



## CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 12, № 4, 2021

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2021.4.03

УДК 624.134.4: 69.058.2

### ПОВЕДЕНИЕ КОНСТРУКЦИЙ РАСКРЕПЛЕНИЯ КОТЛОВАНА В ЗИМНИХ УСЛОВИЯХ

**А.В. Бояринцев<sup>1</sup>, М.Б. Заводчикова<sup>1</sup>, И.Н. Зуев<sup>2</sup>, А.В. Журко<sup>2</sup>, И.С. Камаев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> ГАПС-Девелопмент, Москва, Россия

#### О СТАТЬЕ

Получена: 01 сентября 2021

Принята: 14 октября 2021

Опубликована: 28 декабря 2021

#### Ключевые слова:

глубокий котлован, топ-даун, стена в грунте, окружающая застройка, дополнительное воздействие.

#### АННОТАЦИЯ

Практический опыт по откопке котлованов показывает, что данный процесс растянут во времени и может длиться в течение нескольких месяцев, захватывая различные сезоны года. В данных условиях актуальным становится дополнительный учёт процессов, происходящих с ограждением котлована и окружающим его грунтовым массивом в зимний период, когда температура воздуха опускается ниже нуля.

В настоящей статье представлены результаты полевого наблюдения за ограждающими конструкциями глубокого котлована, грунтовым массивом и зданиями окружающей застройки в процессе изменения температуры воздуха в течение зимы 2020–2021 гг. Наблюдения осуществлялись путём контроля планового и высотного положения конструкций при помощи инклинометров и тахеометров. В лабораторных условиях были определены лучинистые свойства глинистого грунта, расположенного в уровне откопки котлована. Численным моделированием распределения температур в системе «атмосфера – котлован – грунтовый массив» определена глубина промерзания грунта. Всё это позволило понять природу наблюдаемых процессов.

Результаты наблюдений показали, что при понижении температуры конструкции ограждения переместились внутрь котлована до 8 мм, а здания окружающей застройки получили осадку до 5 мм. При этом результаты лабораторных исследований показали, что грунты, граничащие с ограждающими конструкциями котлована и фундаментами окружающих зданий, являются непучинистыми. Таким образом, в конкретной ситуации исключается объяснение зафиксированных деформаций явлением морозного пучения.

© **Бояринцев Андрей Владимирович** – аспирант, e-mail: [Andrey\\_boyarintsev@mail.ru](mailto:Andrey_boyarintsev@mail.ru), ORCID 0000-0001-9384-9297.

**Заводчикова Мария Борисовна** – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, e-mail: [Zvmaria@mail.ru](mailto:Zvmaria@mail.ru), ORCID 0000-0002-0480-2866.

**Зуев Иван Николаевич** – заместитель генерального директора, e-mail: [Zuev.I@hals-development.ru](mailto:Zuev.I@hals-development.ru).

**Камаев Игорь Сергеевич** – директор департамента девелопмента, e-mail: [Kamaev.I@hals-development.ru](mailto:Kamaev.I@hals-development.ru).

**Журко Алексей Владиславович** – управляющий проектированием, e-mail: [Zhurko.a@hals-development.ru](mailto:Zhurko.a@hals-development.ru), ORCID 0000-0002-3772-7719.

**Andrey V. Boyarintsev** – PhD-student, e-mail: [Andrey\\_boyarintsev@mail.ru](mailto:Andrey_boyarintsev@mail.ru).

**Maria B. Zavodchikova** – PhD, associate professor, e-mail: [Zvmaria@mail.ru](mailto:Zvmaria@mail.ru).

**Ivan N. Zuev** – Deputy General Director, e-mail: [Zuev.I@hals-development.ru](mailto:Zuev.I@hals-development.ru).

**Igor S. Kamaev** – Head of Development Department, e-mail: [Kamaev.I@hals-development.ru](mailto:Kamaev.I@hals-development.ru).

**Alexei V. Zhurko** – Design Manager, e-mail: [Zhurko.a@hals-development.ru](mailto:Zhurko.a@hals-development.ru).

Наблюдаемые деформации могут быть объяснены усадкой материала распорных конструкций вследствие понижения среднесуточной температуры воздуха. Данный эффект подтверждается результатами испытаний и рядом наблюдений, представленных в работе. На основе сделанных выводов исследования даны практические рекомендации по выполнению откопки котлованов с учётом сезонных колебаний температуры воздуха, вызывающих усадку и расширение распорных конструкций ограждения котлована любой глубины.

© ПНИПУ

## THE LOW TEMPERATURE INFLUENCE ON THE DEEP EXCAVATION SUPPORTING SYSTEM

A.V. Boyarintsev<sup>1</sup>, M.B. Zavodchikova<sup>1</sup>, I.N. Zuev<sup>2</sup>, A.V. Zhurko<sup>2</sup>, I.S. Kamaev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint-Petersburg, Russian Federation

<sup>2</sup> Hals-Development, Moscow, Russian Federation

### ARTICLE INFO

Received: 01 September 2021

Accepted: 14 October 2021

Published: 28 December 2021

#### Keywords:

deep excavation, top-down, diaphragm, surrounding development, additional effect.

### ABSTRACT

The practical experience to dig an excavation shows that this process is extended in time and can last for several months engulfing different seasons. An additional accounting of processes occurring in excavation shoring and surrounding soil body during wintertime, when the air temperature drops below zero, is important in such circumstances.

This paper describes the results of a field survey of shoring of a deep excavation, soil body and buildings of a surrounding development as the air temperature was changing during the 2020–2021 winter. The survey was performed by monitoring the horizontal and vertical positions of structures using inclinometers and tacheometers. The heaving properties of the clay soil positioned at the excavation digging level were determined in laboratory conditions. The soil frost depth was determined by a numerical simulation of temperature distributions in the "atmosphere-excavation-soil body" system. All this helped understand the nature of the processes observed.

The observation results showed that, as the temperature was decreasing, the excavation shoring structures moved into the excavation to a distance of up to 8 mm, and the surrounding development buildings shrank by up to 5 mm. The laboratory study results showed in this context that soils bordering on the shoring structures and foundations of surrounding buildings were not heaving. Thereupon, the strains, which were registered in this actual situation, can not be explained by the frost-heaving phenomenon.

The observed strain can be explained by shrinkage of the sprung structure material resulting from a decreasing mean daily air temperature. This effect was confirmed by test results and several surveys presented in the paper. Based on the study conclusions practical guidelines were formulated for excavation digging with consideration to seasonal air temperature fluctuations causing shrinkage and expansion of sprung structures in the shoring structures of excavation of any depth.

© PNRPU

## Введение

Урбанизация, переход в постиндустриальную эпоху и другие социально-экономические процессы меняют облик современного города, а также функции, возложенные на его центр. Вследствие чего увеличивается численность населения городов, его автомобилизация, рост туристического потока и повышается доля коммерческих и офисных помещений в центральной части города. Всё это провоцирует повышение нагрузки на городскую инфраструктуру, к которой она не была готова, и приводит к образованию автомобильных пробок, переполненности центральных улиц и парков, нехватке парковочных мест. Тем самым ухудшается качество городской среды, облик города, растёт его загазованность [1].

Одним из способов решения данных проблем является освоение подземного пространства городов. Такое решение позволит перенести места хранения автомобилей, транспортные развязки, торговые и административно-бытовые помещения под землю, освободив площади для озеленения и новой застройки, обеспечив оздоровление городской среды и повышение эффективности её использования [2; 3].

При этом задача, поставленная перед гражданскими инженерами по освоению подземного пространства, не является тривиальной. Плотная городская застройка, объекты культурного наследия, а также сложные инженерно-геологические условия, осложняют проектирование и процессы строительства. Тем не менее существует множество примеров успешной реализации подобных проектов по всему миру: Великобритания [4], Китай [5], Египет [6], Польша [7], Москва [8; 9], Санкт-Петербург [10–12], Тобольск [13].

Практический опыт по откопке котлованов показывает, что данный процесс растянут во времени и может длиться в течение нескольких месяцев, захватывая различные сезоны года. В данных условиях актуальным становится дополнительный учёт процессов, происходящих с ограждением котлована и окружающим его грунтовым массивом в зимний период, когда температура воздуха опускается ниже нуля.

Наиболее опасным процессом, происходящим в зимнее время, является морозное пучение грунта. Наблюдения российских [14] и китайских учёных [15] демонстрируют, что воздействия нормальных сил пучения могут достигать 0,5 МПа. Кроме того, данное воздействие может приводить к возникновению аварийных ситуаций. Следует отметить ряд объектов, когда в следствие воздействия нормальных сил пучения были повреждены или выведены из работоспособного состояния различные конструкции. Так, при промерзании основания фундамента строящегося здания были повреждены фундаментная плита и вертикальные конструкции подвальной части здания в Москве [16]. А при промерзании грунтов за ограждающей конструкцией был выведен из строя участок шлюза № 10 канала им. Москвы, выполненный из уголкового подпорной стенки [17]. Таким образом, становится очевидным необходимость учёта данных процессов при проектировании котлованов, температура воздуха внутри которых может опускаться ниже нуля при его возведении или эксплуатации.

Изучению воздействия нормальных сил морозного пучения посвящён ряд работ [18–21], как лабораторных, так и полевых. Среди прочих следует выделить лабораторный эксперимент А.В. Мельникова [22], в рамках которого были установлены соотношения значений нормальных сил пучения при различном положении фронта промерзания. Полевой модельный эксперимент Ю.М. Гуткина [23], которым была установлена зависимость величины нормального пучения от податливости конструкций ограждения. А также наблюдения, выполненные А.Г. Алексеевым [24] на участке тоннеля в г. Москве. В рамках опыта автором была установлена корреляция между лабораторными и полевыми методами испытания грунтов на пучение, а также предложена аналитическая формула для оценки значения воздействия пучащегося грунта.

Тем не менее во всех представленных работах внимание исследователей сосредоточено на процессах, связанных с изменением температуры грунта. При этом комплексно не рассматривается система «грунтовой массив – конструкции ограждения котлована», которая учитывает процессы проходящие не только в грунте, но и в самих конструкциях ограждения. Для исследования поведения котлована и грунтов вокруг него было выполнено наблюдение за ограждениями котлована в г. Санкт-Петербурге в течение зимнего сезона 2020–2021 гг. Разработка котлована была начата летом 2020 г., в декабре 2020 г. были за-

кончены работы по изготовлению ростверка. В январе и феврале 2021 г. выполнялись вертикальные конструкции подземной части. Температура воздуха при этом опустилась ниже нуля и сохранялась таковой в течение нескольких недель, опускаясь до значений минус 28 °С.

## **Методика проведения эксперимента**

### *Объект*

Для наблюдения был выбран котлован, разработанный в рамках строительства второй очереди бизнес-квартала «Невская ратуша», девелопер проекта группа компаний «ГАЛС».

Разработка котлована выполнялась по технологии Top-down. Глубина котлована составляла 10 м. Ограждение было выполнено двух видов: 1) стена в грунте длиной 27 м, и толщиной 800 мм, выполненная вдоль зданий окружающей застройки; 2) шпунт Ларсена 5-УМ, который отделял первый и второй этапы возведения второй очереди бизнес-квартала.

Распорные конструкции были выполнены из железобетонных плит толщиной 300 мм, расположенных в два уровня на относительных отметках 0 и минус 5 м, а также плиты ростверка возводимого здания толщиной 1 м, расположенного на отметке минус 10 м. За относительную отметку принята планировочная отметка площадки строительства. Железобетонные плиты представляли собой диск, разрезанный деформационными швами по контурам корпусов будущего здания, а также секциями подземных автостоянок. Ограждение и распорные плиты перекрытий прижимались друг к другу, жёстко не соединяясь.

### *Грунты*

Подземная часть строящегося здания граничит с морскими и озёрными четвертичными отложениями, представленными насыщенными водой пылеватыми песками, слоистыми супесями и суглинками в текучей консистенции, а также слабозаторфованными грунтами. Основание котлована расположено в слое песков средней крупности и средней плотности. Ограждающие конструкции заводятся в слои ледниковых отложений, представленных суглинками в тугопластичной консистенции. Характерный инженерно-геологический разрез, совмещённый с расположением конструкций котлована, представлен на рис. 1.

Основные физико-механические и теплофизические характеристики грунтов, расположенных в уровне подземной части строящегося здания, представлены в табл. 1. Физические и механические свойства были определены в рамках инженерно-геологических изысканий на территории площадки строительства. Теплофизические определены согласно СП 25.

Вдоль котлована расположены слои песков средней крупности и текучие супеси. Пески средней крупности не обладают пучинистыми свойствами. Для оценки воздействия потенциально пучинистых грунтов ИГЭ 4 (супесь текучая) в процессе откопки был выполнен отбор грунтов для определения их значения степени пучинистости. Степень пучинистости определялась на приборе определения степени пучинистости производства фирмы «ГЕО-ТЕК» согласно ГОСТ 28622-2012, с учётом влияния структуры грунта, а также направления движения фронта промерзания, для чего образцы отбирались поперёк и вдоль слоёв грунта ИГЭ 4. В дальнейшем производилось одностороннее промерзание образца «сверху вниз» с одновременной фиксацией вертикальных перемещений грунта. Данным образом моделировалось влияние структуры грунта и направления промерзания на степень пучинистости грунта. Испытания проводились при вертикальной нагрузке 30 кПа.

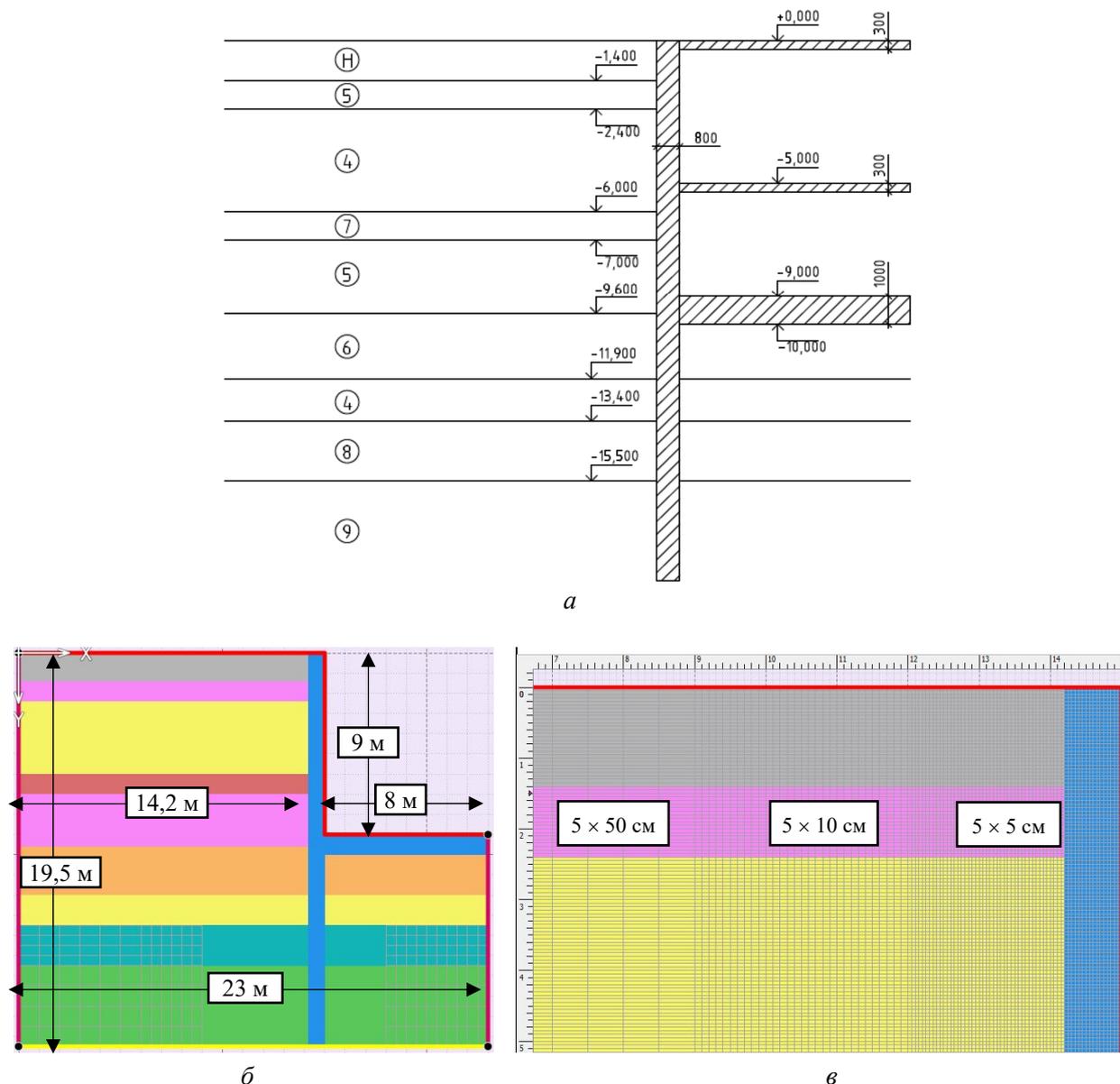


Рис. 1. Численная модель грунта и ограждения котлована: *a* – инженерно-геологический разрез; *б* – модель грунта и ограждения котлована; *в* – разбиение модели на сетку конечных элементов  
 Fig. 1. The FEM model of the soil and deep excavation supporting system: *a* – geotechnical cross-section; *б* – soil and excavation enclosure model; *в* – finite element meshing

Таблица 1

Некоторые физические и теплофизические свойства грунтов

Table 1

Some performances of the soil

ИГЭ	$\lambda_s$ , Вт/(м·°С)	$\lambda_{th}$ , Вт/(м·°С)	$C_f$ , кДж/(м <sup>3</sup> ·°С)	$C_{th}$ , кДж/(м <sup>3</sup> ·°С)	$L_v$ , МДж/м <sup>3</sup>	$T_{bf}$ , °С	$W$ , д.е.	$\rho_d$ , т/м <sup>3</sup>	$W_p$ , д.е.
4	2	1,8	2358,11	3112,80	117,15	-0,15	0,29	1,50	0,24
5	2,75	2,4	1990,95	2723,28	113,68	-0,1	0,20	1,73	–
6	2,75	2,4	1938,38	2645,54	109,78	-0,1	0,19	1,69	–
7	0,93	1,39	2603,69	3444,79	130,57	-0,15	0,61	1,01	0,49
8	1,7	1,5	2612,92	3322,95	110,22	-0,2	0,32	1,45	0,20
9	1,8	1,57	2578,45	3428,90	132,02	-0,2	0,41	1,29	0,25

### Методы наблюдения

В течение холодного периода года выполнялся геотехнический мониторинг, который включал наблюдение за среднесуточной температурой воздуха, а также реакцией ограждения котлована и грунтового массива на её изменения.

Ежедневные значения среднесуточной температуры принимались по данным метеостанции.

Наблюдения за деформациями ограждения выполнялись еженедельно при помощи геодезического и инклинометрического измерений. Кроме того, оценивалось изменение высотного положения зданий окружающей застройки, косвенно по которым можно было оценить влияние температуры на грунтовый массив. Схема расположения котлована, окружающей застройки, инклинометров и геодезических марок указана на рис. 2.

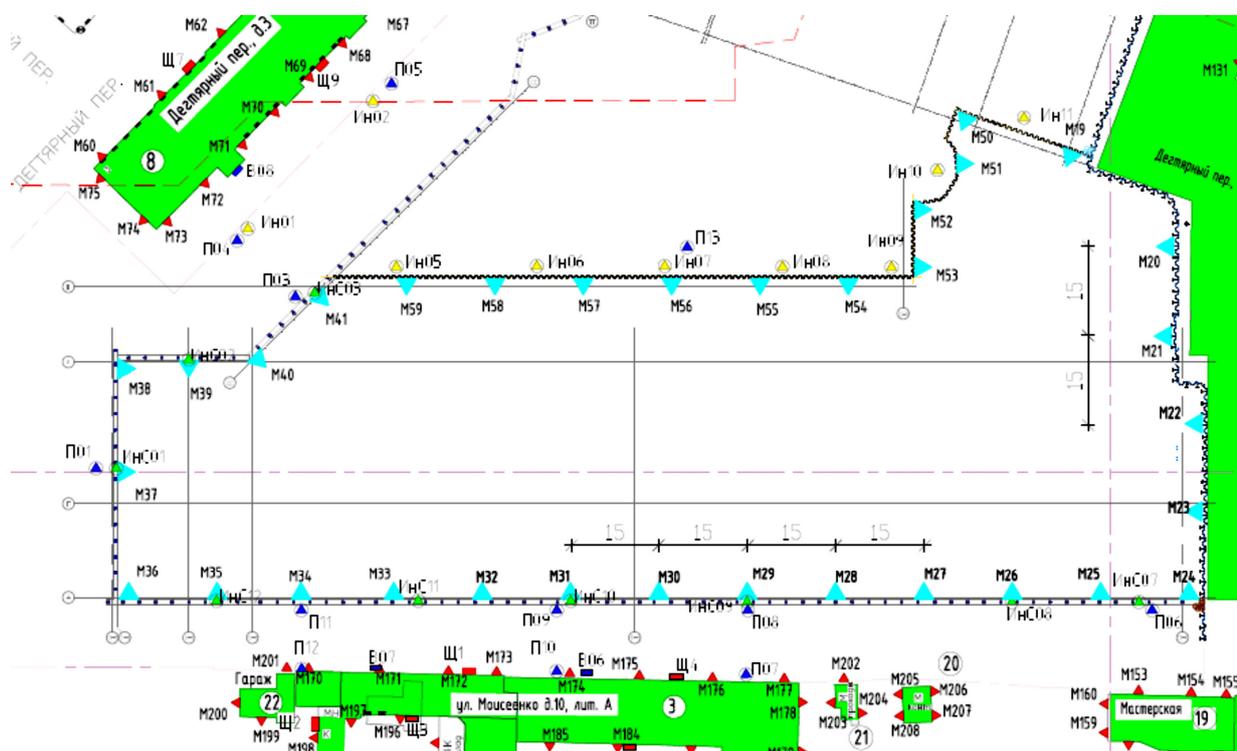


Рис. 2. Расположение инклинометров и геодезических марок

Fig. 2. The location of the measurement system

*Глубина промерзания грунта.* Для определения величины глубины промерзания грунта с поверхности земли и вдоль ограждения котлована выполнялось численное моделирование процесса промерзания в программном комплексе, реализующем конечно-разностный метод определения температуры каждой точки расчётной модели, с учётом изменений температуры воздуха в годовом цикле, условий теплопередачи между грунтом и атмосферой, а также переходов грунта из талого состояния в мёрзлое и обратно.

Численная модель представляла собой массив грунта, размеры которого назначались из условия недопущения их влияния на глубину промерзания, и составили: ширина – 23 м, глубина – 19,5 м. Разбиение модели на сетку конечных элементов представлено на рис. 2. Для получения более точных размеров глубины промерзания в предполагаемом месте её формирования ячейки сетки задавались небольшими размерами (5 × 5 см). Для сокращения

числа блоков их размеры увеличивались при удалении от сваи. Укрупнение производилось таким образом, чтобы каждый угол каждого конечного элемента приходил в углы всех окружающих.

К поверхностям модели грунта прикладывались граничные условия (далее ГУ) с учётом рекомендаций СП25: к верхней – ГУ первого рода с задаваемыми значениями температуры, условия теплообмена на поверхности не моделировались, поскольку поверхность земли вокруг котлована чистилась от снега в зимний период; к боковым – ГУ второго рода с нулевым значением теплопотока; к нижней – ГУ первого рода с постоянным значением, равным 8 °С. В правой части области моделировался котлован, его ограждение и фундаментная плита. Железобетонные элементы задавались как грунт с теплотехническими характеристиками, принятыми по СП 63 и температурой фазового перехода, равной минус 100 °С, что в данных условиях невозможно, таким образом исключались тепловыделения при переходе температуры бетона через нуль. Система задавалась как плоская задача.

## Результаты натурных наблюдений

При определении степени пучинистости образцы с горизонтальной ориентацией слоёв внутри обоймы нумеровались «Г», а с вертикальным – «В». Результаты лабораторных исследований показывают различие в пучинистых свойствах грунта при различной ориентации слоёв. Результаты исследований приведены в табл. 2.

Таблица 2

Определение анизотропии пучинистых свойств ИГЭ 4

Table 2

The frost-heave anisotropy of soil #4

Номер образца	Относительная деформация пучения	Среднее значение	Степень пучинистости по ГОСТ 28622-2012
Горизонтальное расположение слоёв внутри образца грунта			
Г1	0,056	0,057	Среднепучинистый
Г2	0,058		
Вертикальное расположение слоёв внутри образца грунта			
В1	0,009	0,017	Слабопучинистый
В2	0,021		
В3	0,022		

При горизонтальном расположении слоёв образец увеличился на 5,7, а при вертикальном – на 1,7 %. Таким образом, при моделировании промерзания грунта от котлована посредством промораживания образца грунта вдоль слоёв (образцы «В») установлено, что грунты ИГЭ 4 при фактических условиях промерзания являются слабопучинистым. Таким образом, вдоль всей глубины котлована расположены слабо- и непучинистые грунты.

По результатам наблюдения за деформациями ограждения котлована при помощи инклинометров можно отметить деформирование ограждений в периоды понижения и повышения температур воздуха (рис. 3).

Значения деформаций инклинометров в отметке верхней плиты перекрытия в течение периода наблюдений представлены в табл. 3.

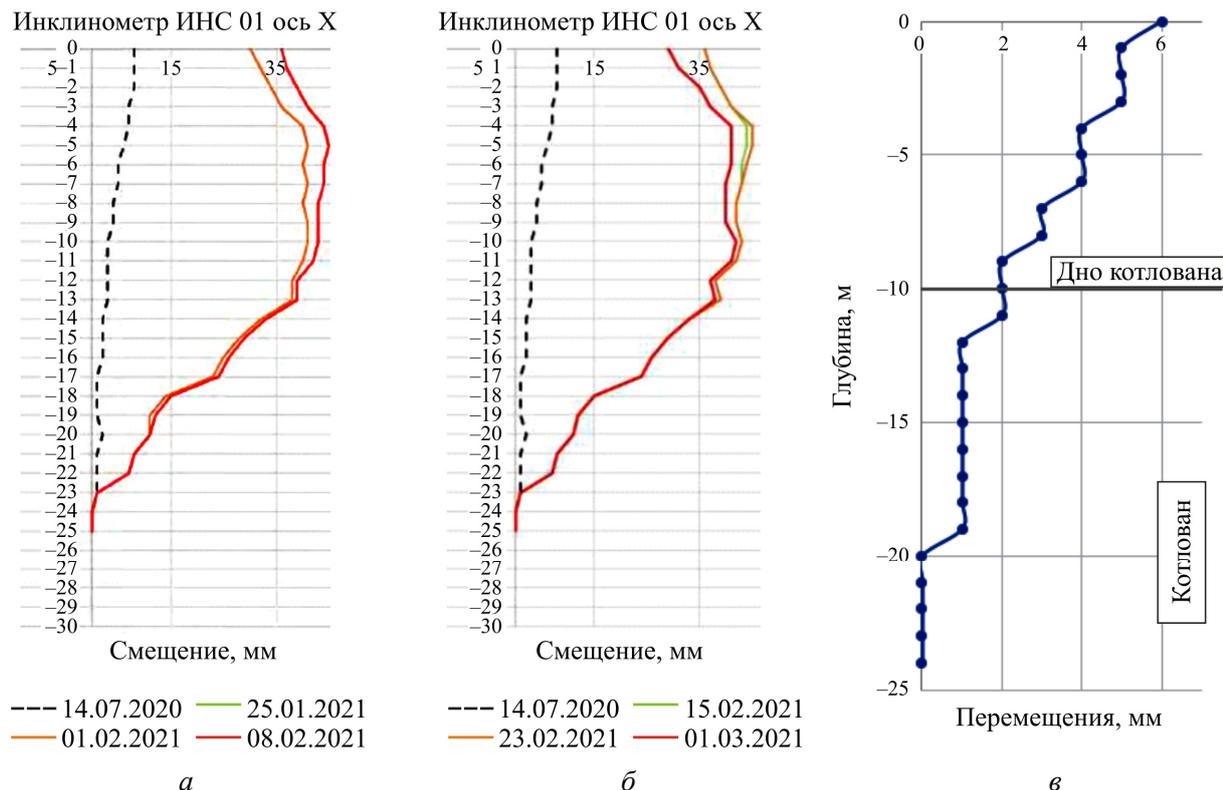


Рис. 3. Наблюдения за деформациями инклинометра ИНС 01: а – накопленные деформации за весь период строительства, измеренные в период с 25.01 по 08.02; б – с 15.02 по 01.03; в – прирост деформаций ограждения между измерениями 01.02 и 08.02

Fig. 3. The deformations of inclinometer INS 01: а – The deformation of the inclinometer from 25.01 to 08.02; б – from 15.02 to 01.03; в – the changing of the deformations from 01.02 to 08.02

Таблица 3

Горизонтальные перемещения некоторых инклинометров

Table 3

The lateral deformation of some inclinometers

Дата	Перемещения, мм				
	ИнС01	ИнС3	Ин05	Ин9	Ин11
08.12.2020	28	25	-4	-21	-9
08.02.2021	36	33	-9	-15	-2
Разница в перемещениях, мм	8	8	5	6	7

Измеренные при помощи инклинометров значения деформаций ограждающих конструкций были сопоставлены с изменением среднесуточной температуры воздуха. Сопоставление приведено в виде графика и представлено на рис. 4.

Как видно по рис. 4, понижение среднесуточной температуры воздуха до минус 5 °С сопровождается перемещением верха ограждающей конструкции внутрь котлована на 2 мм, а понижение до минус 15 °С – перемещением верха ограждения на 6 мм. Таким образом, можно заметить, что на каждое понижение температуры на 5 °С ниже нуля ограждающие конструкции реагируют перемещением её верха на 2 мм. С повышением температуры ограждение возвращается в исходное положение. При дальнейшем повышении температуры отмечается перемещение ограждающих конструкций в сторону «от котлована».

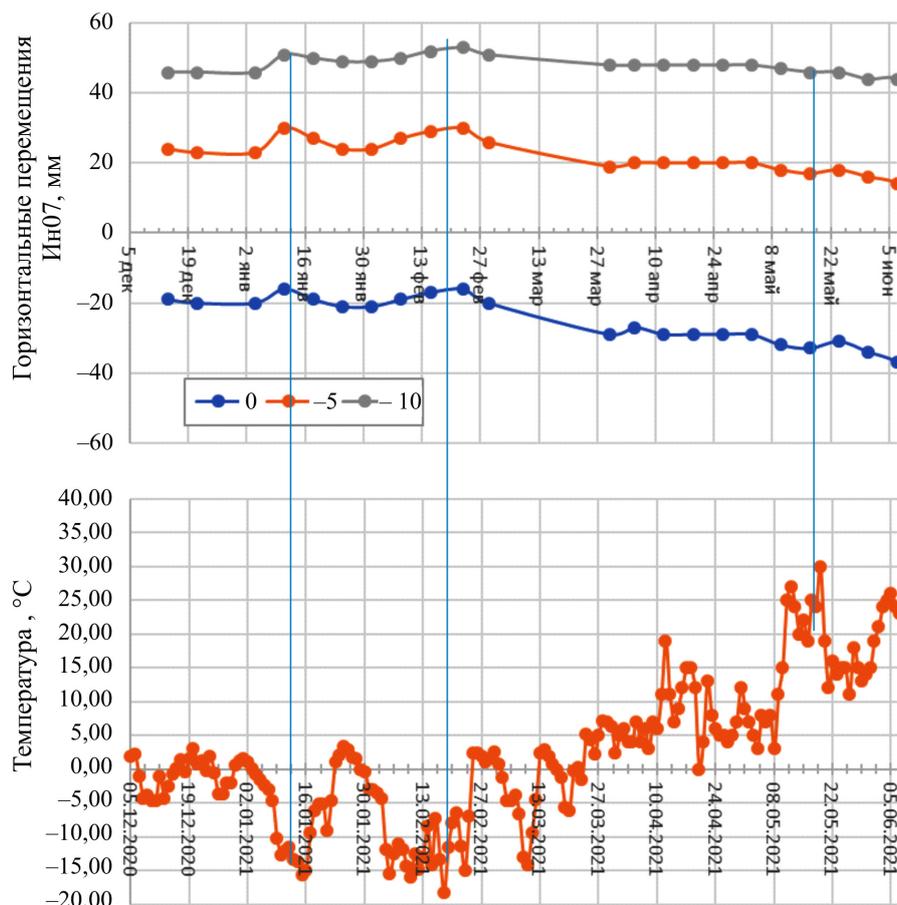


Рис. 4. Совмещённый график изменения температуры воздуха и накопленных перемещений стены в грунте за весь период строительства

Fig. 4. The comparison of the chart of the air temperature changing and the chart of the supporting system lateral displacement changing

На конец периода отрицательных температур (23.02.2021) перемещение ограждения внутрь котлована по всей глубине котлована составило 7 мм, по отношению к его началу (21–28.12.2020).

Параллельно с этим в периоды понижения температур наблюдалось раскрытие всех деформационных швов (рис. 5). При повышении температуры наблюдается закрытие швов.

Следует отметить, ввиду отсутствия дополнительного теплового воздействия солнечной радиации на конструкции нижних ярусов, подземное пространство нагревается неравномерно. Так, с момента потепления ограждающая конструкция в уровне верхней плиты (0 м) вернулась в исходное положение, деформация составила 7 мм. В уровне второй плиты, на отметке минус 5 м, перемещения составили 4 мм. В уровне ростверка, отметка минус 10 м, перемещения составили только 1 мм. При этом в процессе промерзания значения деформаций всех плит соотносятся друг с другом, что свидетельствует о равномерности охлаждения конструкций.

Моделирование процесса промерзания грунта с учётом натуральных наблюдений за температурой воздуха показали, что грунт промёрз на величину 0,5 м за стеной котлована. У поверхности глубина промерзания составила 1,3 м (рис. 6), что соответствует нормативному значению, вычисленному согласно СП22.



*a*

*б*

Рис. 5. Раскрытие деформационных швов между плитами:  
*a* – плита на отметке минус 5 м (вид снизу); *б* – плита на отметке минус 5 м (вид сверху)

Fig. 5. The deformation joints: *a* – plate at minus 5 m (bottom view);  
*б* – plate at minus 5 m (view from above)

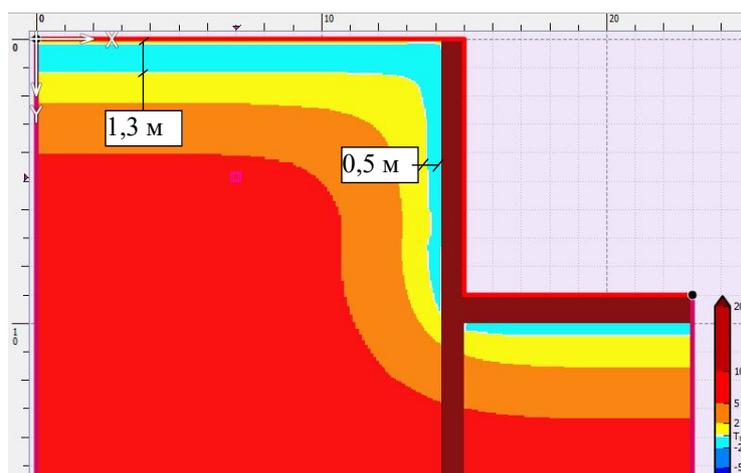


Рис. 6. Результаты моделирования промерзания грунта

Fig. 6. The FEM modeling result

## Обсуждение результатов

Скорость промерзания грунтов в рассмотренной задаче составляет от 16 до 29 мм/сут с понижением скорости к концу холодного периода года, что соотносится с данными, полученными другими учёными [25; 26]. Для промерзания слоя грунта толщиной 500 мм за стеной ограждения котлована при максимальном градиенте температур и при условии охлаждения бетона «стены в грунте» должно потребоваться не менее 14 сут. Также необходимо принять во внимание и скорость развития деформаций морозного пучения. По данным [28; 29] для слабопучинистых грунтов деформации развиваются со скоростью от 0,5 до 2 мм/сут. Таким образом, полный период развития деформаций морозного пучения составляет не менее 15 сут при условии совместного развития промерзания и пучения грунта. Как видно из наблюдений, полные деформации ограждения котлована фиксируются уже на вторые сутки (рис. 4) после наступления холодов.

Учитывая скорость реакции ограждения котлована на изменение температуры (рис. 4), повсеместное раскрытие деформационных швов при понижении температуры, а также

знакопеременные деформации ограждения при понижении и повышении температуры воздуха, можно сделать вывод о том, что при понижении температуры бетон плит перекрытия уменьшается в объёме, а при её повышении – увеличивается.

Дополнительным доказательством данного тезиса является характер деформирования ограждения. Как показывают наблюдения, значения горизонтального смещения ограждения котлована равномерно увеличиваются от его низа к верху. Тогда как пучинистые свойства грунтов по глубине котлована неравномерны: слои непучинистых песков расположены в верхней и нижней частях котлована на отметках 0...2,7 и 7...10 м, а массивный слой текучих слабопучинистых супесей и заторфованных грунтов находятся в отметках 2,7...7 м. Таким образом, воздействие пучащегося грунта должно быть сосредоточенным в центральной части ограждения котлована, в уровне ИГЭ 4 и 7, что должно было отразиться на эпюре изменения деформаций ограждения котлована (рис. 3, в), тогда как зафиксированный характер деформирования соответствует перемещению консольного ограждения.

Следует отметить одинаковые значения деформаций ограждения, выполненного из стены в грунте (СВГ) и шпунта. За шпунтами, тонкостенными конструкциями, толщина промёрзшего слоя грунта составила 1,3 м, тогда как за СВГ – 0,8–0,5 м. При этом, как видно из табл. 3, деформации инклинометров на шпунте (обозначение Ин...) и СВГ (обозначение ИнС...) сопоставимы. Данное наблюдение также подтверждает отмеченную ранее природу деформаций ограждения.

Согласно СП 63.13330, в диапазоне температур –40...+50 для бетонных конструкций значение коэффициента температурного расширения равно 0,00001 1/°С. Так, значение деформации температурного сжатия плит перекрытия  $\delta$ , равное 0,0097 м, или 9,7 мм, может быть определено по формуле

$$\delta = \alpha_{bt} \cdot \Delta T \cdot L = 0,00001 \cdot (-15 - 0) \cdot 48,6 = 0,0097.$$

Полученное значение соотносится с измеренными инклинометрами значениями.

Согласно данным, полученным по лабораторным испытаниям, а также численному моделированию, можно определить увеличение слоя текучей супеси  $y$ , равного 0,0085 м, или 8,5 мм, который расположен на отметках минус 2,7...6 м:

$$y = \varepsilon_{th} \cdot h_{fn} = 0,017 \cdot 0,5 = 0,0085 \text{ м} = 8,5 \text{ мм}.$$

Принимая во внимание то, что при нормальном воздействии пучения, часть деформации компенсируется деформированием подстилающих непромёрзших слоёв грунта [24], можно сделать вывод о незначительном влиянии сил морозного пучения на перемещения ограждения котлована.

Ввиду температурной усадки плит распорной системы и отсутствия её соединения с ограждающими конструкциями, изменилась схема работы конструкций ограждения котлована: из опёртых на плиты перекрытия они стали консольными, защемлёнными в грунте, со значением вылета консоли, равным 10 м. Ввиду этого значительно уменьшилась жёсткость системы ограждения, что и вызвало наблюдаемые перемещения внутрь котлована (см. рис. 3, в).

Согласно исследованиям [30], перемещение ограждения котлована способствует оседанию поверхности грунта. Таким образом, сезонные изменения линейных размеров распорных конструкций, вследствие колебаний их температуры, оказывают влияние на дополнительные осадки зданий окружающей застройки. Как показывают наблюдения за зда-

нием по ул. Моисеенко д. 10, вследствие перемещения ограждения в период отрицательных температур была зафиксирована осадка марок на величину от 2 до 5 мм (рис. 7). При линейном расширении плит перекрытий во время потепления и перемещении конструкций ограждения в сторону «от котлована» наблюдается подъём зданий до 2 мм. При этом значение подъёма не компенсирует осадку, которую получило здание вследствие усадки бетона плит распорной системы котлована.

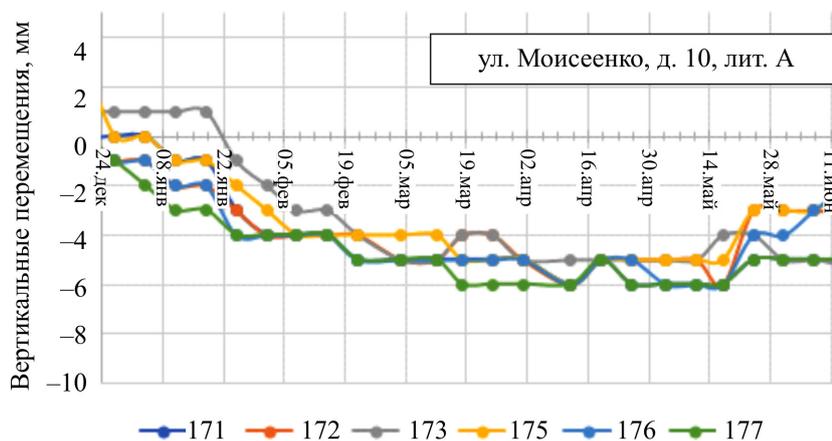


Рис. 7. Вертикальные перемещения здания окружающей застройки  
Fig. 7. The settlement of the nearest building to excavation pit

Данные перемещения демонстрируют значимость температурного изменения линейных размеров материала распорных конструкций, его влияние на дополнительную осадку зданий, попадающих в зону влияния нового строительства.

Следует отметить возможность использования данного эффекта для положительного воздействия на высотное положение здания: в качестве компенсационного подъёма, вызванного температурным расширением распорной системы.

Таким образом, при планировании земляных работ необходимо учитывать явления, связанные с температурным расширением и усадкой материалов распорной системы котлована.

## Выводы

В рамках настоящей работы выполнено наблюдение за плановым и высотным положением конструкций ограждения котлована и зданий окружающей его застройки. Наблюдения показали, что при понижении среднесуточной температуры воздуха до минус 28 °С ограждения смещаются внутрь котлована до 8 мм, а здания окружающей застройки получают дополнительную осадку до 5 мм. При этом результаты лабораторных испытаний показывают, что окружающий котлован грунтовый массив является слубопучинистым и не способен вызвать подобных деформаций.

На основе наблюдений, лабораторных испытаний и численного моделирования сделан вывод о влиянии температурных деформаций материала распорной системы котлована на деформирование системы «котлован – грунтовый массив – существующая застройка».

Для минимизации воздействия от данного эффекта рекомендуется при планировании земляных работ реализовывать следующие мероприятия:

- проводить работы по изготовлению распорных систем в межсезонные периоды года, когда температура воздуха выше нуля. Данное решение способствует минимизации сезонных колебаний линейных размеров распорных конструкций в годовом цикле;
- в холодный период года поддерживать температуру воздуха внутри котлована выше нуля. Данные мероприятия позволят исключить промерзание грунтов вокруг котлована, температурную усадку конструкций распорной системы и всех сопутствующих им процессов;
- планировать работы по откопке котлована таким образом, чтобы в процессе откопки грунта на наиболее ответственных отметках происходило повышение температуры воздуха и материал распорных конструкций расширялся в сторону «от котлована», компенсируя тем самым горизонтальные смещения ограждения при откопке и, как следствие, деформации зданий окружающей застройки.

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов.** Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

## Библиографический список

1. Рахманов А.Б. Четыре колеса апокалипсиса: причины автомобильных пробок в крупных городах мира // Вестник томского государственного университета. Философия. Социология. Политология. – 2020. – № 58. – С. 170–188.
2. Инновационная практика в городах и доктрина градоустройства / В.А. Ильичёв, С.Г. Емельянов, В.И. Колчунов, Н.В. Бакаева // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. – 2014. – № 3. – С. 3–18.
3. Руководство по комплексному освоению подземного пространства крупных городов / В.А. Ильичев [и др.]. – М.: РААСН, 2014. – 211 с.
4. Fuentes R., Pillai A., Ferreira P. Lessons learnt from a deep excavation for future application of the observational method // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical engineering. – 2018. – № 10. – P. 468–485. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.12.004> (дата обращения: 07.07.2021).
5. Cui X., Ye M., Zhuang Y. Performance of a foundation pit supported by bored piles and steel struts: a case study // Soil's and foundations. – 2018. – № 58. – P. 1016–1027. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.05.004> (дата обращения: 07.07.2021).
6. Ahmed A.A., Ahmed S.M., Samy M.N. Deformations envelopes associated with deep pit excavations in Nile alluviums of the greater Cairo // AICSGE9 Alexandria, Egypt 19–21 december, 2016. – P. 1–15.
7. Deep excavation in urban areas – defects of surrounding buildings at various stages of construction / J. Rybak, A. Ivannikov, E. Kurilova, T. Zryek // MATEC Web of Conferences. – 2018. – № 146. – URL <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814602012> (дата обращения: 07.07.2021).
8. Влияние строительства уникальных объектов с подземной частью на примыкающие исторические здания / Н.С. Никифорова, Ф.Ф. Зехниев, С.В. Астафьев, О.В. Буртовская // Вестник гражданских инженеров. – 2009. – № 2. – С. 126–129.
9. Научно-техническое сопровождение проектирования и строительства торгово-рекреационного комплекса «охотный ряд» на манежной площади / В.А. Ильичев, П.А. Ко-

новалов, Н.С. Никифорова, И.В. Колыбин, А.Н. Скачко // Российская архитектурно-строительная энциклопедия. – 2008. – С. 242–246.

10. Ильичёв В.А., Мангушев Р.А., Никифорова Н.С. Опыт освоения подземного пространства российских мегаполисов // ОФМГ. – 2012. – № 2. – С. 17–20.

11. Мангушев Р.А., Осокин А.И., Сотников С.Н. Геотехника Санкт-Петербурга. Опыт строительства на слабых грунтах. – М.: Изд-во АСВ, 2018. – 386 с.

12. Опыт сооружения подземных паркингов в условиях слабых грунтов Санкт-Петербурга / Р.А. Мангушев, Е.Б. Лашкова, В.Ю. Смоленков, М.А. Зайцев // Вестник гражданских инженеров. – 2015. – № 5. – С. 91–100.

13. Опыт совместного применения инъекционных свай и кессона при устройстве подземного этажа здания историко-культурного наследия в г. Тобольске/ Я.А. Пронозин, Р.В. Мельников, Ю.В. Зазуля, М.А. Степанов // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 3. – С. 22–30.

14. Алексеев А.Г. Определение горизонтального давления морозного пучения, действующего на подпорные стены при промерзании грунта // Промышленное и гражданское строительство. – 2007. – № 6. – С. 24.

15. Chao G., Zh. Lu Frost heaving of foundation pit for seasonal permafrost areas // Magazine of Civil Engineering. – 2019. – № 2. – P. 61–71.

16. Алексеев А.Г. Промерзание грунта в основании фундаментной плиты многоэтажного здания и его последствия // Промышленное и гражданское строительство. – 2018. – № 4. – С. 37–43.

17. Максименко Е.В., Левачев С.Н. Воздействие морозного пучения грунта на подпорные стены гидротехнических сооружений // Вестник МГСУ. – 2010. – № 4–2. – С. 331–338.

18. Каменских Е.М., Юшков Б.С. Пример силового воздействия морозного пучения на ограждение котлована под свайные фундаменты копра скипового ствола // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – 2014. – Т. 1. – С. 417–420.

19. Самарин В.Ф., Козловский О.Г. Влияние морозного пучения на вертикальные подпорные стенки // Речной транспорт (XXI век). – 2009. – № 7. – С. 84–86.

20. Орлов В.О., Ким В.Х. Метод оценки давления морозного пучения на ледогрунтово-ограждение подземного сооружения // ОФМГ. – 1988. – № 3. – С. 25–28.

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

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

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

24. Алексеев А.Г. Методика исследования давления, действующего на подпорные стены при промерзании-оттаивании грунта // ОФМГ. – 2007. – № 3. – С. 15–18.

25. Горелик Я.Б., Паздерин Д.С. Корректность постановки и решения задач по прогнозу динамики температурных полей в основании сооружений на многолетнемерзлых грунтах // Криосферы Земли. – 2017. – Т. XXI, № 3. – С. 49–59.

26. Кудрявцев С.А., Кажарский А.В. Численное моделирование процесса миграции влаги в зависимости от скорости промерзания грунтов // *Инженерно-строительный журнал*. – 2012. – № 4. – С. 33–38.

27. Расчёт системы «основание – сооружение» при промерзании и оттаивании грунтов с помощью программы «Termoground» / В.М. Улицкий, И.И. Сахаров, В.Н. Парамонов, С.А. Кудрявцев // *ОФМГ*. – 2015. – № 5. – С. 3–7.

28. Chamberlain E.J., Gow A.J. Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils // *Dev. Geotech. Eng.* – 1979. – URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-41782-4.50012-9> (дата обращения: 07.07.2021).

29. Kujala K. Evaluation of factors affecting frost susceptibility in soils // *Frost Geotech Eng Proc 2nd Symp Anchorage*. – 1993.

30. Зерцалов М.Г., Казаченко С.А., Конюхов Д.С. Исследование влияния разработки котлована на окружающую застройку // *Вестник МГСУ*. – 2014. – № 6. – С. 77–86.

## References

1. Rahmanov A.B. CHetyre kolesa apokalipsisa: prichiny avtomobil'nyh probok v krupnyh gorodah mira [The reasons of traffic jams in the big cities]. *Vestnik tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Filosofiya. Sociologiya. Politologiya*, 2020, no. 58, pp. 170–188.

2. Il'ichev V.A., Emel'yanov S.G., Kolchunov V.I., Bakaeva N.V. Innovacionnaya praktika v gorodah i doktrina gradoustrojstva [The innovative practice and doctrine of urban planning]. *Biosfernaya sovместimost': chelovek, region, tekhnologii*, 2014, no. 3, 2014, pp. 3–18.

3. Il'ichev V.A. [et al]. Rukovodstvo po kompleksnomu osvoeniyu podzemnogo prostranstva krupnyh gorodov [The guide of the underground space mastering]. Moscow, RAASN, 2014, 211 p.

4. Fuentes R., Pillai A., Ferreira P. Lessons learnt from a deep excavation for future application of the observational method. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical engineering*, 2018, no. 10, pp. 468–485. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.12.004>.

5. Cui X., Ye M., Zhuang Y. Performance of a foundation pit supported by bored piles and steel struts: a case study. *Soil's and foundations*, 2018, no. 58, pp. 1016–1027. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.05.004>.

6. Ahmed A.A., Ahmed S.M., Samy M.N.. Deformations envelopes associated with deep pit excavations in Nile alluviums of the greater Cairo. *AICSGE9 Alexandria*, Egipt 19–21 December, 2016, pp. 1–15.

7. Rybak J., Ivannikov A., Kurilova E., Zryek T. Deep excavation in urban areas – defects of surrounding buildings at various stages of construction. *MATEC Web of Conferences*, 2018, 146. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814602012>.

8. Nikiforova N.S., Zekhniev F.F., Astafev S.V., Burtovskaya O.V. Vliyanie stroitel'stva unikal'nyh ob"ektov s podzemnoj chast'yu na primykayushchie istoricheskie zdaniya [The influence of deep excavation to nearest historical buildings]. *Vestnik grazhdanskih inzhenerov*, 2009, no. 2, pp. 126–129.

9. Il'ichev V.A., Konovalov P.A., Nikiforova N.S., Kolybin I.V., Skachko A.N. Nauchno-tekhnicheskoe soprovozhdenie proektirovaniya i stroitel'stva torгово-rekreacionnogo kompleksa «ohotnyj ryad» na manezhnoj ploshchadi [The scientific definition of the design and construction of the “Ohotnui ryad” city mall on Manezhnaya square]. *Rossiyskaya arhitekturno-stroitel'naya enciklopediya*, 2008, pp. 242–246.

10. Il'ichyov V.A., Mangushev R.A., Nikiforova N.S. Opyt osvoeniya podzemnogo prostranstva rossijskikh megapolisov [The experience of underground mastering in biggest Russian cities]. *Bases, foundation and solis mechanics*, 2012, no. 2, pp. 17–20.

11. Mangushev R.A., Osokin A.I. Sotnikov S.N. Geotekhnika Sankt-Peterburga. Opyt stroitel'stva na slabyyh gruntah [Saint-Petersburg geotechnic. The experience of building on soft soils]. Moscow, ASV, 2018, 386 p.

12. Mangushev R.A., Lashkova E.B., Smolenkov V.YU., Zajcev M.A. Opyt sooruzheniya podzemnyh parkingov v usloviyah slabyyh grunntov Sankt-Peterburga [The experience of the building of the underground parking in Saint-Petersburg]. *Vestnik grazhdanskih inzhenerov*, 2015, no. 5, pp. 91–100.

13. Pronozin Ya.A., Mel'nikov R.V., Zazulya Yu.V., Stepanov M.A. Opyt sovместnogo primeniya in'ekcionnyh svaj i kessonа pri ustrojstve podzemnogo etazha zdaniya istoriko-kul'turnogo naslediya v g. Tobol'ske [The experience of construction of underground floor of historical building in Tobolsk]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*, 2013, no. 3, pp. 22–30.

14. Alekseev A.G. Opređenje gorizontalnogo davleniya moroznogo pucheniya, dejstvuyushchego na podpornyye steny pri promerzanii grunta [The determinaton of lateral influence of frost heave]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2007, no. 6, p. 24.

15. Chao G., Lu Zh. Frost heaving of foundation pit for seasonal permafrost areas. *Magazine of Civil Engineering*, 2019, no. 2, pp. 61–71.

16. Alekseev A.G. Promerzanie grunta v osnovanii fundamentnoj plity mnogoetazhnogo zdaniya i ego posledstviya [The consequence of the soil freezing under the foundation plate of the building]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2018, no. 4, pp. 37–43.

17. Maksimenko E.V., Levachev S.N. Vozdejstvie moroznogo pucheniya grunta na podpornyye steny gidrotekhnicheskikh sooruzhenij [The influence of frost heave on supporting systems of hydraulic structures]. *Vestnik MGSU*, 2010, no. 4–2, pp. 331–338.

18. Kamenskih E.M., Yushkov B.S. Primer silovogo vozdejstviya moroznogo pucheniya na ograzhdenie kotlovana pod svajnyye fundamenty kopra skipovogo stvola [The sample of the frost heave influence on excavation pit supporting system]. *Modernizaciya i nauchnyye issledovaniya v transportnom komplekse*, 2014, vol. 1, pp. 417–420.

19. Samarin V.F., Kozlovskij O.G. Vliyanie moroznogo pucheniya na vertikal'nyye podpornyye stenki [The influence of frost heave on supporting structeres]. *Rechnoj transport (HKHI vek)*, 2009, pp. 84–86.

20. Orlov V.O., Kim V.H. Metod ocenki davleniya moroznogo pucheniya na ledogruntovoe ograzhdenie podzemnogo sooruzheniya [The method of analyze of frost heave influence on ice-soil supporting system of underground structure]. *Bases, foundation and solis mechanics*, 1988, no. 3, pp. 25–28.

21. Paramonov V.N., Saharov I.I., Paramonov M.V. Processy promerzaniya i ottaivaniya pri ustrojstve podzemnyh i zaglublennyh sooruzhenij [The frost and thaw processes while underground structure is building]. *ZHilishchnoe stroitel'stvo*, 2012, no. 9, pp. 21–25.

22. Mel'nikov A.V. Laboratornyye issledovaniya vertikal'nyh i gorizontal'nyh sil i deformacii moroznogo pucheniya glinistogo grunta [The lab investigation of vertical and lateral forces and deformations of frost heave of the clay]. *Vestnik grazhdanskih inzhenerov*, 2012, no. 2, pp. 126–131.

23. Gutkin Yu.M. O gorizontal'nom davlenii moroznogo pucheniya glinistyh grunтов na ograzhdayushchie konstrukcii konechnoj zhyostkosti [About lateral influence of frost heave on supporting system of excavation pit]. *Bases, foundation and solis mechanics*, 2014, no. 1, pp. 27–31.

24. Alekseev A.G. Metodika issledovaniya davleniya, dejstvuyushchego na podpornye steny pri promerzanii-ottaivaniy grunta [The investigation methodology of lateral influence of frost heave on supporting walls]. *Bases, foundation and solis mechanics*, 2007, no. 3, pp. 15–18.

25. Gorelik Ya. B., Pazderin D.S. Korrektnost' postanovki i resheniya zadach po prognozu dinamiki temperaturnyh polej v osnovanii sooruzhenij na mnogoletnemerzlyh gruntah [The correctness of determination of temperature flows in the soil base of the building on permafrost]. *Kriosfery Zemli*, 2017, vol. XXI, no. 3, pp. 49–59.

26. Kudryavtsev S.A., Kazharskij A.V. CHislennoe modelirovanie processa migracii vlagi v zavisimosti ot skorosti promerzaniya gruntov [The Finite element modeling of water flow in freezing soil]. *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal*, 2012, no. 4, pp. 33–38.

27. Ulickij V.M., Saharov I.I., Paramonov V.N., Kudryavtsev S.A. Raschyot sistemy «osnovanie-sooruzhenie» pri promerzanii i ottaivaniy gruntov s pomoshch'yu programmy «Termoground» [The using of “Termoground” software for modeling of the freezing and thawing of soils]. *Bases, foundation and solis mechanics*, 2015, no. 5, pp. 3–7.

28. Chamberlain E.J., Gow A.J. Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils. *Dev. Geotech. Eng.*, 1979. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-41782-4.50012-9>.

29. Kujala K. Evaluation of factors affecting frost susceptibility in soils. *Frost Geotech Eng. Proc 2nd Symp Anchorage*, 1993.

30. Zercalov M.G., Kazachenko S.A., Konyuhov D.S. Issledovanie vliyaniya razrabotki kotlovana na okruzhayushchuyu zastrojku [The investigation of the excavation influence to nearest buildings]. *Vestnik MGSU*, 2014, no. 6, pp. 77–86.