

ОСОБЕННОСТИ ВОЗВЕДЕНИЯ ФУНДАМЕНТОВ ИЗ СВАЙ С УШИРЕНИЯМИ НА МЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

Н. В. Купчикова, В. С. Федоров

Купчикова Наталья Викторовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения», Российский университет транспорта (РУТ МИИТ), г. Москва, Российская Федерация; e-mail: kupchikova79@mail.ru;

Федоров Виктор Сергеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные конструкции, здания и сооружения», Российский университет транспорта РУТ (МИИТ), г. Москва, Российская Федерация

Проанализированы конструктивно-технологические решения фундаментов из свай с уширениями для возведения на мерзлых грунтах. Цель исследования – выявить особенности возведения фундаментов. Исследование, выполненное по результатам теплотехнических расчетов численными методами основания с обоснованием принципа использования многолетнемерзлых грунтов для свайно-плитного фундамента с концевыми цилиндрическими уширениями и физико-механическими характеристиками грунтов основания, выполнено в программном комплексе MIDAS GTS NX на основе нормативной документации. Для конструкций, возводимых на оттаивающих грунтах проектным методом, рекомендуется использовать жесткие массивные фундаменты, к которым относятся свайные с уширениями. Они должны выдерживать значительные осадки и перераспределять нагрузку.

Ключевые слова: мерзлый грунт, сваи с уширениями, численное моделирование, оттаивание грунта.

FEATURES OF THE CONSTRUCTION OF FOUNDATIONS FROM PILES WITH EXTENSIONS ON FROZEN SOILS

N. V. Kupchikova, V. S. Fedorov

Kupchikova Nataliya Viktorovna, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of Building Structures, Buildings and Facilities Department, Russian University of Transport (RUT MIIT), Moscow, Russian Federation; e-mail: kupchikova79@mail.ru;

Fedorov Viktor Sergeevich, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Building Structures, Buildings and Facilities Department, Russian University of Transport RUT (MIIT), Moscow, Russian Federation

The structural and technological solutions of foundations made of piles with extensions for construction on frozen soils are analyzed. The purpose of the study is to identify the features of the construction of foundations from piles with extensions on frozen soils. The study, based on the results of thermal engineering calculations using numerical methods of the base to substantiate the principle of using permafrost soils for pile-slab foundations with end cylindrical extensions and physico-mechanical characteristics of the base soils, was performed in the MIDAS GTS NX software package based on regulatory documentation. For structures erected on thawing soils by the design method, it is recommended to use rigid massive foundations, which include pile foundations with extensions. These foundations must withstand significant precipitation and redistribute the load.

Keywords: frozen soil, piles with extensions, numerical modeling, soil thawing.

Актуальность

Арктическая зона России представляет собой стратегически важный регион, где осуществляется активное развитие инфраструктуры, промышленности и транспортных сетей. С учетом значительного роста инвестиций в Арктику и повышения грузооборота по Северному морскому пути (СМП), а также развития инфраструктурных объектов особое внимание требует вопрос выбора наиболее прочностных и экономически эффективных решений фундаментов глубокого заложения (рис. 1).

Выбор типа фундамента и способа устройства основания для территорий, сложенных мерзлыми грунтами, устанавливается проектом в зависимости от инженерно-геокриологических условий строительства, конструктивных особенностей сооружения и технико-экономической целесообразности. Современные тенденции устройства фундаментов направлены на применение свайных,

свайно-плитных и коробчатых конструкций, одним из направлений развития которых является устройство фундаментов из свай с уширениями.

Метод

Цель исследования – выявить особенности возведения фундаментов из свай с уширениями на мерзлых грунтах. В отечественной и зарубежной практике строительства применялись сваи с уширениями готового, набивного и комбинированного типа. Уширения бывают одно-, многоместными и расположенными вверху, на конце сваи или на стволе. Устройство уширений осуществлялось в основном путем разбуривания, инъецирования буровзрывного способа, втрамбовывания, что требовало использования специальных средств оборудования крупной механизации (рис. 2) [3, 4].

Как показала практика раскопок, устройство свай с уширениями не всегда позволяло получить

уширения целостной формы с оптимальными размерами. Отсутствие единых методов конструирования, расчета сдерживало применение фундаментов из таких конструкций.

В СП 25.13330.2020 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах» сваи с уширениями не рассматриваются, а в СП «Свайные

фундаменты» такие конструкции ограничены лишь двумя типами свай – буронабивными с уширенной пятой и наклонными боковыми гранями. Обязательным является расчет по оценке экономической эффективности технических решений фундаментных конструкций.

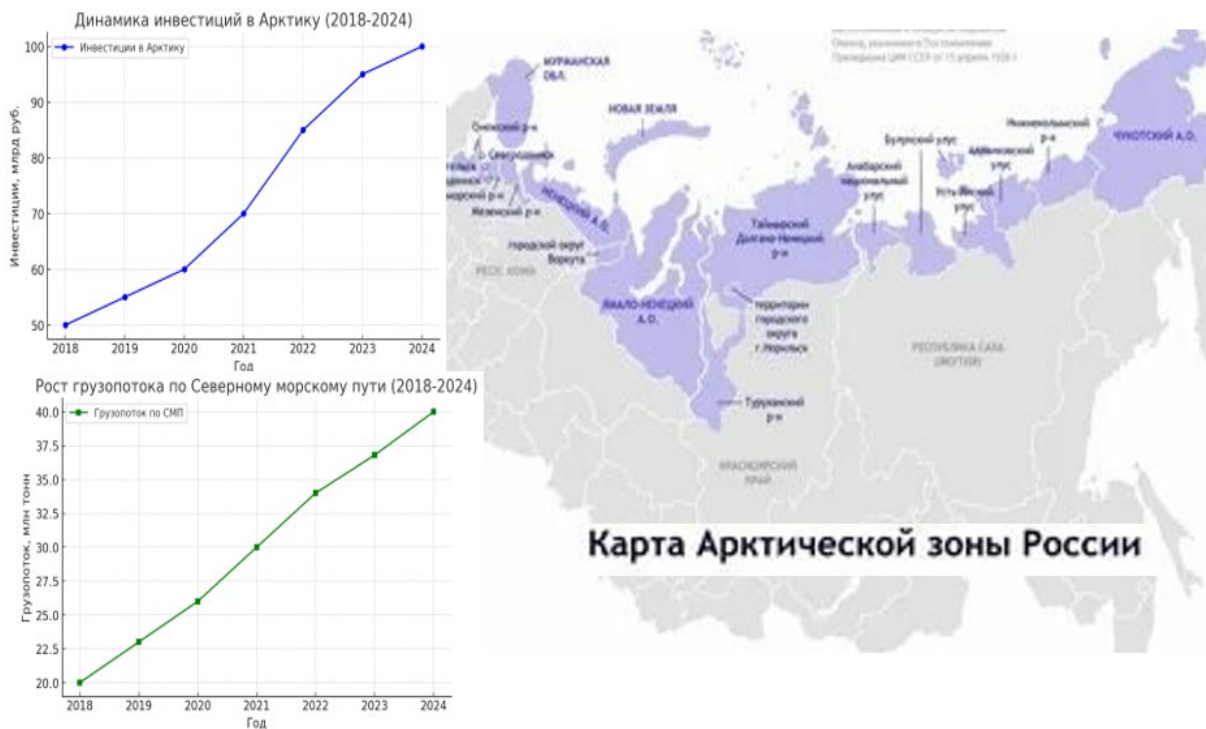


Рис. 1. Анализ динамики инвестиций в Арктику, роста грузопотока по Северному морскому пути и карта арктической зоны России

Конструкции свай с уширениями



Рис. 2. Конструктивные решения готовых и набивных свай с уширениями

Основная задача свай с уширениями – обеспечить устойчивость фундамента за счет уменьшения мощности слоя сезонного оттаивания мерзлых грунтов основания под зданием. Некоторые особенности конструкций: при наличии сил пучения нижняя часть сваи выполняет роль анкера и обеспечивает устойчивость на выдергивание. В конструкции предусматривается использование теплоизоляционного экрана из экструдированного пенополистирола под зданием, что позволяет значительно уменьшить глубину оттаивания мерзлых грунтов основания в процессе эксплуатации сооружения. Сваи с уширением могут использоваться для малоэтажного строительства в условиях вечномерзлых грунтов.

Технология устройства буронабивных малозаглубленных свай с нижним уширением для условий вечномерзлых грунтов в работе авторов [5] включает несколько этапов:

- 1) подготовка скважин до глубины максимального сезонного оттаивания грунта;
- 2) закладка арматуры в подготовленную скважину, заливка и уплотнение бетона;
- 3) вывод верхнего края свай с использованием цилиндрической опалубки на уровень в 0,1–0,15 м от поверхности земли;
- 4) вертикальная планировка свайного поля подсыпкой песчаного грунта, устройство опалубки и арматурного каркаса для фундаментных балок, укладка теплоизоляции из экструдированного пенополистирола, заполнение песком оставшегося пустого пространства между фундаментными балками (рис. 3).

При выборе метода заглубления свай необходимо учитывать особенности, плюсы и минусы каждого метода, а также изучить местные условия на строительной площадке.

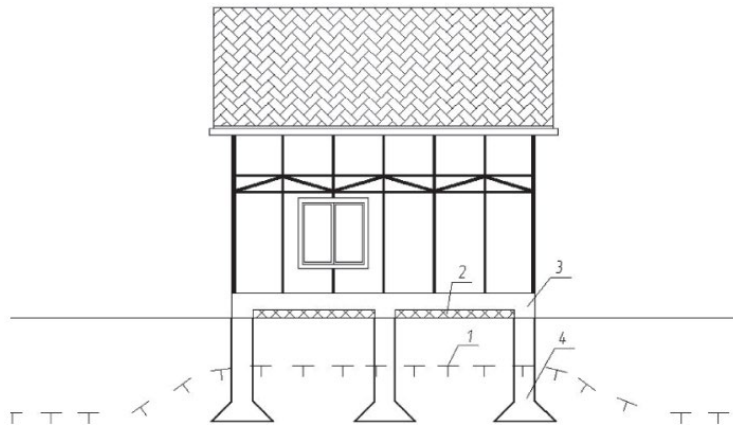
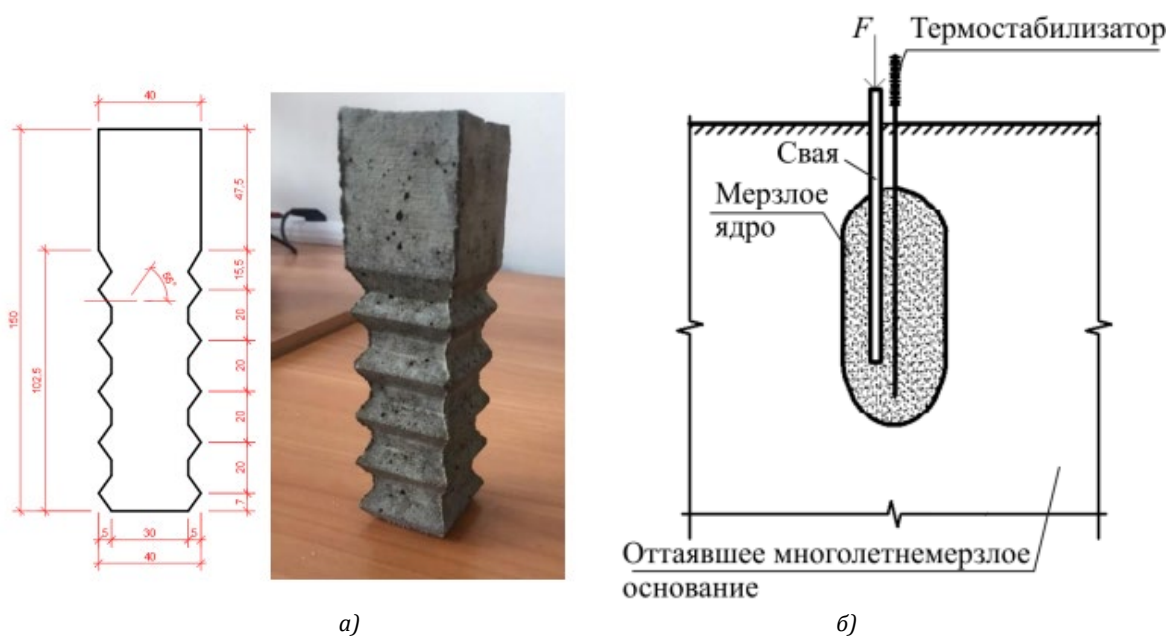


Рис. 3. Теоретическая кривая нулевой изотермы в период максимального оттаивания мерзлого грунта:
1 – граница сезонного оттаивания; 2 – утеплитель; 3 – фундаментная балка;
4 – свайный фундамент с нижним уширением [5]

В работе [6] авторы в результате проведенных численных, маломасштабных и натуральных экспериментов установили, что при термостабилизации оттаявшего и оттаивающего многолетнемерзлого основания сезонно действующими охлаждающими устройствами вокруг тела одиночной сваи формируется ядро мерзлого грунта, которое увеличивает ее несущую способность за счет увеличения рабочей контактной поверхности сваи с грунтом. Конструктивная схема одиночной сваи с мерзлым ядром, построенная по результатам проведенных экспериментов, представлена на рисунке 4, а. Исследователи заменили полученную форму эллипсоида мерзлого ядра на эквивалентный цилиндр. На основе равенства объемов двух фигур в качестве допущения было принято, что одиночная свая с мерзлым ядром представлена в виде цилиндра, погруженного в оттаявшее многолетнемерзлое основание.

В работе [7] проведенные авторами исследования для бетонных моделей ребристых свай

(рис. 4, б) показали, что во всех случаях лед образуется на нижних и верхних гранях ребер, в пространстве между ребрами – не образуется. Определение влажности раствора при погружении сваи с начальной положительной температурой показало, что влажность раствора вблизи граней ребер и в межреберном пространстве приблизительно одинакова. При рассмотрении сваи с начальной температурой, равной -20°C , влажность раствора вблизи нижних граней ребер составила 23 %. В межреберном пространстве влажность раствора уменьшилась до 16,14 %. Это свидетельствует о том, что при начальной отрицательной температуре раствора влага мигрирует к выступающим частям. При использовании ребристых свай на их ребрах образуется тонкий слой льда. В ребристых сваях нагрузка передается нижними гранями ребер и грунт или грунтовый раствор работает преимущественно на сжатие, вследствие чего наличие льда, предположительно, не будет значительно снижать несущую способность основания.



а) б)

Рис. 4. Сваи с уширениями в мерзлых грунтах:
а) свая с формой эллипсоида мерзлого ядра [6]; б) общий вид бетонной модели ребристых свай [7]

Тепловые расчеты важны при строительстве инженерно-геотехнических сооружений и зданий в зоне вечной мерзлоты. Температурный режим (совокупность последовательных температурных полей в грунтовом массиве, соответствующих любым моментам времени) рассчитывается как прогноз тепловых воздействий на верхнюю и нижнюю границы фундамента сооружения, заданный на весь расчетный период [10–15]. Наиболее характерной особенностью этих процессов является наличие ранее неизвестных («свободных») границ между различными состояниями почвы в талом и мерзлом состоянии. Из-за этой особенности их математические модели нелинейны и сложны для анализа. Результаты расчетов климатических явлений, которые являются критическими для геотехнических сооружений на многолетнемерзлых основаниях (в зоне вечной мерзлоты), показывают непрерывное повторение одного и того же сезонного цикла. Это определяет периодические гармонические колебания всех величин, которые определяются и в результате численного моделирования и анализа.

Результаты

Настоящее исследование выполнено по результатам теплотехнических расчетов численными методами основания с обоснованием принципа использования многолетнемерзлых грунтов для свайно-плитного фундамента с концевыми цилиндрическими уширениями и физико-механическими характеристиками грунтов основания в программном комплексе MIDAS GTS NX на основе нормативной документации. При подготовке настоящего научно-технического отчета использованы исходные проектно-исследовательские материалы [16–19]. При выполнении

теплотехнических расчетов глубина расчетной области подбиралась из условия отсутствия ее влияния на результаты. В связи с этим глубина модели была принята равной 68 м от низа подошвы наиболее заглубленного фундамента.

Граничные условия модели

Для нестационарного расчета распределения температуры были заданы граничные условия теплового потока. Боковым границам модели назначены закрытые, что соответствует естественным условиям, то есть тепловой поток не может пройти через них и, следовательно, рассеиваться. Весь теплообмен происходит между нижней и верхней границами. Нижней границе присвоено значение температуры, равное $-3,53$ °C и рассчитанное на основании среднесуточного значения температуры на глубине нулевых годовых амплитуд и геотермического градиента. Так, на рисунках 5–8 можно наблюдать максимальную глубину оттаивания грунтового массива в течение трех лет, которая составила от 5.3 до 17 м, что свидетельствует об изменении структуры грунта, преобразовании структурных связей между его компонентами и резким снижением прочностных и деформационных характеристик.

При выполнении численного прогноза изменения НДС грунтов основания глубина расчетной области ограничивалась глубиной сжимаемой толщи 18 м. Учитывался нестационарный расчет теплового потока, основной принцип которого базируется на вводе граничных условий, ненулевого интервала времени и тепловых параметров грунтов, основными из которых являются удельная теплоемкость c_s [кДж/(тонн·град)] и теплопроводность частиц грунта λ_s [Вт/(м·град)].

На изополях полных напряжений и упругой деформации (рис. 9, 10) представлено сравнение того, как ведет себя грунтовый массив в мерзлом и талом грунте. В полных напряжениях грунт сохраняет свою форму, а упругая дефор-

мация изменяется из-за перехода воды из твердого состояния в жидкое. Так как в грунте образуются поры, можно сделать вывод, что осадка будет больше в мерзлом грунте, чем в талом, соответственно, будет происходить деформация.

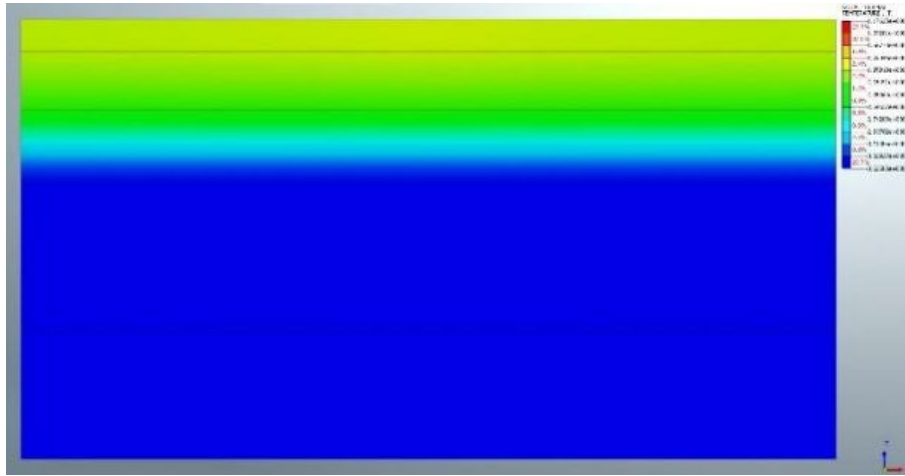


Рис. 5. Распределение положительных температур после 6 месяцев (максимальная глубина оттаивания $d_{max} = 7,1$ м)

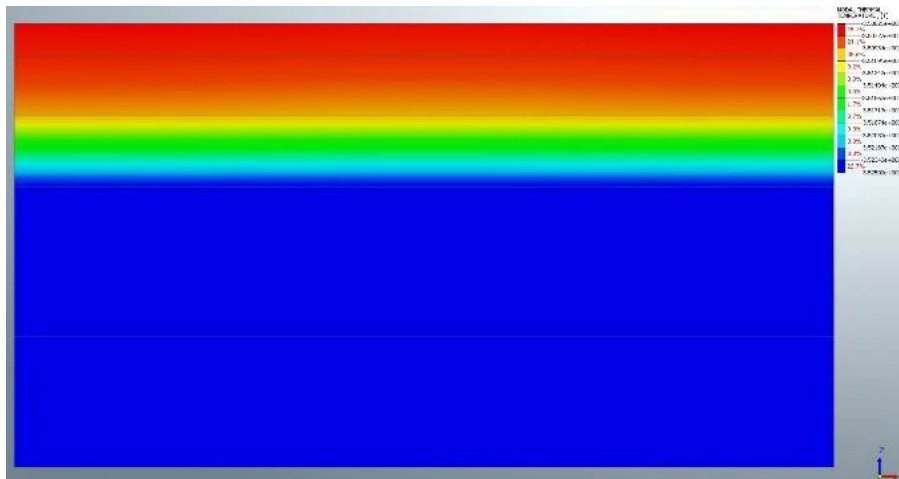


Рис. 6. Распределение положительных температур после 30 месяцев (максимальная глубина оттаивания $d_{max} = 16$ м)

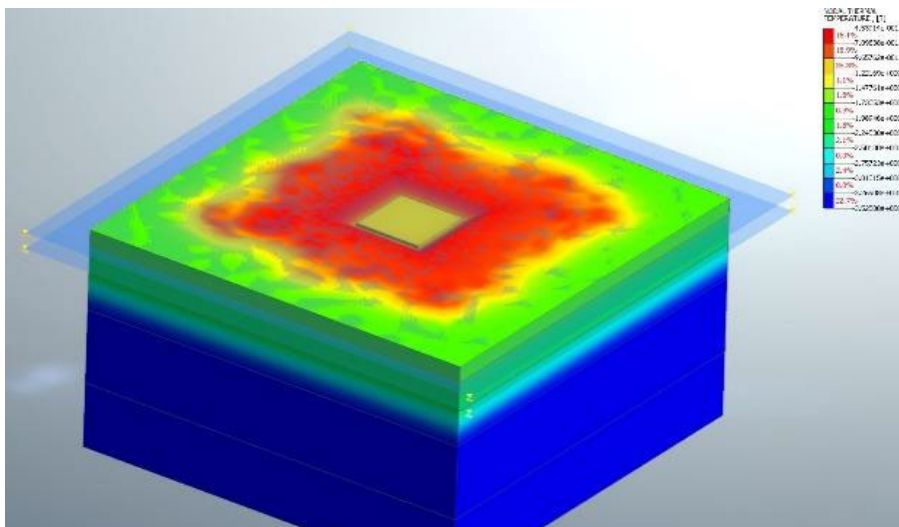


Рис. 7. Распределение положительных температур после 1 месяца (максимальная глубина оттаивания $d_{max} = 5,3$ м)

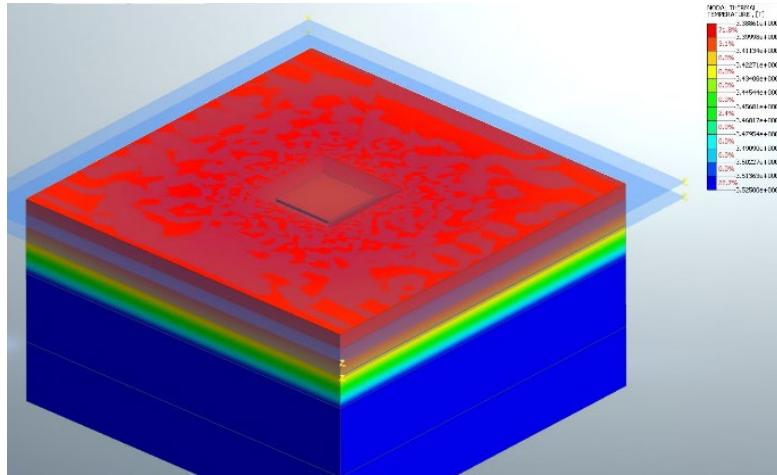


Рис. 8. Распределение положительных температур после 24 месяцев (максимальная глубина оттаивания $d_{max} = 15,6$ м)

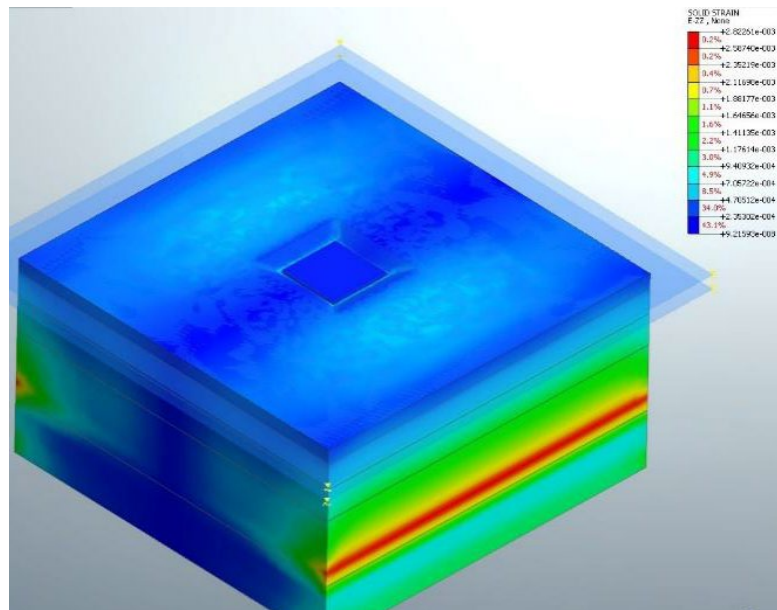


Рис. 9. Упругая деформация относительно оси Z; (талый грунт)

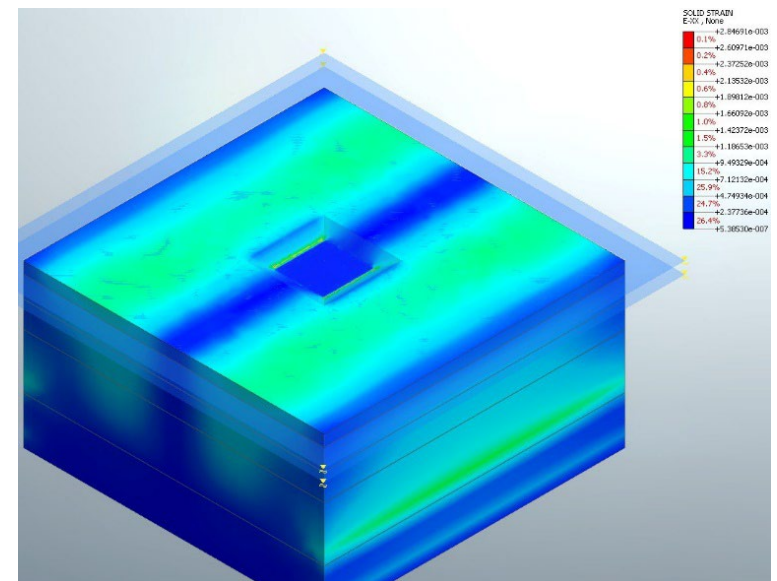


Рис. 10. Упругая деформация относительно оси X; (мерзлый грунт)

Выводы

Исследования в рамках поставленной цели показали, что из-за разной глубины оттаивания грунтов под различными элементами конструкции и их неоднородности неодинаковая осадка фундаментов из свай с уширениями при оттаивании оснований из мерзлых грунтов является неизбежным явлением, если сооружение построено на оттаивающих грунтах.

Наиболее интенсивное образование углублений наблюдается в начальный период существования сооружения, когда скорость оттаивания наибольшая. Поэтому перед возведением фундамента рекомендуется провести предварительное оттаивание грунта на определенную глубину. Это приводит к уменьшению осадки в дальнейшем и более равномерному осадконакоплению.

Для конструкций, возводимых на оттаивающих грунтах проектным методом, рекомендуется использовать жесткие массивные фундаменты, к которым относятся свайные фундаменты с уширениями. Они должны выдерживать значительные осадки и перераспределять нагрузку. Причиной последнего выбора жесткого пояса является необходимость установки поясов из железобетона довольно высоко, чтобы они взаимодействовали с остовом здания. Таким образом, при возведении сооружений на оттаивающих грунтах методом адаптации конструкции сооружений к различным населенным пунктам после завершения строительства используется система жестких массивных фундаментов, которые рассчитаны на то, чтобы выдерживать значительные перепады их грунтовых оснований.

Список литературы

1. Патент № 2817932 С1 Российская Федерация, МПК E02D 27/35. Способ снижения воздействия касательных сил морозного пучения на свайные фундаменты : № 2023119388 : заявл. 24.07.2023 : опубл. 23.04.2024 / Г. П. Кузьмин, А. Д. Набережный ; заявитель Институт мерзлотоведения имени П. И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук. – EDN YWMOXQ.
2. Набережный А. Д. Процессы миграции влаги при промерзании грунтового раствора в ребристых буроопускных сваях / А. Д. Набережный, А. Е. Саввина, А. Д. Егорова, Г. П. Кузьмин // Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ : сборник трудов V Международной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 23–24 мая 2019 г. – Санкт-Петербург : Национальный исследовательский университет ИТМО, 2019. – С. 21–222. – EDN GYQVAE.
3. Купчикова Н. В. О факторах, влияющих на надежность свайных фундаментов с уширениями / Н. В. Купчикова // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2021. – № 3 (37). – С. 54–61. – DOI: 10.52684/2312-3702-2021-37-3-54-61. – EDN VWZXNB.
4. Купчикова Н. В. Результаты численного анализа системы "здание - свайный фундамент - грунтовое основание" с помощью "MIDAS GTS NX" / Н. В. Купчикова, А. Н. Сычков // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2021. – № 1 (35). – С. 19–24. – EDN SZIVGB.
5. Местников А. Е. Буронабивные малозаглубленные сваи для малоэтажного строительства в условиях Якутии / А. Е. Местников, Д. А. Григорьев // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 11–3. – С. 491–495. – EDN VДАРQH.
6. Жайсамбаев Е. А. Методика определения осадки одиночной сваи в термостабилизируемом основании, сложенном оттаявшими многолетнемерзлыми грунтами / Е. А. Жайсамбаев, Т. В. Мальцева, А. Н. Краев, А. И. Синицкий // Construction and Geotechnics. – 2024. – Т. 15, № 3. – С. 42–55. – DOI 10.15593/2224-9826/2024.3.04. – EDN BUUIDC.
7. Набережный А. Д. Исследование несущей способности мерзлых грунтов основания ребристых буроопускных свай : дисс. ... канд. Техн. наук / А. Д. Набережный. – 2018. – 149 с. – EDN BVUJXO.
8. Скворцов Д. С. Температурный расчет грунтового основания в геотехнических программных комплексах / Д. С. Скворцов, А. И. Синицкий, Е. А. Жайсамбаев // Архитектура, строительство, транспорт. – 2024. – № 3 (109). – С. 54–63. – DOI: 10.31660/2782-232X-2024-3-54-63. – EDN IZCSZE.
9. Современные технологии проектирования и строительства фундаментов на многолетнемерзлых грунтах : сборник докладов Международной научно-технической конференции, Москва, 14–15 ноября 2018 г. – Москва : Международная ассоциация фундаментостроителей, 2018. – 63 с. – EDN YSKKTB.
10. Кудрявцев С. А. Геотехнический мониторинг инфраструктуры железных дорог Дальнего Востока России в условиях деградации многолетнемерзлых грунтов / С. А. Кудрявцев, Т. Ю. Вальцева, К. Б. Ушеревич и др. // Фундаментальные поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2022–2023 годы : научные труды РААСН : в 2 т. – Москва : АСВ, 2024. – С. 241–250. – EDN GUOZUL.
11. Кудрявцев С. А. Комплексная оценка оснований фундаментов зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах Дальнего Востока / С. А. Кудрявцев, Т. Ю. Вальцева, В. Ю. Шемякин // Фундаменты глубокого заложения и проблемы геотехники территорий : материалы III Всероссийской конференции с международным участием, Пермь, 29–31 мая 2024 г. – Пермь : Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2024. – С. 82–89. – EDN FLVUCP.
12. Сахаров И. И. О расчетах свайных фундаментов в криолитозоне при использовании термостабилизаторов / И. И. Сахаров, С. А. Кудрявцев, В. Н. Парамонов // Academia. Архитектура и строительство. – 2024. – № 4. – С. 134–140. – DOI: 10.22337/2077-9038-2024-4-134-140. – EDN BGNWSR.
13. Сахаров И. И. Новые подходы к проектированию и строительству железных и автомобильных дорог в криолитозоне / И. И. Сахаров, С. А. Кудрявцев, В. Н. Парамонов, Т. Ю. Вальцева // Транспортные сооружения. – 2024. – Т. 11, № 2. – DOI: 10.15862/03SATS224. – EDN DNITYN.

14. Кудрявцев С. А. Численное моделирование процессов оттаивания многолетнемерзлых грунтов инфраструктурных железнодорожных объектов Дальнего Востока / С. А. Кудрявцев, Т. Ю. Вальцева // Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений : тезисы докладов VIII Международного симпозиума, Тамбов, 17–21 мая 2023 г. – Тамбов : ИП Чеснокова А. В., 2023. – С. 146–147. – EDN LPSMGK.

15. Алехин В. С. Экспериментальные исследования и численный анализ деформационно-прочностных характеристик буронабивных микросвай с уширенной пятой из щебня / В. С. Алехин, Н. В. Купчикова // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2016. – Т. 43, № 4. – С. 123–132. – DOI: 10.21822/2073-6185-2016-43-4-123-132. – EDN YTNLST.

16. Житомирский Б. Л. О влиянии теплового скольжения в общем переносе тепла и влаги при термическом воздействии на мерзлые грунты при строительстве площадных объектов нефтегазопроводов / Б. Л. Житомирский // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И. М. Губкина. – 2020. – № 4 (301). – С. 72–77. – DOI: 10.33285/2073-9028-2020-4(301)-72-77. – EDN NWAKGM.

17. Кудрявцев С. А. Расчетно-теоретическое обоснование проектирования и строительства сооружений в условиях промерзающих пучинистых грунтов: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук / С. А. Кудрявцев. – Санкт-Петербург, 2004. – 40 с. – EDN NHXKYH.

18. Минкин М. А. Методика и методы инженерно-геокриологических изысканий / М. А. Минкин, М. А. Минкин. – Ухта : Институт управления, информации и бизнеса, 2005. – 252 с. – ISBN 5-9641-0012-0. – EDN QNMDRD.

19. Роман Л. Т. Строительство на намывных грунтах в криолитозоне / Л. Т. Роман и др. – Москва : б. и., 2008. – 322 с. – ISBN 978-5-94645-002-7. – EDN QNNMUF.

© *Н. В. Купчикова, В. С. Федоров*

Ссылка для цитирования:

Купчикова Н. В., Федоров В. С. Особенности возведения фундаментов из свай с уширениями на мерзлых грунтах // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГБОУ АО ВО «АГАСУ», 2025. № 1 (51). С. 79–86.