УДК 624.1

Д.А.ПОТЕМКИН, *канд. техн. наук, доцент, potyomkin@list.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

D.A.POTYOMKIN, *PhD in eng. sc., associate professor, potyomkin@list.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ В КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ ЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА ПОВЕДЕНИЕ ГРУНТОВОГО МАССИВА ВБЛИЗИ ГЛУБОКИХ КОТЛОВАНОВ

Комплексное расчетное обоснование проектов строительства, эксплуатации, реконструкции сооружений в сложных инженерно-геологических условиях, в том числе в стесненной городской застройке, стало невозможным без использования современных компьютерных программ. В работе рассмотрены 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».

Ключевые слова: глубокие котлованы, стена в грунте, защитные сооружения, комплексное обоснование.

INFLUENCE OF CHANGES IN CONSTRUCTIVE ELEMENTS OF PROTECTIVE CONSTRUCTIONS ON BEHAVIOR OF THE SOIL MASSIF NEAR DEEP DITCHES

Complex settlement justification of construction projects, operation, reconstruction of constructions in difficult engineering-geological conditions, including in the constrained city building, became impossible without use of modern computer programs. In work the general approaches and results of modeling stressedly-deformed condition of the soil massif are considered at a postadiyny construction of a ditch for construction of one of hydraulic engineering constructions of St.-Petersburg under protection of a design «wall in soil».

Key words: deep excavations, «wall in soil», support, complex justification.

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 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 известный способ «стена в грунте». Сущность способа заключается в создании по контуру будущего котлована железобетонного ограждения – стены с помощью, например, 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:

• материала конструктивных элементов крепи и их геометрических размеров;

• сопротивления сдвигу контакта грунт – конструкция;

• глубины заделки стены в устойчивые грунты (ниже отметки днища котлована);

• наличия и местоположения в конструкции вспомогательных элементов (расстрелы, анкеры и т.п.);

• наличия грунтовых вод в массиве и положения их уровня при сооружении котлована с подтоплением или искусственным понижением уровня грунтовых вод.

В работе представлены общие подходы и результаты моделирования напряженно-деформированного состояния грунтового массива при постадийном сооружении котлована для строительства одного из гидротехнических сооружений 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 В25. Первая очередь сооружения котлована предусматривает постадийную откопку грунта на 7,5 м, по 1,5 м на каждой стадии. На рис.1, *а* представлен общий вид сечения котлована.

В расчетах грунтовый массив рассматривается как упругопластичная 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_3 – 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 (рис.1, *б*) составили 80 м в длину и 50 м в ширину. Дискретизация пространства грунтового массива выполнена треугольными с 15 узлами каждый. 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).

Сопротивление 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, некоторые расчетные физико-механические свойства которых представлены в табл.1.

В качестве контрольных фиксировались следующие расчетные величины смещений: подъем днища котлована, максимальные результирующие смещения в конструкции

Таблица 1

Расчетные характеристики грунтов

Грунт	h, м	e	γ_1, кН/м^3	γ_2, 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	0,55	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

Примечание. h – мощность слоя грунта; e – коэффициент пористости; γ_1 и γ_2 – объемный вес грунта в ненасыщенном водой состоянии и в полностью насыщенном водой состоянии соответственно; E_0 – модуль деформации грунта; ν – коэффициент поперечной деформации грунта.

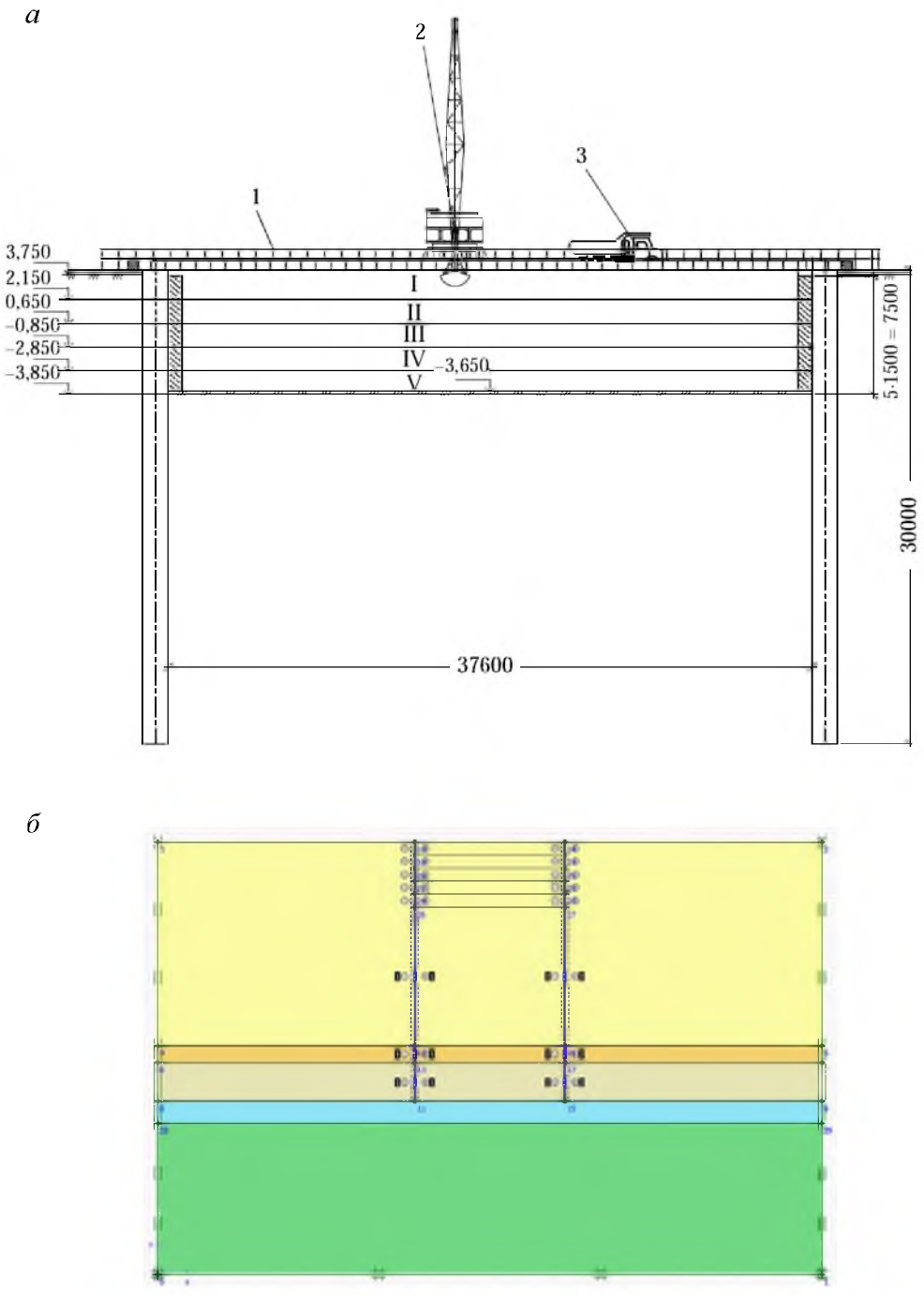


Рис.1. Общий вид продольного сечения (*а*) и модели (*б*) котлована

1 – ограждение котлована высотой 1,5 м; 2 – кран КС-5363; 3 – автосамосвал; I-IV – стадии сооружения котлована

стены, максимальные горизонтальные и максимальные вертикальные смещения стены (рис.2 и табл.2).

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы. При прочности контакта, равной прочности грунта, слои грунта, непосредственно контактирующие с бетоном стены, могут не переходить в пластическое состояние и перемещение элемента стены повторяет перемещение грунтовых частиц: грунт «стремится» вытолкнуть стену в сторону котлована и вверх. При

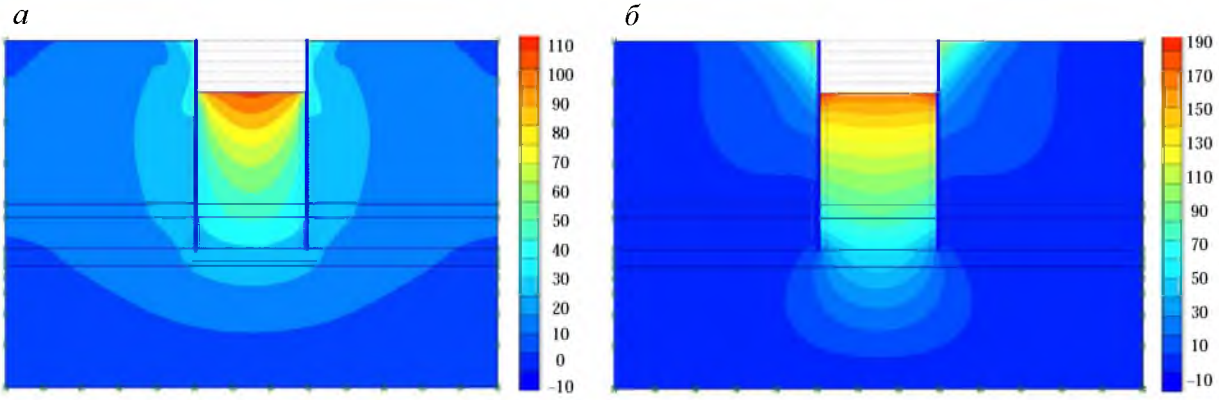


Рис.2. Смещения в грунтовом массиве при прочности контакта, равной прочности грунта (*а*) и равной 40 % реальной прочности контакта (*б*), мм

ослабленной прочности контакта (40 % от реальной прочности грунта) перемещение происходит в сторону котлована и вниз (стена «тонет»).

Таблица 2

Контрольные величины смещений, мм

Параметр	Прочность контакта грунта с материалом конструкции, %			
	100	80	60	40
Подъем днища котлована	113,14	127,32	153,5	191,7
Максимальные (результирующие) смещения стены	61,88	67,09	75,65	92,44
Максимальные горизонтальные смещения	57,39	64,23	74,85	92,23
Максимальные вертикальные смещения	23,24	19,52	11,18	-6,23

Таким образом, 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.

Изменение глубины заделки стены в грунт. Последовательность земляных работ: пять этапов по 1,5 м каждый, мощность стены 0,8 м. Смоделированы четыре варианта заделки стены в грунт ниже днища котлована: на 5; 10; 15 и 22,5 м.

При глубине заделки 5 м (рис.3, *а*) происходит опрокидывание стены грунтом в выработанное пространство. Перемещающийся в котлован грунт увлекает за собой стену, сопротивления которой недостаточно для предотвращения критических смещений призмы сползания. После отработки четырех этапов земляных работ горизонтальные смещения стены могут достигать 0,14 м. По эпюре смещений видно, что грунт вынуждает участок стены поворачиваться вокруг точки, находящейся недалеко от нижнего торца стены, и

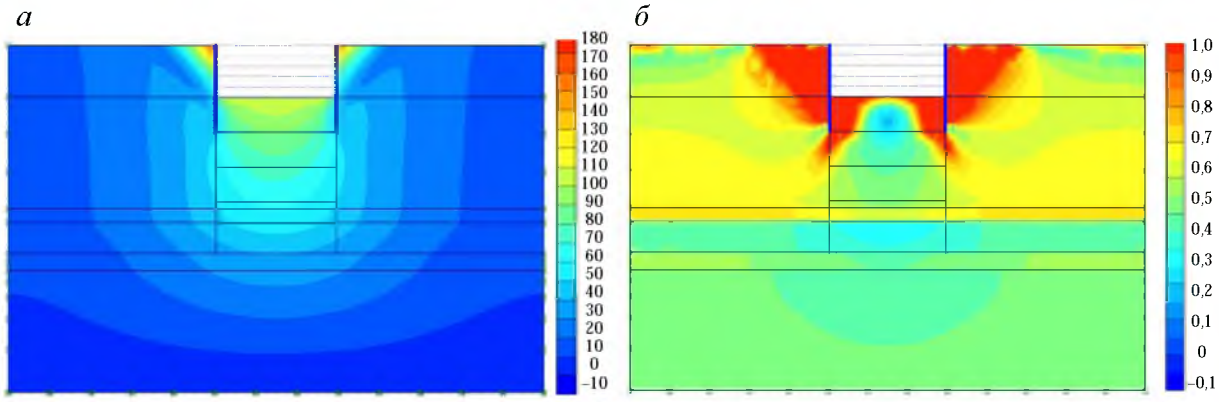


Рис.3. Смещенияв грунтовом массиве при глубине заделки 5 м (*а*) и зона пластических деформаций (*б*), мм

вынуждает ее к опрокидыванию в котлован. На эпюре зоны пластических деформаций в грунтовом массиве (рис.3, *б*) видно, что в зону пластических деформаций попадает практически вся стена, поэтому перемещения стены следуют за перемещениями грунта. В данных инженерно-геологических условиях 5-метровой заделки стены ниже уровня днища для обеспечения устойчивости бортов котлована явно недостаточно.

После отработки пятого этапа земляных работ борты котлована теряют устойчивость, так как смещения достигают 0,17 м, а подъем грунта в днище котлована – 0,14 м.

Таблица 3

Контрольные величины смещений при изменении величины заделки стены в грунт, м

Параметр	Глубина 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

Дальнейшее увеличение глубины заделки стены в грунт ведет к значительному уменьшению подвижек в грунтовом массиве. Смещения в бортах котлована резко уменьшаются с 0,17 до 0,070 м при заделке 22,5 м. Перемещения самой стены: также резко снижаются полные смещения с 0,146 до 0,063 м, горизонтальные (в сторону выработанного пространства) с 0,141 до 0,057 м. Устойчивость котлована обеспечивается при заделке 10 м, смещения в целом снижаются. Размеры зоны пластических деформаций в этом случае свидетельствуют о том, что основная часть стены (ниже отметки днища) расположена в устойчивой части массива.

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.

Изменение мощности ограждающей конструкции. Толщина стены последовательно принималась равной 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.

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

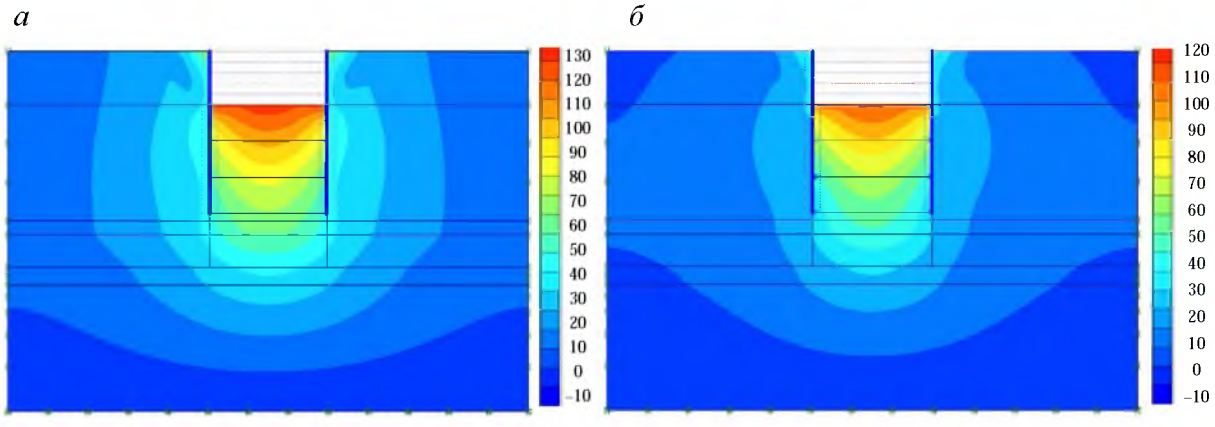


Рис.4. Смещения в грунтовом массиве при толщине стены 0,8 м (*а*) и 1,2 м (*б*), мм

Таблица 4

Контрольные величины смещений при изменении толщины защитной конструкции, м

Параметр	Толщина 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

Следует отметить некоторое уменьшение размеров зоны пластических деформаций и изменение ее формы: она становится менее концентрированной у стен и вытянутой в сторону бортов котлована, при этом увеличении мощности ограждающей конструкции происходит заметное перераспределение смещений в грунтовом массиве в плане абсолютных значений при неизменном характере смещений.

Наличие 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 путем введения в модель ограничителей перемещений, устанавливаемых в местах соединения расстрелов и стен в реальной конструкции.

Толщина стен составляет 0,8 м, глубина заделки стен ниже уровня днища котлована 15 м, грунт разрабатывается в пять этапов по 1,5 м каждый. Расстрел располагается в верхней части котлована на расстоянии 1,5 м от поверхности и вводится в работу после первого этапа земляных работ (рис.5, табл.5).

Таблица 5

Контрольные величины смещений при наличии и отсутствии вспомогательных расстрелов, м

Параметр	Ограждающие конструкции		
	без расстрелов	с расстрелами-балками	с расстрелами-закреплениями
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

Наличие расстрелов в ограждающей конструкции влияет на общую картину смещений в грунтовом массиве следующим образом. Резкое снижаются горизонтальные (в 6-7 раз) и общие (почти в 2 раза) максимальные смещения стен, а также максимальные смещения в бортах котлована (в 2 раза), т.е. жесткие расстрелы препятству-

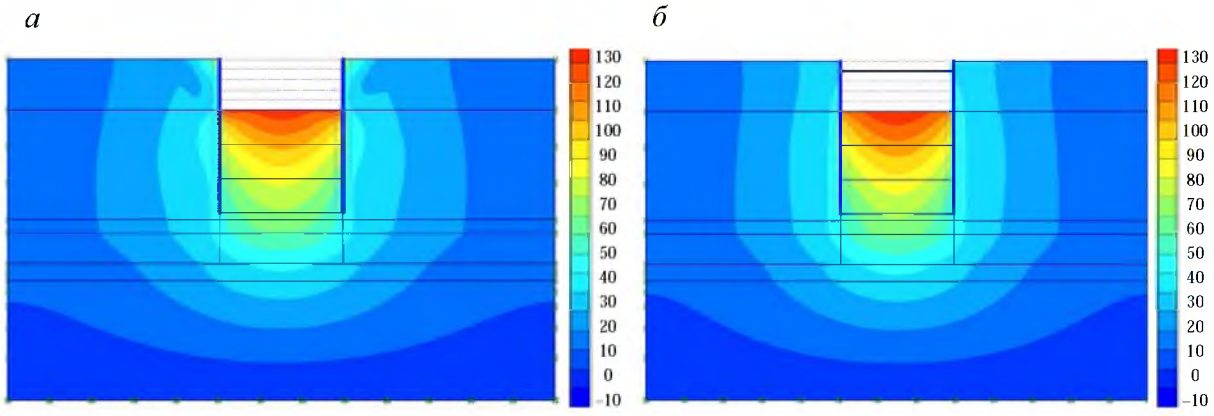


Рис.5. Смещения в грунтовом массиве при наличии (*а*) и отсутствии (*б*) расстрелов, мм

ют перемещению стен в сторону котлована при незначительном увеличении вертикальных перемещений (грунт «выталкивает» стены вверх). Величина подъема днища котлована практически не изменяется. Важным обстоятельством является факт уменьшения формы и размеров зоны пластических деформаций в бортах и днище котлована.

Наличие анкерного крепления стен. Для предотвращения перемещения стен ограждающей конструкции в сторону выработанного пространства, когда нежелательно перекрывать котлован элементами вспомогательных конструкций, строители применяют глубокие анкеры. Анкеры представляют собой стальные стержни, одним концом закрепляемые в стенах, а другим в грунте с помощью грунтоцементных замков, располагающихся вне зоны влияния котлована и работающих на трение. Стержни, будучи закрепленными в обоих концах, работают на растяжение, препятствуя встречному перемещению стен. Для усиления эффекта сопротивления смещениям в анкерных стержнях часто создают натяжение.

Длина анкеров примерно 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.

Результаты моделирования (рис.6, табл.6) 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.

Таблица 6

Контрольные величины смещений при наличии и отсутствии анкерного крепления стен, м

Параметр	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

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

Наличие грунтовых вод. Строительство открытых выработок, подземной части зданий и сооружений, прокладка ком-

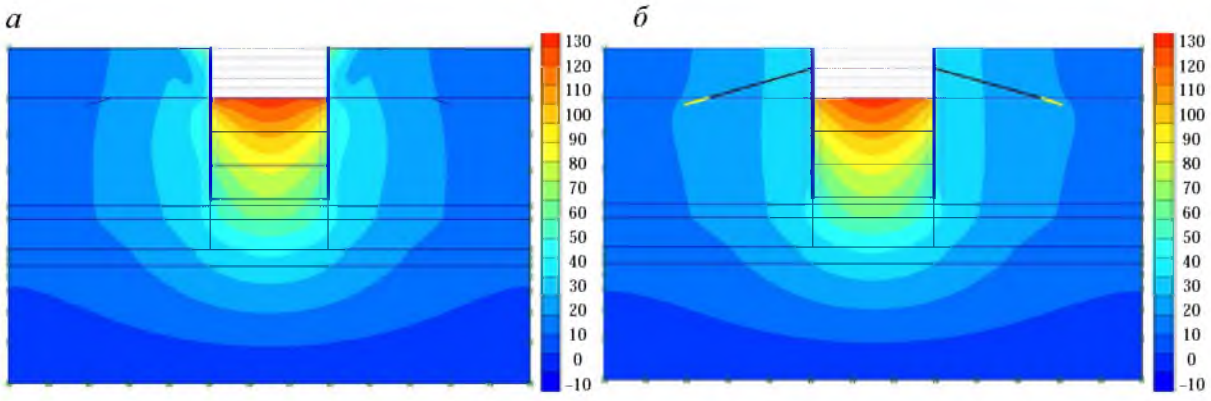


Рис.6. Смещения в грунтовом массиве при наличии (*а*) и отсутствии (*б*) анкеров, мм

муникаций и т.п. происходят, как правило, в дисперсных грунтах осадочного происхождения, которые зачастую сильно обводнены.

С целью выяснения закономерностей деформирования обводненного грунтового массива смоделированы три варианта строительства котлована: в условно сухих грунтах, в обводненных грунтах с подтоплением выработанного пространства и в обводненных грунтах с понижением уровня грунтовых вод по мере ведения земляных работ. Первоначальное расстояние от поверхности до уровня грунтовых вод принято равным 2 м, грунты ниже уровня являются водонасыщенными, напор отсутствует. Первый этап расчета предусматривает распределение порового давления в массиве, перед расчетом напряженно-деформированного состояния грунтового массива после очередного этапа земляных работ также проводится перерасчет порового давления и суммирование его с горным давлением (в табл.7).

Таблица 7

Контрольные величины смещений при наличии грунтовых вод, м

Параметр	«Сухие» грунты	Подтопляемый котлован	Понижение уровня
Подъем днища котлована	0,126	0,095	0,025
Максимальные смещения в бортах котлована	0,060	0,060	0,391
Максимальные смещения стены	0,079	0,062	0,300
Максимальные горизонтальные смещения стены	0,067	0,060	0,297

Результаты расчетов показывают, что наличие воды в котловане ведет к снижению практически всех показателей смещений во всех контрольных точках. Это объясняется создаваемым отпором находящейся в котловане воды внешнему горному и гидростатическому давлению, при этом отпор препятствует как перемещению стен в сторону котлована, так и подъему грунта в днище котлована. Зона влияния котлована остается практически прежней при некоторой разнице в форме по сравнению с базовой моделью (для «сухих» грунтов). Зона пластических деформаций также имеет схожую форму и размеры.

Мульда смещений имеет меньшие размеры, но смещения в пределах осушаемой зоны значительно выше: перемещение грунтов в бортах возрастает практически в 5 раз, перемещение участков стены – в 4,5-5 раз. Это объясняется, по-видимому, совместным действием двух факторов: оседанием грунта в бортах от осушения и возросшим давлением со стороны бортов на стены в связи с наличием воды в порах (совместное давление воды и грунта), хотя днище котлована поднимается заметно меньше (в 3,5 раза).

Следует обратить внимание на резкое увеличение размеров зоны пластических деформаций. Обводненный грунт имеет еще меньшие прочностные показатели, поэтому в пластическое течение вовлекаются большие его объемы и давление на элементы ограждающей конструкции значительно растет (с чем и связан резкое увеличение смещений стен в выработанное пространство). Зона пластических деформаций в случае строительства котлована с понижением уровня грунтовых вод охватывает почти 75 % площади стены, что может угрожать возможностью аварийной ситуации.