

На правах рукописи



Шестаков Илья Викторович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА
ЗАЩИТЫ ОСНОВАНИЙ ФУНДАМЕНТОВ
ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ МАЛОНАГРУЖЕННЫХ
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ
И СООРУЖЕНИЙ В СЕЗОННО
ПРОМЕРЗАЮЩИХ ГРУНТАХ**

Специальность 2.1.2. Основания и фундаменты,
подземные сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Хабаровск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (ДВГУПС).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Кудрявцев Сергей Анатольевич

Официальные оппоненты: **Горшков Николай Иванович**
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», г. Хабаровск, кафедра автомобильных дорог, доцент;

Парамонов Максим Владимирович
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Санкт Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», кафедра геотехники, доцент.

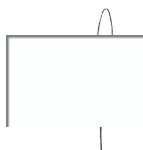
Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».**

Защита состоится «23» ноября 2022 г. в 12-00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.380.04 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория № 220). Тел./факс: 8 (812) 316-58-73; E-mail: rector@spbgasu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <https://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/shestakov-ilya-viktorovich>.

Автореферат разослан «10» октября 2022 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



В. В. Конюшков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Значительную часть территории застройки городов и производственных объектов составляют малонагруженные здания и сооружения: технологические эстакады, эстакады слива и налива топлива, открытые насосные, открытые складские площадки объекта, станции весового контроля, трансформаторные подстанции и другие объекты. Несмотря на то, что малонагруженные здания и сооружения относятся к вспомогательным объектам, от их технического состояния зависит безопасность производства. В случае предаварийного состояния малонагруженного объекта выполнение срочных ремонтных работ зачастую невозможно вследствие специфики технологии производства и связано с необходимостью проведения земляных или огневых работ, или остановкой производства, что является невозможным в технологическом цикле для объектов топливно-энергетического, и транспортного комплекса. В подобных случаях применяют компенсационные мероприятия, направленные на стабилизацию технического состояния объекта получившего повреждения. Тем не менее сами компенсационные мероприятия эффективны только для надземной части объектов. Работы для стабилизации технического состояния фундамента требуют проведения земляных работ. При этом, в зависимости от инженерно-геологических условий, в большинстве южных районов Дальнего Востока России стоимость составляет 25–45% общих затрат от устройства нового фундамента. Исходя из этого, проблема снижения затрат на защиту оснований фундаментов малонагруженных зданий и сооружений в сезонно промерзающих грунтах от негативных процессов морозного пучения является актуальной.

Степень разработанности темы. Разработка способов защиты морозоопасных оснований фундаментов малонагруженных зданий, сооружений производственных объектов развернулось во второй половине XX века и связана с исследованиями температурных процессов и изменениями физико-механических свойств грунта, и, как следствие, разрабатываемыми способами защиты гражданских объектов. В нашей стране применение защитных мероприятий морозоопасных оснований фундаментов начато с 70-х годов, однако широкого распространения не получили из-за особенности организации строительного производства в СССР, ориентированного на заводское изготовление строительных конструкций, а также значительной доли железобетонных конструкций в строительстве. В Российской Федерации разработка защитных мероприятий для морозоопасных грунтов оснований фундаментов малонагруженных зданий и сооружений получила развитие после 2000 года и связана с широким развитием строительства, модернизации, реконструкции и капитальных ремонтов.

Теоретические и экспериментальные работы по исследованию оснований фундаментов в сезонно промерзающих пучинистых грунтах осуществляли Е.С. Ашпис, В.В. Веселов, Л.Б. Ганеллис, О.Р. Голли, Б.И. Далматов, В.Д. Э.Д. Ершов, И.А. Золотарь, А.И. Иванов, Карлов, Я.А. Кроник, В.А. Кудрявцев, С.А. Кудрявцев, В.В. Лушников, В.Г. Меламед, В.А. Мельников, Н.Н. Морарескул, А.Л. Невзоров, О.Р. Оржиховский, В.О. Орлов, В.Н. Парамонов, М.В. Парамонов, Б.Г. Петров, Н.А. Пузаков, А.М. Пчелинцев, Н.Ф. Пыщев, И.И. Сахаров, В.М. Улицкий, Н.А. Цытович, В.Б. Швеиц, П.Ф. Швецов, В.Н. Шестаков, а также зарубежные исследователи: AlNouri, I., Aldrich, H.P., Andersland, O., Croy, F.C., Croney, D., Comini, G.M., Fish, A.M., Guidice, Del S., Kaplar, C.W., Konrad, J.M., Ladanyi, B., Lennox, W.C., Linell, K.A., Nixon, J.F., Pike, C. W., Saurin, B. F., Sayles, F., Spenser, W.G., Sykes, J.F., Wechsler A.E., Wu Ziwang, Zhang Changqing и многие другие ученые.

Объект исследования: основания и фундаменты малонагруженных зданий и сооружений при промерзании, морозном пучении.

Предмет исследования: напряженно-деформированное и теплофизическое состояние морозоопасного основания фундаментов малонагруженных объектов при воздействии процессов сезонного промерзания и морозного пучения.

Цель исследований: совершенствование метода защиты оснований фундаментов эксплуатируемых малонагруженных производственных зданий и сооружений в сезонно промерзающих грунтах.

Задачи исследования:

1. Провести анализ теоретических и практических исследований методов защиты фундаментов малонагруженных объектов, эксплуатируемых в морозоопасных основаниях, с глубоким сезонным промерзанием от деформации морозным пучением.

2. Разработать алгоритм методики по оценке фактического состояния и прогнозов по дальнейшей эксплуатации фундаментов и морозоопасных оснований для малонагруженных объектов с использованием расчетов методом конечных элементов.

3. Разработать метод расчета теплоизоляционной защиты фундаментов малонагруженных объектов в условиях сезонного колебания температур от влияния процесса морозного пучения.

4. Выполнить экспериментальные исследования температурного режима промерзающего грунта, взаимодействующего с фундаментами малонагруженных зданий и сооружений.

5. Выполнить исследования температурного режима промерзающего грунта численными методами, с возможностью подбора защитных мероприятий.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Выявлена зависимость изменения температурных и влажностных характеристик грунта оснований фундаментов малонагруженных сооружений

при воздействии отрицательных температур с использованием защитных мероприятий.

2. Определена возможность стабилизации технического состояния основания фундаментов эксплуатируемых малонагруженных зданий и сооружений, получивших повреждения от воздействия морозного пучения – без перехода в аварийное состояние с применением защитных мероприятий по теплоизоляции оснований фундаментов.

3. Предложена методика, позволяющая рассчитать толщину теплоизоляции в зависимости продолжительности действия отрицательных температур от сезонной глубины промерзания по результатам численного моделирования;

4. Предложена методика, позволяющая осуществлять подбор защитных мероприятий, диагностировать техническое состояние оснований и фундаментов малонагруженных зданий и сооружений, включающая в себя элементы неразрушающего контроля и численного моделирования.

Теоретическая значимость работы:

1. Научно обоснованное применение мероприятий по тепловой изоляции основания при проектировании, строительстве и эксплуатации малонагруженных зданий и сооружений в сезонно промерзающих грунтах южных районов Дальнего Востока.

2. Методика диагностики и прогнозирования эксплуатации фундаментов малонагруженных объектов в сезонно промерзающих пучинистых грунтах с использованием численного моделирования МКЭ.

3. Методика расчета толщины теплоизоляции на основании климатических характеристик района строительства и физико-механических характеристик грунта.

Практическая значимость работы:

1. Предложен способ стабилизации технического состояния основания фундаментов, эксплуатируемых малонагруженных зданий и сооружений – без перехода в аварийное состояние с применением защитных мероприятий по теплоизоляции фундаментов;

2. Оптимизирован объем мероприятий по уменьшению деформаций конструкции фундаментов малонагруженных объектов от морозного пучения;

3. Минимизирована стоимость работ по теплоизоляции оснований фундаментов малонагруженных зданий и сооружений с подбором толщины теплоизоляции.

Результаты исследований использованы:

На реальных действующих опасных производственных объектах на территории Хабаровского края, а именно: АО «Хабаровский НПЗ», ООО «Комсомольский НПЗ», приведенных в приложении диссертации.

Методология и методы исследования. В диссертационной работе использованы следующие методы исследования:

– теоретические исследования технического состояния фундаментов малонагруженных зданий и сооружений в сезонно промерзающих пучинистых грунтах;

– натурные исследования и эксперименты по определению температурных значений промерзающего грунта конструктивными мероприятиями и без них в условиях сезонного промерзания, морозного пучения;

– обобщение и анализ результатов экспериментальных исследований для определения эффективных мероприятий по защите фундаментов малонагруженных зданий и сооружений от морозного пучения;

– численное моделирование с применением модуля FEM Models Thermo-ground при решении температурных и влажностных задач трехмерного процесса промерзания и морозного пучения НДС грунтового массива и конструкций малонагруженных объектов;

– сравнение результатов натурных наблюдений с результатами численного моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика диагностики и прогнозирования эксплуатации оснований и фундаментов, малонагруженных объектов в сезонно промерзающих пучинистых грунтах.

2. Результаты натурных наблюдений, исследования температурного режима морозоопасного основания при промерзании, морозном пучении.

3. Влияния защитных мероприятий на тепловой режим грунта и деформации фундаментов в период действия отрицательных температур.

4. Оценка влияния защитных мероприятий на техническое состояние крупномасштабного линейного объекта.

5. Методика расчета толщины теплоизоляции на основании климатических характеристик района строительства.

Область исследования: Согласно сформулированной цели научной работы, её научной новизне, установленной практической значимости диссертация соответствует паспорту специальности 2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения, пункту 5 – разработка новых методов расчета, высокоэффективных конструкций и способов устройства оснований и фундаментов в особых инженерно-геологических условиях: на слабых, насыпных, просадочных, засоленных, набухающих, закарстованных, вечномерзлых и пучинистых и других грунтах; пункту 7 – разработка новых методов расчета, испытаний, конструирования и расчета оснований, фундаментов и подземных сооружений при их реконструкции, восстановлении, усилении и в случае ликвидации аварийных ситуаций.

Степень достоверности результатов подтверждается:

– характером проведения натурных исследований температурных значений промерзающего грунта, отражающим происходящие в основании фундаментов малонагруженных зданий и сооружений криогенные процессы при максимальном сезонным промерзанием.

– корректной постановкой задач и достаточным объемом экспериментальных исследований, полученных с помощью метрологически поверенных измерительных приборов;

– применением методов по расчету НДС, позволяющих выполнить расчет для промерзающего пучиноопасного грунтового массива в постановке трехмерной проекции, проведением долгосрочных опытов (40 опытов) и экспериментов, проведение сравнений результатов, полученных в ходе исследований с результатами других авторов – исследователей, полученных при теоретических и экспериментальных исследованиях;

– выполнением сравнений результатов, полученных при экспериментальных исследованиях и численном моделировании.

Апробация работы. Основные положения диссертации были доложены и обсуждались на научных форумах: «Экология и безопасность водных ресурсов», 2-я международная научно-практическая конференция (Хабаровск, 27–28 ноября 2009г); «Научно-технические проблемы транспорта, промышленности и образования», Всероссийская научно-практическая конференция (Хабаровск, 21–23 апреля 2010); Geotechnical engineering for disaster prevention & reduction, IV international symposium (Khabarovsk, July 26–29, 2011); «Geotechnical engineering for disaster prevention & reduction, environmentally sustainable development», International geotechnical symposium IGS5, INCHEON, (S Korea, Seoul, May 22–24, 2013); 8-th Asian Young Geotechnical Engineering Conference (8AYGEC) (Казахстан, Астане, 5–7 августа 2016 г); «Наука и инновации – современные концепции», Международный научный форум (Москва, 23 октября 2020).

Личный вклад автора включает в себя непосредственное участие в проведении всех теоретических и экспериментальных исследованиях, подготовке докладов и публикаций по теме диссертации. Все данные по результатам исследований и проведенных опытов интерпретированы и обработаны автором лично. Имеются акты внедрения результатов работы, указанные в приложении диссертации.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 8 печатных работах общим объемом 9,25 печ. л., среди них 3 работы объемом 6,5 печ. л. опубликованы в научных рецензируемых изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте ВАК, в том числе одна статья из перечня Scopus и 4 статьи в других изданиях.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, основных выводов, списка использованной литературы и приложений. В работе содержится 129 страниц текста, 75 рисунков, 14 таблиц; список литературы включает 121 источник.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении выполнено обоснование актуальности для диссертационной работы, приведены: объект исследования, цель исследования, перечислены задачи по исследованию, положения, выносимые на защиту, теоретическая и практическая значимость работы, описание и структура диссертационной работы.

В первой главе выполнено: обзор эксплуатации малонагруженных фундаментов зданий и сооружений в сезонно промерзающих пучинистых грунтах, рассмотрены основные причины деформаций и способы защиты от негативных воздействий сил морозного пучения. В частности, наиболее экономичным и оправданным признано применение теплоизоляции фундаментов в уровне дневной поверхности. Проанализирована нормативно-техническая литература, касающаяся расчета теплоизоляции, определено отсутствие обобщенной методики расчета и целесообразность проведения расчета с помощью численных методов.

В первом блоке второй главы: автором приведена методика расчета толщины теплоизоляции основания фундаментов при нахождении фактической глубины сезонного промерзания на основании результатов решения теплофизической задачи по результатам численного моделирования.

Толщина пенопластового теплоизоляционного покрытия вычисляется по формуле:

$$\partial_i = \frac{df_g}{K_i}, \quad (1)$$

где ∂_i – толщина теплоизоляции, м.; df_g – глубина промерзания грунта по результатам численного моделирования, м.; K_i – коэффициент теплоизоляции, определяемый по графику в зависимости от суммы градусо-суток с действием отрицательных температур.

Ширина (вылет) теплоизоляции принимается по результатам численного моделирования, а также возможности размещения изоляции для защиты конструкции. Тем не менее в рамках предварительного расчета вылет теплоизоляции принимается в 1 метр. На основании расчета (1) составлен график рассеивания коэффициента теплоизоляции рис. 1.

Смещение линии тренда в данном случае обусловлено уменьшением глубины промерзания и уменьшением времени фазовых переходов.

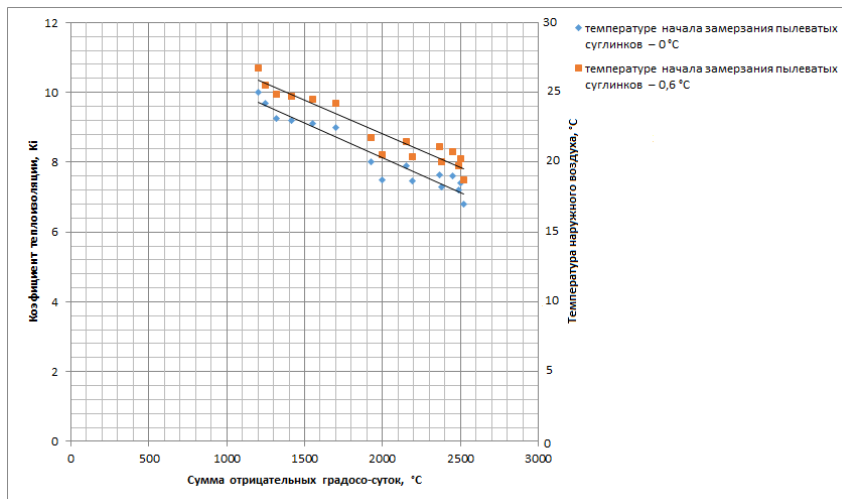


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента теплоизоляции для районов Дальнего Востока при температуре начала промерзания 0, – 0,6 °С

Для пылевато-глинистых грунтов характерен переход в твердомерзлую структуру в температурном промежутке от 0°C до –0,6°C после прекращения фазовых превращений. В данном случае будет наблюдаться уменьшение глубины промерзания. В связи с этим при решении теплофизической задачи целесообразно принимать расчетную температуру равную –0,6°C.

Во втором блоке второй главы приведена методика, позволяющая произвести подборку эффективных средств по защите малонагруженных зданий и сооружений от морозного пучения. Для этого проводятся исследования неразрушающими методами с целью определения следующих критериев: фактические физико-механические характеристики грунта, наличие дефектов и глубину заложения фундамента – с помощью георадарного профилирования и сейсмозондирования, а также фактическую глубину промерзания – с помощью мониторинга температурного режима грунта (рис. 2).

В рамках изучения взаимодействия модели фундамента с промерзающим массивом грунта по деформации, без приложения внешней нагрузки и влияния теплопроводности тела модели фундамента на промерзание массива грунта были проведены лабораторные исследования в холодильной камере.

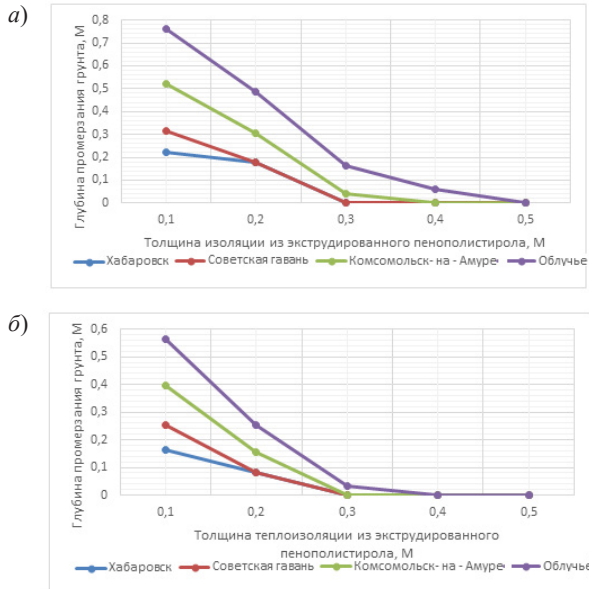


Рисунок 2 – Зависимость глубины промерзания грунта от толщины теплоизоляции для глинисто-пылеватых грунтов при температуре заморозки грунта 0 (а) и $-0,6$ (б) $^{\circ}\text{C}$

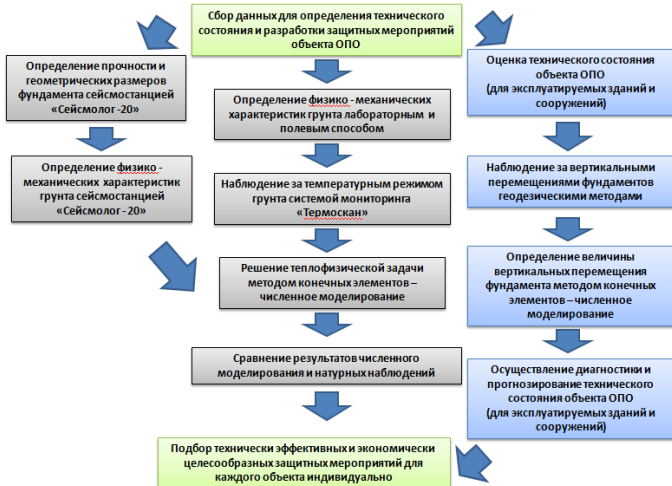


Рисунок 3 – Комплекс диагностики состояния оснований и фундаментов опасных производственных объектов

Для выполнения исследований был изготовлен стенд размерами $1,2 \times 0,6 \times 0,9$ м (рис. 4), заполненный грунтом (суглинком), с начальной влажностью 26 %, в дальнейшем при проведении опытов влажность грунта увеличивалась до 31 %, плотность грунта в стенде задана максимально близкой к естественной.

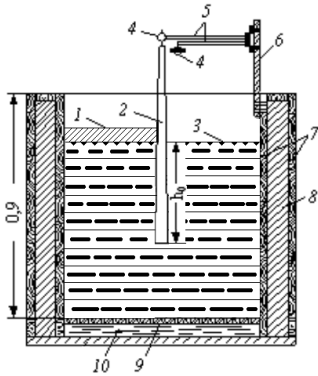


Рисунок 4 – Схема устройства стенда.

- 1 – теплоизоляция (пенополистирол);
 2 – модель фундамента; 3 – грунт (суглинок); 4 – индикаторы часового типа; 5 – оттяжки; 6 – стойка стенда; 7 – стенка стенда; 8 – теплоизоляция; 9 – доски с отверстиями; 10 – подогреватели

Для оценки влияния применения тепловой изоляции грунт сверху закрывали теплоизоляцией толщ. 100–250 мм, с шагом 50 мм. При изменении толщины изоляции опыты повторяли три раза.

При выполнении исследований влажность (W) и удельный вес грунта (γ) изменяли в пределах следующих значений: 0,22 – 0,23 д.е., и 2,20 – 1,95 г/см² соответственно. Результаты по деформациям модели представлены на рис. 5 и 6.

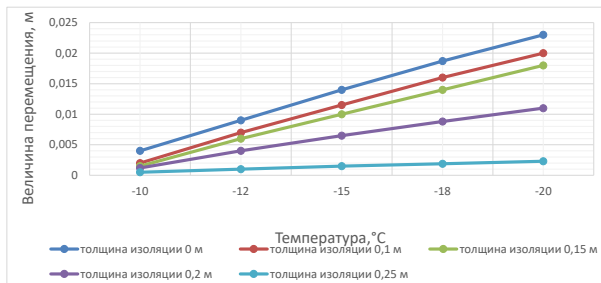


Рисунок 5 –

Результирующий график вертикальных перемещений модели фундамента при различных температурах промораживания грунта и разной толщине применяемой теплоизоляции

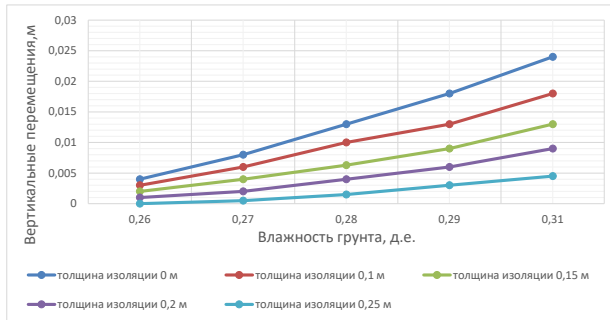


Рисунок 6 – Результирующий график зависимости величины деформации (вертикальных перемещений) модели фундамента при изменении влажности грунта

В третьем блоке второй главы в рамках натуральных исследований температурного режима грунтов основания устроены термоскважины на глубину промерзания с проведением измерения периодичностью один раз в неделю. Полученные данные фиксируются и позволяют в текущем режиме отслеживать изменения.

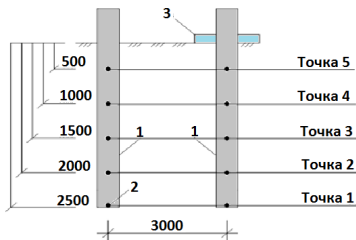


Рисунок 7 – Схема устройства термоскважин

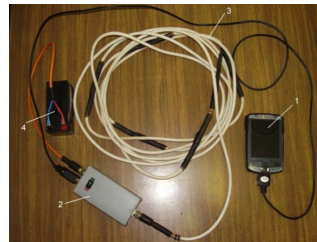


Рисунок 8 – Комплекс измерения температуры «Термоскан»: 1 – ПК; 2 – переходной контроллер, 3 – датчики на измерительной косе, 4 – переносной аккумулятор

Методика исследований включает устройство двух термоскважин со вставленными в них полипропиленовыми трубами по глубине свайного фундамента. Устье одной скважины утеплено экструдированным пенополистиролом толщиной 300 мм (рис.7).

При наблюдении за изменением температурного режима грунта применялся измерительный комплекс «Термоскан», позволяющий проводить замеры температуры в термоскважинах в однократном и непрерывном режимах.

Внешний вид и оборудование измерительного комплекса «Термоскан» представлен на рисунке 8.

В состав измерительной косы входят: температурные датчики модели DS18B20, установленные с шагом 0,5 м. Датчики измеряют температуру в диапазоне: $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$. Погрешность измерений составляет $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Значения температур в термометрических скважинах приведены на рис. 9.

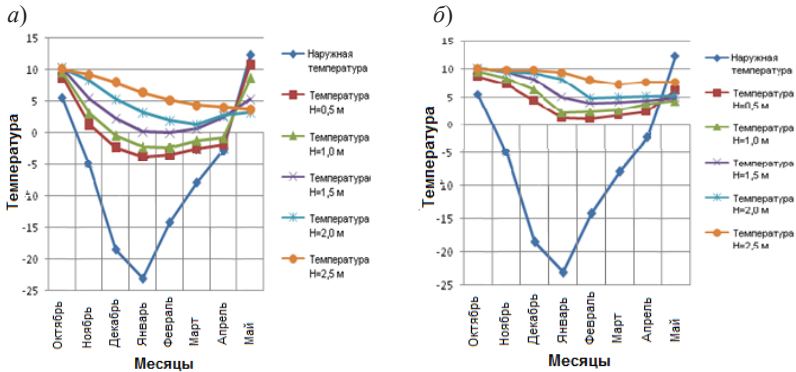


Рисунок 9 – Значения температур в термометрических скважинах по глубине: а) без конструктивных мер утепления; б) с устройством утеплителя

Для решения теплофизических задач в данной работе применялось численное моделирование в программном комплексе FEM models с применением модуля «Termoground». Данный программный продукт, разработанный на кафедре геотехники Санкт-Петербургского архитектурно-строительного университета профессорами: С.А. Кудрявцевым, И.И. Сахаровым, В.Н. Парамоновым, позволяет с достаточной степенью достоверности осуществлять моделирование и анализировать происходящие в массиве грунта процессы промерзания и морозного пучения на основании полученных значений (установившихся) температурных и влажностных полей.

Уравнением теплопроводности (2) описываются процессы промерзания (оттаивания), происходящие в процессе его теплового режима в пространственной постановке расчетной схемы.

$$C_{th(f)}\rho_d \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_{th(f)} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_v, \quad (2)$$

где $C_{th(f)}$ – показатель (удельной) теплоемкости для мерзлого (талого) грунта (Дж/гК·К); ρ_d – показатель плотности для обезвоженного (сухого) грунта (кг/см³); T – температурное значение (К); t – временное значение (с); $\lambda_{th(f)}$ – показатель теплопроводящей характеристики грунтового массива (мерзлого или талого), Вт/м² · °С; x, y, z – положение (координаты) для трехмерного пространства; q_v – значение, при наличии внутренних источников в грунтовом массиве (Вт/м³).

В случае, если тепловой поток принимает установившийся вид, левая часть уравнения теплопроводности сокращается.

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_V = 0. \quad (3)$$

Процесс перехода грунта из талого в мерзлое состояние описывается функцией теплоемкости (рис. 10).

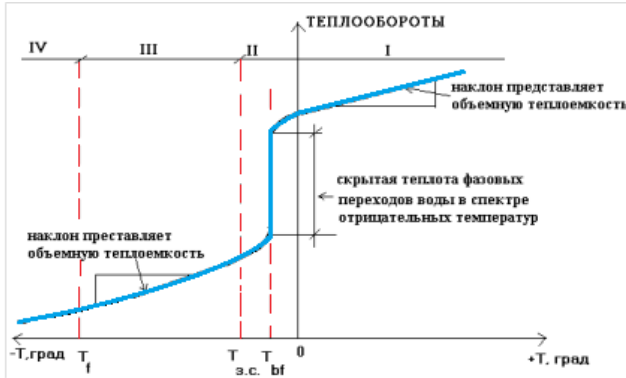


Рисунок 10 –
Функция тепловых оборотов

Крутой частью функции, которая расположена между зонами промерзания и оттаивания, является скрытая теплота для фазовых переходов в период действия температур с отрицательным значением, которую сам грунтовый массив поглощает или наоборот отдает в ходе прохождения влагой в грунтовом массиве определенного фазового состояния.

Наклоны функции, расположенные по краям, являются объемной теплоемкостью мерзлой или талой зоны в зависимости от наклона самой функции.

$$C_{(f)} = C_{(f)} + L_0 \frac{\partial W_w}{\partial T}, \quad (4)$$

где L_0 – значение теплоты при фазовых переходах (превращениях) из воды в лед ($335 \cdot 10^6$ (Дж/м³)); W_w – значение наличия некристаллизованной влаги в мерзлом грунтовом массиве (д.е.).

Объемная теплоемкость ($C_{th(f)}$) является наклонной кривой для мерзлой и талой зоны грунта на графике для теплооборотов (рис. 10).

В качестве слагаемого для уравнения (4) значение теплоты фазовых переходов является описанием процесса (рис. 10), в рамках которого изменяется агрегатное состояние воды в грунтовом массиве (в процессе фазовых превращений) в период действия отрицательного значения температуры и является его компонентой (при образовании скрытого значения при фазовых переходах).

$$L_0 \frac{\partial W_w}{\partial T}. \quad (5)$$

В том случае, когда значение функции для содержания не кристаллизованной (незамерзшей) влаги в грунте была вычислена, суммарное содержание некристаллизованной (незамерзшей) влаги приобретает следующий вид:

$$W_w = K_w W_p, \quad (6)$$

где W_p – значение влажности грунтового массива на границе его раскатывания (д.е.); K_w – является коэффициентом содержания не кристаллизованной (незамерзшей) влаги (для мерзлых глинистых грунтов) в соответствии с таб. 3.1 СП 25.13330.2020.

При подстановке выражения 5 в выражение 2 произойдет преобразование в следующее уравнение:

$$\rho_d (C_{th(f)} + L_0 \frac{\partial W_w}{\partial T}) \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_{th(f)} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_v. \quad (7)$$

Скорость промерзания грунта определяется по формуле:

$$V_{f(th)} = \frac{dT_{f(th)}}{dt}, \quad (8)$$

где $dT_{f(th)}$ – температура промерзающего (оттаивающего) грунта, °C; d_t – время промерзания грунта, с.

По результатам численного моделирования можно оценить распространение фронта промерзания по распределению мерзлого грунта (рис. 11). При этом данные эппор по распределению температуры грунта по глубине схожи с наблюдаемыми по результатам замеров в натуральных исследованиях. На схеме, в отличие от натуральных исследований, можно оценить температуру и распределение мерзлого грунта под теплоизоляцией, температура которого находится в диапазоне $0,5 \div -0,5$ °C, что выше температуры, при действии которой происходит кристаллизация влаги для суглинков пылеватых.

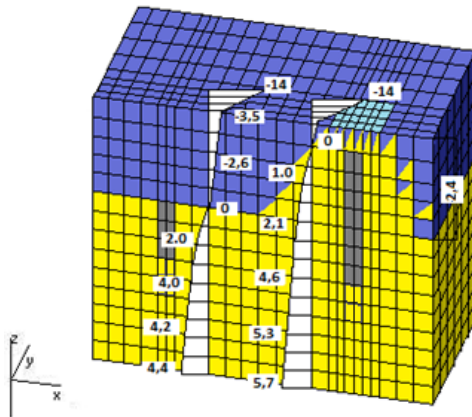


Рисунок 11 – Решение теплофизической задачи к эксперименту по устройству термоскважин, распределение температурных полей на февраль

Таким образом, слой грунтового массива, залегающий под теплоизоляционным покрытием, можно характеризовать как находящийся в переохлажденном (талом) состоянии.

Определение количества среднего значения влажности в рассматриваемой области зоны миграции находится в прямой зависимости от значения количества влаги, мигрирующей в заданном грунтовым объеме:

$$w_{wf} = \frac{Q_{wf}}{\gamma_d}, \quad (9)$$

где Q_{wf} – количество влаги, содержащейся и мигрирующей в заданном грунтовым объеме, д.е.·м²·с; γ_d – значение удельного веса, указанного для обезвоженного (сухого) грунта, кН/м³.

Количество миграционного потока (миграционной влаги) в рассматриваемом объеме грунта рассчитывается следующим образом:

$$Q_{wf} = q_{wf} \cdot A \cdot t, \quad (10)$$

где q_{wf} – интенсивность действия миграционного потока в грунтовым массиве, д.е.; A – является значением площади в поперечном сечении для миграционного потока влаги, м²; t – значение времени, в течении которого действует миграционный поток, с.

Величина значения миграционного потока влаги рассчитывается на единичный объем грунтового массива, в связи с чем значение массы и удельного веса для обезвоженного (сухого) грунта имеют равное значение.

Количество среднего значения влажности, мигрирующей в объеме грунта (Q_d) за период времени (t), находится:

$$\Delta W_{wf} = \frac{Q_{wf}}{Q_d}. \quad (11)$$

При аппроксимации значения функции в ее средней части, которые представляют собой зависимость количества влаги грунтового объема от значения скорости по его промерзанию, рассматриваемой на участке действия границы фазовых переходов и фронта промерзания, для всех видов грунтов рассчитывается следующим образом:

$$\Delta W_{wf} = b \cdot e^{c \cdot v_f}, \quad (12)$$

где V_f – является значением скорости по промерзанию грунтового массива, м/сут.; b , c – являются эмпирическими коэффициентами, определенными для грунтов глина и суглинков по результатам ранее выполненных исследований.

Поскольку в составе решения теплофизических задач в программном продукте FEM models «Termoground» существует возможность определения не только температурных, но и влажностных полей, выполнен расчет по определению устоявшихся влажностных полей для исследуемого объекта. Эпюры распределения влажности по направлению к фронту промерзания позволяют опре-

делить размер возможных деформаций грунта и фундамента, а также проверить эффективность применяемых, защитных мероприятий.

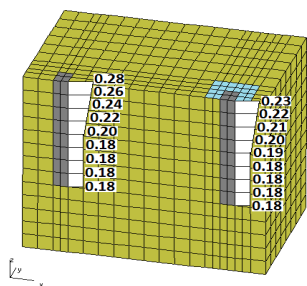


Рисунок 12 – Решение теплофизической задачи к эксперименту по устройству термоскважин, распределение влажностных полей грунта по глубинам в температурных скважинах в феврале месяце

По результатам численного моделирования и распределения эпюр влажности грунта по глубине можно отметить снижение величины миграции влаги к верхним промерзающим слоям грунта и фронту промерзания в случае применения теплоизоляции на 18%. Эпюры распределения влажности по глубине грунта позволяют сделать вывод о корректности выполнения задачи, поскольку отсутствуют участки с резким понижением влажности грунта, вызываемые обезвоживанием, распределение влажности равномерно (рис. 12).

Распределения влажности в грунте в направлении к фронту промерзания при использовании теплоизоляции и без теплоизоляции представлены на рис. 13. Значение зависимости по приращению влажности без защитных мероприятий и с защитных мероприятий соответственно составляет 0,26 и 0,21 д.е., что находится в тех же пределах, что и результаты, полученные при численном моделировании.

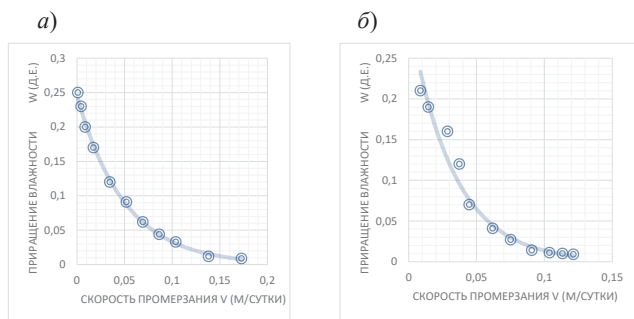


Рисунок 13 – Значения зависимости по приращению влажности (Δ_w) на границе распространения фронта промерзания от скорости самого промерзания: а) без применения теплозащитных мероприятий; б) с применением теплозащитных мероприятий

В главе 3 выполнены исследования влияния защитных мероприятий на деформации оснований и фундаментов.

В первом блоке: приведена методика, указанная в первом блоке второй главы, которая включает в себя следующее: определение методами

сейсмондирование физико-механических характеристик грунта основания; фактического состояния фундаментов. Полученные данные целесообразно использовать при численном моделировании теплофизического и напряженно-деформированного состояния фундаментов с целью снижения их деформирования до предельно допустимых величин от процессов промерзания, морозного пучения.

При зондировании используются замеры продольных и поперечных волн, а также измерения по продольным профилям; по результатам записи отклика в виде спектра Фурье определяются продольные и поперечные размеры фундамента, а также физико-механические характеристики грунтов по ГОСТ 25100-2020.

В втором блоке: выполнены исследования влияния защитных мероприятий на деформацию оснований буронабивного свайного фундамента на экспериментальной площадке.

Влияние морозного пучения на свайный фундамент имеет неравномерный характер. При наблюдении за деформациями в первые три месяца было выявлено следующее: в первый период наблюдений 8–190 мм, во второй период наблюдений 4–46 мм, в третий период наблюдений 291–391 мм (рис. 14, а).

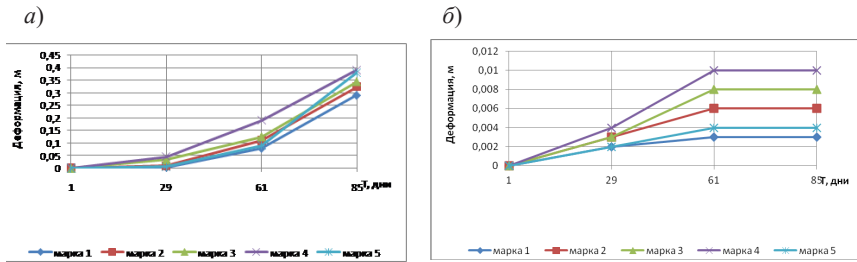


Рисунок 14 – График вертикальных деформаций свайного фундамента в зимний период: а) без утеплителя, б) с утеплителем

Повторные наблюдения проводились в 2010-2011 г. Вокруг свай была уложена теплоизоляция толщиной не менее 300 мм (размерами 1,0×1,0 м.), поскольку при исследованиях удалось установить, что толщина утеплителя менее 200 мм неэффективно снижает скорость и глубину промерзания грунта. В первые 3 месяца наблюдения деформации составили – 2–10 мм, в первый период наблюдений 3–10 мм, во второй период наблюдений 3–10 мм, в третий период наблюдений 3–10 мм (рис. 14, б).

Как видно, максимальная величина перемещения ниже расчетного перемещения для данного типа фундамента (30 мм). Необходимо отметить, что большая величина деформации, в том числе и при наблюдении за фундаментом с утеплителем, обусловлена малой нагрузкой от фундамента без дополнительной нагрузки от вышележащих конструкций.

Возникающие деформации, действующие перпендикулярно к направлению фронта промерзания, рассчитываются на основании уравнения:

$$\varepsilon_{f\perp} = \underbrace{0,09(w_{tot} - w_w)}_1 \underbrace{\frac{\rho_d}{\rho_w}}_2 + 1,09 \underbrace{\int_0^{t_c} q_{wf} dt}_2 + \underbrace{\varepsilon_{cr}}_3. \quad (13)$$

Первая составляющая формулы – показатель деформации, вследствие увеличения объема грунтового массива вследствие кристаллизации влаги, которая присутствует в грунтовых порах до начала криогенных процессов; вторая составляющая формулы – показатель деформации, возникающей вследствие кристаллизации влаги, которая мигрирует в зону промерзания грунтового массива; третья составляющая формулы – относительная деформация вследствие образования морозобойных трещин.

Величина деформации грунтового массива при появлении морозобойных трещин определяется (формула А. Г. Конюшенко, 1977):

$$|\varepsilon_{cr}| = \frac{-0,001972516 + 0,0081876987 \cdot w}{1 - 7,732496 \cdot w + 14,969634 \cdot w^2}. \quad (14)$$

Относительные деформации грунтового массива, имеющие направление, перпендикулярные к фронту промерзания, определяются по уравнению:

$$\varepsilon_{f\perp II} = \Psi \varepsilon_{f\perp}, \quad (15)$$

где Ψ – является коэффициентом для морозного пучения.

Дополнительно для данного фундамента было выполнено численное моделирование по деформации основания фундамента с применением мероприятий и без них (рис. 15).

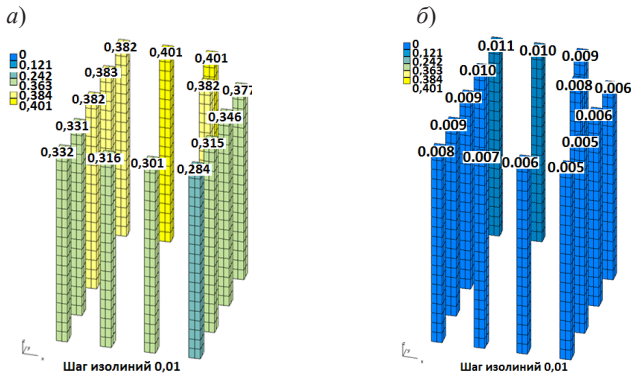


Рисунок 15 – Перемещение свайного фундамента, мм, при промерзании грунта по результатам численного моделирования без защитных мероприятий (а) с защитными мероприятиями (б) (с теплоизоляцией из экструдированного пенополистирола толщиной 300)

При составлении расчетной схемы толщина массива грунта была принята 3,5 м. исходя из глубины заложения фундамента для выявления возможного мостика холода под пятой фундамента. Фундаменты приняты – объемными элементами, грунт – объемными элементами.

В четвертой главе рассмотрена эффективность применения мер для защиты оснований фундаментов масштабного действующего объекта



Рисунок 16 – Внешний вид конструкций эстакады

от деформаций морозного пучения с применением теплоизоляции. В результате проведенного обследования было выявлено значительное количество стоек эстакад, имеющих деформации, связанные с отклонением от вертикали вследствие вертикальных деформаций фундаментов (рис. 16).

Для снижения влияния сил морозного пучения на дальнейшие деформации фундаментов был предложен вариант приме-

нения теплоизоляции фундаментов. В качестве утеплителя – экструдированный пенополистирол толщиной 300 мм, уложенный в уровне дневной поверхности грунта. Данная мера обусловлена тем, что на действующей установке отсутствует возможность производства масштабных земляных работ, а также работ, позволяющих произвести усиление надземных конструкций эстакады для предотвращения возможности дальнейшего перемещения строительных конструкций.

Для оценки температурного режима грунта фундаментов эстакады были устроены температурные скважины. Для сравнения температурного режима температурные скважины были устроены у устья фундаментов стоек в осях 32-36 – с применением теплоизоляции и для стоек в осях 32-1-36-1 – без применения теплоизоляции. Замеры температуры грунта производились по глубине 0,5 и 1,0 м от поверхности грунта, периодичность замеров составляла 3 раза в месяц в течение декабря-февраля 2013, затем апреля, затем в августе 2014 г. Наблюдения проводились с ноября 2012 по август 2013 г. (рис. 17).

Решение теплофизической задачи осуществлялось с использованием программного комплекса FEMmodels, модуля «Termoground» (рис. 18).

По результатам натурных наблюдений температурного режима грунта, а также по результатам численного моделирования было выполнено сравнение средних значений температур (рис. 19).

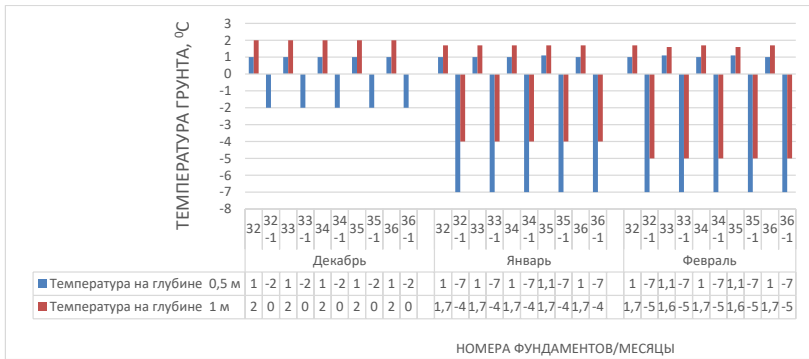


Рисунок 17 – Результаты замеров распределение температуры в термоскважинах

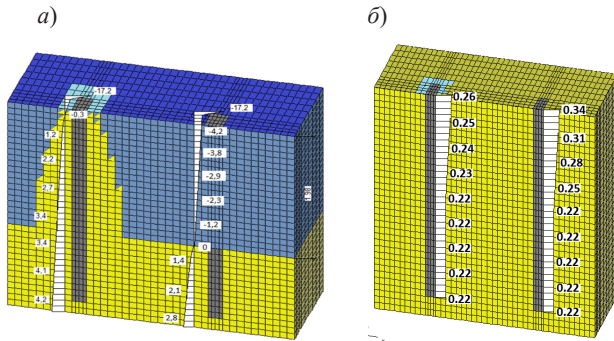


Рисунок 18 – Распределение температурных (а) и влажностных (б) полей в основании фундаментов стоек эстакады, утепленных по поверхности пенополистиролом толщиной 300 мм. (слева) и без теплоизоляции (справа)

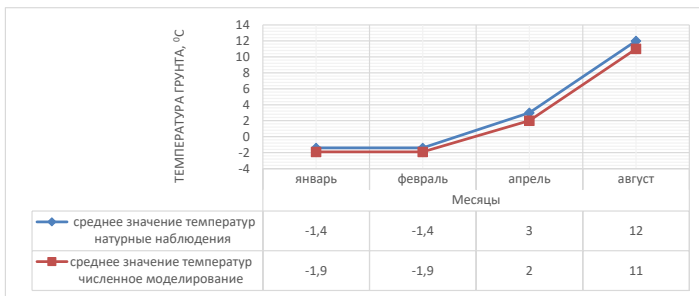


Рисунок 19 – Сопоставление результатов наблюдения за температурным режимом грунта по результатам натуральных наблюдений и численного моделирования с применением утепления

Поскольку пылеватые суглинки приобретают твердомерзлую структуру при температуре от 0°C до $-0,6^{\circ}\text{C}$, после прекращения фазовых превращений возможно наблюдение уменьшения глубины промерзания вследствие отсочки охлаждения грунта и начала процесса фазовых переходов на рис. 21 представлен график глубины промерзания грунта с применением защитных мероприятий при начале замерзания грунта при температуре замерзания 0 и $-0,6^{\circ}\text{C}$. Значения зависимости по приращению влажности (Δ_w) на границе распространения фронта промерзания от скорости самого промерзания с применением теплозащитных мероприятий и без них представлены на рис. 21.

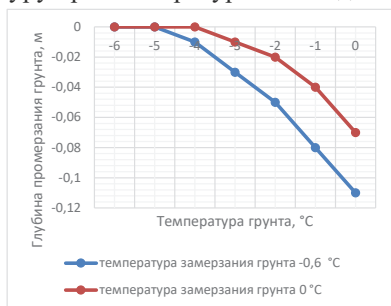


Рисунок 20 – Зависимость глубины распределения отрицательных температур в грунте

Значения зависимости по приращению влажности (Δ_w) на границе распространения фронта промерзания от скорости самого промерзания с применением теплозащитных мероприятий и без них представлены на рис. 21.

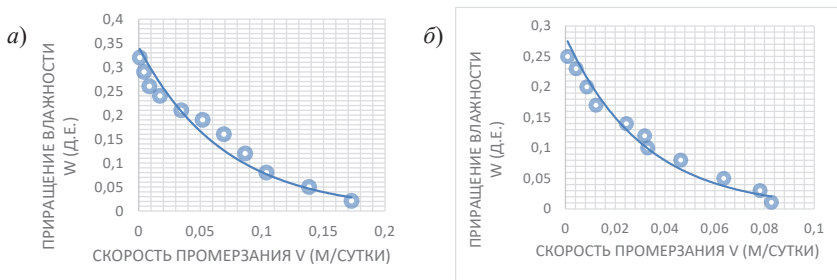


Рисунок 21 – Значения зависимости по приращению влажности (Δ_w) на границе распространения фронта промерзания от скорости самого промерзания:

а) без применения теплозащитных мероприятий; б) с защитными мероприятиями

На рисунке 22 показано перемещение фундаментов эстакады, утепленных по поверхности пенополистиролом толщиной 300 мм и без изоляции по результатам натурных наблюдений.

Полученные в результате численного моделирования значения температур грунта соответствуют данным натурных наблюдений. Максимальное значение температуры грунта по расчету на глубине 0,5 м равна $0,5^{\circ}\text{C}$ и $2,2^{\circ}\text{C}$ на глубине 1 м. Результаты расчета, совпадающие с наблюдаемыми дефектами эстакады, позволяют сделать вывод о влиянии неравномерного вертикального перемещения фундаментов, на взаимное перемещение надземных конструкций.

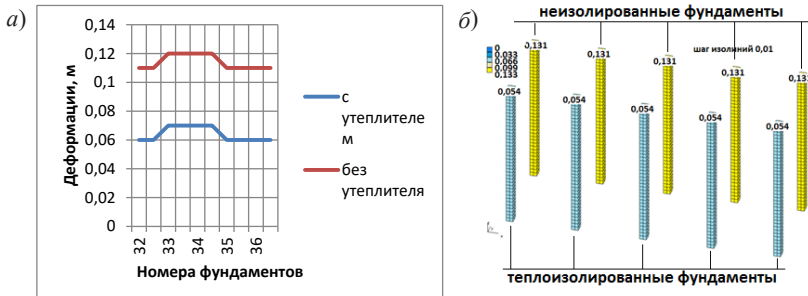


Рисунок 22 – Перемещения фундаментов эстакады при промерзании:

а) по результатам натурных наблюдений; б) по результатам численного моделирования

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполнения диссертационной работы достигнуты поставленные цели с получением следующих результатов:

1. На основании анализа экспериментальных и теоретических исследований методов прогнозирования, устройства и защиты фундаментов малонагруженных объектов, устраиваемых в пучинистых грунтах, установлено, что для эксплуатируемых зданий и сооружений наиболее целесообразным является применение оптимальной толщины горизонтальной теплоизоляции в уровне дневной поверхности грунта, что позволяет снизить деформации фундаментов от морозного пучения, а также минимизировать объем и стоимость работ.

2. Предложенная в работе методика диагностики предназначена для эксплуатируемых объектов в условия отсутствия возможности полномасштабных исследований и позволяет оценивать фактическое состояния оснований фундаментов малонагруженных объектов на основании определения следующих критериев: фактические физико-механические характеристики грунта, наличие дефектов и глубину заложения фундамента – с помощью георадарного профилирования и сейсмозондирования, а также фактическую глубину промерзания – с помощью мониторинга температурного режима грунта.

3. В работе предложена методика расчета толщины теплоизоляции фундаментов, определяемая по формуле, основанной на отношении глубины промерзания грунта по результатам численного моделирования (учитывающими такие факторы, как: фактические физико-механические характеристики грунта, фактическую влажность грунта, температуру замерзания грунта) и длительности градусо-суток отрицательных температур, представленной зависимостью коэффициента теплоизоляции.

4. Выполненные работы по исследованию температурных значений промерзающего грунта основания фундаментов малонагруженных объектов свидетельствует об изменении НДС грунта при промерзании (изменения объема грунта за счет влажности в предзимний период и миграционной влаги в ходе промерзания, формирование льдосодержащих трещин по телу грунта) при использовании теплоизоляции фундаментов. Применение теплоизоляции позволяет снизить влияние ежегодного накопления деформаций фундамента, получившего деформации и предотвратить ухудшение технического состояния объекта.

5. Выполненные исследования температурного режима грунта численными методами указывают на целесообразность решения теплофизических задач, поскольку численные методы позволяют определять температурные и влажностные значения в любой точке исследуемого объекта в годичном периоде проведения наблюдений. Данные, полученные в ходе выполнения работ по численному моделированию, имеют значения, которые соответствуют результатам, которые получены при натуральных экспериментах.

Дальнейшее направления по исследованиям — применение предложенных методик долгосрочной диагностики, расчета теплоизоляции при проектировании и строительстве объектов энергетики и нефтехимии на территории Дальневосточного Федерального округа: при строительстве НПЗ-2 на территории Хабаровского муниципального района и ТЭЦ-4 города Хабаровска.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Научные статьи, опубликованные в рецензируемых изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте ВАК Минобрнауки России и Scopus

1. **Шестаков И.В.** Численное моделирование при реконструкции и ремонте линейных сооружений на буронабивных свайных фундаментах в сезонно промерзающих грунтах Дальнего Востока / Кудрявцев С.А., Петерс А.А., // Вестник ТОГУ – 2016. – № 2(41). – С. 65–74 (0,56 п.л. / п.л. 0,19).

2. **Шестаков И.В.** Исследование температурного режима пучинистых грунтов южных районов Дальнего Востока // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 11(2). С. 328-332 (0,25 п.л. /0,25 п.л.).

3. **Шестаков И.В.** Геотехнический мониторинг легко нагруженных сооружений опасных производственных объектов в сезонно промерзающих грунтах / Кудрявцев С.А., Кажарский А.В. // Современные технологии. Системный Анализ. Моделирование. – 2016. – № 4(52). – С. 181–188 (0,45п.л. / п.л.0,15).

4. **Shestakov I.V.** Monitoring and protection of the foundations of buildings of dangerous production plants on seasonally heaving ground / Kudryavtsev S.A., Kogay V.V., Moldazhova A.A., Kazharkii A.V. // Challenges and Innovations of Geotechnics – Zhussupbekov (ed.). August 5-7, 2016/ London, 2016. P. 191–196.

В других изданиях

5. **Шестаков И.В.** Анализ процесса промерзания грунта вокруг трубы / Кажарский А.В., Шишкина К.М., Кейпан А.А., // Материалы 2-й международной научно-практической конференции, 27-28 ноября 2009 г. под ред. Л.Д. Терехова. Хабаровск: ДВГУПС, 2009г. С.112-126.

6. **Шестаков И.В.** Исследование процесса промерзания пучинистых оснований малонагруженных зданий в условиях г. Хабаровска / Петерс А.А., // Научно-технические проблемы транспорта, промышленности и образования. Труды Всероссийской научно-практической конференции, 21-23 апреля 2010. В 6 т.; под ред. О.Л. Рудых. Т. 2. Хабаровск: ДВГУПС, 2010. С.209-213.

7. **Шестаков И.В.** Устройство малонагруженных зданий на пучинистых основаниях г. Хабаровска / Петерс А.А., // IV international symposium. Geotechnical engineering for disaster prevention & reduction. July 26-29, 2011. Khabarovsk, 2011. P.336-338.

8. **Шестаков И.В.** Численное моделирование процесса промерзания пучинистых оснований малонагруженных зданий / Петерс А.А., // Международная конференция «Численные методы расчетов в практической геотехнике». Санкт-Петербург, 2012. С312-315.

Компьютерная верстка *М. В. Смирновой*

Подписано к печати 20.09.2022. Формат 60×84 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,5. Тираж 120 экз. Заказ 105.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.