

Н. В. ЗУЕВСКАЯ (НТУУ «КПИ», Киев), С. А. ДВОРНИК, В. Е. ГУБАШОВА (СП «Основа-Солсиф»), Ю. В. ВОЛЫК (НТУУ «КПИ», Киев)

## ИЗМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВ ПРИ УСТРОЙСТВЕ ГЛУБОКИХ ВЫЕМОК

В статті наведено порівняння зміни напружено-деформованого стану ґрунту та елементів огорожуючої конструкції при влаштуванні глибоких виїмок за результатами використання двох різних моделей розрахункової програми PLAXIS.

*Ключові слова:* напружено-деформований стан, ґрунт, огорожуюча конструкція, глибока виїмка, PLAXIS

В статье приведено сравнение изменения напряженно-деформированного состояния грунта и элементов ограждающей конструкции при устройстве глубоких выемок по результатам использования двух различных моделей расчетной программы PLAXIS.

*Ключевые слова:* напряженно-деформированное состояние, грунт, ограждающая конструкция, глубокая выемка, PLAXIS

The article presents a comparison of modification of the strained-and-stressed state for the soil and in the elements of barrier structure during carrying out a deep excavation. The results are given using two different models of the soil in computation software PLAXIS.

*Keywords:* strained-and-stressed state, soil, barrier structure, deep excavation, PLAXIS

При устройстве глубоких выемок для выполнения транспортных туннелей, паркингов и других подземных сооружений стоит важная задача правильного расчета конструкции ограждения котлована, которая в свою очередь усложняется присутствием существующих зданий в непосредственной близости к глубокой выемке котлована, что особенно характерно для строительства в условиях стесненной городской застройки. В этом случае, как правило, для ограждения глубоких котлованов применяются гибкие подпорные стены, устраиваемые с использованием свай, шпунтов, технологии «стена в грунте» и т.д.

Для расчета ограждающих конструкций и моделирования поведения грунтов при глубоких выемках, в настоящее время существуют возможность применения различных геотехнических программ.

В статье представлен вариант расчета ограждающей конструкции на участке строительства по ул. Паньковская, 14-б в г. Киеве с использованием расчетной программы PLAXIS на примере различных моделей поведения грунтов.

PLAXIS – это расчетная программа, использующая схемы конечных элементов в двумерной системе, которая разработана специально для анализа деформаций и устойчивости в различных геотехнических условиях. Реальные

ситуации могут быть сведены к плоской или осесимметричной модели.

Идея метода конечных элементов заключается в том, что расчетная система заменяется (аппроксимируется) системой с конечным числом степеней свободы, т.е. производится дискретизация системы на отдельные элементы, соединенные между собой в узлах. Работа дискретизированной системы будет определяться взаимодействием отдельных конечных элементов. Решением задачи определения напряженно-деформируемого состояния расчетной системы методом конечных элементов будет являться такое напряженно-деформируемое состояние дискретизированной системы, при котором удовлетворяются условия совместности и равновесия. [3]

Моделирование может быть нелинейным, зависящим от времени и анизотропным. Для моделирования поведения грунта необходимы специальные схемы, чтобы учесть внутривертикальное давление независимо от того, является оно гидростатическим или нет. Хотя моделирование грунта представляет собой важную задачу, для многих геотехнических проектов требуется еще моделирование конструкции и системы ее взаимодействия с грунтом. Программа PLAXIS является очень многофункциональной, что позволяет рассматривать все аспекты сложных геотехнических систем [1].

Программа имеет удобный графический интерфейс, позволяющий пользователю быстро создавать геометрическую модель и сетку конечных элементов на основании вертикального разреза проектируемого сооружения.

Итак, в программе PLAXIS есть возможность моделировать поведение грунтов, используя следующие модели [2]:

- модель Мора-Кулона (*Mohr-Coulomb Model*);
- модель трещиноватых скальных пород (*Jointed Rock Model*);
- модель твердеющего грунта (*Hardening Soil Model*);
- модель для мягких грунтов (*Soft Soil Model*);
- модель для мягких текучих грунтов (*Soft Soil Creep Model*).

Ниже рассмотрим модели грунтов, используемые для решения поставленной задачи, описание их применений, а так же параметры, необходимые в каждой модели.

#### Модель Мора-Кулона (*Mohr-Coulomb Model*)

MC – упруго-пластичная модель Мора-Кулона включает в себя пять входных параметров: модуль Юнга ( $E$ ), коэффициент Пуассона ( $\nu$ ), сцепление ( $c$ ), угол трения ( $\phi$ ) и угол дилатансии ( $\psi$ ). Эта модель Мора-Кулона представляет приближение «первого порядка» поведение грунта или скального грунта. Рекомендовано использовать эту модель как первый анализ рассматриваемой проблемы. Для каждо-

го слоя одна оценка постоянной средней жесткости. Благодаря этой постоянной жесткости, расчеты сравнительно быстрые. Кроме этого пять параметров модели, упомянутые выше, и начальные условия грунта играют существенную роль в наибольших проблемах грунтовых деформаций.

#### Модель твердеющего грунта (*Hardening Soil Model*)

HS – улучшенная модель моделирования поведения грунта. Как для модели Мора-Кулона, предельные состояния давления описаны посредством угла внутреннего трения  $\phi$ , сцепления  $c$ , и угла дилатансии  $\psi$ . Однако, жесткость грунта описана более точно, используя три различных входных жесткости: модуль деформации при нагрузке  $E_{50}$ , модуль деформации при разгрузке  $E_{ur}$ , одометрический модуль деформации  $E_{oed}$ . В отличие от модели MC, модель HS учитывает тот фактор, что все жесткости возрастают с давлением.

Сравнение результатов использования различных моделей показано на примере ограждающей конструкции по объекту: «Офисно-жилой комплекс по ул. Паньковская, 14-б и ул. Саксаганского/Паньковской, 20/14-б». Расчетная схема представляет собой ограждение котлована (буроабитивные сваи  $\varnothing 820$  мм), разьединительную диафрагму (буроинъекционные сваи  $\varnothing 180$  мм) и фундамент существующего здания по ул. Саксаганского, 70/16.

Описание элементов расчетной схемы приведено в табл. 1.

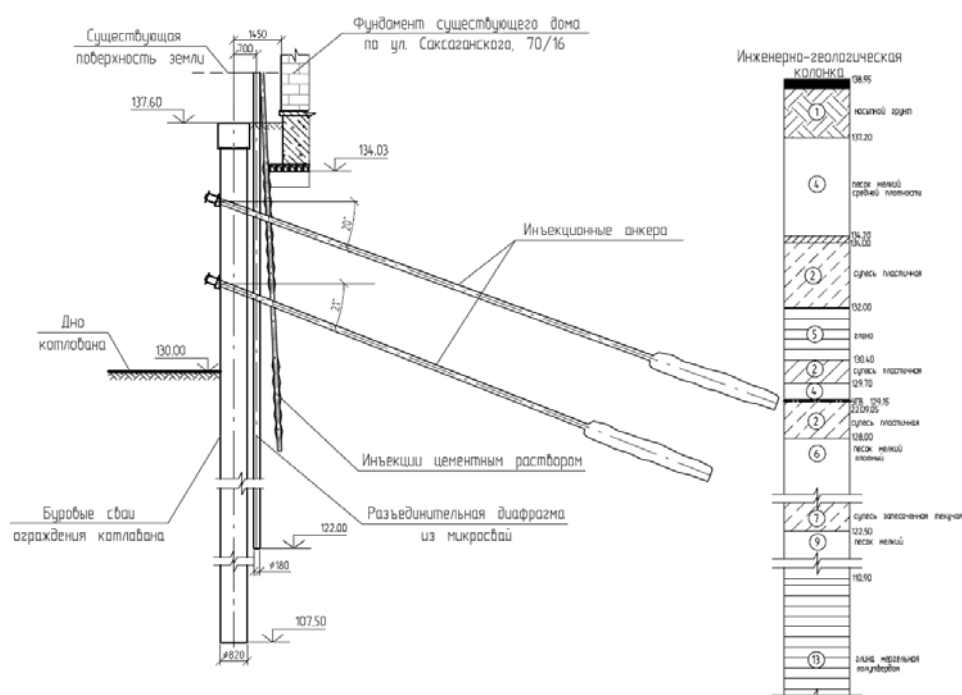


Рис. 1. Расчетная схема

## Элементы расчетной схемы

Элемент	Отметка верха	Отметка низа	Длина, м	Диаметр, мм	Шаг, м
Ограждение котлована – сваи Ø820 мм	136,85	107,50	29,35	820	1,0
Разъединительная диафрагма – микросваи Ø180 мм	139,00	122,00	17	180	0,2
Инъекционные грунтовые анкера	135,50	20°	18		1,0
	133,10	21°	16		2,0

Инженерно-геологические условия площадки строительства характеризуются грунтами, физико-механические свойства которых представлены в табл. 2:

Таблица 2

## Физико-механические характеристики грунтов

№ п/п	Наименование грунта	Показатели характеристик					
		Плотность грунта $\rho$ , т/м <sup>3</sup>	Плотность сухого грунта $\rho_d$ , т/м <sup>3</sup>	Коэффициент по- ристости $e$	Удельное сцепление $c$ , кПа	Угол внутр. трения $\phi$ , град.	Модуль дефор- мации $E$ , МПа
1	Супесь, местами пылеватая, твердая и пластичная	1,74	1,57	0,701	14	25	14
2	Суглинок мягкопластичный	1,88	1,57	0,702	25	21	16
3	Глина тугопластичная, местами полутвердая	1,93	1,57	0,702	22	18	14
4	Песок мелкий кварцевый, маловлажный, влажный и насыщенный водой, средней плотности	1,96	1,46	0,856	43	16	15
5	Глина с прослоями супеси слабозаторфованная, текучепластичная	1,94	1,58	0,677	1,0	31	25
6	Песчаник глинистый с прослойками песчаника крепкого, твердый	1,68	1,15	1,089	3,0	12	3
7	Песок средней крупности, средней плотности	1,97	1,60	0,656	2,0	32	28
8	Суглинок, пылеватый, местами с прослойками глины («наглинок»)	2,00	1,55	0,735	26,0	23	20
9	Глина мергельная («киевский мергель»)	2,05	1,60	0,70	60	20	25

Рассмотрим и сравним полученные при расчете данные изгибающих моментов элементов ограждения котлована, их горизонтальные перемещения, а также изменения усилий в анкерах. На рис. 2 и 3 представлены цветовые поля

деформаций в расчетной модели. Рис. 4 показывает разницу в вертикальных перемещениях дна выемки при использовании различных грунтовых моделей, представленных в программе PLAXIS.

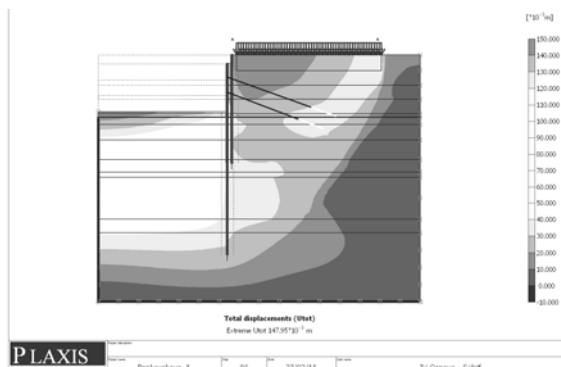


Рис. 2. Общие перемещения расчетной модели при использовании модели грунта *MC*

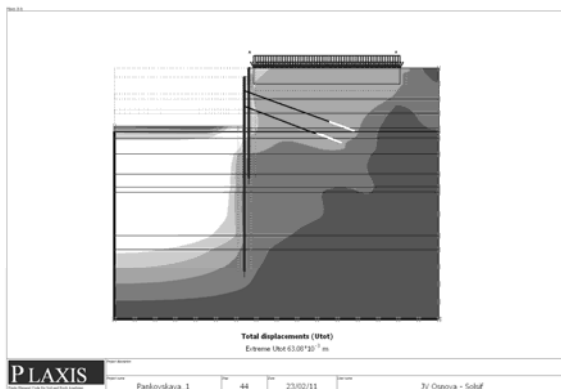


Рис. 3. Общие перемещения расчетной модели при использовании модели грунта *HS*

Эпюры вертикального перемещения поверхности дна котлована (рис. 4) показывают численное значение высоты поднятия грунта после полной выемки. Очевидно, что при использовании модели *HS* вертикальные перемещения меньше более чем в два раза, чем при использовании модели *MC*. Такой результат основан на том, что модель *HS* учитывает модуль упругости грунта при разгрузке, полученный при трехосном испытании, который не используется в расчетах модели *MC*.

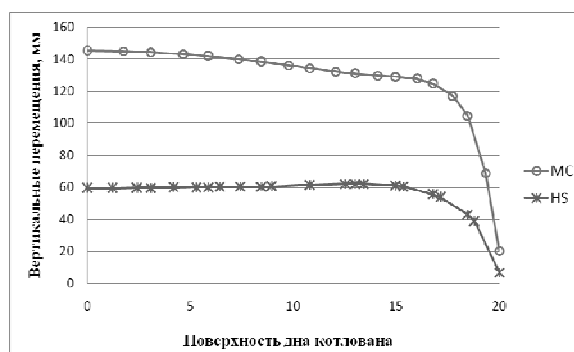


Рис. 4. Вертикальные перемещения поверхности дна котлована при использовании двух моделей грунта

Ниже приведены графики сравнения изгибающих моментов (Bending moment, kN·m) и горизонтальных перемещений (Horizontal displacements, mm) свай ограждения котлована и микросвай разьединительной диафрагмы.

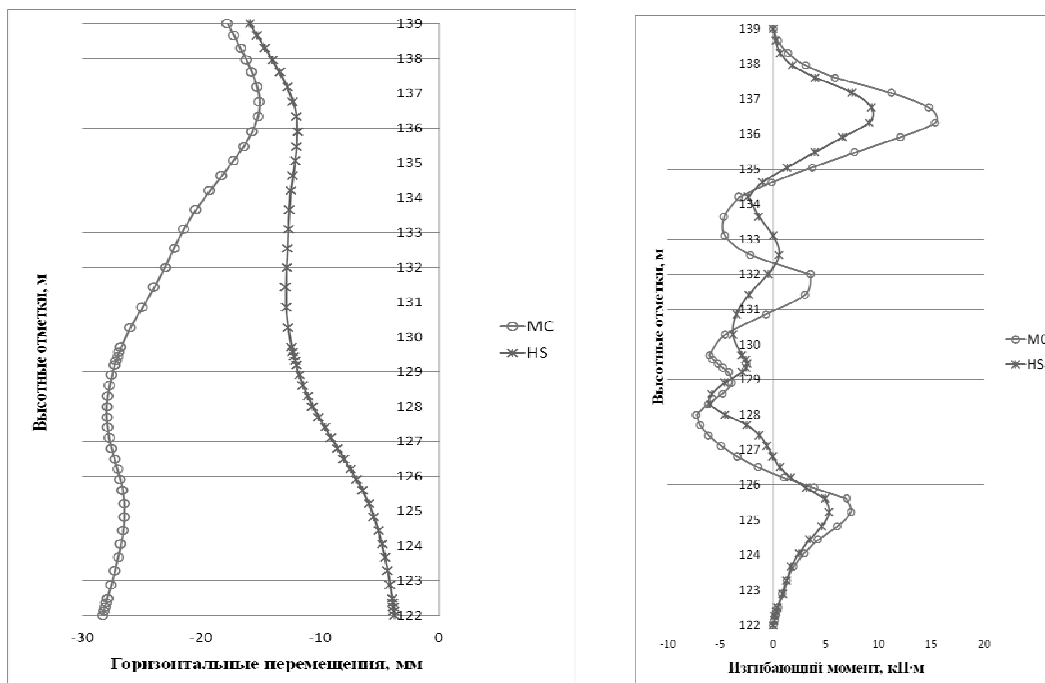


Рис. 5. Микросвай разделительной диафрагмы

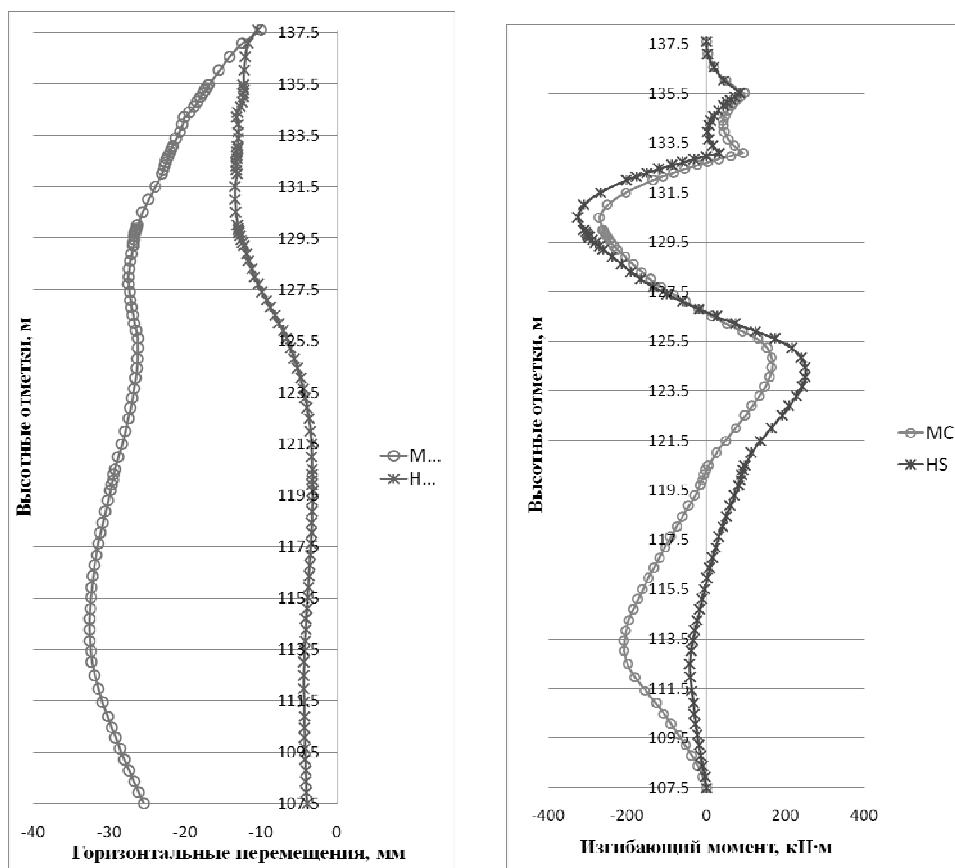


Рис. 6. Буровые сваи ограждения котлована

Таблица 3

**Сравнение результатов расчета по двум выбранным моделям**

Мо- дель	Сваи Ø820 мм		Сваи Ø180 мм		Вертикальное перемещение поверхности дна котлована	Коэффициент безопасности
	Изгибающий момент, кН·м	Перемещения, мм	Изгибающий момент, кН·м	Перемещения, мм		
<b>MC</b>	271,0	32,62	15,4	28,31	145	2,112
<b>HS</b>	324,5	13,39	9,4	15,94	62	2,032

Сравнивая результаты табл. 3, необходимо принимать во внимание то, что разъединительная диафрагма не используется как конструкция, воспринимающая горизонтальное давления, а только как элемент, разделяющий фундаменты возводимого здания и существующего.

Ниже приведена таблица сравнения максимальных значений напряжений в грунтовом массиве, полученных при помощи программы PLAXIS, после выполнения ограждения котлована и полной выемки грунта до проектной отметки (табл. 4).

На рис. 7 и 8 показаны касательные напряжения, возникшие в грунтовом массиве расчетной модели.

Таблица 4

**Максимальные значения напряжений в грунтовом массиве**

Напряжения в грунте	Модель <b>MC</b>	Модель <b>HS</b>
Касательные напряжения, кН/м <sup>2</sup>	129,49	103,15
Горизонтальные суммарные напряжения, кН/м <sup>2</sup>	634,07	645,75
Вертикальные суммарные напряжения, кН/м <sup>2</sup>	789,40	790,76

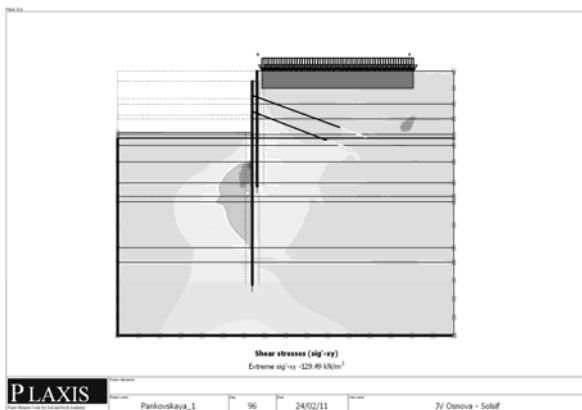


Рис. 7. Касательные напряжения (Shear stresses,  $\text{kN/m}^2$ ) – модель *MC*

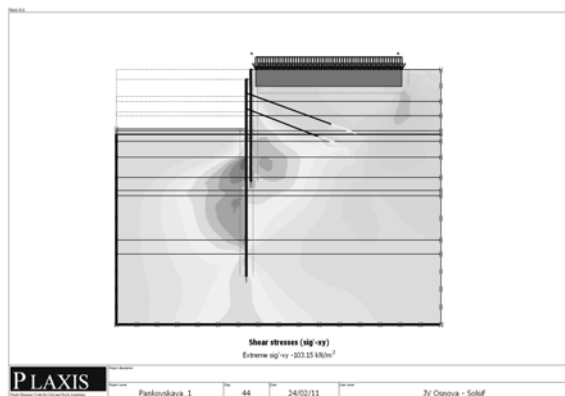


Рис. 8. Касательные напряжения (Shear stresses,  $\text{kN/m}^2$ ) – модель *HS*

Используя также одну из возможностей расчетной программы PLAXIS, мы можем проследить изменения усилий натяжения в корне анкеров после полной выемки. Анкера верхнего яруса корнем находятся в глинах и супеси. Анкера нижнего яруса корнем находится в следующих грунтах: песок мелкий и супесь. Как показывают результаты расчета – потери усилий предварительного натяжения происходят больше при использовании модели *MC*, чем при *HS* (на примере верхнего яруса – 3,8 % потерь при *MC* против 1,3 % при *HS*), то же происходит и с общими перемещениями анкеров (37,44 мм при *MC* и 11,54 мм при *HS*). Результаты проведенных расчетов являются теоретическими и подлежат обязательной проверке экспериментальным путем непосредственно на площадке строительства.

## Выводы

На основании расчетов, полученных при использовании программы PLAXIS, можно сделать некоторые выводы по сравнению применения таких моделей, как модель Мора-Кулона (*Mohr-Coulomb Model*) и модель твердеющего грунта (*Hardening Soil Model*):

- как при *MC*, так и *HS* не происходит существенных изменений изгибающих моментов элементов расчетной схемы, перемещения же, напротив, меньше при *HS*;

- вертикальные перемещения поверхности дна выемки существенно отличаются по результатам расчета двух моделей. Необходимо принимать во внимание возможность влияния в расчете больших деформаций дна котлована на горизонтальные перемещения конструкции ограждения;

- применение в расчете различных моделей поведения грунта и их взаимодействия с элементами ограждающей конструкции не влечет за собой изменение устойчивости расчетной схемы (коэффициент безопасности не претерпевает существенных изменений);

- модель *HS* дает меньшие перемещения корня грунтовых анкеров и потери усилий предварительного натяжения.

После выполнения сравнения двух часто используемых моделей расчетного комплекса PLAXIS также необходимо отметить, что получаемые результаты зависят не только от квалификации инженера-проектировщика, но и от качества определения физико-механических характеристик грунтов на строительной площадке.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Plaxis Version 8. General information [Electron. resource] / Plaxis bv, AN Delft, The Netherlands. – Access mode: [www.plaxis.nl](http://www.plaxis.nl)
2. Plaxis Version 8. Material models manual [Electron. resource] / Plaxis bv, AN Delft, The Netherlands. – Access mode: [www.plaxis.nl](http://www.plaxis.nl)
3. Основания и фундаменты [Текст] : справочник / под ред. проф. Г. И. Швецова. – М.: Высш. шк., 1991. – С. 44-46.

Надійшла до редколегії 31.03.2011.

Прийнята до друку 08.04.2011.