**ВЕСТНИК ПНИПУ.
СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
Т. 8, № 3, 2017
PNRPU BULLETIN.
CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE**
<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9826/2017.3.05

УДК 624.134

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСАДКИ ПРИ УСТРОЙСТВЕ СТЕНЫ В ГРУНТЕ ТРАНШЕЙНОГО ТИПА

О.А. Шулятьев, Д.К. Минаков

Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений (НИИОСП) им. Н.М. Герсевича, Москва, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 06 июня 2017
Принята: 21 июля 2017
Опубликована: 29 сентября 2017

Ключевые слова:

технологические осадки, стена в грунте траншейного типа, геотехнический мониторинг, численные расчеты, PLAXIS 3D

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена вопросу определения технологических осадок фундаментов близрасположенных зданий при устройстве стены в грунте траншейного типа. Материалом для ее написания послужили результаты научно-исследовательской работы (НИР), выполненной в 2015 г. на основании государственного задания (заказчик – ФАУ «ФЦС»). В данной статье представлены анализ имеющихся данных мониторинга технологических осадок и существующих методов расчета технологических осадок, а также результаты численного моделирования процесса устройства стены в грунте.

Изучение большого количества как зарубежных, так и отечественных источников показало следующее. Технологические осадки варьируются в широком диапазоне – от 1 до 63 мм. Количественная оценка технологических осадок при устройстве стены в грунте траншейного типа производится путем расчета методом конечных элементов, при этом отношение осадки, по данным мониторинга, к расчетной осадке варьируется от 48 до 175 %. Основные стадии моделирования устройства стены в грунте – это откопка траншеи и бетонирование. Выявлены два основных подхода к моделированию стадии откопки траншеи: моделирование откопки путем изменения свойств грунта в пределах траншеи или нагрузкой, эквивалентной гидростатическому давлению глинистого раствора. При моделировании стадии бетонирования, как правило, используется билинейная зависимость, предложенная Лингсом. Важным вопросом для численного расчета технологических осадок является размерность модели. В большинстве изученных работ в расчетах принималась трехмерная модель, которая позволяет учесть размер захватки. Расчет по двумерной модели приводит к завышенным значениям перемещений грунтового массива.

Для проверки методики определения технологических осадок выполнено численное моделирование в PLAXIS 3D с использованием данных площадки строительства многоэтажного здания в Большом Каире. В результате данного моделирования получена неплохая сходимость расчетной технологической осадки с результатами мониторинга (осадка по мониторингу – 7 мм, расчетная осадка – 6 мм). На примере площадки строительства в Большом Каире выполнена оценка влияния различных факторов (расстояние между траншеей стены в грунте и фундаментом здания, длина захватки стены в грунте, нагрузка по подошве фундамента и плотность бентонитового раствора) на технологические осадки. Данная оценка показала важность учета исследуемых факторов для оценки технологической осадки.

© ПНИПУ

© Шулятьев Олег Александрович – кандидат технических наук, заместитель директора, e-mail: niiosp35@yandex.ru.
Минаков Денис Константинович – старший инженер, e-mail: sigurdvelsung@mail.ru.

Oleg A. Shuliat'ev – Ph.D. in Technical Science, Deputy Technical Director, e-mail: niiosp35@yandex.ru.
Denis K. Minakov – Senior Engineer, e-mail: sigurdvelsung@mail.ru.

TECHNOLOGICAL SETTLEMENTS DURING THE CONSTRUCTION OF A DIAPHRAGM WALL

O.A. Shuliat`ev, D.K. Minakov

Research Institute of Bases and Underground Structures (NIOSP)
named after N.M. Gersevanov, Moscow, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 06 June 2017
Accepted: 21 July 2017
Published: 29 September 2017

Keywords:

technological settlements, diaphragm wall, geotechnical monitoring, numerical calculations, PLAXIS 3D

ABSTRACT

The article is devoted to the problem related to determining the technological settlements of foundations in nearby buildings during the construction of a diaphragm wall. It is based on the materials of the scientific research work which has been carried out in 2015 as the governmental assignment (customer FAU "FTSS"). It includes the available data analysis gained from monitoring the technological settlements, the analysis of existing methods aimed at estimating technological settlements and results of numerical modeling of the diaphragm wall construction.

As a result, a large number of both foreign and national sources have been analyzed which revealed the following facts. Firstly, technological settlements vary in a wide range from 1 to 63 mm. Secondly, the quantitative evaluation of the technological settlements during the construction of the diaphragm wall is performed by using the finite element method; and the ratio between the settlements gained from the monitoring data and the settlements gained from estimations varies from 48 to 175%. The main modeling stages in constructing the diaphragm wall are the trench excavation and concreting. Two main approaches to modeling the trench excavation stage have been identified, i.e. modeling of the excavation by changing the soil properties within the trench or by the load equivalent to the hydrostatic pressure of the bentonite slurry. As a rule, when modeling the concreting stage, a bilinear dependence proposed by Lings is used. A model dimensionality is an important issue for the numerical calculation of technological settlements. In most studied works, a three-dimensional model was used in the calculations, which allowed considering the size of the panel length. Calculations related to the 2-dimensional model lead to overestimated values of soil displacements.

To verify the method determining the technological settlements, the numerical modeling in PLAXIS 3D was carried out using the data from the construction site of a multi-storey building in Greater Cairo. As a result of this simulation, a good compliance of the calculated technological settlement with the monitoring data was obtained (the settlement according to the monitoring data is 7 mm, the settlement according to the calculations is 6 mm). Based on the example of the construction site in Greater Cairo, it was assessed how various factors (the distance between the diaphragm wall trench and the foundation of the building, the panel length, the load under the foot of the foundation and the density of the bentonite slurry) influence technological settlements. This assessment has shown that it is important to take the investigated factors into account when estimating the technological settlements.

© PNRPU

1. Анализ имеющихся данных по мониторингу технологических осадок

По итогам выполненного поиска научно-технических источников и их анализа можно констатировать, что исследуемой проблеме определения технологических осадок в результате устройства стены в грунте траншейного типа уделяется значительное внимание. Как в зарубежных, так и в отечественных источниках приводится большое количество данных по мониторингу технологических осадок. Технологические осадки варьируются в широком диапазоне – от 1 до 63 мм (максимальная осадка в 63 мм зафиксирована для здания довоенной постройки, расположенного в Гонконге при строительстве метро [1]). Там, где имеются результаты мониторинга и численного моделирования, выполнено сравнение прогнозных и фактических результатов. Отношение осадки, по данным мониторинга, к расчетной осадке варьируется от 48 до 175 %. Это означает, что в одних случаях фактическая осадка оказалась меньше расчетной (до двух раз), в других – больше (до 1,75 раз).

Рис. 1. Сводный график осадок грунтового массива и фундаментов зданий в результате устройства стены в грунте

Fig. 1. Summary chart of the soil and foundations settlements due to diaphragm wall construction

Технологические осадки массива грунта и фундаментов зданий зависят от расстояния до края траншеи. Для иллюстрации данной зависимости на основании собранных данных мониторинга был построен график (рис. 1). Следует отметить, что данные мониторинга, полученные при строительстве метро в Гонконге [1], не представлены на нем, так как в них отсутствует информация о расстоянии между зданиями и краем траншеи. Полученный график наглядно демонстрирует затухание осадок с увеличением расстояния.

2. Анализ существующих методов расчета технологических осадок

В результате анализа российской и зарубежной научно-технической базы установлено, что количественная оценка технологических осадок при устройстве стены в грунте траншейного типа производится путем расчета методом конечных элементов в самых разных геотехнических программах. Для анализа и систематизации выявленных подходов к расчетам технологических осадок от устройства стены в грунте рассмотрим следующие вопросы: модель грунта, моделирование стадии откопки грунта, учет фильтрационных свойств водонасыщенных связных грунтов, моделирование стадии бетонирования и размерность модели.

1. *Модель грунта.* В большинстве расчетов [3–10] для описания грунта, окружающего стену в грунте, использовалась модель Мора–Кулона, а также модели Дункана–Чанга [11] и модель упрочняющегося грунта [12]. В работе [13] для песков была применена модель Дрюкера–Прагера.

2. *Моделирование стадии откопки грунта.* В результате проведенного анализа источников выделены два основных подхода к моделированию откопки траншеи: моделирование откопки путем изменения свойств грунта в пределах траншеи и моделирование откопки нагрузкой.

Первый подход к моделированию подразумевает задание грунту в пределах откапываемой траншеи таких свойств, которые соответствуют глинистому раствору (рис. 2, а). Данный подход был реализован в работах [4, 5, 11]. Наиболее полно принятые свойства

грунта, моделирующего глинистый раствор, раскрыты в работе Е.М. Comodromos с соавторами в 2013 г. [5]: модель грунта – упруго-линейная; модуль сдвига $G = 15$ кПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,49$; объемный вес $\gamma = 11$ кН/м³. Следует отметить, что принятый модуль сдвига в 15 кПа очень мал и фактически означает то, что материал не способен сопротивляться сдвиговой деформации; коэффициент Пуассона, равный 0,49, очень близок к коэффициенту Пуассона воды (0,50).

Рис. 2. Способы моделирования откопки: *a* – изменение свойств грунта в пределах траншеи на соответствующие глинистому раствору; *б* – замена грунта в траншеи нагрузкой, моделирующей гидростатическое давление глинистого раствора

Fig. 2. The methods of the excavation modeling: *a* is change of the soil properties in the trench at the appropriate clay mud; *b* is replace soil in the trench with a load simulating the hydrostatic pressure of clay mud

Второй подход к моделированию предполагает удаление грунта из траншеи и замену его нагрузкой, эквивалентной гидростатическому давлению глинистого раствора (рис. 2, *б*). Данный подход был реализован в работах [3, 7, 9, 10, 12–15]. Наиболее детально он описан в работе S.M. Gourvenec и W. Powrie, 1999 г. [10].

3. *Учет фильтрационных свойств водонасыщенных связных грунтов.* Связные водонасыщенные грунты моделируются полностью не дренированными [6, 9] или с заданным коэффициентом фильтрации [10]. В работе [16] в качестве дополнения к полевому эксперименту был выполнен численный расчет горизонтальных перемещений стенки траншеи в зависимости от уровня глинистого раствора и выбранной фильтрационной модели грунта, при этом были получены следующие результаты: максимальное перемещение стенки траншеи через двое суток при недренированной модели грунта составило 65 мм, при дренированной с коэффициентом фильтрации 10^{-6} см/с – 70 мм, при дренированной с коэффициентом фильтрации 10^{-5} см/с – 113 мм.

4. *Моделирование стадии бетонирования.* Технология устройства стены в грунте предусматривает после откопки траншеи замещение глинистого раствора подвижной бетонной смесью, которая при этом оказывает давление на стенки траншеи. Стадия бетонирования моделировалась в работах [5–15]. В работах [5, 11], в которых откопка траншеи моделировалась изменением свойств грунта, подвижная бетонная смесь моделировалась упругим материалом. В работах [6–10, 12, 13, 15], в которых откопка траншеи моделировалась нагрузкой, подвижная бетонная смесь также моделировалась нагрузкой. В работе [7] не раскрыт метод определения нагрузки на стенки траншеи на стадии бетонирования. В работах [12, 15] закон распределения нагрузки на стенки траншеи принимался гидростатическим, в остальных работах [6, 8–10, 13] использовалась билинейная зависимость, предложенная Лингсом [17]:

$$\sigma = \begin{cases} \gamma_{\text{б}} \cdot h & \text{при } h \leq h_{\text{крит}}, \\ \gamma_{\text{бен}} \cdot h + (\gamma_{\text{б}} - \gamma_{\text{бен}}) \cdot h_{\text{крит}} & \text{при } h > h_{\text{крит}}, \end{cases}$$

где σ – боковое давление на стенки траншеи; $\gamma_{\text{б}}$ – объемный вес бетонной смеси; $\gamma_{\text{бен}}$ – объемный вес глинистого раствора; $h_{\text{крит}}$ – критическая глубина; h – глубина ниже уровня поверхности земли.

Билинейная зависимость Лингса основывается на опытных данных, согласно которым давление бетонной смеси на стенки траншеи до определенной глубины, называемой критической, является гидростатическим, а на больших глубинах оно остается постоянным или уменьшается.

В работах [6, 9] критическая глубина принималась равной 15 м при глубине траншеи 35 м, в работе [10] критическая глубина принималась равной 1/3 глубины траншеи, в работах [8, 13] – равной 1/5 глубины траншеи. Схема для определения давления на стенки траншеи в процессе бетонирования [10] представлена на рис. 3.

Рис. 3. Схема для определения давления на стенки траншеи в процессе бетонирования
Fig. 3. The scheme aimed at determining the pressure on the trench walls in the process of concreting

Затвердевший бетон моделируется в изученных работах одинаково: заданием грунту в пределах траншеи свойств бетона (упруго-линейная модель, модуль деформации и объемный вес в зависимости от конкретного бетона, коэффициент Пуассона, равный 0,2).

5. *Размерность модели.* Важным вопросом для численного расчета технологических осадок является размерность модели. Существуют три возможных подхода к решению данного вопроса: двухмерная, трехмерная и осесимметричная модели. В большинстве изученных работ по умолчанию принималась трехмерная модель, и обоснования ее выбора не приводилось. Однако в нескольких работах [10, 14] вопрос выбора размерности модели рассмотрен подробно и приведены сравнения расчетов по моделям с разной размерностью.

В работе [10] проведен подробный анализ и сравнение результатов численного моделирования устройства стены в грунте в двух- и трехмерной моделях. Устройство стены в грунте в трехмерной модели осуществлялось поэтапно по девяти захваткам. Всего было выполнено четыре трехмерных расчета с разными длинами захваток: 2,50; 3,75; 5,0 и 7,5 м. Сравнение результатов расчетов по разным моделям представлено на рис. 4. Как видно на данном рисунке, расчеты по двухмерной модели дают существенно большие значения перемещений грунтового массива, чем по трехмерной. При этом разница тем

больше, чем меньше длина захватки стены в грунте, принимаемая в трехмерной модели: максимальное горизонтальное перемещение грунтового массива в двухмерной модели составляет 12,5 мм, в трехмерной модели с длиной захватки 7,5 м – 7,5 мм, в трехмерной модели с длиной захватки 2,5 м – 1,4 мм.

Рис. 4. Распределение по глубине горизонтальных перемещений грунтового массива при различной длине захватки L (перемещения фиксировались напротив середины центральной захватки стены в грунте)

Fig. 4. The distribution along the depth of the horizontal displacements of the soil depending on different panel length L (the displacements were found opposite the middle part of the central panel in the soil)

В результате выполненных расчетов в работе [10] был сделан вывод о том, что для достоверного моделирования устройства стены в грунте необходимо выполнять расчет по трехмерной модели, которая учитывает размеры захватки стены в грунте. Расчет по двухмерной модели приводит к завышенным значениям перемещений грунтового массива.

3. Численное моделирование процесса устройства стены в грунте

Для проверки методики определения технологических осадок в процессе устройства стены в грунте было выполнено численное моделирование данного процесса с использованием данных площадки строительства многоэтажного здания в Большом Каире [11]. Численное моделирование велось в программном комплексе (ПК) PLAXIS 3D. Принятая модель грунта в расчетах – модель Кулона–Мора. Откопка траншеи моделировалась путем замены грунта в пределах траншеи нагрузкой, эквивалентной гидростатическому давлению глинистого раствора. Стадия бетонирования (подвижной бетонной смеси) в расчете не моделировалась, так как на данной стадии давление на стенки траншеи больше, чем на стадии откопки траншеи, и, следовательно, дополнительных осадок окружающего массива грунта не происходит.

Грунты на площадке в Большом Каире представлены песками различной крупности и плотности. Уровень подземных вод расположен на глубине 2 м. Глубина подошвы стены в грунте от уровня поверхности земли составляет 21 м, ширина – 0,6 м, длина захваток варьируется от 2,7 до 6,7 м. Окружающая застройка представлена пятью зданиями, замаркированными буквами A , B , C , D и E . Более подробное описание площадки дано в работе [18].

Рис. 5. Схема взаимного расположения захваток стены в грунте и фундамента здания E в расчетной модели

Fig. 5. The scheme of the mutual location of the diaphragm wall panels and foundation of the building *E* in calculated model

Расчетная модель объекта, созданная в PLAXIS 3D, включает в себя участок стены в грунте, состоящий из четырех захваток длиной 3,5–6,5 м (рис. 5) и расположенный вблизи данных захваток здания *Е* (двухэтажное здание с фундаментами мелкого заложения глубиной 2–3 м). Расстояние между зданием *Е* и стеной в грунте составляет 3 м. Расчетная технологическая осадка, согласно результатам моделирования, составила 6,2 мм, что хорошо соответствует имеющимся данным мониторинга, по которым здание *Е* получило осадку 6,8 мм. Таким образом, подтверждена возможность использования численного моделирования в объемной постановке для оценки технологических осадок в процессе устройства стены в грунте путем замены грунта в траншее нагрузкой, эквивалентной гидростатическому давлению глинистого раствора.

4. Факторы, влияющие на технологические осадки

На технологические осадки влияет множество факторов. На основании анализа научно-технических источников можно выделить у них несколько основных: инженерно-геологические условия, расстояние между траншеей стены в грунте и фундаментом здания, длина захватки стены в грунте, нагрузка по подошве фундамента и плотность бентонитового раствора. Все указанные факторы, за исключением инженерно-геологических условий, могут быть легко заданы одним числом. На примере площадки строительства в Большом Каире была выполнена оценка влияния всех указанных факторов, кроме инженерно-геологических условий, на технологические осадки. Результаты расчетов, выполненных для данной оценки, представлены в таблице. Инженерно-геологические условия во всех расчетах принимались постоянными, соответствующими площадке строительства в Большом Каире. Полученные результаты расчетных осадок сравнивались с осадкой в 6,2 мм, рассчитанной в условиях, когда значения всех факторов соответствуют фактическим. Как видно из таблицы, изменение любого из исследуемых факторов в пределах, характерных для строительной практики, приводит к значительному изменению технологической осадки (от 2,5 до 7 раз). Таким образом, учет данных факторов имеет существенное значение для прогноза технологической осадки.

Результаты выполненных расчетов для оценки влияния
различных факторов на технологическую осадку
The results of calculations executed to assess the influence
of various factors on technological settlements

Номер расчета	Факторы, влияющие на технологическую осадку				Расчетная технол. осадка здания E , мм	Отношение расч. технол. осадки к осадке в 6,2 мм**, %
	Расстояние от здания до траншеи, м	Длина захватки, м	Давление по подошве фундамента здания E , кПа	Плотность бentonитового раствора, кН/м ³		
1	3	6,0	300	10,5	6,2**	100
2	1*	6,0	300	10,5	15,1	244
3	5	6,0	300	10,5	3,1	50
4	3	9,5	300	10,5	13,5	218
5	3	22	300	10,5	Обрушение стенок захв.	Нет результата
6	3	6,0	200	10,5	2	32
7	3	6,0	400	10,5	13,7	221
8	3	6,0	300	11	3,7	60
9	3	6,0	300	11,5	2,4	39

Примечание: * – полужирным шрифтом выделены значения фактора, который в данном расчете меняется (относительно фактического его значения); ** – осадка в 6,2 мм получена в результате расчета, в котором значения всех факторов соответствуют фактическим (участок строительства в Большом Каире).

Библиографический список

1. Morton K., Cater R.W., Linney L. Observed settlements of building adjacent to stations constructed for the modified initial system of mass transit system of the mass transit railway // Proceedings of the 6th Southeast Asian Conference on Soil Engineering, 19–23 may, Hong Kong. – 1980.
2. Poh T.Y., Chee-Goh A.T., Wong I.H. Ground movements associated with wall construction: case histories // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE. – 2001. – № 127 (2). – P. 1061–1069.
3. Stephen T.M. Young, James W.C. Sze. Deep basement construction through an existing basement at the central business district of Hong Kong // Proceedings of the Firth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. – New York, 2004.
4. Ashraf Abu-Krishna. Design and construction of the deepest diaphragm walls in Cairo // Underground Space. – London, 2007.
5. Comodromos E.M., Papadopoulou M.C., Konstantinidis G.K. Effects on adjacent buildings from diaphragm wall installation // Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Paris, 2013.
6. Wit J.C.W.M. de, Lengkeek H.J. Full scale test on environmental impact of diaphragm wall trench installation in Amsterdam – the final results // International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. – Toulouse, 2002.
7. Sanctis L. de, Mandolini A. Finite element analysis of the excavation of the new Garibaldi station of Napoli underground // Proceedings of the International Conference on Numerical Simulation of Construction Processes in Geotechnical Engineering for Urban Environment, 23/24 March 2006. – Bochum, 2006.

8. Lachler A., Neher H.P., Gebeyhu G. A comparison between monitoring data and numerical calculation of a diaphragm wall construction in Rotterdam // *Proceedings of the International Conference on Numerical Simulation of Construction Processes in Geotechnical Engineering for Urban Environment*, 23/24 March 2006. – Bochum, 2006.
9. Wit J.C.W M. de, Roelands J.C.S., Kant M. de. Full scale test on environmental impact of diaphragm wall trench installation in Amsterdam – the final results // *International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*. – Tokyo, 1999.
10. Gourvenec S.M., Powrie W. Three-dimensional finite-element analysis of diaphragm wall installation // *Geotechnique* 49. – 1999. – № 6. – P. 801–823.
11. Ahmed Hosny Abdel-Rahman, Sayed Mohamed El-Sayed. Spatial stress deformation analysis for installation of a diaphragm wall // *Ain Shams University Faculty of Engineering. Scientific Bulletin*. – 2002. – Vol. 37, № 3.
12. Численное моделирование технологической осадки соседних зданий при устройстве траншейной «стены в грунте» / Р.А. Мангушев, А.А. Веселов, В.В. Конюшков, Д.А. Сапин // *Вестник гражданских инженеров*. – 2012. – № 5 (34). – С. 87–98.
13. Triantafyllidis Th., Schafer R. Impact of diaphragm wall construction on the stress state in soft ground and serviceability of adjacent foundations // *Proceedings of the 14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Madrid, Spain, 24–27 September 2007. – Madrid, 2007.
14. Tan T.-S., Yong K.-Y., Hou B. 3-D finite element modelling of slurry trenching // *International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*. – Tokyo, 1999.
15. Сапин Д.А. Осадки фундаментов зданий соседней застройки при устройстве траншейной «стены в грунте» // *Жилищное строительство*. – 2015. – № 4. – С. 8–13.
16. Numerical analysis of experimental slurry trench in soft clay / T. Tamano, N.H. Quan, M. Kanaoka, S. Fukui // *International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*. – Toulouse, 2002.
17. Lings M.L., Ng C.W.W., Nash D.F.T. The lateral pressure of wet concrete in diaphragm wall panels cast under bentonite // *Proceedings of Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering*. – 1994. – Vol. 107, iss. 3. – P. 163–172.
18. Определение технологических осадок фундаментов близлежащих зданий при устройстве стены в грунте, грунтовых анкеров и буроинъекционных свай / О.А. Шулятьев, О.А. Мозгачева, Д.К. Минаков, Д.Ю. Соловьев // *Academia. Архитектура и строительство*. – 2016. – № 4. – С. 129–140.

References

1. Morton K., Cater R.W., Linney L. Observed settlements of building adjacent to stations constructed for the modified initial system of mass transit system of the mass transit railway. *Proceedings of the 6th Southeast Asian Conference on Soil Engineering*, 19-23 may, Hong Kong, 1980.
2. Poh T.Y., Chee-Goh A.T., Wong I.H. Ground movements associated with wall construction: Case histories. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2001, no. 127(2), pp. 1061-1069.
3. Stephen TM Young, James WC Sze. Deep basement construction through an existing basement at the central business district of Hong Kong. *Proceedings Fifth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, New York, 2004.

4. Ashraf Abu-Krishha. Design and construction of the deepest diaphragm walls in Cairo. *National Authority for Tunnels (NAT)*, Cairo, Egypt.
5. Comodromos E.M., Papadopoulou M.C., Konstantinidis G.K. Effects on adjacent buildings from diaphragm wall installation. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, 2013.
6. J.C.W.M. de Wit, H.J. Lengkeek. Full scale test on environmental impact of diaphragm wall trench installation in Amsterdam - the final results. *International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Toulouse, 2002.
7. L. de Sanctis, A. Mandolini. Finite element analysis of the excavation of the new Garibaldi station of Napoli underground. *Proceedings of the International Conference on Numerical Simulation of Construction Processes in Geotechnical Engineering for Urban Environment*, 23-24 March 2006, Bochum, Germany.
8. Lachler A., Neher H.P., Gebeyhu G. A comparison between monitoring data and numerical calculation of a diaphragm wall construction in Rotterdam. *Proceedings of the International Conference on Numerical Simulation of Construction Processes in Geotechnical Engineering for Urban Environment*, 23-24 March 2006, Bochum, Germany.
9. J.C.W.M. de Wit, J.C.S. Roelands, M. de Kant. Full scale test on environmental impact of diaphragm wall trench installation in Amsterdam - the final results. *International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Tokyo, 1999.
10. Gourvenec S.M., Powrie W. Three-dimensional finite-element analysis of diaphragm wall installation. *Geotechnique* 49, 1999, no. 6, pp. 801-823.
11. Ahmed H. Abdel-Rahman, Sayed M. El-Sayed. Spatial stress deformation analysis for installation of a diaphragm wall. *Ain Shams University Faculty of Engineering. Scientific bulletin*, 2002, vol. 37, no. 3, pp. 75-90.
12. Mangushev R.A., Veselov A.A., Konushkov V.V., Sapin D.A. Chislennoe modelirovanie tekhnologicheskoi osadki sosednikh zdaniy pri ustroistve transheinoi «steny v grunte» [Numerical simulation of adjoining development's technology settlement in process of trench slurry wall construction]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, 2012, no. 5 (34), pp.87-98.
13. Triantafyllidis Th., Schafer R. Impact of diaphragm wall construction on the stress state in soft ground and serviceability of adjacent foundations. *Proceedings of the 14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Madrid, Spain, 24-27 September, 2007.
14. Tan T-S., Yong K.-Y., Hou B. 3-D finite element modelling of slurry trenching. *International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Tokyo, 1999.
15. Sapin D.A. Osadki fundamentov zdaniy sosednei zastroiki pri ustroistve transheinoi «steny v grunte» [Settlements of foundations of adjacent buildings when arranging the trench "slurry wall"]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*, 2015, no. 4, pp. 8–13.
16. Tamano T., Quan N.H., Kanaoka M., Fukui S. Numerical analysis of experimental slurry trench in soft clay. *International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Toulouse, 2002.
17. Lings M.L., Ng C. W.W., Nash D.F.T. The lateral pressure of wet concrete in diaphragm wall panels cast under bentonite. *Proceedings of Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, 1994, vol. 107, iss. 3, 1994, pp. 163-172.
18. Shulyatjev O.A., Mozgacheva O.A., Minakov D.K., Solov'ev D.Yu. Opredelenie tekhnologicheskikh osadok fundamentov blizlezhashchikh zdaniy pri ustroistve steny v grunte, gruntovykh ankerov i buroin"ektsionnykh svai [Determination of technological settlements of nearby buildings during installation of diaphragm wall, ground anchors and micropiles]. *Academia. Architecture and Construction*, 2016, pp. 129-140.