УДК 622.284

А.Г.ПРОТОСЕНЯ, *д-р техн. наук, профессор, kaf-sgp@mail.ru*
Д.А.ПОТЕМКИН, *канд. техн. наук, доцент, potyomkin@list.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург
С.В.СТЕПАНЕНКО, *начальник ПТО*
ООО «Струйные Технологии и Строительство», Санкт-Петербург

A.G.PROTOSENYA, *Dr. in eng. sc., professor, kaf-sgp@mail.ru*
D.A.POTYOMKIN, *PhD in eng. sc., associate professor, potyomkin@list.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg
S.V.STEPANENKO, *head of department*
Jet Technology and Construction ltd, Saint Petersburg

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ КОНСТРУКЦИЙ ЗАГЛУБЛЕННОГО ПОДЗЕМНОГО СООРУЖЕНИЯ

Выполнена постановка задачи и численное моделирование в плоской постановке смещений грунтового массива при строительстве заглубленного подземного сооружения. Выявлено влияние граничных условий по контакту «грунт – конструкция», заделки стены, ее толщины и анкерного крепления на деформирование грунтового массива.

Ключевые слова: моделирование, грунтовый массив, котлован, метод конечных элементов, свая.

NUMERICAL MODELING OF DEEP EXCAVATION STRUCTURES BEHAVIOR DURING CONSTRUCTION

Numerical modeling of deep excavation construction is done in plane strain condition. The influence of boundary condition, contact condition between soil and structures, constrain of cantilever wall, thickness of the wall and anchors on the strain condition of the soil is found.

Key words: modeling, soil, pit, finite elements method, the pile.

Строительство заглубленных сооружений, фундаментов высотных зданий, а также подземных сооружений мелкого заложения связано с образованием открытых выработок больших размеров – котлованов. Инженерно-геологические условия строительства в Санкт-Петербурге характеризуются наличием мощной толщи четвертичных отложений мелкодисперсных обводненных грунтов. Поддержание выработанного пространства большого размера в таких условиях является сложной инженерной задачей.

Одним из эффективных способов сохранения устойчивости котлована является способ «стена в грунте». Сущность способа заключается в создании по контуру будущего котлована железобетонного ограждения-стены, например, с помощью буросекущих свай до начала земляных работ с последующей разработкой грунта в котловане под защитой ограждения.

Параметры стены рассчитываются таким образом, чтобы частично или полностью исключить нежелательные смещения в грунтовом массиве. При этом результирующая картина смещений во вмещающем массиве зависит от множества влияющих факторов:

– материал конструктивных элементов крепи и их геометрические размеры;

– сопротивление сдвигу контакта «грунт – конструкция»;

– глубина заделки стены в устойчивые грунты (ниже отметки днища котлована);

– наличие и местоположение в конструкции вспомогательных элементов (расстрелы, анкеры и т.п.);

Таблица 1

Расчетные характеристики грунтов

Наименование грунта	h, м	e	γ, кН/м^3	γ', кН/м^3	E_0, МПа	ν	φ	c, кПа
Пески мелкие и средней крупности	23,5	0,7	15,4	19,5	20	0,3	25	1
Пески пылеватые	2,0	0,55	16,65	20,2	18	0,3	33	1
Супеси пылеватые тугопластичные	4,5	0,43	21,45	21,5	10	0,2	16	22
Супеси пылеватые, с гравием, галькой, пластичные, полутвердые	2,5	0,42	18,8	21,8	15	0,2	20	13
Супеси очень пылеватые (алевритовые), пластичные, полутвердые	–	0,59	16,7	20,4	12	0,2	17	17

Примечания: h – мощность слоя грунта; e – коэффициент пористости; γ – объемный вес грунта в полностью насыщенном водой состоянии; γ' – объемный вес грунта в ненасыщенном водой состоянии; E_0 – модуль деформации грунта; ν – коэффициент поперечной деформации грунта; φ – угол внутреннего трения грунта; c – сцепление грунта.

– наличие в грунтовом массиве и положение уровня грунтовых вод при сооружении котлована с подтоплением или искусственным понижением уровня грунтовых вод.

В данной работе рассматриваются общие подходы[*] и результаты моделирования напряженно-деформированного состояния грунтового массива при постадийном сооружении котлована для строительства одного из гидротехнических сооружений Санкт-Петербурга[**] под защитой конструкции «стена в грунте».

Размеры котлована в плане 39×18 м, диаметр составляющих элементов ограждающей стены (буросекущих свай) 1,5 м при эффективной толщине стены 0,9 м, глубина стены 30 м. Материал ограждающей стены – бетон класса В 25. Первая очередь сооружения котлована предусматривает постадийную откопку грунта на 7,5 м по 1,5 м на каждой стадии.

В расчетах грунтовый массив рассматривается как упруго-пластичная среда, прочность которой задается известным критерием прочности Кулона – Мора:

$$\sigma_1 = \frac{2c\cos\varphi + \sigma_3(1+\sin\varphi)}{1-\sin\varphi},$$

где σ_1 и σ_1 – максимальные и минимальные главные напряжения в массиве; c – сцепление; φ – угол внутреннего трения грунта.

Расчеты произведены на двумерных моделях в программном комплексе PLAXIS. Размеры модели составили 80 м в длину и 50 м в ширину, что составляет два размера сооружения по горизонтали и полтора размера сооружения по вертикали. Граничные условия в модели: по вертикальным левой и правой границам – запрет перемещения граничных узлов по горизонтали, по нижней горизонтальной границе – запрет перемещения узлов в обоих направлениях. Дискретизация пространства грунтового массива выполнена треугольными 15-узловыми элементами. Элементы защитной конструкции (участки стены, расстрелы, анкеры) моделировались элементами-балками, характеризуемыми продольной жесткостью EA, изгибной жесткостью EI, весом w (здесь E – модуль упругости материала; I – момент инерции сечения элемента; A – площадь поперечного сечения элемента; w – вес условного элемента стены длиной и высотой 1 м и шириной, равной проектной ширине стены).

Моделирование деформированного состояния грунтового массива с изменением сопротивления сдвигу контакта «грунт – конструкция». Возможность проскальзывания грунта относительно ограждающей стены может существенно повлиять на работу сооружения.

Грунтовый массив в районе строительства представлен пятью разновидностями грунтов, расчетные физико-механические свойства которых представлены в табл.1.

---

[*] *Улицкий В.М.* Геотехническое сопровождение развития городов / В.М.Улицкий, А.Г.Шашкин, К.Г.Шашкин. СПб. 2010.

Ulitsky V.M. Geotechnical support for urban development / V.M.Ulitsky, A.G.Shashkin, K.G. Shashkin. Saint Petersburg, 2010.

[**] *Попов М.Г.* Численное моделирование деформирования грунтового массива при сооружении насосной камеры под защитой буросекущих свай / М.Г.Попов, С.В.Степаненко // Освоение минеральных ресурсов Севера: проблемы и решения: Тр.10-й Междунар. науч.-практич. конф. Воркута, 2012. Том 1.

Popov M.G. Numerical modelling of pumping station construction under the protection of secant pile wall / M.G.Popov, S.V.Stepanenko // Proceedings of the 10-th international scientific conference «Development of mineral resource of North: problems and solution». Vorkuta, 2012. Vol.1.

В качестве контрольных фиксировались следующие расчетные величины смещений: подъем днища котлована, максимальные результирующие смещения в конструкции стены, максимальные горизонтальные и вертикальные смещения стены.

Прочность на контакте соотносится с прочностью грунта через параметр R:

$$c'_{int} = Rc';$$
$$\varphi'_{int} = R\varphi';$$

где c'_{int} – сцепление по контакту; φ'_{int} – угол внутреннего трения по контакту.

В расчетах параметр R принимался равным: $R_п = R_с = 1{,}0$ – прочность контакта равна прочности грунта; $R_п = 0{,}7$, $R_с = 0{,}6$ – реальная прочность контакта; $R_п = 0{,}56$, $R_с = 0{,}48$ – 80 % реальной прочности контакта; $R_п = 0{,}42$; $R_с = 0{,}36$ – 60 % реальной прочности контакта; $R_п = 0{,}28$, $R_с = 0{,}24$ – 40 % реальной прочности контакта ($R_п$ – параметр для песков; $R_с$ – параметр для супесей).

В табл.2 приведены расчетные значения контрольных величин смещений.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы. При значении прочности контакта, равном прочности грунта, слои грунта, непосредственно контактирующие с бетоном стены, могут не переходить в пластическое состояние и перемещение элемента стены повторяет перемещение грунтовых частиц. Из данных табл.2 виден характер перемещения элемента стены – грунт «стремится» вытолкнуть стену в сторону котлована и вверх. При ослабленной прочности контакта (40 % от реальной прочности грунта) элемент стены ведет себя иначе – перемещение происходит в сторону котлована и вниз (стена «тонет»).

Таким образом, расчеты показали, что движение грунтовых масс, вовлеченных в процесс сдвижения, имеет общую закономерность – перемещение грунтовых частиц в сторону выработанного пространства, а работа конструктивных элементов ограждения ощутимо зависит от прочности контакта грунта с материалом ограждающей конструкции.

Моделирование деформированного состояния грунтового массива с изменением глубины заделки стены в грунт. Последовательность земляных работ принята такой же, как и в предыдущем разделе: 5 этапов по 1,5 м каждый, мощность стены при этом составляет 0,8 м.

Смоделированы четыре варианта заделки стены в грунт ниже днища котлована: 5; 10; 15; 22,5 м.

При глубине заделки 5 м происходит опрокидывание стены грунтом в выработанное пространство. Перемещающийся в котлован

Таблица 2

Значения контрольных величин смещений

Оцениваемый параметр	Значения смещений (мм) при различной прочности контакта грунта с материалом конструкции (%)				
	прочность грунта	реальная прочность (100%)	80%	60%	40%
Подъем днища котлована	103,3	113,14	127,32	153,5	191,7
Максимальные (результирующие) смещения стены	54,11	61,88	67,09	75,65	92,44
Максимальные горизонтальные смещения	47,55	57,39	64,23	74,85	92,23
Максимальные вертикальные смещения	25,89	23,24	19,52	11,18	–6,23

Примечание. Значения сцепления даны в процентах от реальных для данного места строительства величин $R_п = 0{,}7$; $R_с = 0{,}6$.

Таблица 3

Значения контрольных величин смещений при изменении величины заделки стены в грунт

Контрольный параметр	Значения смещений (м) при величине заделки стены в грунт (м)			
	5	10	15	22,5
Подъем днища котлована	0,140	0,129	0,122	0,113
Максимальные смещения стены	0,146	0,086	0,068	0,063
Максимальные горизонтальные смещения стены	0,141	0,074	0,057	0,057
Максимальные смещения в бортах котлована	0,170	0,080	0,070	0,070

грунт увлекает за собой стену, сопротивления которой не достаточно для предотвращения критических смещений призмы сползания. После отработки четырех этапов земляных работ горизонтальные смещения стены могут достигать 0,14 м. После отработки пятого этапа земляных работ смещения в бортах котлована достигают 0,17 м и они теряют устойчивость, при этом подъем грунта в днище котлована может достигать 0,14 м. Численные значения контрольных величин смещений сведены в табл. 3.

Дальнейшее увеличение глубины заделки стены в грунт ведет к значительному уменьшению подвижек в грунтовом массиве. Смещения в бортах котлована резко уменьшаются от 0,17 до 0,070 м при величине заделки 22,5 м. Перемещения самой стены также резко снижаются от 0,146 до 0,063 м – полные смещения и от 0,141 до 0,057 м – горизонтальные (в сторону выработанного пространства). Устойчивость котлована обеспечивается при величине заделки, равной 10 м, в дальнейшем снижаются величины смещений в целом.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что глубина заделки ограждающей конструкции в грунт ниже отметки днища котлована является важным фактором, влияющим на устойчивость выработанного пространства.

Моделирование деформированного состояния грунтового массива с изменением мощности ограждающей конструкции. В разделе представлены результаты моделирования напряженно-деформированного состояния грунтового массива при сооружении котлована с пятью вариантами толщины стены: 0,8; 0,9; 1,0; 1,1 и 1,2 м. Глубина заделки стены в грунт ниже днища котлована принята равной 15 м, последовательность отработки оставлена прежней: 5 этапов по 1,5 м каждый.

Численные значения контрольных параметров смещений в контрольных точках сведены в табл.4.

Анализ смещений свидетельствует о том, что с увеличением толщины стены происходит постепенное уменьшение зоны влияния котлована, а также подвижек элементов защитной конструкции. При увеличении толщины стены на 50 % (от 0,8 до 1,2 м) происходит снижение перемещения участков стены также на 50 % (табл.4); резко уменьшаются подвижки в бортах котлована (50 %), хотя подъем днища котлована снижается на 10 %. Характер перемещений элементов стены остается неизменным.

В целом можно отметить, что с увеличением мощности ограждающей конструкции происходит заметное перераспределение смещений в грунтовом массиве в плане абсолютных значений при неизменном характере смещений.

Моделирование напряженно-деформированного состояния грунтового массива при наличии вспомогательных расстрелов. Наличие в составе ограждающей конструкции вспомогательных расстрелов, препятствующих свободному перемещению стен в выработанное пространство под давлением грунтовых масс, может быть принципиально смоделировано двумя способами: путем введения в модель элемента балки (непосредственно представляющей горизонтальный расстрел) и ограничителей перемещений, устанавливаемых в местах соединения расстрелов и стен в реальной конструкции.

Численные значения смещений в грунтовом массиве были получены для трех вариантов расчета: без расстрелов, с расстрелами-балками и расстрелами-закреплениями. Толщина стен составляет 0,8 м, глубина заделки стен ниже уровня днища котлована 15 м, грунт разрабатывается в 5 этапов по 1,5 м каждый.

Таблица 4

Значения контрольных величин смещений при изменении толщины защитной конструкции

Контрольный параметр	Значения смещений (м) при толщине стены (м)				
	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
Подъем днища котлована	0,126	0,123	0,119	0,115	0,112
Максимальные смещения в бортах котлована	0,060	0,050	0,045	0,040	0,040
Максимальные смещения стены	0,079	0,068	0,060	0,054	0,049
Максимальные горизонтальные смещения стены	0,067	0,057	0,051	0,047	0,044

Таблица 5

Значения контрольных величин смещений при наличии и отсутствии вспомогательных расстрелов

Контрольный параметр	Значения смещений (м) при отсутствии (наличии) расстрелов		
	без расстрелов	расстрелы-балки	расстрелы-закрепления
Подъем днища котлована	0,126	0,128	0,128
Максимальные смещения в бортах котлована	0,060	0,030	0,030
Максимальные смещения стены	0,079	0,045	0,045
Максимальные горизонтальные смещения стены	0,067	0,010	0,010

Таблица 6

Значения контрольных величин смещений при наличии и отсутствии анкерного крепления стен

Контрольный параметр	Значение смещений (м) при наличии (отсутствии) анкеров	
	без анкеров	с анкерами
Подъем днища котлована	0,126	0,126
Максимальные смещения в бортах котлована	0,060	0,030
Максимальные смещения стены	0,079	0,042
Максимальные горизонтальные смещения стены	0,067	0,011

Численные значения контрольных величин смещений сведены в табл.5.

Расстрел располагается в верхней части котлована на расстоянии 1,5 м от поверхности и вводится в работу после первого этапа земляных работ.

Наличие расстрелов в ограждающей конструкции влияет на общую картину смещений в грунтовом массиве следующим образом. Происходит резкое снижение горизонтальных (в 6-7 раз) и общих (в 2 раза) максимальных смещений стен, а также максимальных смещений в бортах котлована (в 2 раза), т.е. жесткие расстрелы препятствуют перемещению стен в сторону котлована при незначительном увеличении вертикальных перемещений (грунт «выталкивает» стены вверх).

Моделирование напряженно-деформированного состояния грунтового массива при наличии анкерного крепления стен. Для предотвращения перемещения стен ограждающей конструкции в сторону выработанного пространства, когда нежелательно перекрывать котлован элементами вспомогательных конструкций, строители применяют глубокие анкера.

Анкерное крепление стен представляет собой стальные стержни, одним концом закрепляемые в стенах, а другим закрепляемые в грунте с помощью грунтоцементных замков, располагающихся вне зоны влияния котлована и работающих на трение. Стержни, будучи закрепленными в обоих концах, располагаются в грунте и работают на растяжение, препятствуя встречному перемещению стен. Для усиления эффекта сопротивления смещениям в анкерных стержнях часто создают натяжение.

Расчет смещений выполнен для двух вариантов: без усиления стен анкерным креплением и с анкерным креплением. Длина анкеров составляет 12 м, длина замков 1,5 м, угол наклона к горизонту 35°, предварительное усиление в анкерах, создаваемое натяжением стержней, 120 кН. Стержень анкера моделируется элементом – балкой, анкерный замок – элементом, увеличивающим жесткость грунтового массива в месте своего расположения и работающим на растяжение. Величины смещений в контрольных точках приведены в табл.6.

Результаты моделирования показывают, что наличие анкерного крепления влияет на характер работы стены и смещения в грунтовом массиве в непосредственной близости от стен, при этом зона влияния котлована остается неизменной. Картина перемещений участков стены схожа с вариантом усиления стен горизонтальными расстрелами.

Ввод в работу анкеров оказал сильное влияние на формирование зоны пластических деформаций. При наличии анкерного крепления зона образуется в районе расположения грунтоцементных знаков, работающих на выдерживание, а также в районе днища котлована. Это объясняется принципиальным характером работы анкерного крепления: нагрузка от стен приходится на стержни и от них передается на замки, непосредственно работающие с грунтовым массивом.