

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ФУНДАМЕНТОВ ЗДАНИЙ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ПОДЗЕМНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

NUMERICAL MODELING OF THE STRESS-STRAIN STATE OF BUILDING FOUNDATIONS IN THE AREA OF INFLUENCE OF UNDERGROUND CONSTRUCTION

Строительство в условиях плотной городской застройки сопровождается развитием дополнительных осадок существующих зданий. Зачастую разработка котлованов проводится в водонасыщенных грунтах и требует принятия мер по водопонижению, что влечет за собой изменение гидрогеологических условий площадки строительства. Приводится сопоставление результатов расчета осадок фундаментов зданий окружающей застройки при разработке котлована с учетом и без учета водопонижения. Исследование проводилось с применением аналитических решений и численного моделирования.

Ключевые слова: окружающая застройка, водонасыщенные грунты, подземное строительство, зона влияния, напряженно-деформированное состояние оснований.

Construction in dense urban areas is accompanied by the development of additional settlement of existing buildings. Excavation is often carried out in water-saturated soils and requires dewatering measures, which leads to changes in the hydro-geological conditions of the construction site. This article presents a comparison of the settlement calculations for the foundations of surrounding buildings during nearby excavation, both with and without consideration of dewatering. The study was conducted using analytical solutions and numerical modeling.

Keywords: surrounding buildings, water-saturated soils, underground construction, zone of influence, stress-strain state of foundations.

Введение

Подземное строительство открытым и закрытым способами в условиях городской застройки часто сопровождается водопонижением, что вызывает развитие дополнительных деформаций зданий и сооружений, расположенных вблизи котлованов. Эта проблема особенно актуальна при строительстве в исторической городской застройке из-за рисков повреждений и значительных экономических затрат на восстановление архитектурных памятников [1–4]. Дополнительные деформации зданий часто зависят от инженерно-геологических и гидрогеологических

условий площадки, применяемых технологий строительства, проектных решений и многих других факторов [5–7].

Влияние устройства котлованов на соседние здания и сооружения достаточно подробно описано в научных работах [8–16]. Мероприятия по оценке безопасности зданий и сооружений приведены в работах [17–19].

Актуальность настоящей работы заключается в учете изменения гидрологических условий площадки в процессе строительства при осушении котлована и прогнозировании дополнительных осадок существующего здания при водопонижении.

Целью исследования является оценка влияния водопонижения при разработке котлована в условиях плотной городской застройки на величину дополнительных осадок фундаментов примыкающего здания.

Для достижения поставленной цели были выполнены аналитические и численные исследования влияния водопонижения на дополнительные осадки существующего здания, примыкающего к котловану.

Аналитические решения для гидрогеологических расчетов

В большинстве случаев дополнительные осадки зданий и сооружений соседней застройки происходят от влияния комплекса различных факторов. К этим факторам относятся конструктивно-технологические, температурно-влажностные, динамические, статические, гидрогеологические и др. [20, 21].

Критериями безопасности существующих зданий в современной нормативной базе являются ограничения осадок, их относительных разностей (кренов) предельными значениями:

$$\sum S_{ad}^i \leq S_{ad,u}; \quad (1)$$

$$\Delta S_{ad}^i / L \leq (\Delta S / L)_u, \quad (2)$$

где S_{ad}^i — величина дополнительных деформаций (осадок, их относительных разностей или кренов) окружающих конструкций от статических и технологических нагрузок на основание; L — расстояние между соседними фундаментами.

Рассмотрим пример влияния водопонижения в условиях городской застройки и выведем основные аналитические гидрогеологические параметры. При водопонижении за пределами котлована образуется депрессионная поверхность (положение уровня безнапорных вод в пространстве). Расчетная схема к определению дополнительных осадок грунта вследствие понижения уровня грунтовых вод представлена на рис. 1.

Аналитические решения в области оценки водопонижения приводятся для выработок круглой формы. Для выработок произвольной формы предварительно определяется

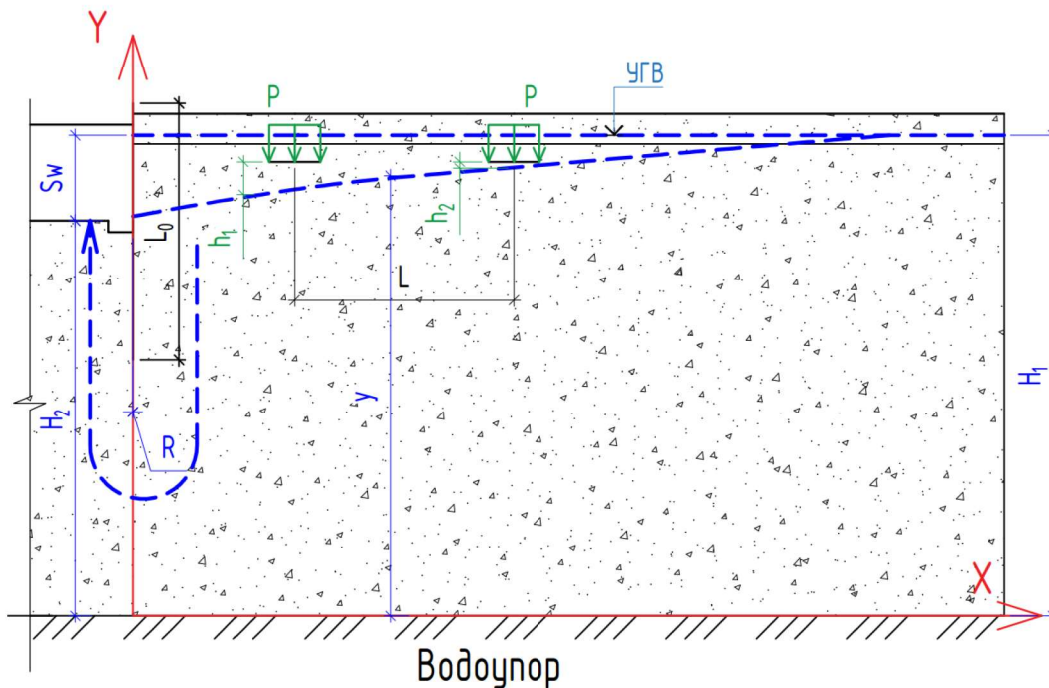


Рис. 1. Расчетная схема к определению дополнительных осадок

приведенный (расчетный радиус), зависящий от конфигурации и отношения ширины выработки b к ее длине d [22].

Расчетный радиус для невытянутых выработок при $b/d > 0,5$ определяется по формуле

$$r_0 = \sqrt{\frac{F}{\pi}}; \quad (3)$$

для вытянутых выработок при $b/d \leq 0,5$ расчетный радиус определяется по формуле

$$r_0 = \eta \frac{b+d}{4}, \quad (4)$$

где r_0 — приведенный радиус выработки, м; b, d — ширина и длина выработки, м; F — площадь выработки, м²; η — табличная функция, зависящая от значения соотношения b/d .

В большинстве случаев мощность водоносных слоев оказывается больше глубины котлованов, и ограждения не доводятся до водоупорных слоев грунта. В этом случае котлован является несовершенным [23].

Радиус влияния депрессионной воронки R в условиях безнапорной фильтрации при водопонижении можно определить по формуле [24]

$$R = 2S_w \sqrt{H_1 \cdot k_f}, \quad (5)$$

где S_w — величина водопонижения уровня подземных вод в котловане, м; H_1 — расстояние от уровня подземных вод до водоупо-

ра, м; k_f — коэффициент фильтрации грунта, м/сут.

Значения коэффициентов фильтрации и радиусов влияния для некоторых грунтов приведены в табл. 1.

Приток воды в котлован можно вычислить по формуле

$$q = \frac{k_f (H_1^2 - H_2^2)}{2R}, \quad (6)$$

где H_2 — расстояние от дна котлована до водоупора, м.

Депрессионная кривая при водопонижении в несовершенном котловане описывается следующим выражением:

$$y = \sqrt{H_2^2 + 2 \frac{q}{k_f} x}, \quad (7)$$

где y, x — вертикальная и горизонтальная ординаты депрессионной кривой, м.

Максимальное S_{\max} и минимальное S_{\min} значения дополнительных осадков фундаментов существующих зданий в пределах депрессионной кривой можно определить по формулам

$$S_{\max} = \frac{(\gamma_d \cdot h_1 + P) h_1}{2E}, \quad (8)$$

$$S_{\min} = \frac{(\gamma_d \cdot h_2 + P) h_2}{2E}, \quad (9)$$

где γ_d — удельный вес грунта, кН/м³; h_1 и h_2 — максимальная и минимальная разности отметок подошв фундаментов и ординат депрессионной кривой соответственно, м;

Таблица 1

Значения коэффициентов фильтрации и радиусов влияния для некоторых грунтов

Грунт	Коэффициент фильтрации k_f , м/сут	Радиус влияния R , м
Пески гравелистые	50–100	120–150
Пески крупные	20–75	100–120
Пески средней крупности	10–30	70–80
Пески мелкие	2–10	50–60
Пески пылеватые	1–3	20–40
Супеси легкие	0,1–0,7	10–20
Супеси тяжелые	0,01–0,1	5–10
Торф слаборазложившийся	1,0–4,5	–
Торф сильноразложившийся	0,01–0,15	–

P — величина давления по подошве фундаментов, кПа; E — модуль деформации грунта основания, МПа.

Неравномерность осадок можно определить по формуле

$$\delta = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{L}, \quad (10)$$

где L — расстояние между соседними фундаментами, м.

Практический пример

Приведем практический пример устройства котлована размерами в плане 17,5×8,5 м и глубиной 5,0 м под аккумулирующий резервуар для сбора и поверхностного стока с территории автостоянки вблизи нежилого четырехэтажного бесподвального здания. Ограждающие конструкции котлована выполняются из шпунтовых металлических свай «Ларсен Л5-УМ». Система раскрепле-

ния — в виде обвязочного пояса из спаренных двутавров профиля 40К1 и распорки из трубы $\phi 530 \times 8$. Схема расположения открытого котлована и существующего здания показана на рис. 2.

Физико-механические характеристики грунтов приняты по результатам инженерно-геологических изысканий и представлены в табл. 2. ИГЭ-7 (глины твердые) являются водоупорным слоем. Основанием фундамента существующего здания являются водонасыщенные пески. Уровень грунтовых вод расположен на глубине 1,0 м от дневной поверхности.

Существующее здание имеет бескаркасную конструктивную схему с несущими продольными стенами. Стены толщиной 0,55–0,8 м выполнены из кирпича. Перекрытия опираются на металлические двутавровые балки.

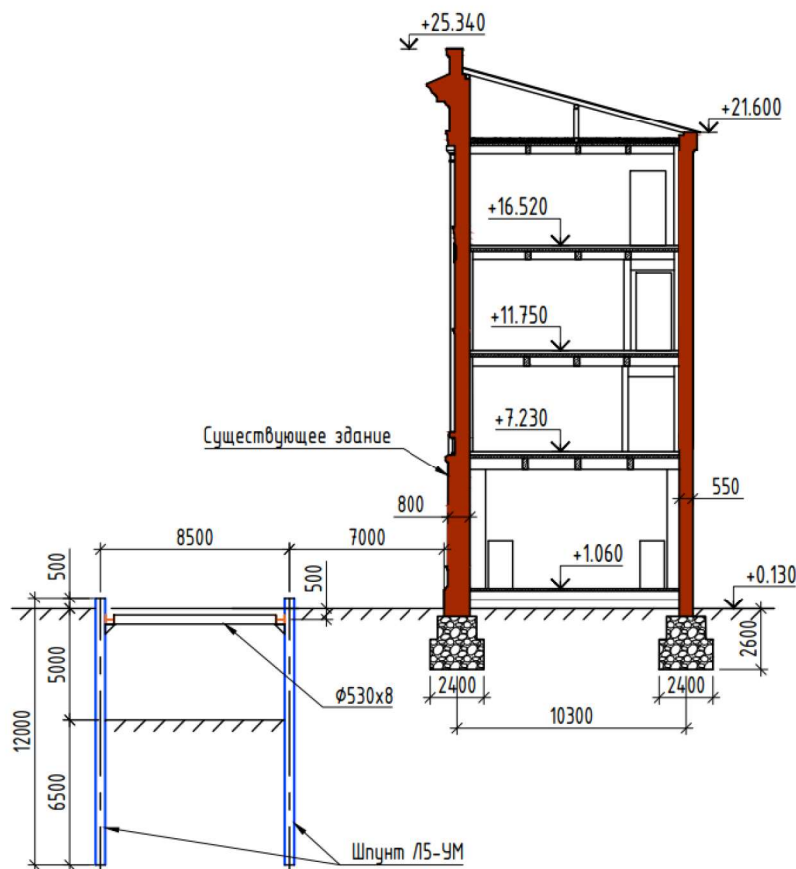


Рис. 2. Схема расположения сооружения и здания

Физико-механические свойства грунтов

№ ИГЭ	Наименование грунта	h , м	ρ , т/м ³	ν	e	IL	k_p м/сут	c , кПа	φ , °	E , МПа
1	Насыпные грунты (супеси с линзами песка)	1,4	1,9	–	–	–	–	–	–	–
2	Пески средней крупности серые водонасыщенные	1,8	2,12	0,31	0,680	–	6,0	2	29	17
3	Суглинки тяжелые пылеватые текучие коричневатого-серые с прослоями песка	2,8	1,82	0,38	1,000	1,0	0,4	8	10	6
4	Суглинки легкие пылеватые мягкопластичные серые	1,1	1,99	0,36	0,700	0,63	0,2	21	19	10
5	Супеси пылеватые пластичные серые	3,6	2,12	0,34	0,493	0,68	0,1	24	17	11
6	Супеси пылеватые тугопластичные серые	12,8	2,15	0,32	0,444	0,35	0,08	22	15	14
7	Глины легкие пылеватые твердые дислоцированные	10,0	2,1	0,27	0,542	-0,40	0,001	50	21	25

Фундаменты выполнены ленточными, из бутового камня на известково-песчаном растворе, глубиной заложения 1,6–2,2 м и шириной подошвы 0,9–2,4 м. По результатам обследования зданию присвоена работоспособная категория технического состояния. В соответствии с СП 22.13330 предельные величины дополнительных деформаций для данного здания составляют: относительная разность осадок $(\Delta S/L)_u = 0,001$; максимальная осадка $S_{ad,u}^{max} = 3,0$ см.

Расчет деформаций грунтового массива был выполнен методом конечных элементов в программном комплексе Midas GTS NX в плоской постановке. Расчетная область имеет размеры 19,5×86,4 м. В качестве расчетной модели при конечно-элементном расчете использовалась модель упрочняющегося грунта —Hardening Soil Model (HSM), которая наиболее реалистично отражает поведение грунтов при выемке грунта по сравнению с КЭ моделью Кулона–Мора. Удельный вес грунтов, залегающих

ниже УГВ, принят с учетом взвешивающего действия воды.

Параметры для модели HSM определяются по результатам стабилметрических испытаний, однако такие испытания не выполнялись. В связи с этим дополнительные параметры определялись по формулам, рекомендуемым разработчиками программного комплекса Midas GTS NX.

Фундаменты и наземные конструкции существующего здания смоделированы одномерными стержневыми конечными элементами. Применяемая модель — Elastic. Значения модулей упругости для кирпичной и бутовой кладки приняты согласно требованиям СП 15.13330.

Расчет дополнительных осадок грунтового массива с учетом водопонижения проводился по следующим этапам:

1. Моделирование природных напряжений, обусловленных естественными силами гравитации, уровня грунтовых вод. Обнуление перемещений.

2. Моделирование существующего здания.
 3. Обнуление перемещений. Моделирование устройства ограждающей конструкции котлована и интерфейсных элементов, технологической нагрузки по бровке котлована.

4. Выемка грунта 1 на глубину 1,4 м. Задание УГВ в котловане 1.

5. Монтаж распорной системы на глубине 0,5 м от поверхности.

6. Выемка грунта 2 на глубину 2,2 м. Задание УГВ в котловане 2.

7. Выемка грунта 3 на глубину 1,4 м. Задание УГВ в котловане 3.

Расчетная схема показана на рис. 3.

Результаты и обсуждение

Для рассматриваемой площадки величины расчетных параметров следующие: $S_w = 4,0$ м; $H_1 = 22,5$ м; $H_2 = 18,5$ м; $r_0 = 6,88$ м.

Давление по подошвам фундаментов $P = 250$ кПа.

Зависимость радиуса влияния при водопонижении от коэффициентов фильтрации, полученных по данным инженерно-геологических изысканий, изображена на рис. 4.

Средневзвешенное значение коэффициента фильтрации для рассматриваемой площадки составляет 0,68 м/сут, что соответствует радиусу влияния $R \approx 31$ м.

Прогнозируемый водоприток в котлован составит:

$$q = \frac{k_f (H_1^2 - H_2^2)}{2R} = \frac{0,68 (22,5^2 - 18,5^2)}{2 \cdot 31} = 1,79 \text{ м}^3/\text{сут}.$$

Кривая депрессии описывается уравнением:

$$y = \sqrt{H_2^2 + 2 \frac{q}{k_f} x} = \sqrt{18,5^2 + 2 \frac{1,79}{0,68} x} = \sqrt{342,25 + 5,264x}.$$

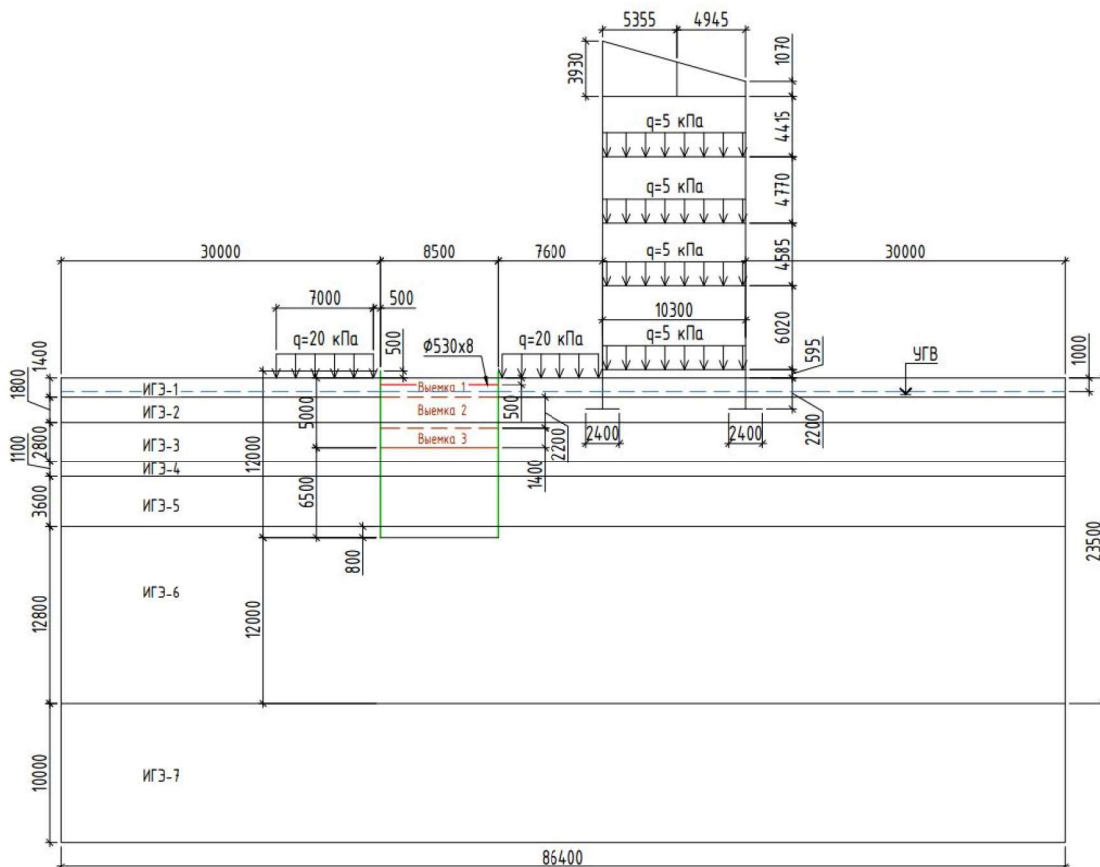


Рис. 3. Общий вид расчетной схемы

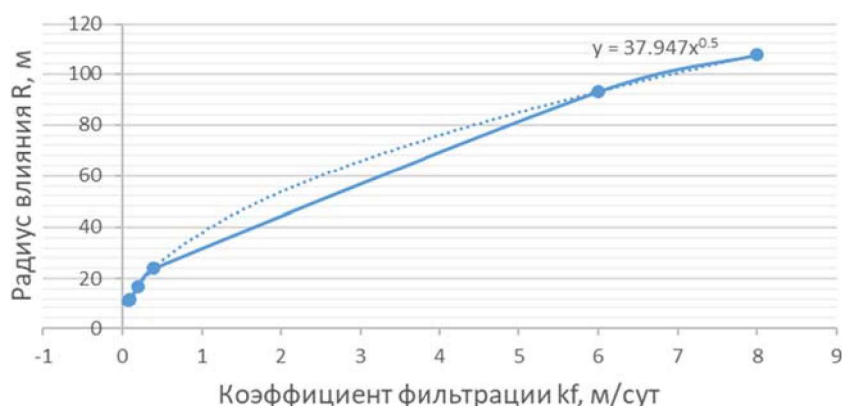


Рис. 4. Зависимость радиуса влияния при водопонижении от коэффициента фильтрации грунтов

На рис. 5 приведены кривые депрессии при водопонижении в котловане, вычисленные аналитически и численным методом при различных длинах шпунта L , м. По графикам видно, что по мере уменьшения длины шпунта радиус влияния возрастает. Понижение уровня грунтовых вод и максимальные деформации окружающей застройки при аналитическом расчете, как правило, будут иметь завышенные значения. Это связано с тем, что существующие аналитические выражения не учитывают наличие ограждающих конструкций выработок, препятствующих свободному поступлению подземных вод в котлован.

Величины дополнительных осадок фундаментов, определяемые по формулам (8) и (9):

$$S_{\max} = \frac{(\gamma_d \cdot h_1 + P)h_1}{2E} = \frac{(21,2 \cdot 1,59 + 250)1,59}{2 \cdot 17000} = 0,027 \text{ м};$$

$$S_{\min} = \frac{(\gamma_d \cdot h_2 + P)h_2}{2E} = \frac{(21,2 \cdot 0,43 + 250)0,43}{2 \cdot 17000} = 0,007 \text{ м}.$$

Неравномерность осадок:

$$\delta = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{L} = \frac{0,027 - 0,007}{10,3} = 0,0019.$$

На рис. 6 приведены результаты численного моделирования дополнительных осадок фундаментов здания и грунтового массива с учетом водопонижения.

По результатам геодезических наблюдений в процессе производства работ макси-

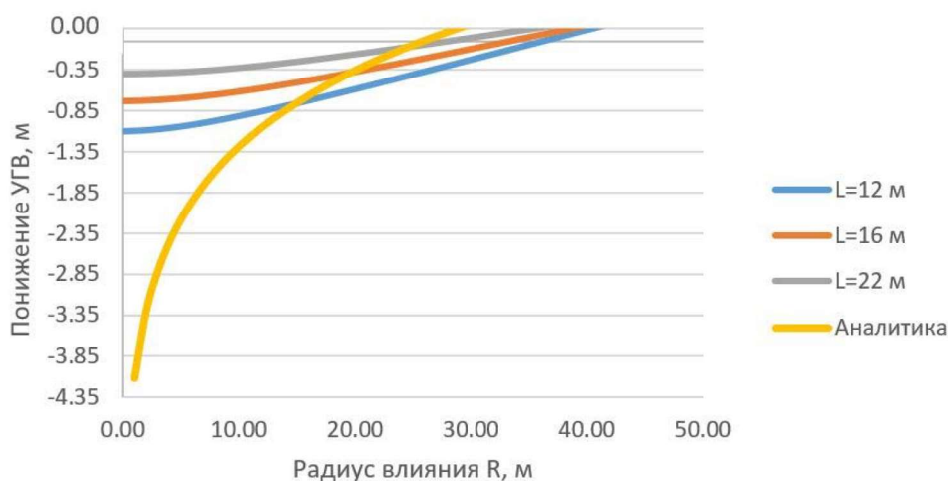


Рис. 5. Кривые депрессии по аналитическому и численному методам

Таблица 3

Расчетные дополнительные деформации основания существующего здания при разработке котлована под резервуар

Рассматриваемый случай	Максимальная расчетная дополнительная осадка	Предельно допустимые дополнительные деформации основания приняты согласно указаниям п. 3 Приложения К СП 22.13330 по табл. 4.2 ТСН 50-302-2004		Относительная разность осадок
	S_{ad} , см	$S_{ad, u}$, см	$(\Delta S/L)_u$	$\Delta S/L$
Аналитический расчет	2,7	3,0	0,0015	0,0019
Численный расчет	2,55			0,0012
Результаты мониторинга	2,8			0,0017

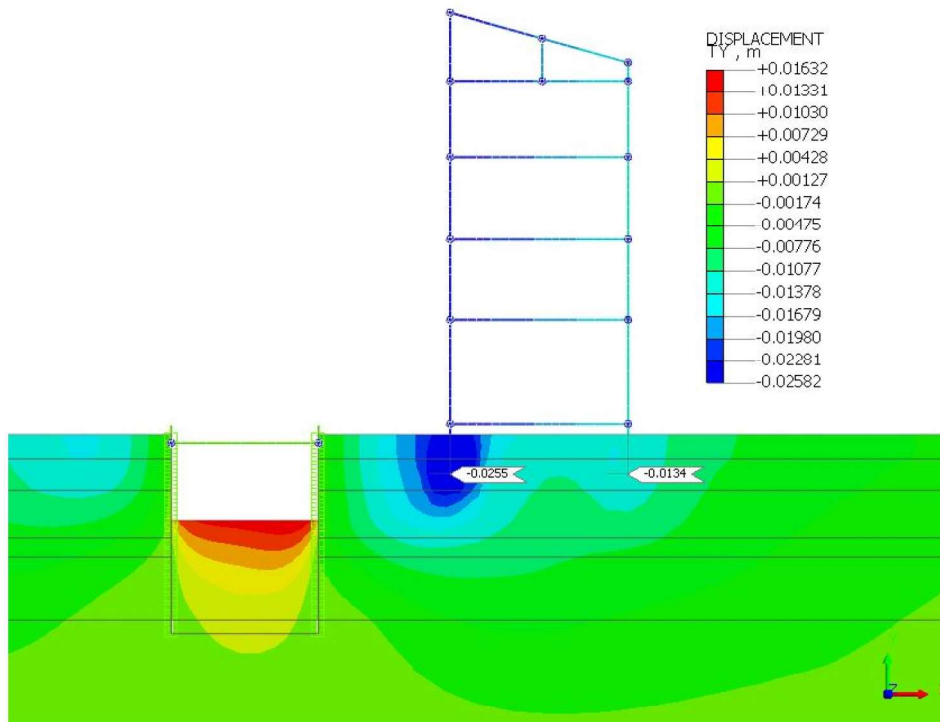


Рис. 6. Изополя осадок грунтового массива с учетом понижения уровня грунтовых вод за пределами котлована. $S_{max} = 25,5$ мм; $S_{min} = 13,4$ мм

мальное значение осадки фундамента существующего здания составило 28 мм, минимальное — 10 мм (рис. 7).

Сводные результаты расчетов осадок приведены в табл. 3.

Основные выводы

1. При проектировании подземных сооружений с изменением уровня подземных вод

за пределами котлована в условиях городской застройки (при коротких ограждениях котлована) необходимо выполнять гидрогеологические расчеты, определять радиус влияния и вычислять депрессионную кривую, расход (водоприток) и дополнительные осадки зданий соседней застройки с учетом водопонижения.

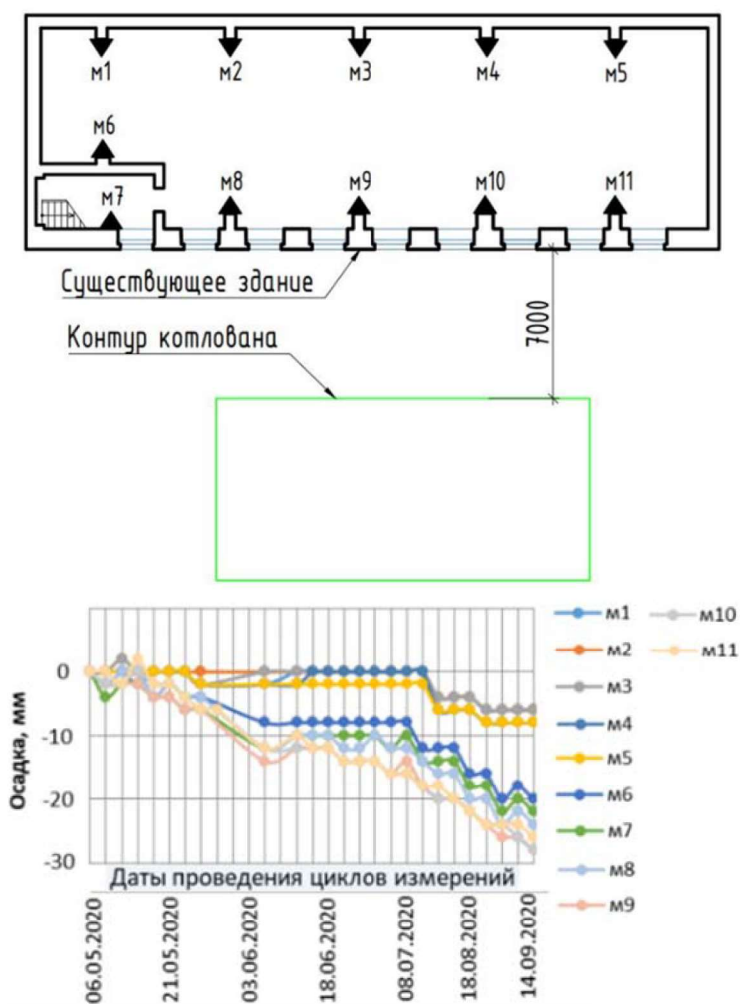


Рис. 7. График развития осадок по результатам геодезических наблюдений

2. На практическом примере приведены аналитические решения и выполнено численное моделирование с определением напряженно-деформированного состояния грунтового массива до и после водопонижения.

3. Прогноз дополнительных осадок здания соседней застройки по результатам аналитических расчетов и численного моделирования был сопоставлен с результатами геодезического мониторинга. Фактические максимальные осадки по результатам геодезического мониторинга не превысили допустимого значения, равного 3 см. Относительная разность осадок по результатам мониторинга превысила допустимое значение на незначительную величину 0,0002, что не является

критическим значением согласно дополнительным рекомендациям актуализированного технического регламента по оценке влияния нового строительства на окружающую застройку (раздел 7 СП 361.1325800.2017).

Библиографический список

1. Sclar E. D., Lönnroth M., Wolmar C. (eds.). Improving urban access: New approaches to funding transport investment. London, 2016. 252 p.
2. Сахаров И. И. Обрушение девятиэтажного здания по улице Двинской в Петербурге. Ход процесса, причины и следствия // Вестник гражданских инженеров. 2005. № 4 (5). С. 51–60.
3. Алексеев С. И. Анализ причин увлажнения кладки стен Смольного собора // Реконструкция городов и геотехническое строительство. 2000. № 3. С. 58–60.

4. Мулюков Э. И. Статистический анализ причин и вероятностный прогноз отказов оснований и фундаментов // Отказы в геотехнике: сб. ст. Уфа: БашНИИстрой, 1995. С. 5–17.

5. Мангушев Р. А., Осокин А. И. Геотехника Санкт-Петербурга / под ред. Р. А. Мангушева. М.: АСВ, 2010. 259 с.

6. Шашкин А. Г., Шашкин К. Г., Богов С. Г., Шашкин В. А., Шашкин М. А. Мониторинг зданий и сооружений при строительстве и эксплуатации (практическое руководство под ред. А. Г. Шашкина). СПб.: Изд-во института «Геореконструкция», 2021. 632 с.

7. Захаров М. С., Мангушев Р. А. Инженерно-геологические и инженерно-геотехнические изыскания в строительстве / под ред. Р. А. Мангушева. М.; СПб.: АСВ, 2014. 172 с.

8. Мангушев Р. А., Конюшков В. В., Сапин Д. А. Инженерно-геотехнические изыскания при строительстве и реконструкции в условиях плотной застройки // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 5. С. 47–54.

9. Мангушев Р. А., Никифорова Н. С., Конюшков В. В., Осокин А. И., Сапин Д. А. Проектирование и устройство подземных сооружений в открытых котлованах. М.; СПб.: АСВ, 2013. 256 с.

10. Мангушев Р. А., Никифорова Н. С. Технологические осадки зданий и сооружений в зоне влияния подземного строительства. М.: АСВ, 2017. 160 с.

11. Улицкий В. М., Шашкин А. Г., Шашкин К. Г. Геотехническое сопровождение развития городов. СПб.: Стройиздат Северо-Запад; Группа компаний «Геореконструкция», 2010. 551 с.

12. Лобовиков Д. А., Шашкин А. Г., Шашкин В. А. Здания железно-каменной конструкции в Санкт-Петербурге рубежа XIX–XX веков // Жилищное строительство. 2021. № 4. С. 3–17.

13. Wang W., Hu Y., Sheng J., Xu Z. Design and practice of underground space development of existing historical buildings in soft soils // Yantu Gongcheng Xuebao / Chinese Journal of Geotechnical Engineering. 2023. Vol. 45 (12). Pp. 2445–2453.

14. Xu Z., Gu Z., Wang W., Hu Y. Monitoring analysis on influence of underground space development on its three side enclosed historical protected buildings // Tumu Gongcheng Xuebao / China Civil Engineering Journal. 2024. Vol. 57 (6). Pp. 221–230.

15. Misa R., Sroka A., Tajduś K., Dudek M. Analytical design of selected geotechnical solutions which protect civil structures from the effects of underground mining // Journal of Sustainable Mining. 2019. Vol. 18 (1). Pp. 1–7.

16. Улицкий В. М., Шашкин А. Г. Сохранение памятников архитектуры и обеспечение их механиче-

ской безопасности // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 7. С. 31–39.

17. Конюхов Д. С. Безопасность существующей застройки при производстве подземных работ // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 8. С. 158–167.

18. Никифорова Н. С. Обеспечение сохранности зданий в зоне влияния подземного строительства. 2-е изд. М.: НИУ МГСУ, 2016. 151 с.

19. Никифорова Н. С. Закономерности деформирования оснований зданий вблизи глубоких котлованов и защитные мероприятия: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2008. 324 с.

20. Улицкий В. М., Шашкин А. Г., Шашкин К. Г., Шашкин В. А. Основы совместных расчетов зданий и оснований. СПб.: Изд-во института «Геореконструкция», 2014. 328 с.

21. Смирнов Б. А., Полуниин В. М. Развитие подходов к определению допустимых дополнительных деформаций исторической застройки численными методами // Вестник гражданских инженеров. 2024. № 1 (102). С. 37–47.

22. Синдаловский Л. Н. Гидрогеологические расчеты с использованием программы ANSDIMAT. СПб.: Наука, 2021. 891 с.

23. Монахов С. А. Влияние противofiltrационных мероприятий на уровни грунтовых вод // Основания, фундаменты и механика грунтов (ОФМГ). 2001. № 4. С. 15–18.

24. Кусакин И. П. Искусственное понижение уровня грунтовых вод. 2-е изд., перераб. и доп. М.; Л.: ОНТИ. Глав. ред. строит. литературы, 1935. 247 с.

References

1. Sclar E. D., Lönnroth M., Wolmar C. (eds.). *Improving urban access: New approaches to funding transport investment*. London, 2016, 252 p.

2. Sakharov I. I. *Obrushenie devyatiyazhного zdaniya po ulitse Dvinskoy v Peterburge. Khod protsessa, prichiny i sledstviya* [The collapse of a nine-story building on Dvinskaya Street in St. Petersburg. Process, cause and effect]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2005, no. 4 (5), pp. 51–60.

3. Alekseev S. I. *Analiz prichin uvlazhneniya kladki sten Smol'nogo sobora* [Analysis of the reasons for moistening the masonry of the walls of the Smolny Cathedral]. *Rekonstruktsiya gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo – Urban reconstruction and geotechnical construction*, 2000, no. 3, pp. 58–60.

4. Mulyukov E. I. *Statisticheskiy analiz prichin i veroyatnostnyy prognoz otkazov osnovaniy i fundamentov* [Statistical analysis of causes and probabilistic forecast of

failures of bases and foundations]. *Otkazy v geotekhnike* [In: Failures in geotechnics]. Ufa, BashNIIstroy Publ., 1995, pp. 5–17.

5. Mangushev R. A., Osokin A. I. *Geotekhnika Sankt-Peterburga* [Geoengineering in St. Petersburg]. Ed. by Mangushev R. A. Moscow, ASV Publ., 2010, 259 p.

6. Shashkin A. G., Shashkin K. G., Bogov S. G., Shashkin V. A., Shashkin M. A. *Monitoring zdaniy i sooruzheniy pri stroitel'stve i ekspluatatsii (prakticheskoe rukovodstvo pod red. A. G. Shashkina)* [Monitoring of buildings and structures during construction and operation (practical guide ed. by A. G. Shashkin)]. St. Petersburg, Georekonstruktsiya Publ., 2021, 632 p.

7. Zakharov M. S., Mangushev R. A. *Inzhenerno-geologicheskie i inzhenerno-geotekhnicheskie izyskaniya v stroitel'stve* [Engineering – geological surveys and engineering – geotechnical surveys in construction]. Ed. by Mangushev R. A.. Moscow, St. Petersburg, ASV Publ., 2014, 172 p.

8. Mangushev R. A., Konyushkov V. V., Sapin D. A. *Inzhenerno-geotekhnicheskie izyskaniya pri stroitel'stve i rekonstruktsii v usloviyakh plotnoy zastroyki* [Engineering – geotechnical surveys at construction in conditions of dense development]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and Civil Engineering*, 2016, no. 5, pp. 47–54.

9. Mangushev R. A., Nikiforova N. S., Konyushkov V. V., Osokin A. I., Sapin D. A. *Proektirovanie i ustroystvo podzemnykh sooruzheniy v otkrytykh kotlovanakh* Design and construction of underground structures in open pits]. Moscow, St. Petersburg, ASV Publ., 2013, 256 p.

10. Mangushev R. A., Nikiforova N. S. *Tekhnologicheskie osadki zdaniy i sooruzheniy v zone vliyaniya podzemnogo stroitel'stva* [Technological settlements of buildings and structures in the zone of influence of underground construction]. Moscow, ASV Publ., 2017, 160 p.

11. Ulitskiy V. M., Shashkin A. G., Shashkin K. G. *Geotekhnicheskoe soprovozhdenie razvitiya gorodov* [Geotechnical support for urban development]. St. Petersburg, Stroyizdat Severo-Zapad; Georekonstruktsiya Publ., 2010, 551 p.

12. Lobovikov D. A., Shashkin A. G., Shashkin V. A. *Zdaniya zhelezno-kamennoy konstruktsii v Sankt-Peterburge rubezha XIX–XX vekov* [Buildings of iron-stone construction in St. Petersburg at the turn of the XIX–XX centuries]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo – Housing Construction*, 2021, no. 4, pp. 3–17.

13. Wang W., Hu Y., Sheng J., Xu Z. Design and practice of underground space development of existing historical buildings in soft soils. *Yantu Gongcheng Xuebao. Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, vol. 45 (12), pp. 2445–2453.

14. Xu Z., Gu Z., Wang W., Hu Y. Monitoring analysis on influence of underground space development on its three side enclosed historical protected buildings. *Tumu Gongcheng Xuebao. China Civil Engineering Journal*, 2024, vol. 57 (6), pp. 221–230.

15. Misa R., Sroka A., Tajduś K., Dudek M. Analytical design of selected geotechnical solutions which protect civil structures from the effects of underground mining. *Journal of Sustainable Mining*, 2019, vol. 18 (1), pp. 1–7.

16. Ulitskiy V. M., Shashkin A. G. *Sokhranenie pamyatnikov arkhitektury i obespechenie ikh mekhanicheskoy bezopasnosti* [Preservation of architectural monuments and ensuring their mechanical safety]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and Civil Engineering*, 2017, no. 7, pp. 31–39.

17. Konyukhov D. S. *Bezopasnost' sushchestvuyushchey zastroyki pri proizvodstve podzemnykh rabot* [Safety of existing buildings during underground work]. *Gorniy informatsionno-analiticheskiy byulleten' – Mining Information and Analytical Bulletin*, 2022, no. 8, pp. 158–167.

18. Nikiforova N. S. *Obespechenie sokhrannosti zdaniy v zone vliyaniya podzemnogo stroitel'stva* [Ensuring the safety of buildings in the zone of influence of underground construction]. 2nd ed. Moscow, NRU MGSU Publ., 2016, 151 p.

19. Nikiforova N. S. *Zakonomernosti deformirovaniya osnovaniy zdaniy vblizi glubokikh kotlovanov i zashchitnye meropriyatiya. Diss. dokt. tekhn. nauk* [Patterns of deformation of building bases near deep pits and protective measure. Dr. Sci. Tech. diss.]. Moscow, 2008, 324 p.

20. Ulitskiy V. M., Shashkin A. G., Shashkin K. G., Shashkin V. A. *Osnovy sovmestnykh raschetov zdaniy i osnovaniy* [Fundamentals of joint calculations of buildings and foundations]. St. Petersburg, Georekonstruktsiya Publ., 2014, 328 p.

21. Smirnov B. A., Polunin V. M. *Razvitie podkhodov k opredeleniyu dopustimyykh dopolnitel'nykh deformatsiy istoricheskoy zastroyki chislennymi metodami* [Development of approaches to determining permissible additional deformations of historical development by numerical methods]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2024, no. 1 (102), pp. 37–47.

22. Sindalovskiy L. N. *Gidrogeologicheskie raschety s ispol'zovaniem programmy ANSDIMAT* [Hydrogeological calculations using the ANSDIMAT program]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2021, 891 p.

23. Monakhov S. A. *Vliyanie protivofil'tratsionnykh meropriyatiy na urovni gruntovykh vod* [Impact of anti-filtration measures on groundwater levels]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov (OFMG) – Bases, foundations and soil mechanics (OFMG)*, 2001, no. 4, pp. 15–18.

24. Kusakin I. P. *Iskusstvennoe ponizhenie urovnya gruntovykh vod* [Artificial lowering of the groundwater level]. 2-nd ed., revised. Moscow, Leningrad, ONTI Publ., 1935, 247 p.