УДК 624.152.63

© Р. А. Мангушев, д-р техн. наук, профессор

© А. В. Бояринцев, магистрант

© А. А. Русецкий, магистрант

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)

E-mail: ramangushev@yandex.ru,

andrey_boyarintsev@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-1-75-82

© R. A. Mangushev, Dr. Sci. Tech., Professor

© A. V. Boyarintsev, undergraduate

© A. A. Rusetskiy, undergraduate

(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)

E-mail: ramangushev@yandex.ru,

andrey_boyarintsev@mail.ru

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ РАСЧЕТ ОГРАЖДЕНИЯ КОТЛОВАНОВ МЕТОДОМ ШПУНТОВОЙ СТЕНЫ И ЭКРАНОВ ЖЕСТКОСТИ

COMPARATIVE CALCULATION OF THE EXCAVATION PIT ENCLOSURE TYPES BY THE METHOD OF SHEET PILE WALLS AND RIGIDITY SCREENS

Приводится краткий анализ существующих ограждений котлованов и сопоставление их жесткости, примеры эффективности отсечных «экранов жесткости». Для реальных инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга методом конечных элементов выполнен численный анализ ограждений котлована из шпунтового ряда и нескольких вариантов экрана жесткости. Проанализирована эффективность двухрядного шпунтового ограждения с промежуточным слоем грунта в естественном состоянии и искусственно закрепленного грунтоцементного массива.

Ключевые слова: дополнительные осадки, ограждение котлована, шпунтовый ряд, экран жесткости, стена в грунте, численный анализ, грунтоцементный массив.

The article provides a brief analysis of the existing types of excavation pit enclosure and a comparison analysis of their rigidity. Examples of the effectiveness of the cutoff «rigidity screen» are given. Taking into account the real engineering-geological conditions of St. Petersburg, there has been carried out a numerical analysis by the finite element method for the pit enclosure made of sheet piles and several options of the «rigidity screen». The effectiveness of a double-row sheet piling enclosure with an intermediate layer of soil in the natural condition and artificially-fixed jet grouting soil massif is analyzed.

Keywords: additional settlements, excavation pit enclosure, sheet piles row, rigidity screen, diaphragm wall, numerical analysis, jet grouting soil massif.

Введение

В настоящее время при ограждении котлованов в условиях плотной городской застройки наибольшее распространение получили шпунтовое ограждение и различные модификации «стены в грунте»: железобетонные траншейного типа, из буровых соприкасающихся или секущихся свай, а также «стены в грунте» из грунтоцементного массива [1]. Наиболее надежными, однако трудоемкими и затратными, являются методы ограждения с использованием «стены в грунте», при этом при их устройстве возникает ряд рисков для строителей. Так, при производстве траншейной «стены в грунте» возможно вымывание бетона или залипание глинистого раствора на стенах траншеи, что существенно

снижает жесткость и несущую способность конструкции. При устройстве «стены в грунте» из грунтоцемента возможно неравномерное перемешивание грунта, в результате которого в конструкции образуются прослойки грунта.

Известен положительный опыт зарубежных и отечественных инженеров по применению так называемых «экранов жесткости». Так, японская компания GIKEN предлагает выполнение подпорной стены из шпунта, усиленной забуривающими металлическими трубами, выполняющими роль контрфорсов (рис. 1). Совместность работы данной конструкции обеспечивается объединением ряда шпунта и буровых труб по верху железобетонным ростверком.

Рис. 1. Шпунтовый ряд, усиленный трубами

Рис. 2. Устройство «экрана жесткости» из буровых свай при строительстве торгового комплекса в Москве [2]

Идея устройства защитных экранов была реализована отечественными инженерами при строительстве торгового комплекса «Охотный ряд» на Манежной площади в Москве [2] (рис. 2). Ограждающая конструкция котлована представляла собой стену в грунте толщиной 0,9 м. Для обеспечения безопасности существующих тоннелей метрополитена, расположенных в 6 м от стены, были устроены защитные ряды свай диаметром 0,8 м с шагом 1,2...2 м. Для раскрепления «стены в грунте» было выполнено объединение ее верхней части с головами свай общей фундаментной плитой.

В Санкт-Петербурге имеется опыт применения защитных экранов для уменьшения дополнительных технологических осадок зданий при разработке котлованов вблизи них. Так,

при разработке котлована глубиной 8,5 м около 5–6-этажного кирпичного здания постройки начала XX века его фундаменты получили осадки, значительно превышающие предельно допустимые для данного типа сооружений, в результате чего в несущих стенах образовались трещины, что привело к остановке работ по дальнейшей отрывке котлована [3] (рис. 3).

Для стабилизации полученных осадок и их дальнейшей минимизации был предложен проект создания отсечного защитного экрана, выполненного методом манжетной технологии, путем компенсационного нагнетания в грунт основания цементно-песчаного раствора с подачей снизу вверх под давлением от 4 до 10 МПа (рис. 4).

Статическое зондирование, проведенное в зоне инъекционного закрепления грунта

Рис. 3. График развития осадок марок по межевым стенам здания, получившего наибольшие деформации (выделены дополнительные технологические осадки в процессе инъектирования при создании защитного экрана) [3]

Рис. 4. Схема манжетной технологии и общий вид площадки при создании отсечного защитного экрана

между шпунтовым ограждением и межевыми стенами здания, отметило упрочнение текучих супесей и суглинков в среднем на 30–40 %. Результаты мониторинга показали, что проведенные мероприятия по созданию защитного экрана привели к стабилизации развития осадок здания, однако в процессе инъекции были отмечены дополнительные технологические осадки отдельных точек фундамента стены здания от 4 до 8 мм (см. рис. 3).

Комбинированный «экран жесткости», выполненный из установленного ранее шпунтового ограждения, усиленного в дальнейшем вертикальной диафрагмой из грунтоцемента, устроенной по методу «джетграутинг» (струйной технологии), был применен при строительстве второй сцены Мариинского театра (рис. 5). Данным решением удалось остановить развивающиеся дополнительные осадки зданий окружающей за-

стройки и обеспечить безопасную экскавацию оставшегося грунта из котлована [4, 5].

С. А. Сапиным [6] были рассчитаны изгибные жесткости одного погонного метра ограждения и показано, что наибольшие значения она имеет у ограждений котлованов, выполненных методом «стена в грунте» (рис. 6).

Целью настоящей работы являлся расчетный анализ эффективности применения «экрана жесткости» из двух рядов шпунта, удаленных друг от друга на расстоянии 1 м, в грунтовых условиях, типичных для Санкт-Петербурга.

Постановка задачи

Сравнительный анализ проводится посредством численного моделирования задачи строительства реального здания с развитым подземным пространством в центре Санкт-Петербурга.

Рассматривался котлован с глубиной выемки $H_k = 8$ м и шириной по верху 12 м. На расстоянии

Рис. 5. «Экран жесткости», примененный при усилении ограждения котлована при строительстве второй сцены Мариинского театра

Рис. 6. Изгибная жесткость одного погонного метра ограждения

8 м от бровки котлована расположено 6-этажное кирпичное здание на железобетонном ленточном фундаменте. Нагрузка на крайние фундаменты по расчетам составила 250,5 кН, на центральный — 323,9 кН.

Геологические условия приняты в виде типичного напластования слабых тиксотропных суглинков с мелкими песками в верхней части основания (рис. 7).

Расчет производился в программном комплексе Plaxis в плоской постановке задачи. Границы расчетной схемы принимались согласно радиусу влияния выемки — 30 м от бровки котлована по горизонтали, и известным геологиче-

ским условиям по вертикали. Расчетная схема рассматриваемой задачи приведена на рис. 8.

Для моделирования грунтов основания выбрана упруго-пластическая модель Hardeningsoil. Механические и деформационные характеристики грунтов, а также параметры, вводимые в программу, представлены в табл. 1.

Были выполнены расчеты для восьми типов ограждения:

1. Ряд шпунта Ларсена Л IV с глубиной погружения 21 м.
2. Два ряда шпунта Ларсена Л IV с глубиной погружения 21 м на расстоянии 1 м друг от друга с объединением железобетонным ростверком

Рис. 7. Инженерно-геологический разрез площадки строительства

Рис. 8. Расчетная схема поставленной задачи

Таблица 1

Характеристики грунтов и грунтоцемента, принятые в расчете

№ ИГЭ	Модель грунта	с, кПа	φ, град	γ_{sat} , кН/м ³	γ_{unsat} , кН/м ³	×10 ³ , кПа						R_{inter}
						E'	G	E_{oed}	E_{50}^{ref}	E_{oed}^{ref}	E_{ur}^{ref}	
1	HS	5	25	16,5	16,5	—	—	—	20	20	100	0,5
2	HS	6	31	19,9	25,4	—	—	—	18	18	90	0,6
3	HS	17	19	21,3	26,7	—	—	—	9	9	45	0,5
4	HS	10	5	13,5	18,5	—	—	—	6	6	30	0,45
5	HS	17	19	17,8	21,2	—	—	—	18	18	90	0,5
6	HS	29	25	21,4	21,4	—	—	—	23	23	115	0,5
ГЦ	Mohr-Coulomb	1000	35	17	17	500	250	500	—	—	—	0,95

по верху и оставлением грунта в межшпунтовом пространстве.

3. Два ряда шпунта Ларсена Л IV с глубиной погружения 21 м на расстоянии 1 м друг от друга с объединением железобетонным ростверком по верху и цементацией грунта в межшпунтовом пространстве на глубину выемки котлована.

4. То же на 1,2 глубины выемки котлована.

5. То же на 1,8 глубины выемки котлована.

6. То же на 2 глубины выемки котлована.

7. То же на 2,25 глубины выемки котлована.

8. То же на всю глубину погружения шпунта.

«Экран жесткости» задавался как два шпунтовых ряда со слоем грунта посередине. Шпунт моделировался как элемент типа «плита» с характеристиками, указанными в табл. 2.

Дополнительно к описанным выше ограждениям на отметке –1,00 м введена распорная система в виде металлических труб с шагом 3 м. Расчетная схема представлена на рис. 9.

Результаты расчета

Расчет выполнялся в три стадии (рис. 10): 1 — стадия экскавации до отм. –1,00 м; 2 — устройство распорной системы и экскавация до отм. –5,00 м; 3 — окончательная экскавация до отм. –8,00 м.

В процессе расчета определялись следующие параметры: горизонтальное перемещение ограждения котлована, наиболее близкого к су-

ществующему зданию, дополнительная осадка его фундамента, изгибающие моменты, возникающие в рядах шпунта рассматриваемого ограждения, продольные усилия, возникающие в распорке (рис. 11, 12).

Результаты расчета на момент полной экскавации грунта сведены в табл. 3.

Дополнительная осадка вычислялась по формуле

$$u_{доп} = |u|_i - |u|_0, \quad (1)$$

а относительное уменьшение осадки существующей застройки при использовании «экрана жест-

Рис. 9. Задание расчетной схемы в ПК Plaxis

Таблица 2

Параметры шпунтового ряда

Наименование	Площадь поперечного сечения одной шпунтины A, см ²	Момент инерции одной шпунтины I, см ⁴	Параметры, введенные в программу	
			EA, кН/м	EI, кН · м ² /м
Ларсен Л IV	94,2	37 837	$3,23 \cdot 10^9$	$118,9 \cdot 10^9$

Рис. 10. Стадии разработки котлована

Таблица 3

Результаты численных расчетов на момент завершения работ по отрывке котлована

№ п/п	Описание	Максимальное горизонтальное перемещение левого ограждения u_y , см	Общая деформация фундамента существующего здания $ u $, см	Дополнительная осадка фундамента существующего здания $u_{доп}$, см	Уменьшение осадки существующей застройки, %	Изгибающий момент шпунтового ряда M , кН · м		Сжимающее усилие в распорке N , кН
						левого	правого	
	Моделирование существующей застройки	—	6,51	—	—	—	—	—
1	Один ряд шпунта Ларсена Л IV	1,35	9,71	3,2	—	—	5016	861,1
2	Два ряда шпунта Ларсена Л IV с грунтом между ними	1,18	9,33	2,82	11,9	1260	3981	868,3
3	Два ряда шпунта Ларсена Л IV с цементацией на 8 м	1,15	9,21	2,7	15,6	1246	4008	867,6
4	Два ряда шпунта Ларсена Л IV с цементацией на 9,6 м	1,14	9,29	2,78	13,1	1158	4073	864,8
5	Два ряда шпунта Ларсена Л IV с цементацией на 14,4 м	1,16	9,29	2,78	13,1	1071	4147	867,5
6	Два ряда шпунта Ларсена Л IV с цементацией на 16 м	1,17	9,31	2,8	12,5	1056	4150	866,9
7	Два ряда шпунта Ларсена Л IV с цементацией на 18 м	1,19	9,22	2,71	15,3	1082	4124	868,7
8	Два ряда шпунта Ларсена Л IV с цементацией на 21 м	1,2	9,28	2,77	13,4	1171	4010	867,8

Рис. 11. Изополя деформаций основания при полной откопке котлована и выполнении «экрана жесткости» с грунтовым наполнением

Рис. 12. Эпюры изгибающих моментов, возникающие при полной откопке котлована, в левом и правом рядах шпунта «экрана жесткости» с грунтовым наполнением

кости» по сравнению с использованием одного ряда шпунтового ограждения определялось по формуле

$$\frac{|u|_1 - |u|_i}{|u|_1} 100 \% \quad (2)$$

В результате проведенного численного анализа установлено:

1. Устройство «экрана жесткости» позволяет уменьшить дополнительные осадки существующей застройки на 11,9 % в случае двухрядного

шпунтового ограждения с грунтом между ними и на 15,6 % в случае заполнения грунтоцементом по сравнению с использованием традиционной однорядной шпунтовой стенки.

2. Наполнение «экрана жесткости» грунтоцементом между двумя рядами шпунтовых стенок позволяет уменьшить дополнительные осадки существующей застройки на 4,3 % по сравнению с грунтовым наполнением.

3. При изменении глубины цементации пространства между рядами шпунта «экрана жесткости» от H_k до $H_{шп}$ уменьшение дополнительной осадки существующей застройки по сравнению с ограждением из одного ряда шпунта составило 12,5...15,6 %.

4. Ввиду малой эффективности цементации всего массива грунта межшпунтового пространства между двумя рядами имеет смысл использовать цементацию лишь в качестве поясов в местах крепления распорной системы к ограждению для более равномерного распределения усилия между ними.

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: учеб. пособие. М.; СПб.: АСВ, 2013. 256 с.
2. Мангушев Р. А., Никифорова Н. С. Технологические осадки зданий и сооружений в зоне влияния

подземного строительства / под ред. Р. А. Мангушева. М.: АСВ, 2017. 168 с.

3. Мангушев Р. А., Гарнык Л. В., Осокин А. И. Опыт сохранения соседних зданий при устройстве котлованов больших объемов в условиях плотной застройки // Основания. фундаменты и механика грунтов. 2016. № 5. С. 10–13.

4. Мангушев Р. А. и др. Основные концептуальные технические и технологические решения при строительстве подземной части второй сцены Санкт-Петербургского государственного академического Мариинского театра // сб. науч.-техн. статей «Проектирование и строительство подземной части нового здания (второй сцены) государственного академического Мариинского театра»; под общ. ред. В. А. Ильичева, А. П. Ледяева, Р. А. Мангушева. СПб.: СПбГАСУ, 2011. С. 12–33.

5. Ланько С. В. Влияние грунтоцементных конструкций на деформируемость ограждений котлованов в условиях городской застройки: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2013. 168 с.

6. Сапин Д. А. Технологические осадки фундаментов зданий соседней застройки при устройстве траншейной «стены в грунте»: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2016. 149 с.

References

1. Mangushev R. A., et al. *Proektirovanie i ustroystvo podzemnykh sooruzheniy v otkrytykh kotlovanakh*. Ucheb. posobie [Design and arrangement of underground structures in open excavation pit. Teaching manual]. Moscow, St. Petersburg, ASV Publ., 2013, 256 p.

2. Mangushev R. A., Nikiforova N. S. *Tekhnologicheskie osadki zdaniy i sooruzheniy v zone vliyaniya podzemnogo stroitel'stva* [Technological settlements of buildings and constructions in the zone of influence of underground

construction]. Ed. by Mangushev R. A. Moscow, ASV Publ., 2017, 168 p.

3. Mangushev R. A., Garnyk L. V., Osokin A. I. *Opyt sokhraneniya sosednikh zdaniy pri ustroystve kotlovanov bol'shikh ob'emov v usloviyakh plotnoy zastroyki* [Experience of preserving the neighboring buildings at construction of excavation pits of large volumes in the conditions of dense urban development]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov – Bases, foundations and mechanics of soil*, 2016, no. 5, pp. 10–13.

4. Mangushev R. A., et al. *Osnovnye kontseptual'nye tekhnicheskie i tekhnologicheskie resheniya pri stroitel'stve podzemnoy chaste vtoroy stseny Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo akademicheskogo Mariinskogo teatra* [The main conceptual engineering and technology solutions at construction of the underground part of the second stage of the St. Petersburg State Academic Mariinsky Theatre]. *Sb. nauch.-tekhn. statey «Proektirovanie i stroitel'stvo podzemnoy chaste novogo zdaniya (vtoroy stseny) gosudarstvennogo akademicheskogo Mariinskogo teatra»* [Coll. works "Design and construction of an underground part of the new building (second scene) of State Academic Mariinsky Theatre"]. Ed. by Il'ichev V. A., Ledyayev A. P., Mangushev R. A. St. Petersburg, SPSUACE Publ., 2011, pp. 12–33.

5. Lan'ko S. V. *Vliyaniya gruntotsementnykh konstruktsey na deformiruemost' ograzhdeniy kotlovanov v usloviyakh gorodskoy zastroyki*. Diss. kand. tekhn. nauk [Influence the soil cement structures on deformability of pits' protections in conditions of urban development. PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2013, 168 p.

6. Sapin D. A. *Tekhnologicheski osadki fundamentov zdaniy sosedney zastroyki pri ustroystve transheynoy «steny v grunte»*. Diss. kand. tekhn. nauk [Technological settlement of the buildings bases of the neighboring building development at construction of the trench "wall in soil"]. St. Petersburg, 2016, 149 p.