина откоса справа	Подошва откоса справа
Параметры:	Высота насыпи в створе Н, м	0	0,69	1,38	1,5	1,38	0,69	0
	Глубина оттаивания слоистого полупространства H_K , м		1,77	1,94	2,08	1,94	1,77	
	ψ	0,98	0,98	1	1	1	0,95	0,95
	φ , °		14,04	14,04		14,04	14,04	
	b , м		50,24	50,24		50,24	50,24	
	$\operatorname{tg} \alpha$		0,1819	0,1194		0,1194	0,1819	
	α , °		10,31	6,81		6,81	10,31	
	γ , °		93,73	97,23		97,23	93,73	
	β	1	1,0286	1,0226	1	1,0226	1,0286	1
	$H_{от}$, м	2,04	2,10	2,13	2,08	2,13	2,03	1,98
	$h_{от}$, м	2,04	1,41	0,75	0,58	0,75	1,34	1,98
	$S_{осн}$, м	0,16	0,11	0,06	0,046	0,06	0,11	0,16
	ds , м		0,05			0,05		

Выходной параметр

$$H_K = H_{cn} + \sum_{i=1}^{n-1} h_i \left(1 - \frac{H_{cn}}{H_{ci}} \right)$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \left(\frac{1}{m} \right) \cdot \frac{180^\circ}{\pi}$$

$$b = \frac{(2H\sqrt{1+m^2} + B)^2 + 4H^2}{8H}$$

бровка $\operatorname{tg} \alpha = \frac{B}{2b}$

середина $\operatorname{tg} \alpha = \frac{B + B_H}{2(2b - H)}$

$$\gamma = 90 + \varphi - \alpha$$

$$\beta = \frac{\sin \gamma}{\sin(90 - \varphi)}$$

$$H_{от} = \psi \beta H_K$$

$$h_{от} = H_{от} - H$$

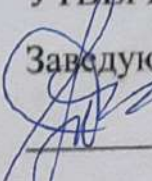
Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Инженерно-строительный институт

Кафедра «Автомобильные дороги и городские сооружения»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой


В.В. Серватинский

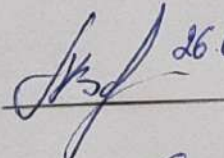
«27» 06 2023

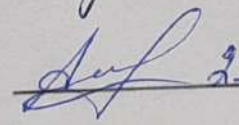
МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

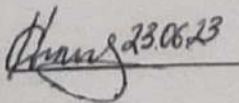
Исследование надежности дорожной насыпи, проектируемой
в криолитозоне по второму принципу

08.04.01 Строительство

08.04.01.11 Проектирование, строительство и эксплуатация транспортных
сооружений в суровых природно-климатических условиях Сибири

Научный руководитель  26.06.23 доцент, канд.техн.наук Т.В. Гавриленко

Выпускник  23.06.23 А.С. Михайлова

Рецензент  23.06.23 С.В. Копылов

Красноярск 2023

ОТЗЫВ РУКОВОДИТЕЛЯ ВКР

На ВКР студента(ки) *Михайловой Александры Сергеевны,*

выполненный на тему: *«Исследование надёжности дорожной насыпи, проектируемой в криолитозоне по второму принципу»*

- 1. Актуальность ВКР.** *Работа актуальна, т.к. посвящена оценке надёжности земляного полотна, проектируемого в зоне распространения многолетнемёрзлых грунтов*
- 2. Научная новизна.** *Работа выполнена в развитие методики оценки надёжности проектируемой в криолитозоне насыпи, разрабатываемой на кафедре АДГС. Сделан следующий шаг, на котором при оценке вероятности безотказной работы насыпи вместо упрощённого подхода на базе метода линеаризации использован метод Монте-Карло, широко применяемый в современной науке.*
- 3. Оценка содержания ВКР.** *В работе проанализированы: методика проектирования насыпи, запроектированной по второму принципу, применение теории надёжности в различных областях строительства и метода Монте-Карло. Изложены основные положения параметрической теории надёжности, применяемые к задаче устойчивости насыпи, проектируемой по второму принципу. Разработана методика оценки показателя надёжности насыпи (вероятности безотказной работы) с помощью метода Монте-Карло. Выполнены статистические расчёты по методу Монте-Карло и получено значение вероятности безотказной работы для условий конкретного примера.*
- 4. Положительные стороны ВКР.** *В диссертации используется математический аппарат теории вероятностей. Проведены конкретные расчёты и получен численный показатель надёжности. Текст диссертации построен логически правильно, сделан грамотный анализ состояния вопроса.*
- 5. Замечания к ВКР.** *Замечания были устранены в ходе подготовки ВКР.*
- 6. Рекомендации по внедрению ВКР.** *Предлагаемая методика должна войти в методiku оценки комплексного показателя надёжности насыпи, учитывающего различные аспекты проектирования и строительства насыпей в зоне распространения многолетнемёрзлых грунтов по второму принципу.*
- 7. Рекомендуемая оценка ВКР** *отлично*
- 8. Дополнительная информация для ГЭК.** *Результаты диссертационной*

работы докладывались на студенческих конференциях, проходивших в университетах Красноярска, Санкт-Петербурга и Якутска в очном и дистанционном формате. Все доклады опубликованы в сборниках трудов конференций.

Руководитель



Т.В. Гавриленко,

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры АДиГС СФУ

«26» июня 2023 г.

РЕЦЕНЗИЯ
на магистерскую диссертацию

Михайловой Александры Сергеевны

**«Исследование надежности дорожной насыпи, проектируемой
в криолитозоне по второму принципу»,**

представленной к защите по направлению 08.04.01 «Строительство»
программа 08.04.01.11 «Проектирование, строительство и эксплуатация
транспортных сооружений в суровых природно-климатических условиях
Сибири»

Тема, выбранная студентом для исследования, является актуальной как с теоретической, так и с практической точки зрения, что в достаточной степени обосновано как во введении к данной работе, так и в ее содержании.

Диссертация представлена объемом 58 страниц, 4 рисунка, 2 таблицы, 36 используемых источников. Структура диссертации соответствует требованиям для отчетов по НИР.

Во введении автором сформулированы цель и задачи, которые предстоит решить в работе.

В первой главе подробно описано состояние вопроса исследования, а именно: существующие принципы проектирования дорожных насыпей в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов, проектные решения насыпей на севере Сибири, методика проектирования земляного полотна по второму принципу, критерии устойчивости насыпи, а также выполнен литературный обзор.

Во второй главе рассмотрено применение теории надежности к задаче устойчивости насыпи, проектируемой по второму принципу: описаны критерии отказа насыпи, сделано обоснование выбора относительной влажности грунта в качестве входного случайного параметра системы.

В третьей главе выполнены статистические испытания по методу Монте-Карло. Было произведено моделирование случайной величины относительной влажности, построена гистограмма и с помощью критерия «хи-квадрат» обосновано принятие нормального закона распределения для нее. Далее для каждого значения из выборки значений относительной влажности были выполнены расчеты осадки насыпи и проведена статистическая обработка полученного ряда значений, построена гистограмма и выбран закон

распределения случайной величины осадки насыпи. Получено значение показателя надежности – вероятности безотказной работы.

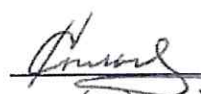
В ходе работы над магистерской диссертацией автор показал владение общими и профессиональными компетенциями, умело осуществляет поиск и использует информацию, необходимую для эффективного выполнения профессиональных задач.

Материал изложен грамотно, логично, хорошо структурирован.

А.С. Михайлова заслуживает присвоение ей квалификации магистра по направлению 08.04.01.11 «Проектирование, строительство и эксплуатация транспортных сооружений в суровых природно-климатических условиях Сибири», а выполненная квалификационная работа оценки «отлично».

Рецензент:

канд. техн. наук

 / С.В. Копылов
(подпись)

Место работы: ФГАОУ ВО СВФУ им. М.К. Аммосова

Занимаемая должность: и.о. заведующего кафедры «Автомобильные дороги и аэродромы» Автодорожный факультет



М.П. «23» ИЮНЯ 2023 г.