

УДК 624.139

Морозное пучение и его влияние на распорную систему ограждающих конструкций глубоких котлованов

С. В. Метелкин, В. Н. Парамонов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Метелкин С. В., Парамонов В. Н. Морозное пучение и его влияние на распорную систему ограждающих конструкций глубоких котлованов // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 1. — С. 133–142. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-133-142

Аннотация

Цель: Исследование взаимодействия конструкций ограждения котлована и массива грунта в период отрицательных температур. **Методы:** Проведение натурных измерений на действующей площадке строительства и численного моделирования. Получены данные о напряженно-деформированном состоянии системы «ограждение котлована — массив грунта»; выполнено сравнение экспериментальных данных с результатами расчетов; по результатам анализа сформулировано предложение об учете дополнительных усилий от морозного пучения в системе «ограждение котлована — массив грунта».

Результаты: Установлено, что величина сил морозного пучения может быть значительной, что говорит о необходимости учета при проектировании раскрепленных ограждений котлованов. По полученной расчетной оценке действующих на ограждения сил морозного пучения следует, что необходимо учитывать не только глубину промерзания грунта, но и значения отрицательных температур, при которых усилия в конструкциях ограждения котлована могут достигать максимумов. **Практическая значимость:** При сравнении экспериментальных данных и результатов расчета подпорных стенок определены факторы, без учета которых возможна потеря несущей способности отдельных элементов распорной системы. Также получены подробные данные о совместной работе ограждения и грунтового массива на действующей строительной площадке в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга.

Ключевые слова: Морозное пучение, ограждение котлована, распорная система, натурный эксперимент, численное моделирование.

Введение

В настоящее время освоение подземного пространства в крупных городах идет полным ходом, а значит, устройство ограждающих конструкций для разработки глубоких котлованов неизбежно. Хотя современные разработки позволяют облегчить устройство ограждающих конструкций глубоких котлованов, все же есть условия, при которых это сделать крайне затруднительно.

Одним из таких условий являются геологические условия конкретного участка. Например, по

Санкт-Петербургу грунты в верхней части геологического разреза в основном представлены мощной толщей слабых глинистых грунтов текучей и текучепластичной консистенции. Данный тип грунтов обладает низкой прочностью и является пучинистым, что вызывает развитие значительного давления на ограждающие конструкции подземных сооружений в период отрицательных температур.

Современное строительство часто ведется в условиях существующей окружающей застройки.

Поэтому проектные решения по устройству подземных сооружений в зоне примыкания к существующим сооружениям должны учитывать следующие факторы риска, которые могут привести к сверхнормативным деформациям окружающей застройки:

1. Технология устройства ограждения котлована.
2. Изменение уровня подземных вод.
3. Деформации ограждения от статических нагрузок (от давления грунта, примыкающих зданий).

Одним из наиболее существенных факторов риска являются работа ограждения при вскрытии котлована и работы тяжелой техники на краю котлованов для обеспечения нужд строительного процесса.

Строительный цикл возведения крупных жилых комплексов, общественно-деловых центров с развитой инфраструктурой, как правило, занимает не один год. А это означает, что производство работ «нулевого цикла» (устройство подземной части) на открытых котлованах может производиться в условиях отрицательных температур в течение длительного периода (более 3 месяцев).

Таким образом, возникает третий фактор риска — изменение статических условий работы ограждения котлована в период отрицательных температур.

В регионах с отрицательными зимними температурами котлованы и стены подземных сооружений подвергаются дополнительным усилиям, вызванным силами морозного пучения. Известны случаи воздействия морозных сил на распорки, на анкеры ограждений, на фундаментные плиты и вертикальные конструкции подвальной части здания [1], а также угловые подпорные стенки шлюзов, приводившие к потере устойчивости и выходу их из строя. Информация о явлениях, сопровождающих промерзание и оттаивание грунтов, и путях существующих оценок раз-

вивающихся при этом деформаций детально изложена в монографиях Н. А. Цытовича (1973), В. О. Орлова (1962) и других. Также исследованиям воздействия сил морозного пучения как в лабораторных, так и в полевых условиях посвящен ряд работ [2–5]. Такие примеры приведены на рис. 1.

По результатам изучения научно-технической литературы можно сделать вывод о том, что при подборе ограждающих конструкций котлованов в зимнее время очень важно учитывать действие дополнительных усилий, которые появляются от морозного пучения, а также принимать во внимание тот факт, что эти усилия могут расти со временем.

При проведении полевых экспериментов на разработанном глубоком котловане становится очевидным, что при определенных условиях усилия в распорных системах могут существенно превышать их значения, определенные при учете только активного давления грунта. При этом в некоторых случаях, в зависимости от значений коэффициента анизотропии морозного пучения грунта, усилия в распорках могут изменять знаки на противоположные, то есть вместо усилий сжатия в распорках могут возникать и растягивающие усилия [6].

Существующие экспериментальные определения усилий в элементах ограждения котлованов исчисляются единицами — А. В. Мельников [7], Ю. М. Гуткин [8].

Для выявления и фиксации сил морозного пучения, а также для анализа усилий в распорных элементах ограждающих конструкций глубоких котлованов в зимнее время были выполнены экспериментальные исследования.

Кроме этого, была выполнена расчетная оценка температурных полей и напряженно-деформированного состояния с помощью программы Termoground с описанием формульной основы и алгоритма расчета.

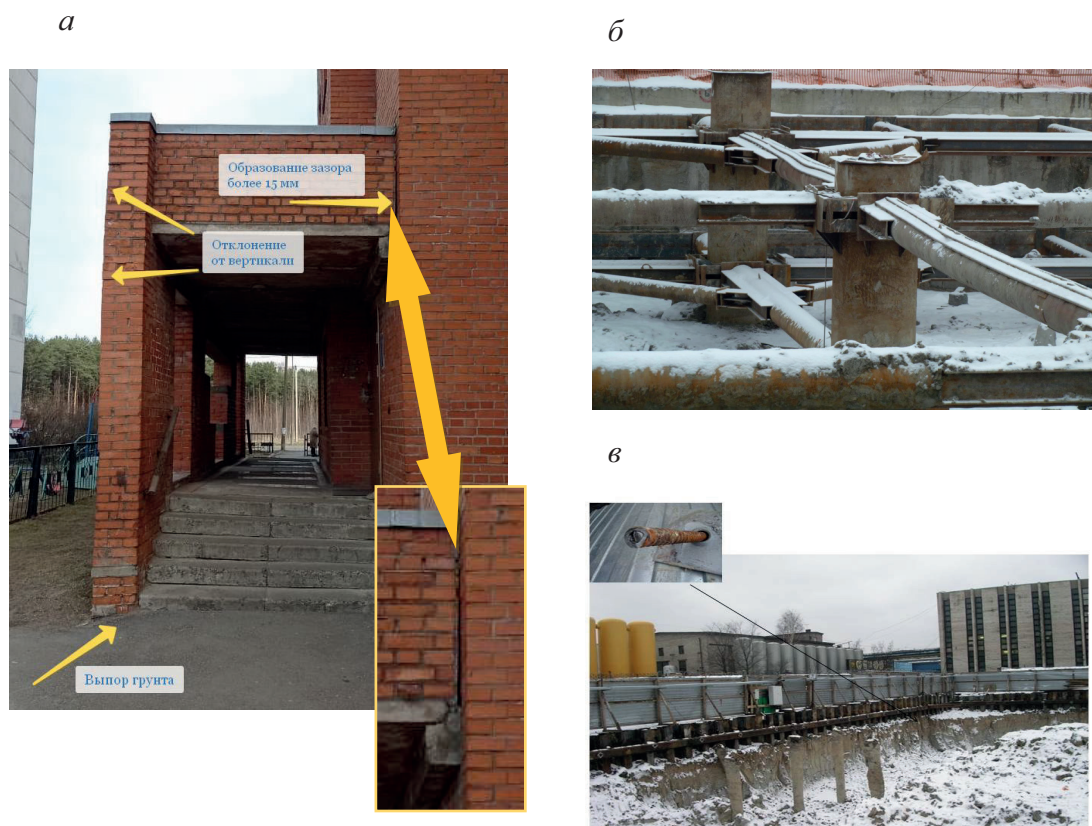


Рис. 1. Влияние сил морозного пучения:
 а — деформация входной группы; б — деформация распорных конструкций;
 в — срыв анкера шпунтового ограждения

Забегая вперед, стоит отметить, что полученные результаты экспериментальных и расчетных данных позволяют утверждать, что учет дополнительных усилий в элементах ограждений котлованов, вызванных морозным пучением грунтов, крайне необходим. Это позволит избежать негативных последствий влияния сил морозного пучения и запроектировать надежное ограждение.

Описание экспериментальной площадки

Площадка находится в г. Санкт-Петербурге, на Петроградской стороне, на углу Аптекарского пр. и Инструментальной улицы.

Участок граничит с участком и зданиями СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Здания университета построены в разные годы, имели различное историческое значение.

В зоне влияния строящегося объекта находится ряд объектов культурного наследия и несколько жилых и административных зданий.

Строится жилой дом с подземным гаражом: 9-этажное здание + 2 подземных этажа. Глубина котлована наблюдаемой части равна ~8,0 м. Длина шпунта — 12 м. Распорная система представляет собой одноярусную систему распорок. Распорки установлены на отметке «-0,750» («+2,200» абс.). Ниже дна котлована превентивно выполнено закрепление 2-метрового слоя грунта по технологии Jet-grouting.

Измерение усилий в распорной системе было организовано посредством струнных тензодатчиков, устанавливаемых на поверхности распорок дуговой сваркой, в комплекте с термистором, измерительный диапазон — 3000 микрострейн.

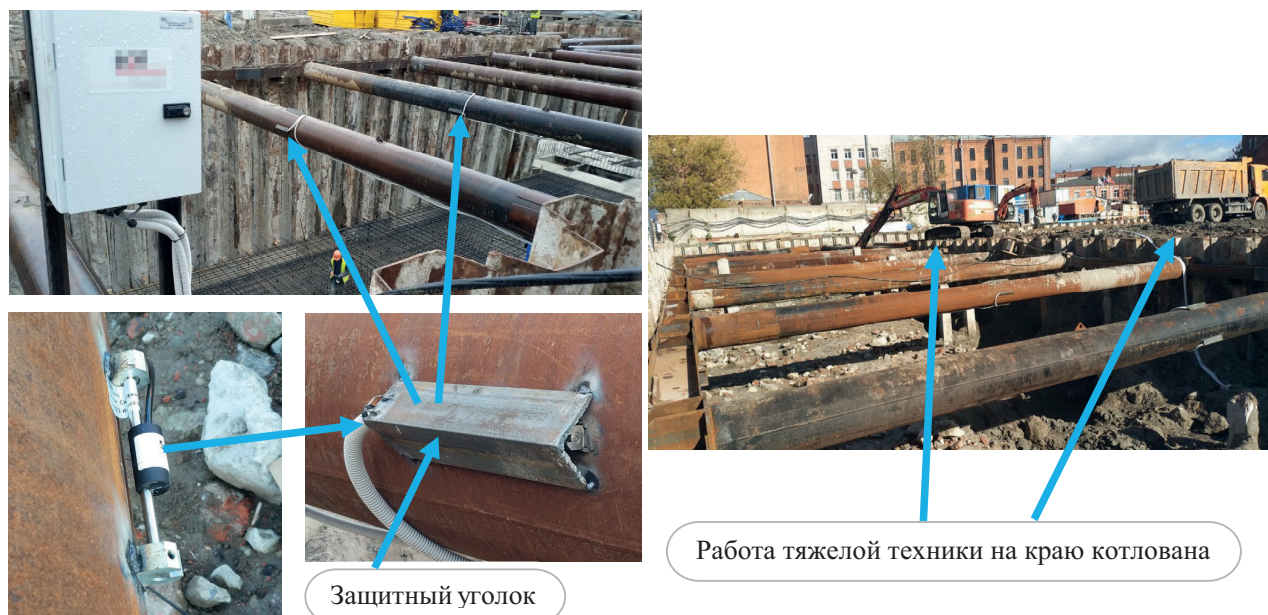


Рис. 2. Вид котлована с распорками и смонтированного датчика

Внешние усилия сжатия или растяжения, которые прикладываются к распорной системе, изменяют натяжение и, соответственно, резонансную частоту колебаний струны внутри датчика. Данные изменения регистрируются с помощью электромагнитной катушки, прикрепленной к корпусу тензометра. Наличие встроенного термистора позволяет выделять температурные напряжения конструкции от напряжений, вызванных силовыми нагрузками.

Распорная система на рассматриваемом участке представляет собой распределительную балку (двутавр 50 Ш 1) и распорки из металлических труб (530 × 7).

Распорная система устанавливалась после погружения в полном объеме шпунтового ограждения (из шпунтовых свай корытного типа, EVRAZ VITCOVICE STEEL, S 355 GP, VL 606A).

На распорки котлована в шпунтовом ограждении были установлены тензометрические датчики (32 шт.), измеряющие и фиксирующие изменяющиеся усилия в распорке, а также температурные датчики (32 шт.) для измерения и фиксации температуры наружного воздуха. Дат-

чики были установлены по периметру поперечного сечения распорки, что позволяло определять как растянутые, так и сжатые зоны. Периодичность снятия и фиксации данных в течение зимы 2018–2019 гг. составляла 1 час. Таким образом, за каждый час выполнялось более 80 измерений. Вид котлована с распорками и смонтированного датчика показан на рис. 2.

Инженерно-геологические условия площадки с поверхности представлены насыпными грунтами мощностью около 2 м, подстилаемыми песками пылеватыми толщиной 1,7 м. Ниже на всю глубину изысканий устройства шпунтового ограждения залегают текучие суглинки. Грунтовые воды к началу промерзания залежали на глубине 2 м от дневной поверхности. Таким образом, за исключением практически непучинистых насыпных грунтов, шпунтовые стены котлована с глубины от 2 до 8 метров контактируют с пучинистыми (пылеватые пески) и сильнопучинистыми (текучие суглинки) грунтами.

Результаты измерений температуры и усилий в одной из распорок котлована в начале зимнего периода показаны на рис. 3 и 4.

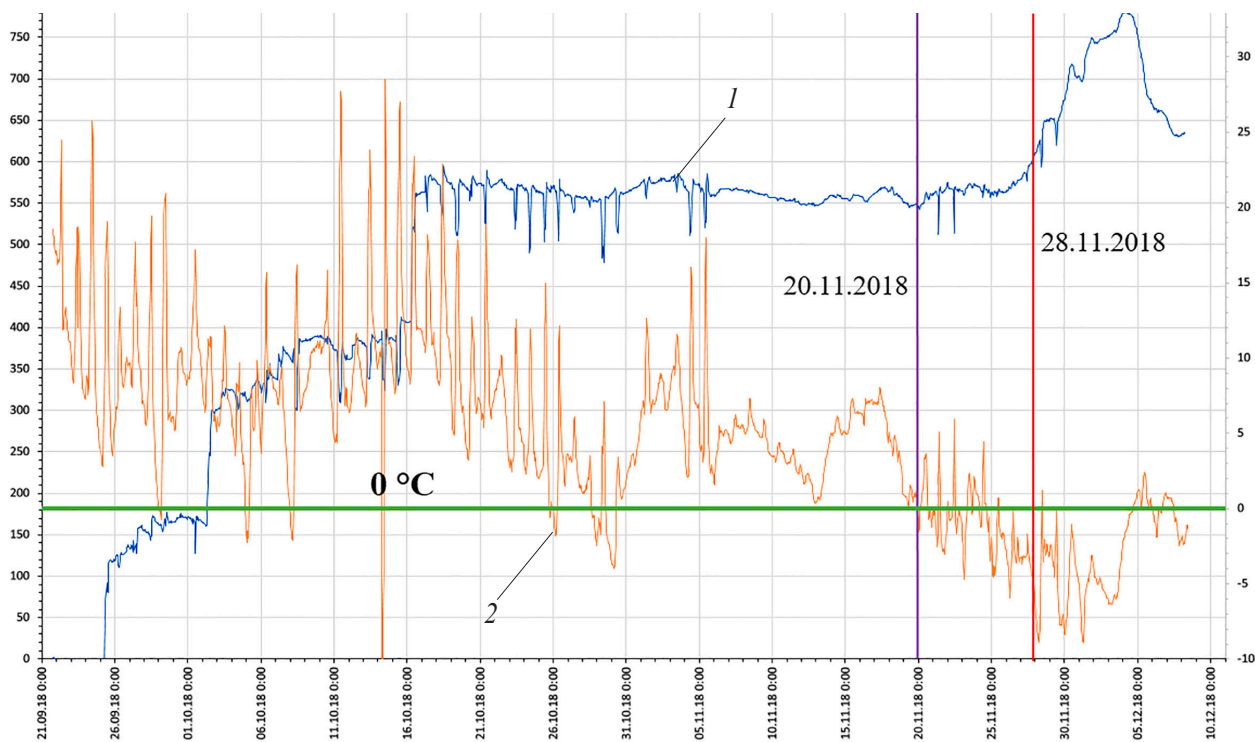


Рис. 3. Динамика роста усилий (I) от температуры (2) в распорке № 5 с течением времени

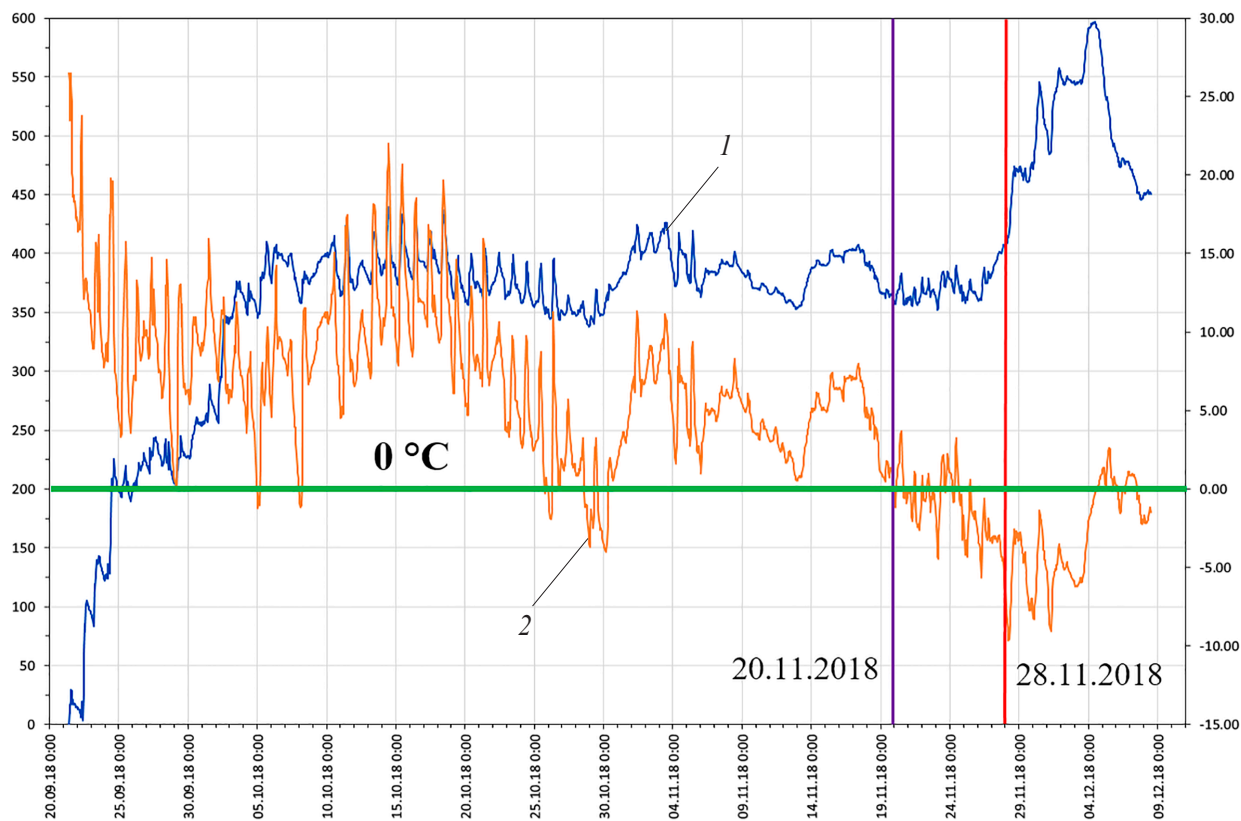


Рис. 4. Динамика роста усилий (I) от температуры (2) в распорке № 9 с течением времени

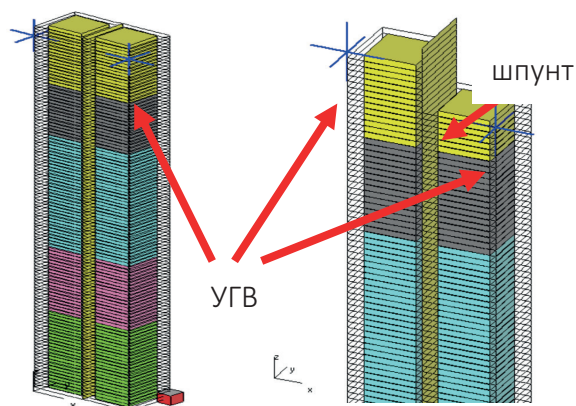


Рис. 5. Расчетная схема задачи

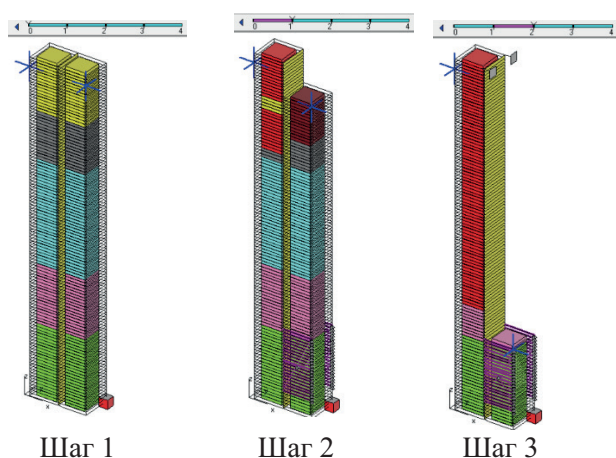


Рис. 6. Пошаговое решение задачи

По результатам наблюдений и обработки получаемых данных на протяжении всего эксперимента можно отметить, что откопка котлована резко не повлияла на изменение нагрузки в распорках — изменения были равномерные на протяжении всего периода наблюдения при положительных температурах воздуха, 204–383 кН (30 тонн), средний шаг прироста составляет 10–15 кН (1,5 тонны). Однако при наступлении периода отрицательных температур, когда открытые стенки глубокого котлована промерзли, датчики зафиксировали дополнительный, ускоренный прирост усилий в распорках. Как видно из графиков (рис. 3, 4), при наступле-

нии с 20 ноября 2018 г. устойчивого «минуса» грунт получил достаточное промерзание и с 28 ноября 2018 г. наблюдаются значительные изменения нагрузки.

Усилия в отдельных распорках составили от 418 кН до 780 кН (от 42 до 78 тонн), средний шаг прироста составляет 30–40 кН (3,5 тонны). Максимальное значение усилий в распорке в период отрицательных температур составило 78 тонн.

Для сравнения: от давления массива грунта при положительных температурах при полностью разработанном котловане и производимых строительно-монтажных работах (в том числе от работы тяжелой техники на краю котлована) — прирост составил с 360 кН до 385 кН, средний шаг прироста 20 кН (2 тонны). Максимальное усилие составило 39 тонн.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что от сил морозного пучения, при многостороннем промерзании котлована, прирост нагрузки (усилия) на распорку удвоился. Такое увеличение следует считать значительным и требующим учета в практике проектирования.

Полуаналитическое решение задачи

Следующим этапом был расчет ограждения котлована полуаналитическим методом. В расчете выполнялась оценка усилий в ограждении и распорной системе, а также горизонтальных смещений щпунта до наступления отрицательных температур. Расчетная схема задачи представлена на рис. 5.

Расчетная схема представляет два «столба» — массива грунтов с коэффициентом постели по Шмитту. Синими «крестиками» отмечен уровень грунтовых вод на первом «шаге» расчетов. Между «столбами» показана пластина, которая моделирует металлическое шпунтовое ограждение (VL606A).

Методика расчета учитывает этапность производства работ (рис. 6):

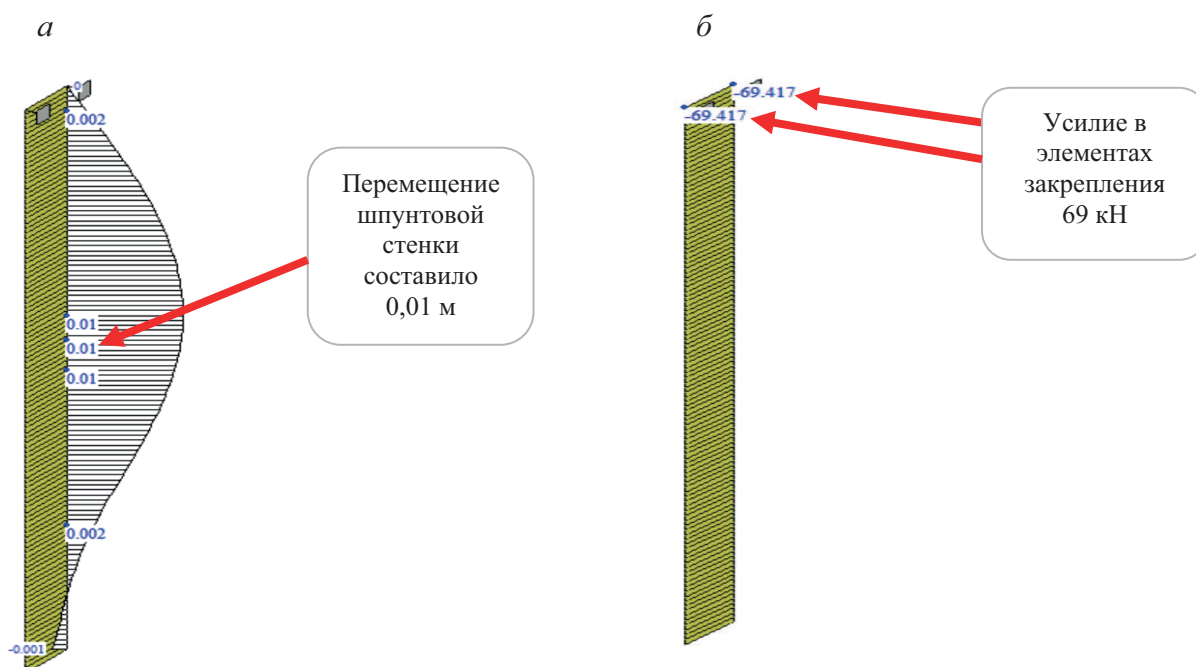


Рис. 7. Результаты расчетов модели:
 а — эпюра горизонтального перемещения; б — усилия в распорных элементах

На «шаге 1» показана расчетная ситуация, при которой на строительной площадке выполнены работы по погружению шпунтового ограждения.

На «шаге 2» выполнена откопка грунта на глубину 1 м для установки распорной системы и включение в работу плиты из грунтоцемента на глубине 9–11 м, выполненной по технологии jet-grouting.

Далее на «шаге 3» осуществлена откопка котлована до проектной глубины (котлован глубиной 8 м) при уже установленных распорных элементах. Синим крестиком справа внизу показан пониженный уровень грунтовых вод.

Результаты расчетов приведены в виде эпюры горизонтальных смещений шпунтового ограждения на рис. 7. Подписаны значения усилий в распорках.

Как видно из представленных материалов, горизонтальное перемещение металлического шпунтового ограждения при полном вскрытии (до проектной отметки) составило 1 см, а максимальные усилия в распорных элементах:

$$69,417 \text{ кН} \cdot 2 \cdot 4,8 \text{ м} = 66,6 \text{ т.}$$

Согласно данным, полученным экспериментальным путем, среднее максимальное значение в распорной системе составило 60 т.

Решение температурной задачи в программе Termoground

Как видно из приведенной выше информации, в течение всего времени действия отрицательных температур происходило значительное увеличение усилий, а значит, их необходимо учитывать при разработке грунта и устройстве подземной части в период отрицательных температур.

Для оценки усилий в распорной системе на момент окончания действия отрицательных температур в программе Termoground были выполнены температурные и деформационные расчеты.

На рис. 8 показан фрагмент расчетной схемы с зоной промерзания, выделенной голубым цветом. В верхнем углу котлована мощность мерзлого грунта, ввиду двухмерности промерзания, почти в два раза превосходит мощность промерзшего

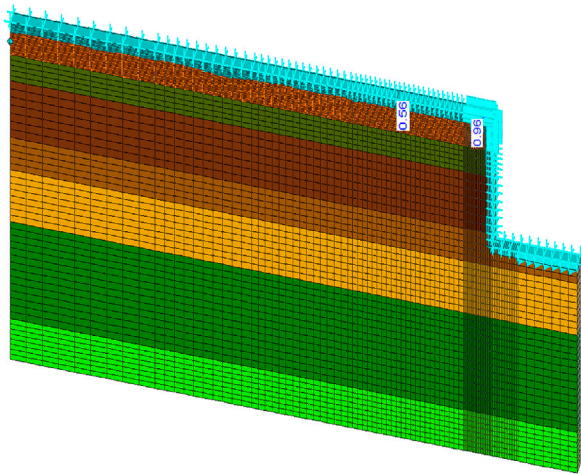


Рис. 8. Фрагмент расчетной схемы с зоной промерзания (толщина мерзлого грунта, м)

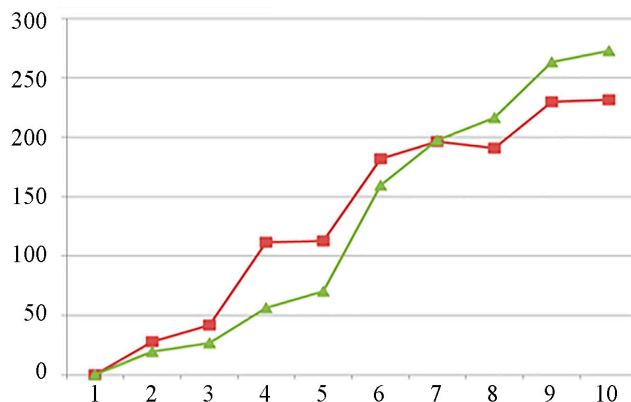


Рис. 9. График эволюции экспериментально замеренных (ряд 1) и рассчитанных (ряд 2) приращений усилий в распорке, вызванных действием морозного пучения

слоя вблизи шпунтовой стенки, составляющей 0,56 м, что следует считать закономерным.

На рис. 9 приведены расчетный и экспериментальный графики зависимости приращения усилия в распорке от времени в период отрицательных температур. Учитывая, что сравнение осуществляется с натурными условиями, для которых характерен естественный разброс характеристик грунта, можно считать, что результаты рас-

чета очень близки к реальным наблюдениям. Это позволяет использовать программу Termoground для оценки усилий в элементах ограждений котлованов, подверженных морозному пучению.

Выводы

1. Силы морозного пучения начинают действовать на элементы ограждения котлована практически сразу после начала промерзания грунта.

2. Величина сил морозного пучения может быть значительной, что говорит о безусловной необходимости ее учета при проектировании, а также о необходимости дальнейшего глубочайшего исследования (в том числе на новых экспериментальных площадках Санкт-Петербурга).

3. С переходом температур наружного воздуха в область положительных значений силы морозного пучения синхронно уменьшаются, не падая, однако, до нулевых значений.

4. При расчетной оценке действующих на ограждения сил морозного пучения следует учитывать не только глубину промерзания грунта, но и значения отрицательных температур, при которых значения сил могут достигать максимумов.

Библиографический список

1. Алексеев А. Г. Промерзание грунта в основании фундаментной плиты многоэтажного здания и его последствия / А. Г. Алексеев // Промышленное и гражданское строительство. — 2018. — № 4. — С. 37–43.
2. Каменских Е. М. Пример силового воздействия морозного пучения на ограждение котлована под свайные фундаменты копра скипового ствола / Е. М. Каменских, Б. С. Юшков // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. — 2014. — Т. 1. — С. 417–420.
3. Самарин В. Ф. Влияние морозного пучения на вертикальные подпорные стенки / В. Ф. Самарин, О. Г. Козловский // Речной транспорт (XXI век). — 2009. — № 7. — С. 84–86.
4. Орлов В. О. Метод оценки давления морозного пучения на ледогрунтовое ограждение подземного соору-

жения / В. О. Орлов, В. Х. Ким // ОФМГ. — 1988. — № 3. — С. 25–28.

5. Парамонов В. Н. Процессы промерзания и оттаивания при устройстве подземных и заглубленных сооружений / В. Н. Парамонов, И. И. Сахаров, М. В. Парамонов // Жилищное строительство. — 2012. — № 9. — С. 21–25.

6. Гречищев С. Е. Криогенные физико-геологические процессы и их прогноз / С. Е. Гречищев, Л. В. Чистотинов, Ю. Л. Шур. — М.: Недра, 1980. — 382 с.

7. Мельников А. В. Лабораторные исследования вертикальных и горизонтальных сил и деформации морозного пучения глинистого грунта / А. В. Мельников // Вестник гражданских инженеров. — 2012. — № 2. — С. 126–131.

8. Гуткин Ю. М. О горизонтальном давлении морозного пучения глинистых грунтов на ограждающие конструкции конечной жесткости / Ю. М. Гуткин // ОФМГ. — 2014. — № 1. — С. 27–31.

Дата поступления: 14.02.2022

Решение о публикации: 02.03.2022

Контактная информация:

МЕТЕЛКИН Сергей Вячеславович — аспирант;
s.metelkin@bk.ru

ПАРАМОНОВ Владимир Николаевич — д-р техн. наук,
доцент; parvn@georec.spb.ru

Frost Heave and Its Influence on Spacer System of Enclosing Constructions of Deep Ditches

S. V. Metelkin, V. N. Paramonov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Metelkin S. V., Paramonov V. N. Frost Heave and Its Influence on Spacer System of Enclosing Constructions of Deep Ditches // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 1, pp. 133–142. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-133-142

Summary

Purpose: Research of interaction between ditch fencing constructions and ground massive in negative temperature period. **Methods:** Pursuing nature measurements on active construction site and numerical modeling. Data on stress-strain state of “ditch fencing-ground massive” system were obtained; the comparison of experimental data with calculation results were made; the proposal on accounting for additional efforts against frost heave in the system “ditch fencing-ground massive” was formulated. **Results:** It was established that magnitude of forces of frost heave can be significant that says on the necessity to consider them while engineering of unfastened ditch fencings. It follows according to obtained calculation estimation of frost heave forces effecting fencings that it’s necessary not just to take into account a ground freezing depth but also negative temperature values which at, efforts in ditch fencing constructions can reach the maximum. **Practical importance:** At comparison of experimental data with retaining wall calculation results, the factors are determined which out of, the loss of bearing capability of spacer system particular elements is possible. There’re also obtained the detailed data on joint work of fencing and ground massive at active construction site in geotechnical conditions of Saint-Petersburg.

Keywords: Frost heave, ditch fencing, spacer system, nature experiment, numerical modelling.

References

1. Alekseev A. G. Promerzanie grunta v osnovanii fundamentnoy plity mnogoetazhnogo zdaniya i ego posledstviya [Soil freezing at the base of the foundation slab of a multi-storey building and its consequences]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and civil construction]. 2018, I. 4, pp. 37–43. (in Russian)
2. Kamenskikh E. M. Primer silovogo vozdeystviya moroznogo pucheniya na ograzhdenie kotlovana pod svaynye fundamenty kopra skipovogo stvola [An example of the force impact of frost heaving on the fencing of a pit for pile foundations of a skip shaft pile driver]. *Modernizatsiya i nauchnye issledovaniya v transportnom komplekse* [Modernization and scientific research in the transport complex]. 2014, V. 1, pp. 417–420. (in Russian)
3. Samarin V. F. Vliyanie moroznogo pucheniya na vertikal'nye podpornye stenki [Influence of frost heaving on vertical retaining walls]. *Rechnoy transport (KhKhI vek)* [River transport (XXI century)]. 2009, I. 7, pp. 84–86. (in Russian)
4. Orlov V. O. Metod otsenki davleniya moroznogo pucheniya na ledogruntovoe ograzhdenie podzemnogo sooruzheniya [Method for assessing the pressure of frost heaving on the ice-ground enclosure of an underground structure]. *OFMG* [OFMG]. 1988, I. 3, pp. 25–28. (in Russian)
5. Paramonov V. N. Protsessy promerzaniya i ottaivaniya pri ustroystve podzemnykh i zaglublennykh sooruzheniy [Processes of freezing and thawing in the construction of underground and buried structures]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo* [housing construction]. 2012, I. 9, pp. 21–25. (in Russian)
6. Grechishchev S. E. *Kriogennyye fiziko-geologicheskie protsessy i ikh prognoz* [Cryogenic physical-geological processes and their forecast]. Moscow: Nedra Publ., 1980. 382 p. (in Russian)
7. Mel'nikov A. V. Laboratornye issledovaniya vertikal'nykh i gorizontal'nykh sil i deformatsii moroznogo pucheniya glinistogo grunta [Laboratory studies of vertical and horizontal forces and deformation of frost heaving of clay soil]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Vestnik grazhdanskikh inzhenerov]. 2012, I. 2, pp. 126–131. (in Russian)
8. Gutkin Yu. M. O gorizontal'nom davlenii moroznogo pucheniya glinistyykh gruntov na ograzhdayushchie konstruktsii konechnoy zhestkosti [On the horizontal pressure of frost heaving of clay soils on enclosing structures of finite rigidity]. *OFMG* [OFMG]. 2014, I. 1, pp. 27–31. (in Russian)

Received: February 14, 2022

Accepted: March 2, 2022

Author's information:

Sergey V. METELKIN — PhD Postgraduate Student; s.metelkin@bk.ru

Vladimir N. PARAMONOV — D. Sci. in Engineering, Associate Professor; parvn@georec.spb.ru