УДК 624.195

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

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

ОБОСНОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СРЕДЫ ДЛЯ ПРОГНОЗА ДЕФОРМАЦИЙ ГРУНТОВОГО МАССИВА В ОКРЕСТНОСТИ ГЛУБОКОГО КОТЛОВАНА

Представлен краткий анализ причин деформирования грунтового массива в окрестности полузаглубленных сооружений. Выполнено численное моделирование строительства типового полузаглубленного сооружения под защитой ограждающей конструкции. Сделаны выводы о применимости типовых геомеханических моделей грунта для описания процессов в окрестности полузаглубленного сооружения.

***Ключевые слова*:** грунты, полузаглубленные сооружения, ограждения, модели грунтов, численное моделирования, деформации.

THEORETICAL BASIS OF GEOMATERIAL ACCOUNTED FOR INDUCED AND INHERENT ANISOTROPY

The main reasons of soil deformation during deep excavation construction are presented. Numerical modeling of deep excavation construction with an account of support system is conducted. Conclusions on the application area of typical soils models is made.

***Key words*:** soils, deep excavations, support, soil models, numerical modelling, deformation.

Сооружение глубоких котлованов в слабых грунтах невозможно без применения специальных способов строительства. Технология возведения несущих стен по технологии «стена в грунте» получила наибольшее распространение при сооружении полузаглубленных сооружений. Это подтверждает как мировой опыт, так и практика строительства глубоких котлованов в условиях Санкт-Петербурга. Несущие стены, выполненные по данной технологии, обладают значительной жесткостью и вступают в работу до момента разработки грунта в котловане, что позволяет их эффективно использовать в условиях плотной городской застройки. Рационально подобранные параметры ограждающей конструкции (несущих стен) и поддерживающих элементов (расстрелов, распорок, анкерного крепления) позволяют обеспечить деформации грунтового массива в допустимых пределах. Однако параметры системы крепления зависят от инженерно-геологических условий строительства, принятой последовательности разработки грунта в котловане и установки ограждающих и поддерживающих элементов, наличия зданий и сооружений, расположенных на поверхности, а также подземных коммуникаций.

Полузаглубленные сооружения должны быть запроектированы таким образом, чтобы обеспечить их устойчивость, а также снизить деформации грунтового массива до допустимого уровня. Полузаглубленное сооружение считается устойчивым, если его стены остаются в устойчивом состоянии, а деформации грунта (подъем) на уровне его

днища поддаются контролю. Деформации грунтового массива в окрестности полузаглубленного сооружения могут вызвать повреждения зданий и сооружений, расположенных в зоне влияния.

Устойчивость полузаглубленного сооружения и деформации грунтового массива в его окрестности взаимосвязаны. Чем выше коэффициент устойчивости, тем менее значительные деформации развиваются в грунтовом массиве. По мере снижения коэффициента запаса по устойчивости стен полузаглубленного сооружения деформации в грунтовом массиве нарастают вплоть до неконтролируемой величины.

Причинами деформаций грунтового массива при сооружении полузаглубленного сооружения являются два фактора. В первую очередь, разработка грунта в котловане приводит к перераспределению напряжений в слоях грунта, расположенных ниже участка его разработки, а снижение напряжений сопровождает подъемом дна котлована. Во-вторых, при разработке грунта в котловане до нулевого значения снижается боковой отпор по всей поверхности стен полузаглубленного сооружения. Если прочность грунта недостаточна, чтобы обеспечить устойчивость стен, происходит неконтролируемое смещение массы грунта в сторону котлована (смещение призмы по поверхности сдвига).

Ограждающие конструкции («стена в грунте», выполненная траншейным способом, «стена» из буросекущихся или буронабивных свай, шпунтовое ограждение в сплошном и интервальном исполнении, «стена», выполненная по технологии струйной цементации, и др.) и поддерживающие конструкции (анкерное крепление, расстрелы, распорки и др.) образуют единую несущую систему, задачей которой является создать такой боковой отпор грунту в окрестности полузаглубленного сооружения, который позволит снизить рост деформаций в грунтовом массиве и обеспечить его общую устойчивость.

Прогноз деформаций земной поверхности при строительстве может быть выполнен на основании полуэмпирических методов, при сравнении с объектом, построенным в аналогичных условиях, аналитическими методами, физическим или численным моделированием.

Полуэмпирические методы анализа деформаций грунтового массива в окрестности подземного сооружений развивались на основе обобщения результатов натурных наблюдений за смещениями стен глубоких котлованов и оседанием земной поверхности. Недостатком такого подхода является сложность обобщения данных, полученных по результатам геотехнического мониторинга. Эти данные, как правило, применимы для данной конкретной площадки, и незначительное изменение одного из параметров может оказать колоссальное влияние на общее поведение системы грунтовый массив – полузаглубленное сооружение. Таким образом, эти методики прогноза оседания земной поверхности и горизонтальных смещений стен котлована корректно использовать для предварительной оценки, а также для оценки результатов, полученных на основании более сложных, математически строгих расчетов.

Важнейшими факторами, оказывающими влияние на деформации в окрестности полузаглубленных сооружений, являются следующие:

- тип грунта и его механическое поведение;
- способ строительства;
- последовательность ведения строительных работ;
- начальное напряженное состояние грунтового массива;
- гидрогеологические условия;
- конструкция ограждающей стены;
- количество и расстановка поддерживающих элементов;
- качество ведения строительных работ;
- температурный режим;
- размеры полузаглубленного сооружения.

Роль каждого из факторов и степень их влияния на поведение полузаглубленного сооружения достаточно сложно оценить заранее. Существующие аналитические решения зачастую сильно упрощают геомеханические процессы, происходящие в грунтовом массиве. Численные методы анализа

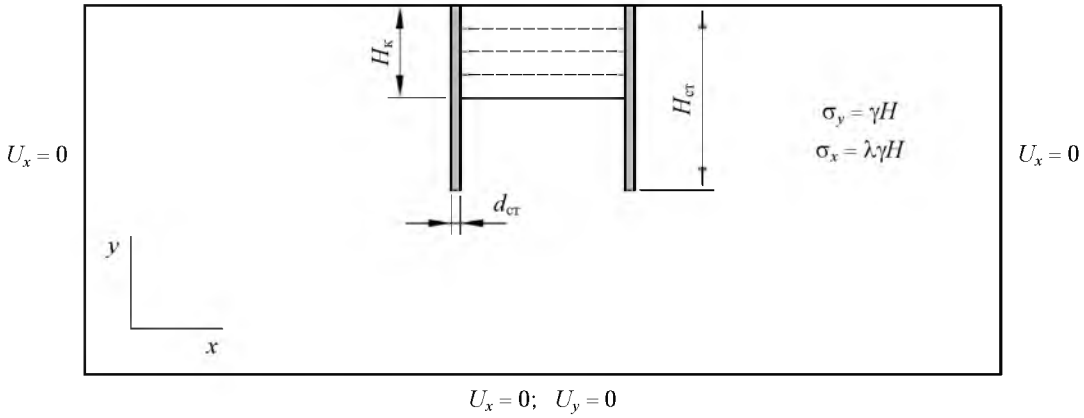


Рис.1. Схема к прогнозу деформаций в окрестности полузаглубленного сооружения (этапы и размеры показаны условно)

позволяют избежать упрощения при прогнозе деформаций в окрестности полузаглубленного сооружения.

Роль численных методов при выполнении оценки устойчивости стен и днища полузаглубленных сооружений, а также при выполнении прогноза грунтового массива в окрестности полузаглубленных сооружений растет. Численные методы позволяют не только решать конкретные практические задачи в области строительства полузаглубленных сооружений, но и получать новые знания о процессах в системе грунтовый массив – полузаглубленное сооружение на различных стадиях его возведения.

Не принижая важности других аспектов численного моделирования строительства полузаглубленных сооружений (последовательности разработки грунта в котловане, взаимодействия ограждающей конструкции с грунтовым массивом, адекватного представления расстрелов, распорок и анкерного крепления в численной модели), в данной работе сделан упор на оценку влияния геомеханических моделей поведения грунта на напряженно-деформированное состояние грунтового массива в окрестности полузаглубленного сооружения. По нашему мнению, именно корректный выбор модели грунтового массива играет решающую роль в достоверности результатов численного моделирования.

Рассмотрим закономерности поведения грунтового массива, вмещающего котлован и элементы защитных конструкций, при поэтапной выемке грунта в процессе строительства котлована. Пусть сооружение глубокого котлована осуществляется в песках. Размеры котлована в рассматриваемой плоскости 18 × 10 м (рис.1). Общая глубина «стены в грунте» $H_{ст} = 20$ м, толщина ограждения $d_{ст}$ изменялась от 0,8 до 1,2 м с шагом 0,2 м, класс бетона В30. Выработанное пространство защищено только «стеной», вспомогательные элементы (расстрелы, анкеры и т.п.) отсутствуют. Выемка грунта производится на глубину $H_к = 10$ м за 10 этапов (по 1 м за этап).

Поведение грунтового массива описывают следующие геомеханические модели: модель линейно-деформируемого тела, упруго-идеально-пластическая модель Кулона – Мора, упругопластическая модель упрочняющегося грунта и упругопластическая модель упрочняющегося грунта с учетом малых деформаций (см.таблицу). Эти геомеханические модели получили широкое распространение в практике численного моделирования строительства подземных сооружений в грунтах, а их реализация представлена практически во всех коммерческих программных комплексах геомеханического анализа (Plaxis, Abaqus, Flac, Z-Soil, TNO DIANA и др.). Физические аспекты, положенные в разработку рассматриваемых моделей грунтов, и математическая реализация детально представлена в документации к указанным программным комплексам.

Параметры моделей материалов, характеризующие физико-механические свойства грунтового массива

Модель грунта (песка)	γ_{unsat}, кН/м^3	γ_{sat}, кН/м^3	E_{50}^{ref}, МПа	E_{ur}^{ref}, МПа	E_{oed}^{ref}, МПа	G_0^{ref}, МПа	$\gamma_{0,7}$	c, кПа	φ	ψ	v_{ur}	m	p_t, кПа	R_f
Упругая	19	20	45	–	–	–	–	–	–	–	0,35	–	–	–
Кулона – Мора	19	20	45	–	–	–	–	1	35	5	–	–	–	–
Модель упрочнявшегося грунта	19	20	45	45	180	–	–	1	35	5	0,2	0,55	0	0,9
Модель упрочнявшегося грунта в малых деформациях	19	20	45	45	180	168,75	$2\cdot10^{-4}$	1	35	5	0,2	0,55	0	0,9

Примечание. γ_{unsat} – объемный вес грунта в ненасыщенном водой состоянии; γ_{sat} – объемный вес грунта в насыщенном водой состоянии; E_{50}^{ref} – модуль деформации грунта, соответствующий 50 % предела его прочности; E_{ur}^{ref} – модуль упругости грунта; E_{oed}^{ref} – одометрический модуль деформации грунта; G_0^{ref} – начальное значение модуля сдвига при малых деформациях ($1\cdot10^{-6}$); $\gamma_{0,7}$ – значение сдвиговых деформаций, при которых начальное значение модуля сдвига G_0^{ref} уменьшается на 70 %; c – сцепление; φ – угол внутреннего трения; ψ – угол дилатансии; v_{ur} – коэффициент Пуассона; m – параметр определяющий зависимость жесткости грунта от уровня напряженного состояния; p_t – прочность грунта растяжению; R_f – коэффициент, характеризующий отношение действительного значения девиатора напряжений на пределе прочности q_f к асимптотическому значению девиатора напряжений q_a.

Целью выполненного численного моделирования является оценка корректности деформирования грунтового массива в окрестности глубокого котлована, полученного по одной из четырех геомеханических моделей, а также определение области эффективного применения каждой из представленных геомеханических моделей.

На рис.2-4 представлены эпюры деформаций в виде подъема почвы котлована, горизонтальных перемещений участка «стены», а также приведены эпюры распределения изгибающего момента вдоль элемента «стены» при последовательной выемке грунта из котлована для четырех моделей, которые дают представление о характере работы системы грунт – инженерное сооружение.

Рассмотрим результаты прогноза подъема почвы котлована (рис.2). Подъем почвы, полученный по линейно деформируемой модели и модели Кулона – Мора, значительно выше, чем при применении упругопластических моделей грунта, учитывающих упрочнение. Данный эффект легко объясним. В моделях грунта, которые учитывают его упрочнение, деформационные характеристики при нагружении и разгрузке отличаются, при этом величина эквивалентного показателя жесткости при разгрузке много больше, чем при разгрузке. В отличие от более продвинутых моделей грунтов в моделях линейно деформируемого грунта и Кулона – Мора значение показателя, характеризующего деформационную способность грунта, постоянно и чаще всего подбирается для условия нагружения, а не разгрузки. В то же время можно отметить, что подъем почвы котлована, полученный по модели упрочняющегося грунта с учетом малых деформаций, меньше, чем по модели упрочняющего грунта, примерно на 30-40 %. Такой эффект получен за счет внедрения функции зависимости деформационной способности от величины деформаций сдвига, который можно наблюдать при испытаниях грунтов в диапазоне сдвиговых деформаций $1\cdot10^{-6}$-$1\cdot10^{-2}$.



Рис.2. Подъем почвы котлована для разных моделей грунта

1 – упругая модель; 2 – модель Кулона – Мора; 3 – модель упрочняющегося грунта; 4 – модель упрочняющегося грунта в малых деформациях

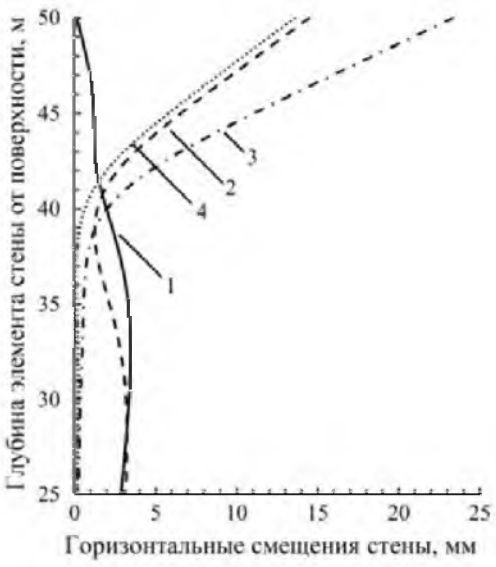


Рис.3. Схема горизонтальных перемещений «стены» для разных моделей грунта (показано отклонение стены от вертикального положения с глубиной)

1 – упругая модель; 2 – модель Кулона – Мора; 3 – модель упрочняющегося грунта; 4 – модель упрочняющегося грунта в малых деформациях

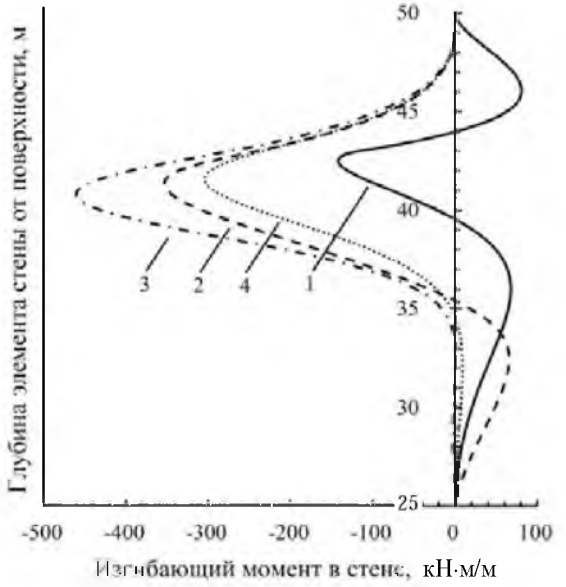


Рис.4. Эпюры распределения изгибающего момента вдоль элемента стены

1 – упругая модель; 2 – модель Кулона – Мора; 3 – модель упрочняющегося грунта; 4 – модель упрочняющегося грунта в малых деформациях

Горизонтальные смещения, полученные на основании линейно деформируемой модели грунта, не отвечают характеру смещений, наблюдаемых на практике. Минимальное значение горизонтальных смещений получено у поверхности земли, а максимальное на нижней отметке ограждающей конструкции. При строительстве полузаглубленного сооружения в идеально упругом теле такой характер деформирования был бы возможен, однако в реальных условиях даже небольшие деформации сдвига приводят к образованию пластических деформаций и началу образованию поверхности скольжения. Таким образом, прогноз горизонтальных смещений стенки котлована на основании линейно деформируемой модели невозможен, если строительство ведется в слабых и плотных грунтах. Картины смещений стенки котлована, полученные на основании упругопластических моделей поведения грунта, в достаточной мере согласуются. Однако горизонтальные смещения, полученные по модели Кулона – Мора ниже уровня дна котлована, выше, чем наблюдаемые по моделям упрочняющегося грунта (рис.3). Это может быть связано с некорректным поведением данной модели при разгрузке грунта, когда за подъемом почвы на уровне дна котлована следует накопление дополнительных горизонтальных смещений.

Согласно полученной выше картине деформирования грунтового массива в окрестности полузаглубленного сооружения для каждой из рассматриваемых геомеханических моделей грунта, усилия, возникающие в ограждающей конструкции, также будут отличаться для разных моделей, так как являются функцией от деформаций ограждения (рис.4). Как видно, качественный характер эпюр, полученных на основании упругопластических моделей, весьма сходен, в то время как эпюра, полученная на основании линейно деформируемой модели грунта, значительно от них отличается.

Выводы

1. Упругая модель требует минимального количества времени на получение результатов, но позволяет оценить только

масштабы и степень влияния на грунтовый массив строящегося сооружения. Приемлемую качественную и количественную оценку ситуации упругая модель сделать не позволяет и не рекомендуется для проведения расчетов деформаций в окрестности полузаглубленного сооружения.

2. Упруго-идеально-пластическая модель Кулона – Мора в значительной степени повторяет поведение упругой модели при малых деформациях, когда нагрузки невелики и элементы защитных сооружений справляются с горным давлением без существенных смещений. Более достоверные результаты эта модель дает на конечной стадии моделирования, когда бóльшая часть нагрузок и вызванных ими смещений уже реализовалась. Модель Кулона – Мора можно использовать для предварительной качественной и количественной инженерной оценки работы вмещающего сооружение массива и при недостаточном количестве (или достоверности) физико-механических характеристик грунтов.

3. Упругопластические модели с упрочнением грунта позволяют получить наиболее достоверные результаты деформирования грунтов к окрестности полузаглубленного сооружения, что положительно сказывается на корректности прогноза усилий в элементах ограждающих и поддерживающих конструкций.