

На правах рукописи

О.Третья

Третьякова Ольга Викторовна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ЭЛЕМЕНТОВ
ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ
ГРУНТА**

05.23.11 – «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов,
аэродромов, мостов и транспортных тоннелей»
(технические науки)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь – 2020 г.

Работа выполнена на кафедре «Автомобильные дороги и мосты» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ФГБОУ ВО ПНИПУ).

Научный руководитель: заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор
Овчинников Игорь Георгиевич

Официальные оппоненты: **Кудрявцев Сергей Анатольевич**
доктор технических наук, доцент, заведующий
кафедрой «Мосты, тоннели и подземные
сооружения» ФГБОУ ВО «Дальневосточный
государственный университет путей сообщения»

Колесников Алексей Олегович
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры
«Инженерной геологии оснований и фундаментов»,
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный
архитектурно-строительный университет»

Ведущая организация: **ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта
РУТ (МИИТ)»**

Защита состоится 28 октября 2020 г. в 13-00 часов
на заседании диссертационного совета Д 999.174.02, созданного на базе
федеральных государственных бюджетных образовательных учреждений высшего
образования «Сибирский государственный университет путей сообщения» и «Томский
государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 630049,
г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, д. 191, ауд. 224.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Сибирский
государственный университет путей сообщения» и на сайте www.stu.ru.

Отзывы на диссертацию и автореферат диссертации с указанием ФИО,
почтового адреса, телефона, адреса электронной почты, наименования организации и
должности, подписанные и заверенные печатью организации, в двух экземплярах
просим направить в адрес диссертационного совета.

Автореферат разослан 4 сентября 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. техн. наук, доцент



Ланис Алексей Леонидович

Введение

Актуальность темы исследования

На значительной территории Российской Федерации опасное природное явление – морозное пучение грунтов оказывает негативное воздействие на конструкции тоннелей мелкого заложения, расположенные вблизи земной поверхности. Следствием этого являются неравномерный подъем и деформации конструкций, приводящие к нарушению целостности тоннельных сооружений. Повреждения от влияния морозного пучения грунта зафиксированы на припортальных участках тоннелей Западно-Сибирской, Восточно-Сибирской и Красноярской железных дорог. Отмечено также воздействие морозного пучения грунта на тоннельные сооружения городской транспортной инфраструктуры. Нейтрализация негативного влияния морозного пучения вызывает увеличение вложений на возведение и техническое содержание конструкций тоннелей, что приводит к необходимости поиска новых эффективных решений для снижения этих затрат.

Существующие методы предотвращения негативного влияния морозного пучения на искусственные сооружения предусматривают инженерно-мелиоративные, химические, тепловые и конструктивные методы. Однако большинство из них составляет дополнительную статью расходов при проектировании, монтаже и эксплуатации. Рациональным является поиск конструктивных решений, обеспечивающих нейтрализацию негативного влияния сил пучения, без дополнительных мероприятий, в использовании элементов самого сооружения. Решением проблемы могут быть разработка и применение элементов фундаментов тоннелей, позволяющих оказывать предусмотренное расчетом противодействие силам пучения в большом диапазоне грунтов. Одним из таких направлений является проектирование свай с обратным уклоном поверхности, обеспечивающих снижение влияния морозного пучения грунта.

Существующие разработки в этой области находятся на стадии теоретических исследований или не обладают достаточной технологичностью. Сборные ромбовидные и двуконусные сваи имеют сложную конструкцию и могут быть изготовлены только на промышленных предприятиях, тогда как для тоннельных сооружений, нередко удаленных от участков производства сборных железобетонных элементов, применение сборных свай сопряжено со значительными транспортными расходами. Требуется решение с применением буровых конструкций свай.

Методы расчета указанных выше конструкций нуждаются в проведении дополнительных натурных исследований, не всегда доступных на стадии проектирования. Для решения проблемы в русле практического использования необходимо совершенствование методов расчета технологичного элемента фундамента тоннеля, обеспечивающего снижение влияния морозного пучения на припортальных участках и пригодного для изготовления на строительной площадке. Все изложенное обуславливает тему исследования.

Степень разработанности проблемы

Разработкой и экспериментальными исследованиями элементов

фундаментов, обеспечивающих снижение влияния морозного пучения грунта, занимались П. А. Аббасов, А. О. Добрынин, Г. Б. Кульчицкий, Д. С. Репецкий, А. Б. Пономарев, В. С. Сажин, К. А. Хамидуллин, Б. С. Юшков, L. Domaschuk, G. R. Newton, X. Huang, Y. Sheng и др. На основе проведенных исследований была осуществлена качественная оценка работы свай, имеющих обратный уклон поверхности, в пучинистом грунте. Такая оценка показала повышенное сопротивление свай негативному влиянию касательных сил морозного пучения. А. О. Добрыниным, Д. С. Репецким, Б. С. Юшковым, В. С. Сажиним и др. были разработаны методы расчета отдельных свай таких конструкций.

Однако, несмотря на известную качественную экспериментальную оценку повышенной сопротивляемости свай с обратным уклоном поверхности влиянию морозного пучения грунта, аналитических решений по количественной оценке геометрических параметров таких фундаментов не получено. Расчетные схемы для разных случаев положения границы промерзания и расположения фундамента в грунте не проработаны. Зависимость геометрических параметров сваи от напряженно-деформированного состояния окружающего пучинистого грунта не установлена. Не построена модель, позволяющая определять геометрические параметры сваи с учетом температурных и грунтовых условий тоннеля, его конструктивных особенностей. Не разработан инженерный метод расчета свай как основного элемента фундамента припортальных участков тоннелей, предусматривающий автоматизированный расчет в компьютерной программе и позволяющий варьировать геометрические параметры сваи.

Цель диссертационного исследования

Цель исследования – снижение влияния морозного пучения грунта на фундамент транспортных тоннелей путем совершенствования расчетных методов определения геометрических параметров его основных элементов.

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Установить связь геометрических параметров несущего элемента фундамента припортального участка транспортного тоннеля, обеспечивающих снижение влияния морозного пучения, с напряженно-деформированным состоянием пучинистого грунта, оцененным по результатам изысканий или аналитическим методом и разработать на этой основе конструкцию сваи.

2. Получить аналитические зависимости для определения геометрических параметров сваи на основе анализа ее расчетных схем в пучинистом грунте.

3. Довести полученные аналитические решения по определению геометрических параметров сваи, обеспечивающих снижение влияния морозного пучения грунта на припортальные участки транспортных тоннелей, до уровня инженерного метода расчета путем разработки компьютерной программы. Оценить результаты расчета, полученные разработанным методом, сопоставлением с существующими экспериментальными данными.

Объектом исследования является конструкция несущего элемента фундамента припортального участка транспортного тоннеля, снижающая влияние морозного пучения грунта.

Предметом исследования являются методы расчета конструкции несущего элемента фундамента, обеспечивающей снижение влияния морозного пучения грунта.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Построены математические модели работы несущего элемента фундамента припортального участка транспортного тоннеля, реализованного в виде сваи с верхним обратным конусом, в грунте с учетом взаимосвязей компонентов природно-технической системы «тоннель мелкого заложения – пучинистый грунт».

2. Установлена связь конфигурации несущего элемента фундамента с напряженно-деформированным состоянием грунта в процессе его морозного пучения; получены аналитические зависимости для определения угла верхнего обратного конуса сваи, обеспечивающего противодействие морозному выпучиванию и устойчивость вышележащих конструкций.

3. На основе полученных аналитических зависимостей разработан инженерный метод определения геометрических параметров сваи, как основного элемента фундамента для припортальных участков транспортного тоннеля, в заданных климатических и грунтовых условиях, включающий автоматизированный расчетный модуль.

Теоретическая и практическая значимость

Исследование позволило наметить эффективный путь снижения влияния морозного пучения на конструкции припортальных участков транспортных тоннелей за счет использования свай с обратным уклоном поверхности. Результаты работы расширили знания в области расчета элементов фундаментов, позволяющих снижать влияние морозного пучения за счет их конфигурации. Используются численные методы и существующие экспериментальные данные для проверки достоверности полученных результатов.

Углубление теоретических представлений о явлении морозного пучения грунта заключается в получении аналитических зависимостей касательных напряжений пучения от влажности и удельного сцепления частиц мерзлого грунта, а также нормальных напряжений морозного пучения от избыточной влажности, превышающей объем пор грунта при промерзании, что делает возможным вычисление напряжений и сил морозного пучения грунта.

Проведена модернизация существующих методов расчета элементов фундаментов в таких направлениях, как: ориентация на определение требуемых геометрических параметров элементов, а не на проверку заданных; учет двух основных случаев положения границы промерзания по высоте фундамента; возможность расчетного определения величин, входящих в уравнения, при отсутствии экспериментальных данных; снижение трудоемкости вычислений за счет использования автоматизированного расчетного модуля. На основе этого разработан инженерный метод расчета несущего элемента фундамента припортального участка тоннеля в виде сваи с верхним обратным конусом в заданных климатических и грунтовых условиях. Для реализации метода разработан автоматизированный модуль по расчету геометрии сваи,

обеспечивающий системный подход к решению задачи и снижающий трудоемкость вычислений.

Выполнено технико-экономическое обоснование применения свай с верхним обратным конусом для припортальных участков транспортных тоннелей в условиях морозного пучения грунта, обосновано снижение материалоемкости таких элементов фундаментов, показана перспектива применения свай для опор мостовых сооружений.

Автоматизированный расчетный модуль принят к использованию в практике проектирования АО «Институт «Стройпроект», АО «Мостострой - 11». Результаты исследования используются в учебном процессе при выполнении магистерских работ по профилю программы магистратуры «Автомобильные дороги и аэродромы», в лекционном курсе дисциплины «Методы решения научно-технических задач в строительстве», в практических курсах «Производственная практика (научно-исследовательская работа)», «Производственная практика (научно-исследовательский семинар)».

Методология и методы исследований

Методология и методы исследований базируются на системном подходе к проблеме обеспечения сопротивляемости свай припортальных участков транспортных тоннелей воздействию морозного пучения грунтов. В работе были использованы аналитические методы, численное моделирование методом конечных элементов, результаты существующих полевых и лабораторных исследований. Вывод основных соотношений опирался на методы механики грунтов, теории упругости, инженерной геологии.

Положения, выносимые на защиту:

1. Конфигурация несущего элемента фундамента припортального участка транспортного тоннеля в виде сваи с верхним обратным конусом, геометрические параметры которой получены из условия равновесия сил, действующих на сваю в процессе морозного пучения грунта.

2. Определение угла верхнего обратного конуса сваи, обеспечивающего противодействие морозному выпучиванию и устойчивость вышележащих конструкций.

3. Инженерный метод расчета сваи припортального участка транспортного тоннеля в условиях морозного пучения грунта. Результаты сопоставления разработанного метода с существующими экспериментальными данными.

Степень достоверности и апробация результатов исследования обусловлены применением теоретических основ и объективных методов научного исследования, широко распространенных в науке и в практике проектирования тоннельных конструкций; обеспечиваются использованием фундаментальных положений теории упругости, механики грунтов и инженерной геологии, а также сопоставлением с существующими экспериментальными данными и результатами расчета методом конечных элементов.

Материалы диссертационной работы были представлены и обсуждены на следующих конференциях:

- на IV Международной науч.-практ. конференции «Инновационные процессы в исследовательской и образовательной деятельности» (ПНИПУ, Пермь, 2015);
- V Международной науч.-практ. конференции «Инновационные процессы в исследовательской и образовательной деятельности» (ПНИПУ, Пермь, 2016);
- международной конференции «Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе» (ПНИПУ, Пермь, 2016);
- международной конференции «Этика, транспорт и устойчивое развитие: социальная роль транспортной науки и ответственность ученых» (UNESCO, Московский государственный университет путей сообщения, Москва, 2016);
- VI Международной науч.-практ. конференции «Инновационные процессы в исследовательской и образовательной деятельности» (ПНИПУ, Пермь, 2017);
- международной науч.-практ. конференции «Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе» (ПНИПУ, Пермь, 2017);
- международной науч.-практ. конференции «Инновационные факторы развития транспорта. Теория и практика» (СГУПС, Новосибирск, 2017);
- всероссийской науч.-практ. конференции с международным участием «Химия. Экология. Урбанистика» (ПНИПУ, Пермь, 2018);
- научном семинаре в ФГБОУ ВО СГУПС (Новосибирск, 2018), ФГБОУ ВО ТГАСУ (Томск, 2018);
- научном семинаре в ФГБОУ ВО ПГУПС (Санкт-Петербург, 2018);
- научном семинаре в ФГБОУ ВО ТГАСУ (Томск, 2019).

Личный вклад автора состоит:

- в разработке конструкции свай с верхним обратным конусом;
- получении зависимостей для вычисления угла наклона поверхности свай при разных положениях границы промерзания грунта, зависимости положены в основу математических моделей работы свай в качестве фундамента припортового участка транспортного тоннеля;
- разработке инженерного метода расчета несущего элемента фундамента припортовых участков транспортных тоннелей в виде свай с верхним обратным конусом в условиях морозного пучения грунта;
- построении алгоритма компьютерной программы по определению геометрических параметров свай с верхним обратным конусом.

Публикации и изобретения

По теме диссертации опубликовано 16 работ, в том числе 7 – в ведущих научных рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки России, 2 – в изданиях, индексируемых международной базой данных Scopus. Новизна результатов подтверждена патентом на полезную модель и свидетельством на программу для ЭВМ.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (200 наименований), приложений. Результаты диссертационного исследования изложены на 134 страницах основного текста, включающего 41 рисунок, 22 таблицы.

Основное содержание работы

В первой главе показано, что значительная часть тоннелей России проходит по территориям с суровым климатом, для которых характерно сезонное промерзание и оттаивание грунтов. Однако, несмотря на сложность климатических и геологических условий, развитие транспортной сети в северных районах актуально для российской экономики. Это отмечали Ю. А. Быков, В. С. Воробьев, К. Л. Комаров, В. А. Копыленко, В. М. Круглов и другие. Влиянию морозного пучения подвержены припортальные участки тоннелей крупных магистралей, тоннели мелкого заложения городской транспортной инфраструктуры. Анализ опыта строительства тоннелей позволил обозначить пучение грунтов как одну из причин нарушения эксплуатационной пригодности сооружений. Повреждения тоннелей от морозного пучения рассмотрены в работах Р. Ш. Абжалимова, А. Г. Алексеева, В. А. Главатских, О. Р. Голли, В. А. Гурского, В. И. Заборницкого, В. Д. Карлова, В. С. Молчанова, Г. Н. Полянкина, А. К. Поправко, Б. Е. Славина, Ю. С. Фролова и других.

Существующие способы предотвращения негативного влияния морозного пучения систематизированы в два основных подхода: снижение воздействия сил пучения на конструкции; соответствующий расчет конструкций, способных без разрушения воспринимать силы морозного пучения, что неизбежно приводит к увеличению материалоемкости. В рамках первого подхода применяются инженерно-мелиоративные, химические, тепловые и конструктивные методы, которые часто приводят к увеличению затрат при проектировании, монтаже и эксплуатации. Требуется поиск решений в повышении эффективности элементов сооружений, без дополнительных мер. Одним из решений является снижение влияния морозного пучения за счет конфигурации фундаментов, в частности, применения свай с обратным уклоном поверхности.

Разработкой и экспериментальными исследованиями таких свай занимались П. А. Аббасов, А. О. Добрынин, Г. Б. Кульчицкий, Д. С. Репецкий, А. Б. Пономарев, В. С. Сажин, К. А. Хамидуллин, Б. С. Юшков, G. R. Newton, L. Domaschuk, X. Huang, Y. Sheng и другие авторы. Г. Б. Кульчицкий и К. А. Хамидуллин показали повышенную сопротивляемость касательным силам пучения ромбовидной сваи за счет уклона ее верхних граней. А. О. Добрынин, Д. С. Репецкий, Б. С. Юшков обосновали способность двуконусных свай снижать касательные силы морозного пучения посредством сил, возникающих в пределах верхнего обратного конуса. G. R. Newton обозначил устойчивость в мерзлом грунте сваи с верхней частью конической формы. X. Huang, Y. Sheng экспериментально показали уменьшение подъема касательными силами пучения свай с уширением в нижней части по сравнению со сваями постоянного сечения.

На основе экспериментальных исследований были разработаны методы расчета свай. Д. С. Репецкий и А. О. Добрынин выполнили аналитическую оценку снижения касательных сил пучения за счет уклона поверхности верхней части сваи для отдельных случаев одиночной двуконусной сваи и куста свай. В. С. Сажин предложил метод расчета свай любой формы, основанный на равенстве работ сил, выпучивающих и удерживающих сваю в грунте в условиях морозного пучения. П. А. Горбачев рассмотрел НДС элемента промерзающего

грунта в виде цилиндра с помещенной в него сваей. В. О. Орлов произвел аналитическую оценку устойчивости сваи постоянного сечения в пучинистом грунте. С. А. Кудрявцев, В. Н. Парамонов, Г. Н. Полянкин, В. С. Сажин, И. И. Сахаров, В. М. Улицкий, В. А. Жуковский для решения теплофизических задач по определению параметров пучинистого грунта вокруг свай и проверки аналитических решений использовали метод конечных элементов.

Существующие исследования морозного пучения отражены в работах П. Е. Аппака, Г. Бескова, В. Г. Березанцева, А. П. Боженовой, С. С. Вялова, М. Н. Гольдштейна, Б. И. Далматова, Б. В. Дерягина, Б. Н. Доставалова, Ю. Д. Дубнова, К. Е. Егерева, Э. Д. Ершова, В. Н. Ефименко, А. Л. Исакова, Н. А. Качинского, М. В. Киселева, А. А. Коновалова, В. А. Кудрявцева, С. А. Кудрявцева, А. Ф. Лебедева, Н. Д. Меренкова, А. Л. Невзорова, В. О. Орлова, Н. А. Перетрухина, Н. А. Пузакова, В. И. Пускова, А. М. Пчелинцева, Л. Т. Роман, Р. М. Саркисяна, М. И. Сумгина, З. Г. Тер-Матриросяна, А. Е. Федосова, В. В. Фурсова, Н. А. Цытовича, В. Г. Чеверева, В. А. Штукенберга, Е. П. Шушериной и др. Вопросы моделирования процесса морозного пучения грунта изложены в работах Е. С. Ашпиза, Б. И. Далматова, О. Р. Голли, С. Е. Гречищева, В. Д. Карлова, Г. Н. Полянкина и др. Исследования послужили предпосылками для определения силовых факторов морозного пучения в данной работе.

Таким образом, имеется обширный опыт аналитического и экспериментального обоснования эффективности свай с обратным уклоном поверхности в пучинистом грунте. Вместе с тем остается неразработанным метод расчета свай, позволяющий определять их геометрические параметры, требуемые для снижения влияния сил морозного пучения с учетом различных климатических и грунтовых условий эксплуатации припортальных участков транспортных тоннелей, пригодный для использования в инженерной практике.

Во второй главе выполнено математическое моделирование работы несущего элемента фундамента припортального участка транспортного тоннеля в виде сваи с верхним обратным конусом в пучинистом грунте. Рассматривается буровая цилиндрическая вертикальная свая трения с участком в виде усеченного конуса в верхней части. Свая эффективна в условиях морозного пучения грунта за счет своей конфигурации, обеспечивающей появление вертикальной составляющей сил морозного пучения, нормальных к наклонной боковой поверхности сваи. Эта составляющая направлена от дневной поверхности и частично компенсирует касательные силы пучения, вызывающие подъем сваи.

Предложены расчетные схемы сваи в грунте; приведены уравнения равновесия действующих сил, характеризующие равновесие сваи, т.е. отсутствие вертикальных перемещений (подъема); получены зависимости для определения угла конуса сваи для двух вариантов: 1) свая с верхним обратным конусом (рисунок 1); 2) свая с верхним обратным конусом в составе сооружения (рисунок 2). Учтены случаи расположения границы промерзания в пределах конуса сваи и цилиндрической части сваи.

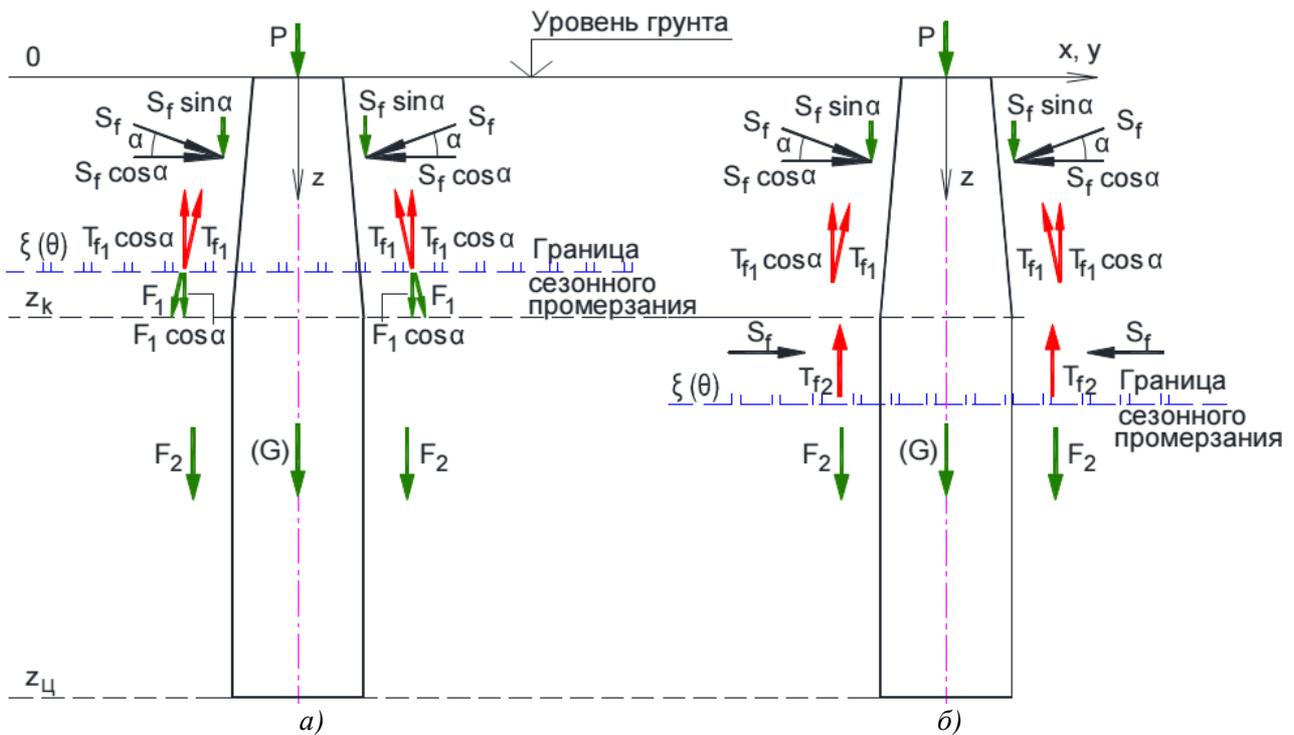


Рисунок 1 – Расчетные схемы сваи с верхним обратным конусом: *а* – граница промерзания в пределах конуса сваи; *б* – граница промерзания в пределах цилиндрической части сваи.

T_{f1}, T_{f2} – касательные силы морозного пучения грунта на конусном участке сваи и участке постоянного сечения соответственно;

S_f – силы морозного пучения, нормальные к боковой поверхности сваи;

$S_f \sin \alpha$ – составляющая нормальных сил морозного пучения в пределах конусного участка сваи, противодействующая касательным силам морозного пучения грунта;

F_1, F_2 – силы трения грунта на боковой поверхности сваи в талой зоне на конусном участке сваи и участке постоянного сечения соответственно;

P – сумма внешней постоянной нагрузки и собственного веса сваи (G).

1) Свая с верхним обратным конусом

Уравнения равновесия

Уравнения равновесия сваи с верхним обратным конусом в грунте при действии сил пучения имеют вид (см. рисунок 1, *а*, *б*):

$$\text{при } \xi < z_k \text{ (см. рисунок 1,а): } -P - S_f \sin \alpha + (T_{f1} - F_1) \cos \alpha - F_2 = 0, \quad (1)$$

$$\text{при } \xi > z_k \text{ (см. рисунок 1,б): } -P - S_f \sin \alpha + T_{f1} \cos \alpha + T_{f2} - F_2 = 0. \quad (2)$$

Интегральные по поверхности приложения силы (см. рисунок 1):

$$\begin{aligned} \text{При } \xi < z_k: \quad S_f &= \int_0^{\xi} \sigma_f 2\pi R_k(z) dz, & \text{При } \xi > z_k: \quad S_f &= \int_0^{z_k} \sigma_f 2\pi R_k(z) dz, \\ T_{f1} &= \int_0^{\xi} \tau_{f1} 2\pi R_k(z) dz, & T_{f1} &= \int_0^{z_k} \tau_{f1} 2\pi R_k(z) dz, \\ F_1 &= \int_{\xi}^{z_k} f_1 2\pi R_k(z) dz, & T_{f2} &= \int_{z_k}^{\xi} \tau_{f2} 2\pi R_u dz, \\ F_2 &= \int_{z_k}^{z_u} f_2 2\pi R_u dz. & F_2 &= \int_{\xi}^{z_u} f_2 2\pi R_u dz. \end{aligned}$$

где σ_f, τ_{fi}, f_i – нормальные и касательные напряжения морозного пучения, расчетное сопротивление грунта на боковой поверхности сваи в талой зоне соответственно; α – угол наклона поверхности конуса сваи.

$$\text{Площадь элементарной полоски конуса по периметру: } dF_k = 2\pi R_k(z) dz. \quad (3)$$

Выражение (3) с учетом переменности радиуса конуса (рисунок 3, а) запишется:

$$dF_k = 2\pi[R_u - \sin \alpha(z_k - z)]dz. \quad (4)$$

Площадь полоски цилиндрической части сваи по периметру: $dF_u = 2\pi R_u dz$. (5)

Для случаев на рисунке 1 с учетом приведенных выше выражений для интегральных сил и (3), (5), при $\cos \alpha \approx 1$ уравнения (1), (2) примут вид:

при $\xi < z_k$:
$$-P - \left(\int_0^{\xi} \sigma_f dF_k \right) \sin \alpha + \int_0^{\xi} \tau_{f1} dF_k - \int_{\xi}^{z_k} f_1 dF_k - \int_{z_k}^{z_u} f_2 dF_u = 0, \quad (6)$$

при $\xi > z_k$:
$$-P - \left(\int_0^{z_k} \sigma_f dF_k \right) \sin \alpha + \int_0^{z_k} \tau_{f1} dF_k + \int_{z_k}^{\xi} \tau_{f2} dF_u - \int_{\xi}^{z_u} f_2 dF_u = 0. \quad (7)$$

Зависимости для определения угла конуса сваи

На основе выражений (6), (7) с учетом (4) получены зависимости для угла наклона поверхности конуса сваи, обеспечивающего ее равновесие в пучинистом грунте, т.е. отсутствие вертикальных перемещений (подъема).

При глубине промерзания $\xi < z_k$ (см. рисунок 1, а):

$$\sigma_f(z_k \xi - 0,5\xi^2)(\sin \alpha)^2 + [-R_u \sigma_f \xi - \tau_{f1}(z_k \xi - 0,5\xi^2) + 0,5f_1(z_k - \xi)^2](\sin \alpha) + R_u[\tau_{f1}\xi - f_1(z_k - \xi) - f_2(z_u - z_k)] - 0,5\pi^{-1}P = 0. \quad (8)$$

При глубине промерзания $\xi > z_k$ (см. рисунок 1, б):

$$0,5\sigma_f z_k^2 (\sin \alpha)^2 + (-R_u \sigma_f z_k - 0,5\tau_{f1} z_k^2)(\sin \alpha) + R_u[\tau_{f1} z_k + \tau_{f2}(\xi - z_k) - f_2(z_u - \xi)] - 0,5\pi^{-1}P = 0. \quad (9)$$

Решение относительно величины $\sin \alpha$, позволяет получить угол наклона поверхности конуса сваи « α ».

2) Свая с верхним обратным конусом в составе сооружения

Уравнения равновесия

Аналогично случаям на рисунке 1 с учетом изменения положения характерных сечений сваи для случаев на рисунке 2 уравнения равновесия (1), (2) примут вид:

при $z_0 < \xi < z_k$ (см. рисунок 2,а):

$$-P - \left(\int_{z_0}^{\xi} \sigma_f dF_k \right) \sin \alpha + \int_{z_0}^{\xi} \tau_{f1} dF_k - \int_{\xi}^{z_k} f_1 dF_k - \int_{z_k}^{z_u} f_2 dF_u = 0, \quad (10)$$

при $z_0 < z_k < \xi$ (см. рисунок 2,б):

$$-P - \left(\int_{z_0}^{z_k} \sigma_f dF_k \right) \sin \alpha + \int_{z_0}^{z_k} \tau_{f1} dF_k + \int_{z_k}^{\xi} \tau_{f2} dF_u - \int_{\xi}^{z_u} f_2 dF_u = 0. \quad (11)$$

Зависимости для определения угла конуса сваи

На основе выражений (10), (11) с учетом площади полоски конуса (4) (рисунок 3, б) получены зависимости для угла наклона поверхности конуса сваи.

При глубине промерзания $z_0 < \xi < z_k$ (см. рисунок 2, а):

$$\sigma_f(z_k \xi - z_k z_0 - 0,5\xi^2 + 0,5z_0^2)(\sin \alpha)^2 + [-R_u \sigma_f(\xi - z_0) - \tau_{f1}(z_k \xi - z_k z_0 - 0,5\xi^2 + 0,5z_0^2) + 0,5f_1(z_k - \xi)^2](\sin \alpha) + R_u[\tau_{f1}(\xi - z_0) - f_1(z_k - \xi) - f_2(z_u - z_k)] - 0,5\pi^{-1}P = 0. \quad (12)$$

При глубине промерзания $z_0 < z_k < \xi$ (см. рисунок 2,б):

$$\begin{aligned}
& 0,5\sigma_f(z_k - z_0)^2(\sin \alpha)^2 + \\
& + [-R_y\sigma_f(z_k - z_0) - 0,5\tau_{f1}(z_k - z_0)^2](\sin \alpha) + \\
& + R_y[\tau_{f1}(z_k - z_0) + \tau_{f2}(\xi - z_k) - f_2(z_y - \xi)] - 0,5\pi^{-1}P = 0.
\end{aligned}
\tag{13}$$

Решение относительно величины $\sin \alpha$, позволяет получить угол наклона поверхности конуса сваи « α ».

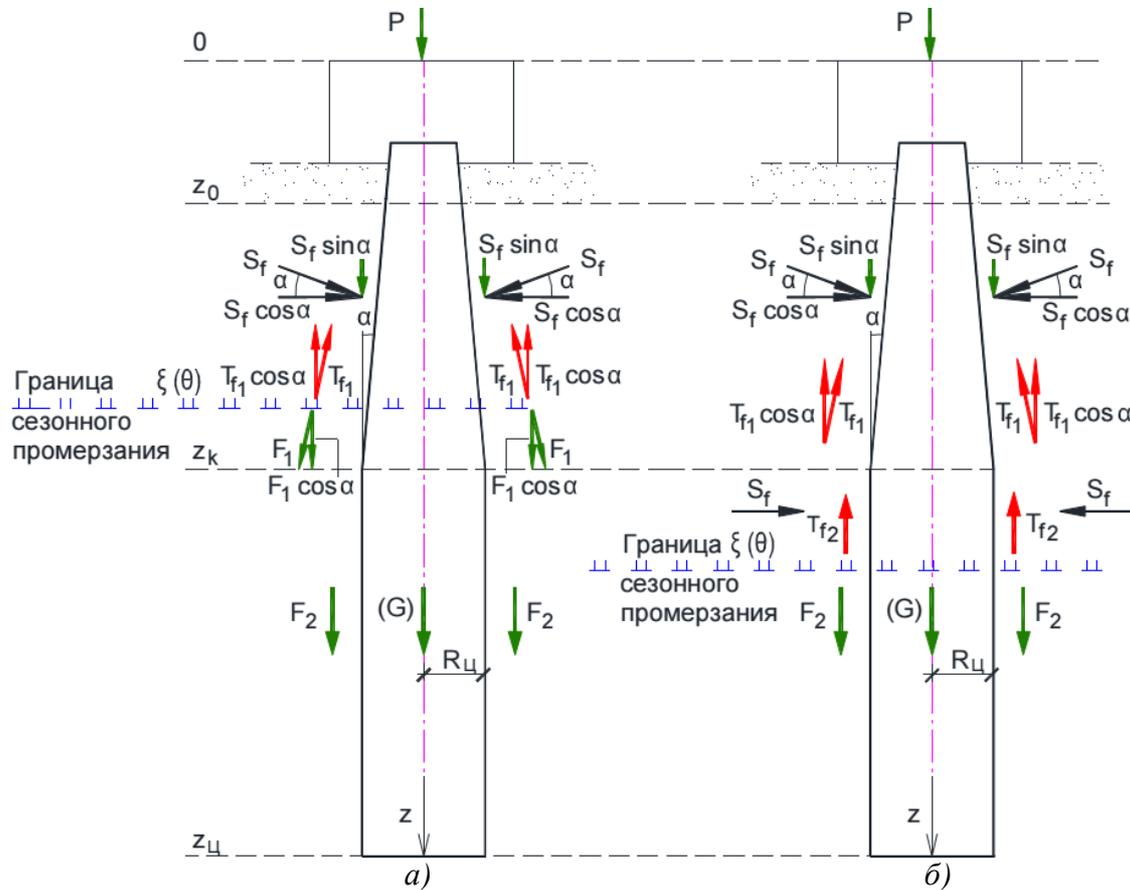


Рисунок 2 – Расчетные схемы сваи с верхним обратным конусом в составе сооружения: *a* – граница промерзания в пределах конуса сваи; *б* – граница промерзания в пределах цилиндрической части сваи (обозначения те же, что на рисунке 1).

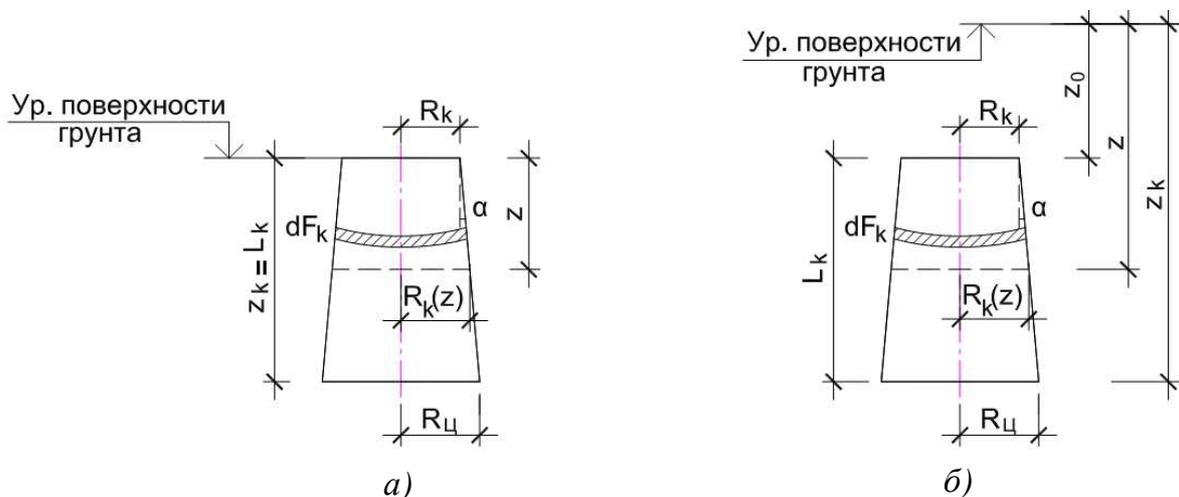


Рисунок 3 – Схемы к определению промежуточного радиуса конуса сваи: *a* – для свай на рисунке 1; *б* – для свай на рисунке 2.

В третьей главе для аналитической оценки эффективности фундамента тоннеля в пучинистом грунте определено положение границы промерзания, получены выражения для нормальных и касательных напряжений морозного пучения. Составлены таблицы данных по используемым характеристикам грунтов. Приняты допущения: грунт в пределах длины сваи однородный и модуль деформации грунта постоянный, температура промерзающего слоя изменяется по линейному закону. Область моделирования имеет подвижную границу, определяемую глубиной промерзания грунта. Для переменной температуры на поверхности, с учетом осреднения на некоторых интервалах, на основе условия Стефана положение границы промерзания определяется как:

$$\xi_{i+1} = \left[\xi_i^2 - (2\lambda_M t_{z(i+1)} / Q_\phi)(\theta_{i+1} - \theta_i) \right]^{0,5}, \quad (14)$$

где i – номера интервалов, на которые разбивается рассматриваемый период $i = 1, 2, 3$ и т.д.; θ – время промерзания; t_z – температура поверхности грунта; λ_M – коэффициент теплопроводности мерзлого грунта; Q_ϕ – удельная теплота фазовых переходов.

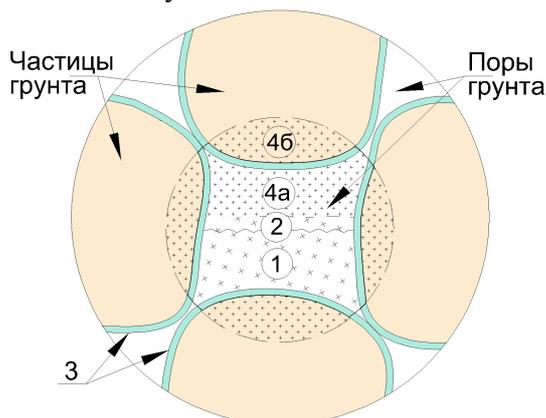
С учетом изменения температуры на поверхности и положения границы промерзания величина отрицательной температуры грунта на глубине z :

$$t_M(z, \theta, \xi) = t_z(\theta) - (t_z(\theta) / \xi(\theta))z. \quad (15)$$

Нормальные напряжения морозного пучения определяются в открытой системе. Пучение происходит при превышении суммарного объема замерзшей и незамерзшей воды над объемом пор в грунте, что вызывает увеличение объема грунта и развитие нормальных напряжений морозного пучения σ_f при контакте расширяющегося грунта с поверхностями фундамента. Таким образом, нормальные напряжения пучения являются, с одной стороны, функцией пористости грунта, а с другой – функцией «избыточной влажности», приводящей к образованию «избыточного льда», превышающего объем пор.

$$\sigma_f = k_{ан} \sigma_{изб.льда}, \quad (16)$$

где $\sigma_{изб.льда}$ – давление «избыточного» льда; $k_{ан}$ – коэффициент анизотропии, учитывающий направление сил пучения.



- 1 – незамерзшая пленочная вода;
- 2 – приращение замёрзшей поровой влаги на 9%;
- 3 – незамерзшая пленочная вода;
- 4а и 4б – замёрзшая миграционная влага с учетом приращения 9% (4а – в свободном объеме пор, 4б – свыше объема пор)

Рисунок 4 – Фазовые состояния воды в промерзающем грунте

Давление «избыточного льда» $\sigma_{изб.льда}$ (4б на рисунке 4) отражает разность давления льда, образующегося при кристаллизации всей миграционной влаги (4а, 4б на рисунке 4) и в свободном объеме пор (4а на рисунке 4). Выражение для давления «избыточного льда» имеет вид:

$$\sigma_{изб.льда} = \sigma_{льда}^{мigr} - \sigma_{льда}^{мigr} e^{(1 - w_w - 1,09w)}, \quad (17)$$

где w – природная влажность грунта; w_w – влажность по незамерзшей воде; e – коэффициент пористости грунта.

После преобразования имеем:

$$\sigma_{изб.льда} = \sigma_{льда}^{мигр} [1 - e(1 - w_w - 1,09w)] \quad (18)$$

Напряжения в сечении грунта с координатой z :

$$\sigma_{льда}^{мигр} = E_M h_{пуч.} / z, \quad (19)$$

где E_M – модуль деформации мерзлого грунта; $h_{пуч.}$ – абсолютная деформация пучения мерзлого грунта за счет миграции влаги, которая согласно А. Л. Невзорову составляет

$$h_{пуч.} = 1,09 \cdot SP \cdot \theta \cdot grad t, \quad (20)$$

здесь SP – сегрегационный потенциал грунта, $grad t$ – градиент температуры.

Выражение (16) для нормального напряжения пучения без учета усадки, как функция избыточной влажности, приводящей к образованию «избыточного льда», превышающего объем пор грунта, с учетом (17-20) запишется:

$$\sigma_f = E_M \frac{1,09 \cdot SP \cdot \theta \cdot grad t}{z} \cdot \left[1 - e \left(1 - w_w \frac{\rho_d}{\rho_w} - 1,09w \frac{\rho_d}{\rho_w} \right) \right] k_{ан}, \quad (21)$$

где ρ_d – плотность сухого грунта; ρ_w – плотность свободной воды.

Предпосылки для определения **касательных напряжений пучения** следующие: неоднородность взаимодействующих сред – поверхности сваи и грунта; использование закона Кулона; стадийность развития касательных напряжений; влияние нормальных горизонтальных напряжений пучения на развитие касательных напряжений; возникновение напряжений и сил сдвига, вызванных вспучивающимся грунтом, в прилегающем к свае пограничном слое.

Предложено *два подхода* к нахождению касательных напряжений пучения. Согласно *первому подходу* напряжения определяются из условия сцепления частиц пограничного слоя мерзлого грунта. Принято, что в единичном объеме мерзлого грунта содержатся лед в количестве $1,09w$ и грунт в количестве $(1-0,9w)$. Это позволяет установить связь касательных напряжений морозного пучения с влажностью грунта и сцеплением частиц мерзлого грунта:

$$\tau_f = c_m + p_{cp} tg \varphi, \quad (22)$$

где

$$c_m = c_{cp} (1 - 1,09w) + c_l 1,09w, \quad (23)$$

здесь c_m – удельное сцепление мерзлого грунта; p_{cp} – среднее давление грунта на боковой поверхности сваи; φ – угол внутреннего трения мерзлого грунта; c_{cp} – удельное сцепление грунта, c_l – сопротивление льда срезу.

Тогда выражение для касательных напряжений на глубине z примет вид:

$$\tau_f = [c_{cp} - 1,09w(c_{cp} - c_l)] + \eta_{гр} \gamma_{гр} z (tg \varphi_{гр}) (1 - 1,09w) + \eta_l \gamma_l z (tg \varphi_l) 1,09w, \quad (24)$$

где $\eta_{гр}$, η_l – коэффициенты бокового давления грунта и льда соответственно; $\gamma_{гр}$, γ_l – объемный вес грунта и льда соответственно; $\varphi_{гр}$, φ_l – углы внутреннего трения грунта и льда соответственно.

После преобразований выражение (24) запишется:

$$\tau_f = [c_{ep} - 1,09(w + (SP \cdot \theta \cdot (\text{grad } t) \cdot k_{an}/z)(c_{ep} - c_n))] + \eta_{ep} \gamma_{ep} z (\text{tg } \varphi_{ep}) (1 - 1,09(w + (SP \cdot \theta \cdot (\text{grad } t) \cdot k_{an}/z))) + \eta_n \gamma_n z (\text{tg } \varphi_n) 1,09(w + (SP \cdot \theta \cdot (\text{grad } t) \cdot k_{an}/z)). \quad (25)$$

Согласно *второму подходу* касательные напряжения морозного пучения определяются как результат сжатия от нормального давления вспучивающегося грунта на боковую поверхность сваи, контактирующую с мерзлым грунтом. Касательные напряжения с использованием закона Кулона, записаны в виде:

$$\tau_f = c_m + \sigma_f \text{tg } \phi. \quad (26)$$

С учетом (21) выражение для касательных напряжений (26) примет вид:

$$\tau_f = c_m + \{E_M (1,09 SP \cdot \theta \cdot (\text{grad } t)/z) [1 - e(1 - w_w \rho_d / \rho_w - 1,09 w \rho_d / \rho_w)] k_{an}\} \text{tg } \phi. \quad (27)$$

В таблицах 1 и 2 приведены примеры значений напряжений пучения, вычисленные по полученным формулам, на рисунке 5 – эпюры напряжений.

Таблица 1 – Нормальные напряжения морозного пучения, кН/м²

Глубина определения напряжений, м	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март
	$\xi=0,85$	$\xi=1,49$	$\xi=2,02$	$\xi=2,36$	$\xi=2,48$
z = 0,2	99,3	217,1	324	412,9	435,4
z = 0,5	39,7	86,8	129,5	163	174,2
z = 0,85	23,4	51,1	76,2	96,1	102,4
z = 1,0		43,4	64,8	81,5	87,1
z = 1,49		30	43,5	53,6	57,4
z = 1,7			38,9	48,1	51,4
z = 2,02			32	39,6	42,3
z = 2,36				29,7	36,2
z = 2,48					34,5

Таблица 2 – Касательные напряжения морозного пучения, кН/м²

Глубина определения напряжений, м	Ноябрь		Декабрь		Январь		Февраль		Март	
	№ формулы		№ формулы		№ формулы		№ формулы		№ формулы	
	(25)	(27)	(25)	(27)	(25)	(27)	(25)	(27)	(25)	(27)
z = 0,2	165,4	179,2	186,7	219,7	208,4	256,5	222,3	287	227,9	297,8
z = 0,5	156,7	158,7	165,8	174,9	174,1	189,6	179,8	201	181,7	204,9
z = 0,85	156,7	153,1	161,7	162,6	166,9	171,2	170	178	171,6	180,2
z = 1,0			161,6	160	166,3	167,3	168,7	173	169,7	175
z = 1,49			162,8		165,8	160,0	166,5	163,4	168,5	167,8
z = 1,7					166,4	158,4	167,6	161,7	169,0	162,7
z = 2,02					167,8	156,0	169,3	158,6	169,9	159,6
z = 2,36							171,0	155,2	171,5	157,5
z = 2,48									172,3	156,9

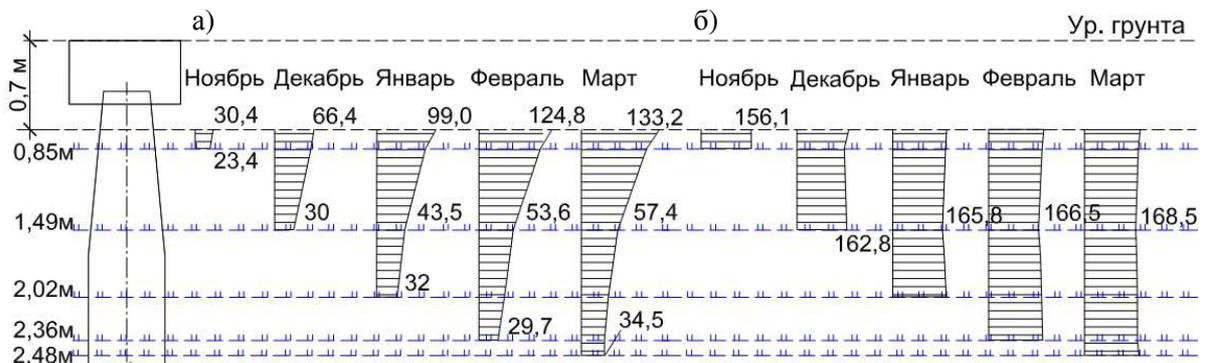


Рисунок 5 – Эпюры напряжений морозного пучения на боковой поверхности сваи: а – нормальные горизонтальные напряжения; б – касательные напряжения

В четвертой главе с использованием полученных решений построены математические модели работы несущего элемента фундамента припортального участка транспортного тоннеля в виде сваи с верхним обратным конусом в пучинистом грунте. Модели представляют собой математическую запись равновесия сил, действующих на сваю в пучинистом грунте, и сводятся к уравнениям второго порядка относительно синуса угла наклона поверхности сваи. Разработан инженерный метод расчета сваи, включающий автоматизированный расчетный модуль для определения ее геометрических параметров. Показаны перспективы практического применения метода на примере припортального участка транспортного тоннеля в условиях Тюменской области. Результаты расчета представлены в виде таблиц и графиков, приведенных в тексте диссертации.

Математическая модель работы сваи с верхним обратным конусом в пучинистом грунте (см. рисунок 1) представляет собой систему уравнений:

$$\text{При } \xi < z_k: -P - \left(\int_0^{\xi} \sigma_f dF_k \right) \sin \alpha + \int_0^{\xi} \tau_{f1} dF_k - \int_{\xi}^{z_k} f_1 dF_k - \int_{z_k}^{z_u} f_2 dF_u = 0,$$

$$\text{При } \xi > z_k: -P - \left(\int_0^{z_k} \sigma_f dF_k \right) \sin \alpha + \int_0^{z_k} \tau_{f1} dF_k + \int_{z_k}^{\xi} \tau_{f2} dF_u - \int_{\xi}^{z_u} f_2 dF_u = 0,$$

$$dF_k = 2\pi[R_u - \sin \alpha(z_k - z)]dz,$$

$$dF_u = 2\pi R_u dz,$$

При $\xi < z_k$:

$$\sigma_f(z_k \xi - 0,5\xi^2)(\sin \alpha)^2 + [-R_u \sigma_f \xi - \tau_{f1}(z_k \xi - 0,5\xi^2) + 0,5f_1(z_k - \xi)^2](\sin \alpha) + R_u[\tau_{f1} \xi - f_1(z_k - \xi) - f_2(z_u - z_k)] - 0,5\pi^{-1}P = 0.$$

При $\xi > z_k$:

$$0,5\sigma_f z_k^2 (\sin \alpha)^2 + (-R_u \sigma_f z_k - 0,5\tau_{f1} z_k^2)(\sin \alpha) + R_u[\tau_{f1} z_k + \tau_{f2}(\xi - z_k) - f_2(z_u - \xi)] - 0,5\pi^{-1}P = 0.$$

$$\sigma_f = E_M \frac{1,09SP \theta \text{ grad } t}{z} \left[1 - e \left(1 - w_w \frac{\rho_d}{\rho_w} - 1,09w \frac{\rho_d}{\rho_w} \right) \right] k_{ан},$$

$$\tau_f = [c_{ep} - 1,09(w + (SP \cdot \theta \cdot (\text{grad } t) \cdot k_{ан}/z)(c_{ep} - c_l)] + \eta_{ep} \gamma_{ep} z (\text{tg } \varphi_{ep}) (1 - 1,09(w + (SP \cdot \theta \cdot (\text{grad } t) \cdot k_{ан}/z))) + \eta_l \gamma_l z (\text{tg } \varphi_l) 1,09(w + (SP \cdot \theta \cdot (\text{grad } t) \cdot k_{ан}/z)),$$

$$\xi_{i+1} = [\xi_i^2 - (2\lambda_m t_{3(i+1)}/Q_\phi)(\theta_{i+1} - \theta_i)]^{0,5}, \quad Q_\phi = Q_{об}(w - w_w),$$

$$t_M(z, \theta, \xi) = t_3(\theta) - (t_3(\theta)/\xi(\theta))z.$$

Математическая модель работы сваи с верхним обратным конусом в составе сооружения (см. рисунок 2), полученная с учетом изменения положения характерных сечений сваи, представляет собой систему уравнений:

$$\text{При } z_0 < \xi < z_k: -P - \left(\int_{z_0}^{\xi} \sigma_f dF_k \right) \sin \alpha + \int_{z_0}^{\xi} \tau_{f1} dF_k - \int_{\xi}^{z_k} f_1 dF_k - \int_{z_k}^{z_u} f_2 dF_u = 0,$$

$$\text{При } z_0 < z_k < \xi: -P - \left(\int_{z_0}^{z_k} \sigma_f dF_k \right) \sin \alpha + \int_{z_0}^{z_k} \tau_{f1} dF_k + \int_{z_k}^{\xi} \tau_{f2} dF_u - \int_{\xi}^{z_u} f_2 dF_u = 0,$$

$$dF_k = 2\pi[R_y - \sin \alpha(z_k - z)]dz, \quad dF_u = 2\pi R_u dz,$$

При $z_0 < \xi < z_k$:

$$\begin{aligned} & \sigma_f(z_k \xi - z_k z_0 - 0,5\xi^2 + 0,5z_0^2)(\sin \alpha)^2 + \\ & + [-R_u \sigma_f(\xi - z_0) - \tau_{f1}(z_k \xi - z_k z_0 - 0,5\xi^2 + 0,5z_0^2) + 0,5f_1(z_k - \xi)^2](\sin \alpha) + \\ & + R_u[\tau_{f1}(\xi - z_0) - f_1(z_k - \xi) - f_2(z_u - z_k)] - 0,5\pi^{-1}P = 0. \end{aligned}$$

При $z_0 < z_k < \xi$:

$$\begin{aligned} & 0,5\sigma_f(z_k - z_0)^2(\sin \alpha)^2 + \\ & + [-R_u \sigma_f(z_k - z_0) - 0,5\tau_{f1}(z_k - z_0)^2](\sin \alpha) + \\ & + R_u[\tau_{f1}(z_k - z_0) + \tau_{f2}(\xi - z_k) - f_2(z_u - \xi)] - 0,5\pi^{-1}P = 0. \end{aligned}$$

$$\sigma_f = E_M (1,09SP \theta \text{ grad } t/z) [1 - e(1 - w_w \rho_d / \rho_w - 1,09w \rho_d / \rho_w)] k_{an},$$

$$\begin{aligned} \tau_f &= [c_{zp} - 1,09(w + (SP \cdot \theta \cdot \text{grad } t \cdot k_{an}/z)(c_{zp} - c_l))] \\ &+ \eta_{zp} \gamma_{zp} z (tg \varphi_{zp}) (1 - 1,09(w + (SP \cdot \theta \cdot \text{grad } t \cdot k_{an}/z))) + \\ &+ \eta_l \gamma_l z (tg \varphi_l) 1,09(w + (SP \cdot \theta \cdot \text{grad } t \cdot k_{an}/z)), \end{aligned}$$

$$\xi_{i+1} = [\xi_i^2 - (2\lambda_m t_{z(i+1)} / Q_\phi)(\theta_{i+1} - \theta_i)]^{0,5}, \quad Q_\phi = Q_{об}(w - w_w).$$

$$t_M(z, \theta, \xi) = t_3(\theta) - (t_3(\theta) / \xi(\theta))z.$$

Инженерный метод расчета свай припортового участка транспортного тоннеля. Алгоритм метода расчета показан на рисунке 7. Алгоритм автоматизированного расчетного модуля и графическая визуализация в 3D - модели в графическом комплексе *AutoCAD* показаны на рисунке 6. Ввод данных и расчет выполнены на языке программирования C#.

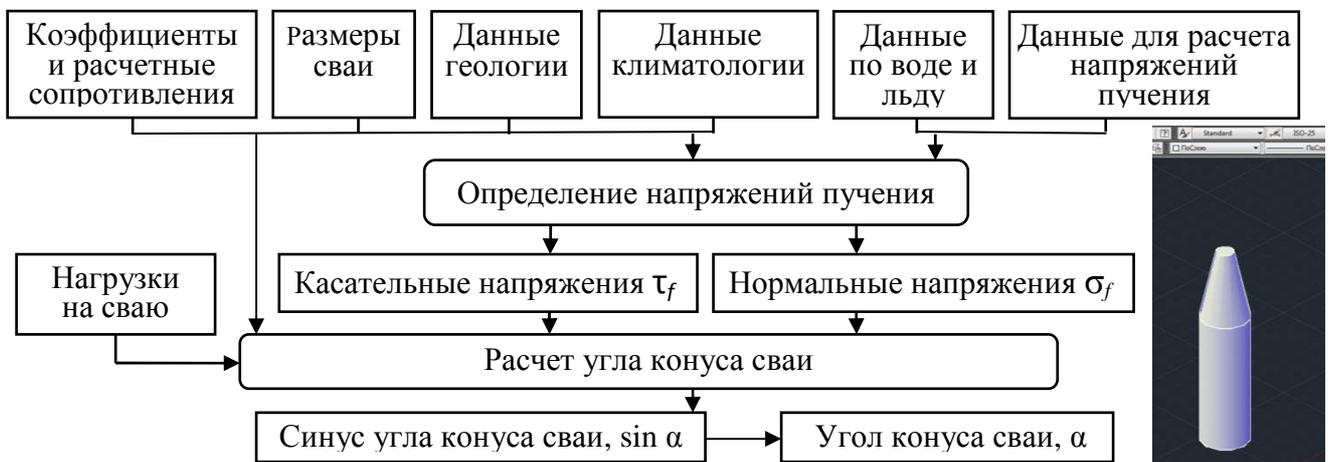


Рисунок 6 – Алгоритм автоматизированного расчета угла конуса свай и графическая визуализация свай

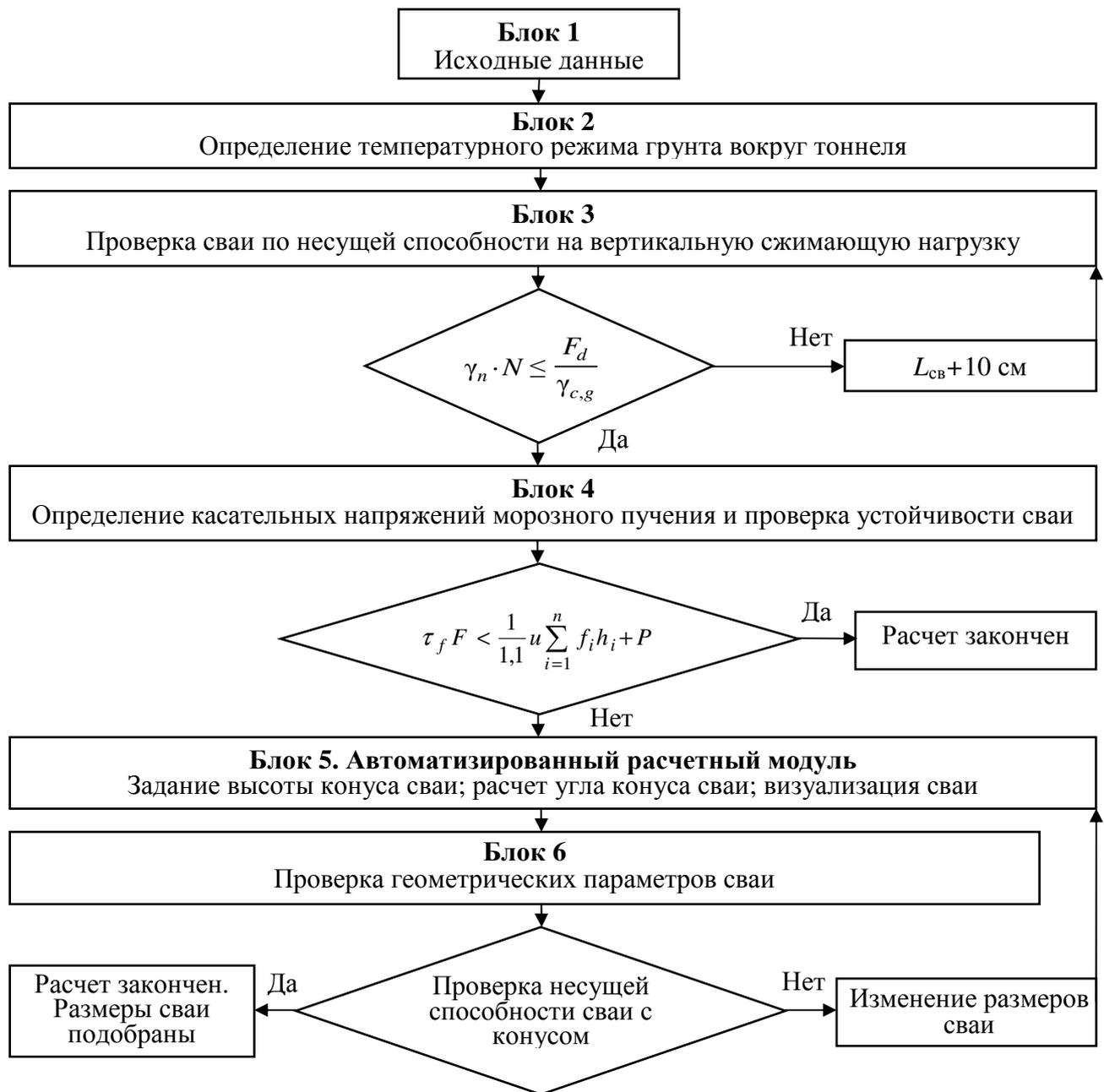


Рисунок 7 – Алгоритм расчета сваи с верхним обратным конусом

Метод предполагает решение квадратичных уравнений относительно синуса угла конуса сваи, полученных из условия равновесия сил, действующих на сваю в пучинистом грунте; определение геометрии сваи; вычисление напряжений и сил морозного пучения (в отсутствие опытных данных) при помощи разработанных аналитических зависимостей; проверку полученной сваи. Инженерный подход метода заключается в использовании разработанного автоматизированного расчетного модуля, в применении составленных таблиц данных по характеристикам грунтов, а также результатов стандартных геологических изысканий.

С применением разработанного метода выполнен *пример расчета сваи с верхним обратным конусом для припортального участка транспортного тоннеля* в климатических и геологических условиях Красноселькупского

района Ямало-Ненецкого автономного округа Тюменской области. На основании изысканий определены: внутренняя температура в тоннеле, радиус теплового влияния тоннеля на окружающий грунт, температуры грунта вокруг сооружения, напряжения и силы морозного пучения грунта, геометрические параметры свай. Температуры грунта в характерных точках (M , $M_0 - M_3$), радиус влияния тоннеля на грунт, положение границы промерзания показаны на рисунке 8.

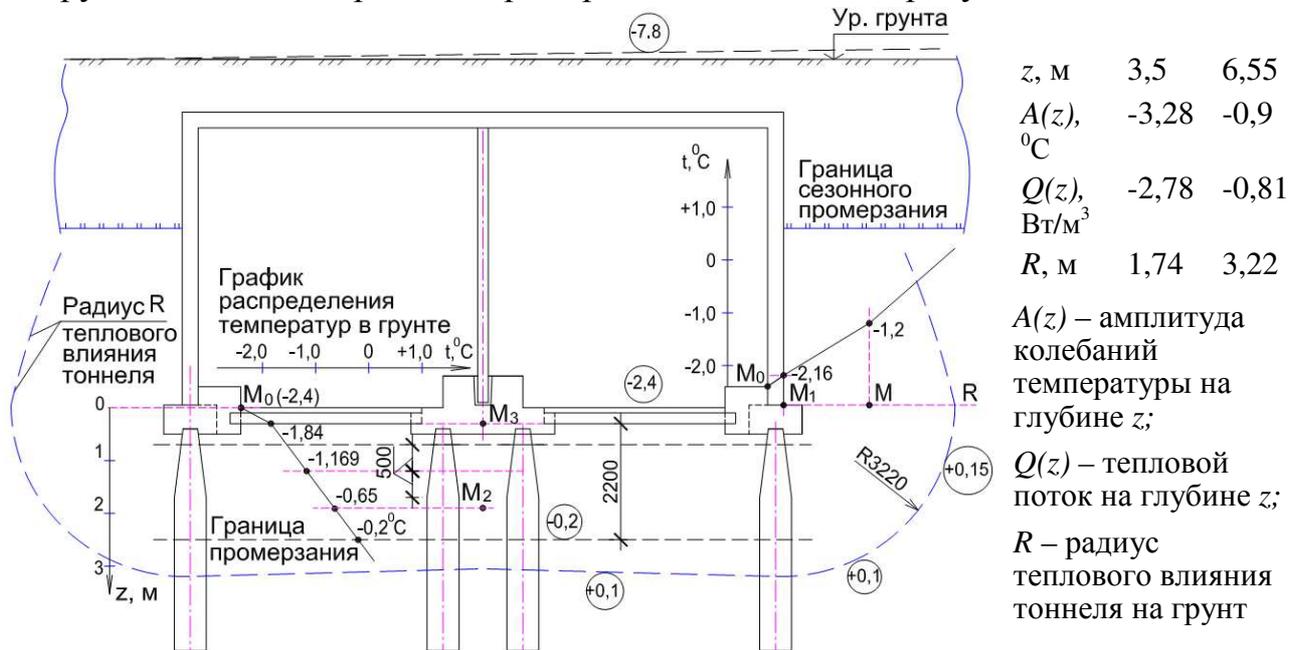


Рисунок 8 – Схема к определению температурного режима грунта вокруг тоннеля

Таблица 3 – Показатели свай по вариантам

Вид свай	Номер варианта	Длина свай, м	Длина конуса, L_k , м	Диаметр цилиндрической части свай, $D_{ц}$, м	Отношение длины конуса к диаметру цилиндрической части свай, $L_k/D_{ц}$	Диаметр конуса в месте заделки свай в ростверк, м	Угол конуса свай, град.	Объем свай, м ³	Удерживающая составляющая нормальных сил пучения, кН	Несущая способность свай на выпучивание, кН	Касательные силы пучения, кН
Свая без конуса	1	5,1	0	0,6	–	–	0	1,44	–	315,1	315,4
Свая с конусом	2	4,1	1,3	0,6	2,17	0,338	5	1,0	6,42	273,5	272,1
	3			0,64	2,03	0,264	7	1,094	8,85	283,3	274,6
	4			0,7	1,86	0,225	9	1,274	11,82	298,7	289,8
	5		1,2	0,6	2	0,355	5	1,019	10,8	278,4	278,6
	6			0,64	1,875	0,289	7	1,12	15,0	290,1	283,9
	7			0,7	1,714	0,257	9	1,31	20,15	305,9	301,4
	8		1,1	0,6	1,83	0,327	6	1,017	12,23	279,7	278,2
	9			0,64	1,72	0,287	8	1,125	16,54	292	288,3
	10			0,7	1,57	0,242	10	1,32	21,45	309,5	305,7
	11		1,0	0,6	1,67	0,299	7	1,02	13,6	280,7	278,9
	12			0,64	1,56	0,26	9	1,135	17,73	293,3	290,3
	13			0,7	1,43	0,19	12	1,323	24,07	312,1	305,8
	14		0,9	0,6	1,5	0,301	8	1,0	14,68	282,8	283,2
	15			0,64	1,41	0,2	11	1,103	19,63	295,2	289,3
	16			0,7	1,29	0,11	15	1,283	26,96	315	304,6
	17		0,6	0,6	1,0	0,17	15	1,04	21,03	289	288,8
	18			0,7	0,857	0	30		32,5		

Произведен расчет углов наклона поверхности для конусов длиной 1,3; 1,2; 1,0; 0,9 и 0,6 м при диаметрах цилиндрической части сваи 0,6; 0,64 и 0,7 м. Минимальный диаметр сваи в месте заделки в ростверк принят 300 мм.

Результаты расчета показаны в таблице 3. Из полученных вариантов определены размеры свай, отвечающие принятым конструктивным требованиям и наименьшей материалоемкости – это варианты 2 и 14. Нормальные боковые напряжения морозного пучения грунта вычислены по формуле (21). Касательные напряжения определены по результатам инженерно-геологических изысканий.

В пятой главе выполнено сопоставление результатов расчета разработанным методом с существующими экспериментальными данными. При помощи разработанного метода определены углы конусов свай, размеры и условия работы которых взяты в соответствии с имеющимся экспериментом. В эксперименте определялись вертикальные перемещения свай (подъем), характеризующие связь геометрических параметров со степенью обеспечения равновесия свай в условиях морозного пучения грунта. Сопоставление результатов расчета с экспериментом показало, что равновесие рассчитываемых свай обеспечивается практически теми же углами наклона поверхности конусов, что и экспериментальных свай, с отклонениями, показанными в таблице 4.

Таблица 4 – Сопоставление аналитического расчета с экспериментальными данными

Модель сваи, расчет, эксперимент	Угол наклона поверхности конуса сваи, град, эксперимент	Угол наклона поверхности конуса сваи, град, расчет	Отклонение расчетных значений углов от экспериментальных, %	Вертикальные перемещения свай, мм, эксперимент
№ 1	6,34	7,46	+17,66	1,2
№ 2	5,29	5,46	+3,21	0,85
№ 3	4,54	4,17	-8,15	0,55
№ 4	3,97	3,43	-13,6	0,4

Поскольку расчетные углы конусов получены из условия равновесия, отклонения их значений от экспериментальных углов показывают, насколько экспериментальные сваи обеспечивают это равновесие, что определено по перемещениям экспериментальных свай. Для свай № 1 и 2 (таблица 4), где расчетом получен больший угол, чем задан в эксперименте (отклонение в большую сторону), вертикальные перемещения экспериментальных свай максимальные. Это означает что угла, заданного в эксперименте, недостаточно для обеспечения равновесия свай. Для свай № 3 и 4 (таблица 4), где расчетом получен угол, меньший, чем задан в эксперименте, перемещения экспериментальных свай минимальные, следовательно, и заданный в эксперименте угол в большей степени обеспечивает равновесие свай.

Достоверность рассматриваемых расчетных моделей и метода расчета подтверждается соответствием полученных результатов с опубликованными экспериментальными данными.

Проверка аналитического решения по определению геометрии сваи с верхним обратным конусом методом конечных элементов в ПК «Plaxis» подтвердила уменьшение касательных сил пучения для свай с конусом (модели № 2 и 3) в сравнении со свай постоянной сечения (модель № 1). Результаты отражены на рисунке 9 и в таблице 5. Как видно, аналитический расчет дает результаты с запасом, то есть обеспечивает большую надежность.

Таблица 5 – Результаты аналитического и численного расчетов

Модель сваи	Уменьшение касательных сил пучения для свай с конусом в сравнении со свай постоянной сечения, %	
	Аналитический расчет	ПК «Plaxis»
Модель № 2 (вариант 2, таблица 3)	15,8	20,8
Модель № 3 (вариант 14, таблица 3)	14,9	22,0

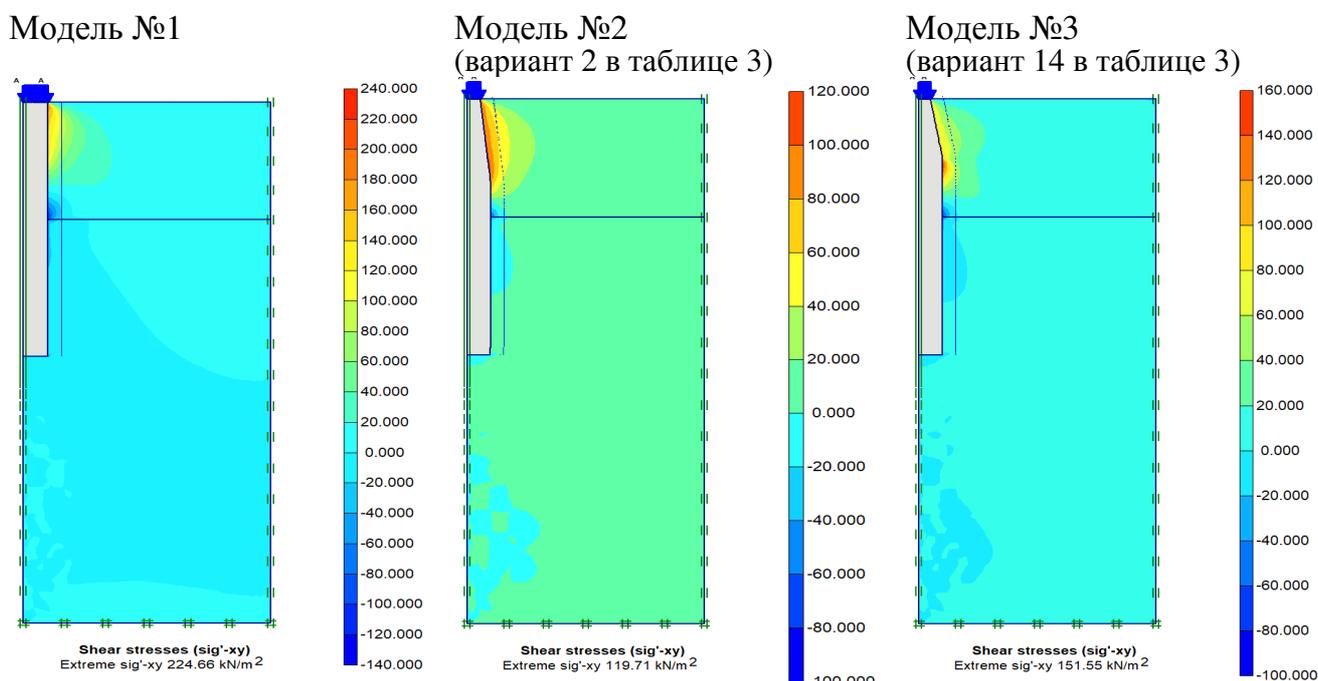


Рисунок 9 – Касательные напряжения пучения, полученные в ПК «Plaxis»

Технико-экономическим расчетом обоснована перспективность применения свай с верхним обратным конусом в практике проектирования фундаментов припортовых участков транспортных тоннелей в части получения экономического эффекта и уменьшения материалоемкости фундаментов. Расчет выполнен для трех вариантов цилиндрических свай: 1) свая постоянной сечения; 2) свая с верхним обратным конусом; 3) свая постоянной сечения с утеплением грунта. За базовый принят 1-й вариант. Экономический эффект получен от применения свай с конусом и по сравнению с базовым вариантом без учета материалов составляет 6 709 766 руб. в год, в пересчете на одну сваю – 1160 руб. Экономия материалов на одну сваю – 2140 руб.

Направление дальнейших исследований. Предлагаемая методика расчета может быть развита на случай использования при проектировании мостовых сооружений, в частности, при расчете фундаментов пойменных опор мостов. Это позволит существенно уменьшить глубину заложения таких фундаментов и тем

самым снизить материалоемкость и стоимость конструкций. В отдельных случаях эта методика может быть распространена и на береговые опоры. При этом также есть возможность применить для фундаментов опор сваю с верхним обратным конусом с вычисляемыми геометрическими параметрами, обеспечивающими снижение касательных сил морозного пучения грунта и уменьшение длины свай.

Заключение

1. Построена модель работы несущего элемента фундамента припортального участка транспортного тоннеля, реализованного в виде сваи с верхним обратным конусом, в пучинистом грунте. Модель представляет собой математическую запись условия равновесия сил, действующих на сваю, с учетом особенностей конструкций тоннеля, температурного режима грунта, расчетных или эмпирических величин сил морозного пучения грунта. Полученные интегральные уравнения равновесия сил устанавливают связь геометрических параметров сваи с величинами и соотношением этих сил, что позволяет определить параметры сваи.

2. На основе равновесия действующих сил получены алгебраические уравнения второго порядка для определения угла верхнего обратного конуса сваи с учетом переменности сечения сваи применительно к двум основным случаям положения границы промерзания относительно сваи.

3. Разработан инженерный метод определения геометрических параметров сваи с верхним обратным конусом как основного элемента фундамента припортального участка транспортного тоннеля в заданных климатических и грунтовых условиях. Инженерный подход метода заключается в применении автоматизированного расчетного модуля. Расчеты разработанным методом для условий Тюменской области, показали снижение касательных сил пучения на 15 – 16% и уменьшение материалоемкости сваи на 29 – 31% за счет работы конуса сваи. Сопоставление результатов расчета разработанным методом с существующими экспериментальными данными показало их соответствие. Отклонения расчетных углов конуса сваи от экспериментальных в большую сторону от 3,2 до 17,7 % показывают, что равновесие экспериментальных свай не обеспечивается. Это подтверждается значительными вертикальными перемещениями свай. Отклонения расчетных углов в меньшую сторону от 8,2 до 13,6 % характеризуют равновесие экспериментальных свай в грунте, что видно по их малым перемещениям.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИСЕРТАЦИИ в ведущих научных рецензируемых периодических изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:

1. Юшков, Б. С. Рациональные подходы к проектированию заглубленных транспортных тоннелей в условиях морозного пучения грунтов / Б. С. Юшков, О. В. Третьякова, С. А. Ребров // Дороги и мосты. - 2015. - № 2. - С. 53-62.

2. Третьякова, О. В. Методика снижения аварийности автодорожных тоннелей мелкого заложения в регионах Урала и Сибири / О. В. Третьякова // Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. - 2016. - № 4. - С. 101-113.

3. Третьякова, О. В. Сваи с обратным конусом для транспортных сооружений, устраиваемых в сезонно промерзающих грунтах / О. В. Третьякова, Б. С. Юшков // Основания, фундаменты и механика грунтов. - 2017. - № 3 - С. 18-21.

4. Третьякова, О. В. Методы расчета касательных напряжений морозного пучения грунта / О. В. Третьякова // Дороги и мосты. - 2017. - № 2. - С. 41-59.

5. Саламахин, П. М. Определение напряжений морозного пучения на поверхности свай инженерных сооружений / П. М. Саламахин, О. В. Третьякова // Наука и техника в дорожной отрасли. - 2018. - № 1. - С. 18-20.

6. Третьякова, О. В. Влияние сурового климата на транспортные сооружения и методы их защиты / О. В. Третьякова // Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. - 2018. - № 3. - С. 95-107.

7. Третьякова, О. В. Моделирование работы свай транспортных тоннелей в условиях морозного пучения грунта / О. В. Третьякова // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. - 2019. - № 3. – С. 72-82.

Патент на полезную модель и свидетельство о регистрации программы для ЭВМ:

8. Бурунабивная свая: пат. RU 168119 U1 Рос. Федерация, МПК E02D 5/34 (2006.01) / О.В. Третьякова; № 2016131617; заявит. и патентооблад. ФГБОУ ПНИПУ. заявл. 01.08.2019; опубл. 18.01.2017. Бюл. № 2.

9. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ «Расчет и конструирование свай с верхним обратным конусом» / О.В. Третьякова, А.В. Третьяков; заявит. и патентооблад. ПНИПУ. – № 2017662309; заявл. 18.09.2017; дата регистрации 02.11.2017.

в изданиях, входящих в международные базы данных Scopus, Web of Science:

10. Tretyakova, O.V. Inverted-cone piles intended for transport construction in seasonally freezing soils / O.V. Tretyakova, B.S. Yushkov // Soil Mechanics and Foundation Engineering. - 2017. - Vol. 54, N. 3. - P. 173-176.

11. Tretiakova, O.V. Normal stresses of frost heaving as function of excess moisture // Magazine of Civil Engineering. - 2017. - N. 08(76). - P. 131–140. Scopus, Web of Science.

в других изданиях:

12. Юшков, Б. С. Влияние анизотропии глинистых грунтовых массивов на напряженно-деформированное состояние транспортных тоннелей / Б. С. Юшков, О. В. Третьякова // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». - 2014. - Т. 1. - № 3. - С. 1-12.

13. Юшков, Б. С. Методы защиты транспортных тоннелей от морозного пучения грунта, основанные на расчете конструкций сооружения / Б. С. Юшков, О. В. Третьякова // Транспортные сооружения: интернет-журнал. - 2015. - Т. 2. - № 2. - С. 1-11.

14. Третьякова, О. В. Величины нормальных напряжений морозного пучения, развивающихся в глинистых грунтах / О. В. Третьякова // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. - 2016. - № 1. - С. 125-141.

15. Третьякова, О. В. Методика устройства автодорожных тоннелей мелкого заложения в сезонно промерзающих грунтах / О. В. Третьякова // Метро и тоннели. - 2016. - №5. - С. 26-30.

16. Tretiakova, O. V. Inverted-cone piles for traffic facilities constructed in seasonally freezing soils // Этика, транспорт и устойчивое развитие : материалы междунар. конф. ЮНЕСКО. – Москва : АИСНТ, 2016. - С. 92-100.

17. Tretiakova, O. V. Reduction tangential frost heaving forces by the pile geometry change / O. V. Tretiakova // Architecture and Engineering. - 2017. - Vol. 2, Iss. 1. - P. 61-68.

18. Tretiakova, O. V. Calculation of Tangential Frost Heave Stresses Based on Physical, Mechanical and Stress-Strain Behavior of Frozen Soil / O. V. Tretiakova // Architecture and Engineering. - 2017. - Vol. 2, Iss. 3. - P. 41-53.

Третьякова Ольга Викторовна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ЭЛЕМЕНТОВ
ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ
ГРУНТА**

05.23.11 – «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов,
аэродромов, мостов и транспортных тоннелей»
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 24.08.2020. Формат 69×90/16
1,0 печ. л., тираж 100 экз., заказ № 1065/2020.

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии издательства
Пермского национального исследовательского
политехнического университета.
Адрес: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, к. 113.
Тел.: (342) 219-80-33.