

УДК 624.131.15

© А. В. Квашук, ассистент

© Т. Д. Даутова, ассистент

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: alina_kvashuk@mail.ru, 3518362@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-3-84-91

© A. V. Kvashuk, assistant lecturer

© T. D. Dautova, assistant lecturer

(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: alina_kvashuk@mail.ru, 3518362@mail.ru

АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОГНОЗИРУЕМОЙ МАКСИМАЛЬНОЙ ОСАДКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ ЗАСТРОЙКИ В ИНЖЕНЕРНО- ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

ANALYSIS OF THE APPLICABILITY OF THE METHOD FOR ASSESSING THE PREDICTED MAXIMUM SETTLEMENT OF THE SURROUNDING BUILDING DEVELOPMENT IN THE ENGINEERING AND GEOLOGICAL CONDITIONS OF ST. PETERSBURG

Рассмотрены методики расчета прогнозируемых максимальных осадок зданий в зоне влияния глубокого котлована в условиях Санкт-Петербурга. Проанализированы результаты расчетов прогнозируемых максимальных осадок полуэмпирическим методом, разработанным профессором Н. С. Никифоровой, со значениями осадок, полученными в ПК Plaxis 2D. Дана оценка возможности применения полуэмпирического метода определения прогнозируемой осадки окружающей застройки в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга.

Ключевые слова: осадка здания, зона влияния глубокого котлована, численные и аналитические методы расчета, применимость полуэмпирического метода.

The article considers the methods for calculating the predicted maximum settlement of buildings in the zone of influence of a deep pit in the conditions of St. Petersburg. There have been analyzed the results of calculations of the predicted maximum settlement by the semi-empirical method developed by Professor N. S. Nikiforova with the settlement values obtained in Plaxis 2D software package. The authors present the evaluation of the possibility of applying a semi-empirical method for determining the predicted settlement of the surrounding building development in the engineering and geological conditions of St. Petersburg.

Keywords: building settlement, influence zone of deep excavation, numerical and analytical methods of calculation, applicability of the semi-empirical method.

Освоение подземного пространства в рамках развития больших городов с разработкой котлованов открытым способом является сложной геотехнической задачей. Здания, расположенные в непосредственной близости к объектам нового строительства, вызывают повышенный интерес к обеспечению их работоспособного состояния и предотвращению дополнительных осадок, возникающих

при изменении напряженно-деформированного состояния ввиду начала нового строительства. Следует отметить, что подавляющее большинство зданий центральной части Санкт-Петербурга несут историческую ценность и находятся под охраной государства как памятники архитектуры.

Несмотря на разнообразие методов устройства ограждений котлованов, как показывает

опыт, каждый из них в той или иной мере приводит к дополнительным осадкам соседней застройки. В связи с этим стал актуальным вопрос о возможности прогнозирования величины дополнительных осадок зданий численными и аналитическими методами.

Профессором Н. С. Никифоровой был разработан новый метод расчета максимальных осадок зданий с фундаментами мелкого заложения на естественном основании. В основу данного метода [2] легла масштабная статистическая обработка результатов экспериментальных исследований по измерению осадок более 80 зданий, попадающих в зону влияния объектов нового строительства в Москве.

В рамках прогнозирования дополнительной осадки существующей застройки была определена степень влияния каждого из основных факторов, предложенных Н. С. Никифоровой, а именно [1, 2]:

1. Коэффициент относительной удаленности существующего здания от котлована $m = (H_k - h) / L$, где L — расстояние от котлована до существующего здания; H_k — глубина котлована; h — глубина заложения подошвы фундамента существующего здания.

2. Инженерно-геологические условия площадки строительства, характеризующиеся осредненным значением модуля деформации грунта E .

3. Способы ограждения котлована.

4. Категория технического состояния конструкций здания.

Степень влияния каждого из приведенных факторов была установлена после проведения полнофакторного эксперимента $2k$, где k — число факторов, оказывающих влияние на величину дополнительной осадки.

Результаты полнофакторного анализа показали, что наименьшее влияние на величину дополнительной осадки существующей застройки оказывает категория технического состояния, а наибольшее — коэффициент относительной удаленности здания от котлована m .

Для правомерной оценки возможности применения полуэмпирического метода расчета прогнозируемой максимальной осадки здания в зоне влияния глубокого котлована в условиях Санкт-Петербурга следует обратить внимание на инженерно-геологические условия Москвы

и Санкт-Петербурга и дать их сравнительную характеристику.

Отличительной особенностью инженерно-геологических условий Москвы (рис. 1) является наличие тонкозернистых пылеватых песков, которые могут переходить в плавунное состояние. Также инженерно-геологические условия Москвы предполагают наличие опасных геологических процессов: карстового, оползневого, карстово-суффозионного.

Инженерно-геологические условия Санкт-Петербурга (рис. 2) являются уникальными ввиду сравнительно большой и неравномерной сжимаемости грунтового основания. Озерно-ледниковые отложения в виде глин, суглинков и супесей распространены повсеместно и обладают слоистой или ленточной текстурой, что определяет ряд их специфических свойств, таких как высокая природная влажность и пористость, сильная сжимаемость, пучинистость и тиксотропность [5]. Согласно [3] данные свойства инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга являются причиной возникновения неравномерных, длительно не затухающих осадок зданий и окружающей застройки.

Для оценки применимости методики Н. С. Никифоровой был проведен сравнительный анализ результатов расчета прогнозируемой осадки со значениями осадки, полученной в ПВК Plaxis 2D для трех вариантов расчетной схемы (рис. 3) с последовательно изменяемыми параметрами, такими как глубина котлована, удаленность здания от котлована, глубина заложения подошвы фундамента и способ ограждения котлована (значения параметров см. в табл. 1).

Результаты сравнительного анализа по итогам численного моделирования приведены в табл. 1.

Вариант № 1. Согласно полученным результатам, можно утверждать, что методика Н. С. Никифоровой применима только для котлованов глубиной до 7 м ввиду малой абсолютной погрешности между прогнозируемой и расчетной максимальными осадками в ПВК Plaxis. Тем не менее, осадка, полученная в ПВК Plaxis, начинает выходить за границы предельно допустимой осадки при глубине котлована 8 м.

Вариант № 2. При изменении параметра удаленности котлована от существующей застройки разница абсолютной погрешности между

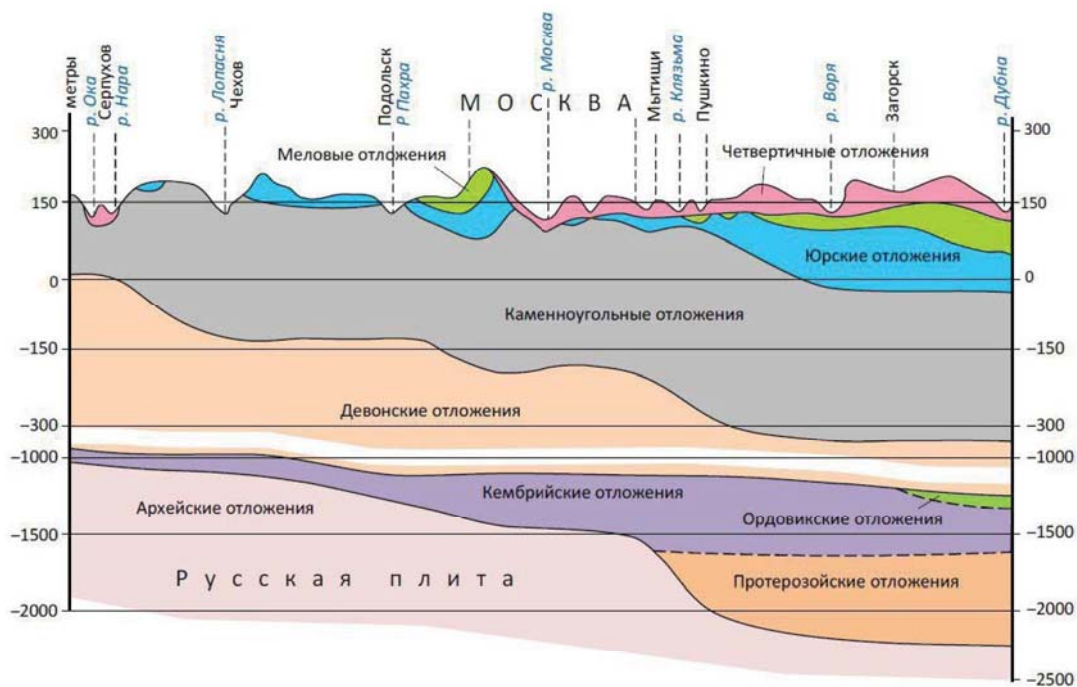


Рис. 1. Инженерно-геологические условия Москвы

прогнозируемой и расчетной максимальными осадками становится менее выраженной и более близкой к методике Н. С. Никифоровой. Минимальное значение абсолютной погрешности, так же как и для варианта № 1, соответствует котловану глубиной 5 м.

Вариант № 3. Абсолютная погрешность между прогнозируемой и расчетной максимальными осадками для данной расчетной схемы находится в диапазоне от 11,78 до 21,56 мм. Такой результат обусловлен тем, что методика Н. С. Никифоровой не учитывает жесткость фундамента

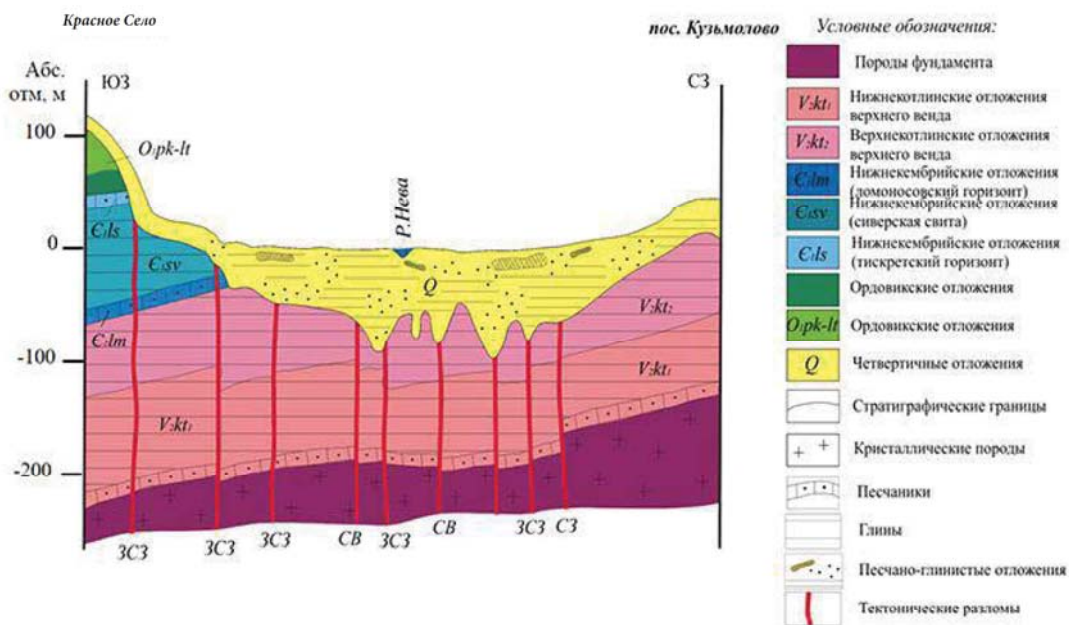


Рис. 2. Инженерно-геологические условия Санкт-Петербурга

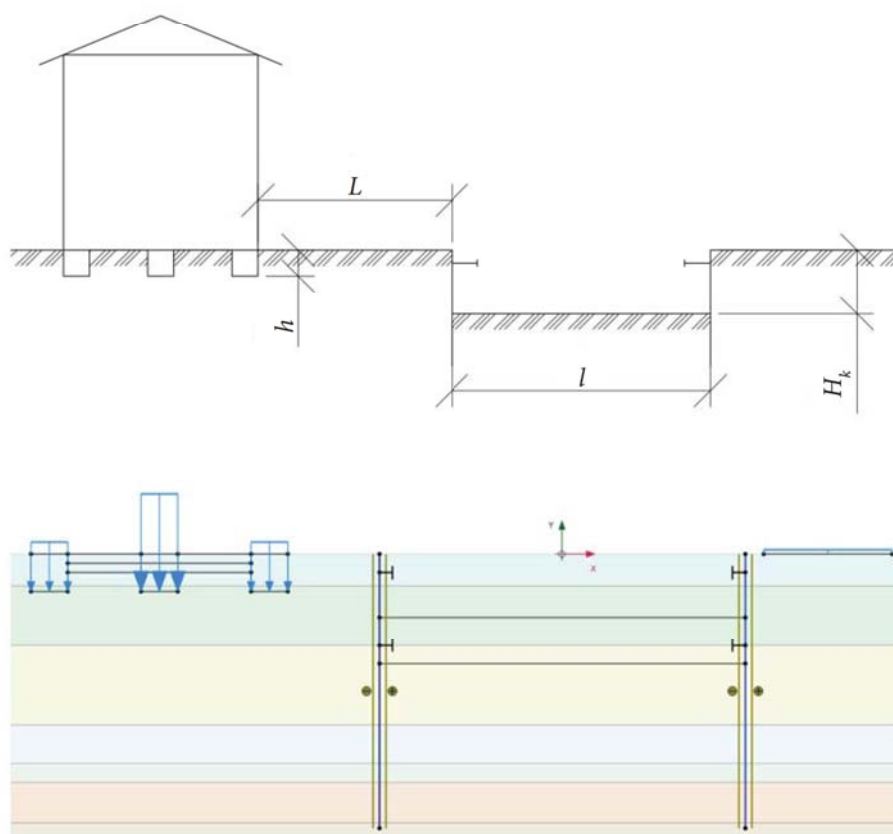


Рис. 3. Расчетная схема для численного моделирования в ПК Plaxis 2D

существующего здания, а глубина его заложения учитывается косвенно при расчете коэффициента m .

Анализ трех вариантов расчетной схемы показал, что при $m < 1$ максимальная осадка, рассчитанная в ПК Plaxis, находится в зоне предельно допустимой осадки. Однако согласно методике Никифоровой при тех же численных значениях коэффициента m абсолютно все значения осадки не превышают предельную осадку.

Ввиду этого целесообразно проанализировать данную зависимость и определить, при каких численных значениях изменяемых параметров, таких как глубина котлована, глубина заложения фундамента существующего здания и удаленность здания от котлована, будет выполняться неравенство $m \leq 1$ [3].

Если предположить, что глубина заложения подошвы фундамента существующего здания — величина постоянная, то, решая неравенство

с двумя переменными, можно определить диапазон изменения параметров H_k и L (табл. 2).

Численные значения всех коэффициентов m для разных глубин заложения подошвы фундамента существующего здания приведены в табл. 3.

Величина значимости вышеперечисленных факторов была установлена с помощью полнофакторного эксперимента типа $2k$, где k — количество факторов, оказывающих влияние на величину дополнительной осадки.

Основные изменяемые параметры:

- x_1 — коэффициент относительной удаленности здания от котлована m ;
- x_2 — инженерно-геологические условия, характеризующиеся осредненным значением модуля деформации E ;
- x_3 — способ раскрепления стен котлована, характеризующийся усилием, воспринимаемым распорными элементами;
- x_4 — техническое состояние здания.

Таблица 1

Сравнение прогнозируемых осадок по методу Н. С. Никифоровой с осадками, полученными в ПК Plaxis 2D

Изменяемые и постоянные параметры вариантов расчетной схемы	t	Прогнозируемая максимальная осадка, мм		Осадочная полученная методом численного моделирования, S_{plax}	Относительная погрешность прогнозируемой осадки $\Delta S = \frac{S_{\phi} - S_{\phi \text{ пол}}}{S_{\phi \text{ пол}}}, \%$	Абсолютная погрешность $\Delta S = S_{plax} - S_{\phi \text{ пол}}$ мм
		по полумпирическому методу, $S_{\phi \text{ пол}}$	по Plaxis (плоская задача), $S_{\phi \text{ plax}}$			
Результаты математического моделирования для варианта № 1						
$H_k = 5 \dots 10$ м $h = 2$ м $L = 5$ м $l = 20$ м	0,6	7,19	9,37	7,25	10,00	0,80
	0,8	8,17	10,44	8,23	14,00	0,79
	1	9,14	11,51	9,21	30,00	0,78
	1,2	10,11	12,58	10,19	47,00	0,78
	1,4	11,09	13,65	11,17	67,00	0,77
	1,6	12,06	14,73	12,15	100,00	0,77
Результаты математического моделирования для варианта № 2						
$H_k = 5$ м $h = 2$ м $L = 5 \dots 30$ м $l = 20$ м	0,1	4,76	6,69	4,80	1,00	0,86
	0,12	4,85	6,79	4,90	2,00	0,85
	0,15	5,00	6,95	5,04	2,50	0,85
	0,2	5,24	7,22	5,29	3,00	0,84
	0,3	5,73	7,76	5,78	4,00	0,83
	0,6	7,19	9,37	7,25	10,00	0,80
Результаты математического моделирования для варианта № 3						
$H_k = 6$ м $h = 2 \dots 5$ м $L = 5$ м $l = 20$ м	0,2	5,24	7,22	5,29	19,00	0,84
	0,3	5,73	7,76	5,78	22,00	0,83
	0,4	6,22	8,29	6,27	24,00	0,82
	0,5	6,71	8,83	6,76	26,50	0,81
	0,6	7,19	9,37	7,25	28,50	0,80
	0,7	7,68	9,90	7,74	31,00	0,80
0,8	8,17	10,44	8,23	32,00	0,79	

Таблица 2

Диапазон изменения глубины котлована при минимальной удаленности от существующего здания до котлована при $h = \text{const}$

Глубина заложения фундамента существующего здания h , м	Глубина котлована H_k , м
2	0...7
2,5	0...7
3	0...8
3,5	0...8
4	0...9
5	0...9

Максимально допустимая осадка рассматриваемого здания в зоне влияния нового строительства является линейной функцией отклика y :

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4, \quad (1)$$

где b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 — коэффициенты при независимых переменных линейной модели (факторах), указывающие на силу влияния факторов. Коэффициенты b полинома рассчитываются по формулам [2]

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N}; \quad (2)$$

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N y_i \cdot x_{ij}}{N}, \quad j = 1 \dots k. \quad (3)$$

Линейная модель основана на варьировании факторов на двух уровнях:

$$x_1: m = 0, 2 \dots 1, 6;$$

$$x_2: E = 4 \dots 25 \text{ МПа};$$

$x_3: (0,15 \dots 6) \cdot 10^6$ кН/пог. м — усилие, воспринимаемое распорными конструкциями от 1 пог. м;

$x_4: I \dots IV$ — категория технического состояния конструкции здания.

Функцию отклика можно записать в следующем виде:

$$y = 6,25 + 2,48x_1 - 0,85x_2 - 0,94x_3 + 0,15x_4 \quad (4)$$

в соответствии с критерием Фишера $F = 1,146$, что удовлетворяет условию адекватности при 5 %-ном условии значимости (согласно таблице критических значений F , при $f = 11$ $F_{кр} = 2,4$).

В рамках исследований Д. А. Сапина [4] установлено, что технологическая осадка соседних зданий при устройстве ограждения котлована вида «стена в грунте» в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга составляет 18...32 мм.

Таблица 3

Сводная таблица результатов расчета коэффициента относительной удаленности в зависимости от параметров h' и L ($h' = H_k - h$)

		$h', \text{ м}$										
		2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,50	6,00	6,50	7,00	7,50
$L, \text{ м}$	5	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50
	6	0,42	0,50	0,58	0,67	0,75	0,83	0,92	1,00	1,08	1,17	1,25
	7	0,36	0,43	0,50	0,57	0,64	0,71	0,79	0,86	0,93	1,00	1,07
	8	0,31	0,38	0,44	0,50	0,56	0,63	0,69	0,75	0,81	0,88	0,94
	9	0,28	0,33	0,39	0,44	0,50	0,56	0,61	0,67	0,72	0,78	0,83
	10	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
	12	0,21	0,25	0,29	0,33	0,38	0,42	0,46	0,50	0,54	0,58	0,63
	14	0,18	0,21	0,25	0,29	0,32	0,36	0,39	0,43	0,46	0,50	0,54
	16	0,16	0,19	0,22	0,25	0,28	0,31	0,34	0,38	0,41	0,44	0,47
	18	0,14	0,17	0,19	0,22	0,25	0,28	0,31	0,33	0,36	0,39	0,42
	20	0,13	0,15	0,18	0,20	0,23	0,25	0,28	0,30	0,33	0,35	0,38
	22	0,11	0,14	0,16	0,18	0,20	0,23	0,25	0,27	0,30	0,32	0,34
	24	0,10	0,13	0,15	0,17	0,19	0,21	0,23	0,25	0,27	0,29	0,31
	26	0,10	0,12	0,13	0,15	0,17	0,19	0,21	0,23	0,25	0,27	0,29
	28	0,09	0,11	0,13	0,14	0,16	0,18	0,20	0,21	0,23	0,25	0,27
	30	0,08	0,10	0,12	0,13	0,15	0,17	0,18	0,20	0,22	0,23	0,25

Для правомерной оценки применимости полуэмпирического метода прогнозирования дополнительной осадки существующей застройки был проведен сравнительный анализ осадки, рассчитанной по методике Н. С. Никифоровой, и реальных осадок окружающей застройки, полученных в процессе устройства «стены в грунте» при строительстве жилого дома по адресу: Зоологический пер., д. 2–4 [5].

Объект нового строительства с подземными этажами находился в непосредственной близости к существующим зданиям. Котлован был решен с тремя уровнями распорных конструкций, общая глубина котлована составила 10,2 м. Глубина заложения фундаментов существующего здания 3,0 м, в основании фундаментов залегали водонасыщенные пылеватые пески, подстилаемые мощным слоем слабых водонасыщенных суглинков.

График зависимости осадок окружающей застройки от удаленности ограждения котлована типа «стена в грунте» для объекта по адресу: Зоологический пер., д. 2–4 (Петроградский остров), представлен на рис. 4.

По результатам расчета осадки окружающей застройки, находящейся в зоне влияния нового строительства, полуэмпирическим методом, с учетом коэффициента относительной удаленности m , установлено, что относительная погрешность полуэмпирического метода варьируется в диапазоне от 20 до 107 %. График зависимости относительной погрешности при изменении удаленности здания от стены в грунте представлен на рис. 5.

Выводы

По результатам проведенного исследования можно заключить, что полуэмпирический метод прогнозирования дополнительной осадки существующей застройки, разработанный Н. С. Никифоровой, применим в условиях Санкт-Петербурга только для котлованов глубиной до 7 м.

При глубине котлована более 7 м полуэмпирический метод определения дополнительной осадки дает заниженные результаты. Погрешность данного метода различна и варьируется в диапазоне от 20 до 107 % в зависимости от удаленности здания от котлована.

Ограничение применимости полуэмпирического метода в Санкт-Петербурге по глубине

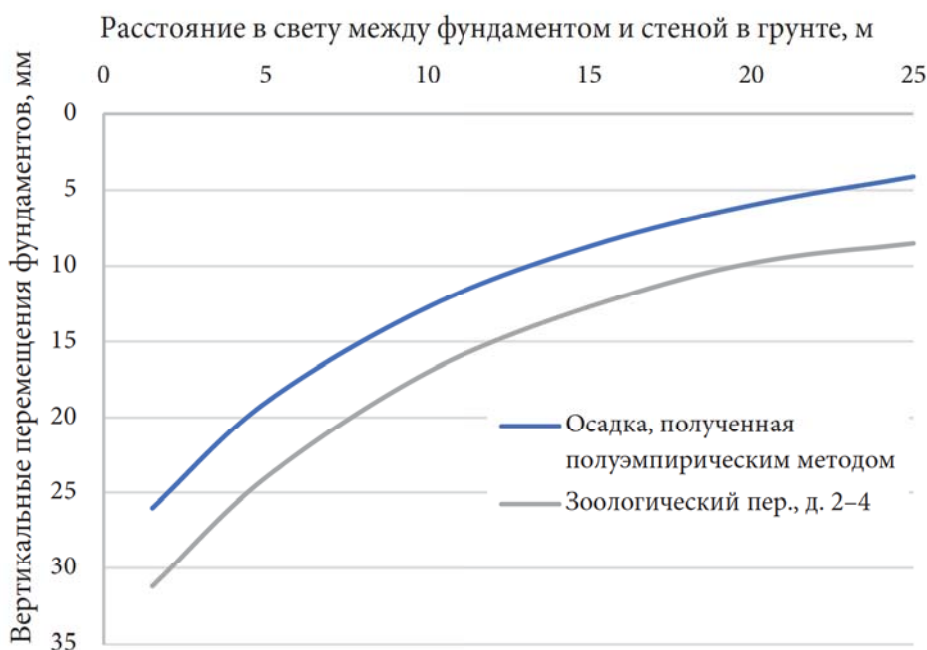


Рис. 4. График зависимости осадки окружающей застройки от удаленности ограждения котлована типа «стена в грунте» для объекта по адресу: Зоологический пер., д. 2–4 (Петроградский остров)

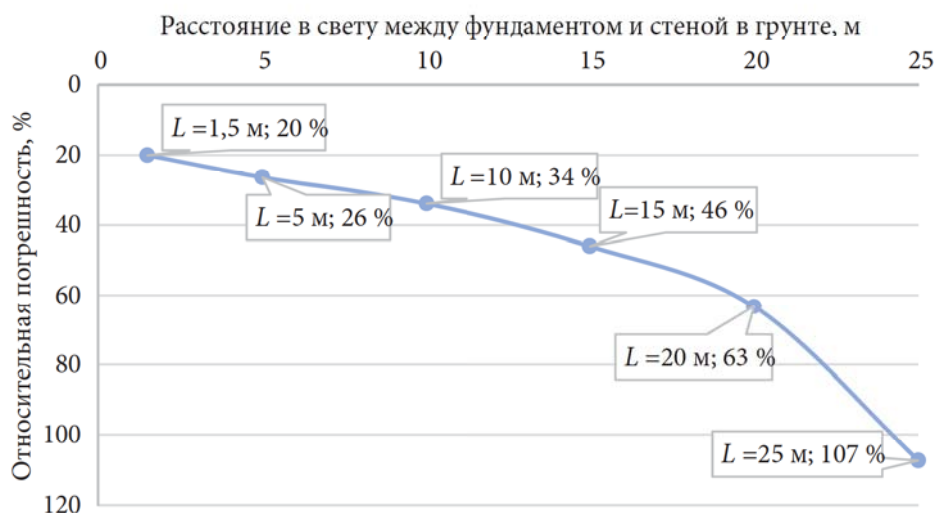


Рис. 5. График зависимости относительной погрешности при изменении удаленности здания от стены в грунте

котлована, главным образом, обусловлено сложными инженерно-геологическими условиями, характеризующимися наличием рыхлых песков, как водонасыщенных, так и не водонасыщенных, а также озерно-ледниковыми водонасыщенными тиксотропными грунтами, подверженными расструктурированию. Опыт строительства в Санкт-Петербурге показал, что даже технологии производства работ, считавшиеся безосадочными, вызывают осадку окружающей застройки.

Библиографический список

1. 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, 2016. 256 с.
2. Никифорова Н. С. Закономерности деформирования оснований зданий вблизи глубоких котлованов и защитные мероприятия: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2008. 324 с.
3. Мангушев Р. А., Осокин А. И., Сотников С. Н. Геотехника Санкт-Петербурга. Опыт строительства на слабых грунтах. М.: АСВ, 2018. 386 с.
4. Сапин Д. А. Дополнительные технологические осадки фундаментов зданий соседней застройки при устройстве траншейной «стены в грунте»: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2016. 177 с.
5. Мангушев Р. А., Никифорова Н. С. Технологические осадки зданий и сооружений в зоне влияния

подземного строительства / под ред. д-ра техн. наук, проф. Р. А. Мангушева. М.: АСВ, 2017. 160 с.

References

1. Mangushev R. A., et al. *Proektirovanie i ustroystvo podzemnykh sooruzheniy v otkrytykh kotlovanakh* [Design and construction of underground structures in open pits]. Moscow, St. Petersburg, ASV Publ., 2016, 256 p.
2. Nikiforova N. S. *Zakonomernosti deformirovaniya osnovaniy zdaniy vblizi glubokikh kotlovanov i zashchitnye meropriyatiya*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Regularities of deformation of the foundations of buildings near deep pits and protective measures. Dr. Sci. Tech. diss.]. Moscow, 2008, 324 p.
3. Mangushev R. A., Osokin A. I., Sotnikov S. N. *Geotekhnika Sankt-Peterburga. Opyt stroitel'stva na slabyykh gruntakh* [Geotechnics of St. Petersburg. Experience of construction on weak soils]. Moscow, ASV Publ., 2018, 386 p.
4. Sapin D. A. *Dopolnitel'nye tekhnologicheskie osadki fundamentov zdaniy sosedney zastroyki pri ustroystve transheyroy «steny v grunte»*. Diss. kand. tekhn. nauk [Additional technological settlement of the neighboring building foundations at construction of diaphragm wall. PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2016, 177 p.
5. Mangushev R. A., Nikiforova N. S. *Tekhnologicheskie osadki zdaniy i sooruzheniy v zone vliyaniya podzemnogo stroitel'stva* [Technological settlement of buildings and structures in the influence zone of underground construction]. Ed. by Mangushev R. A. Moscow, ASV Publ., 2017, 160 p.