

Технология и техника геологоразведочных работ

УДК 624.131

АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПОВЕДЕНИЯ ГРУНТОВ

Л.А. Строкова

Технический университет, г. Мюнхен, Германия
E-mail: geyer3@mail.ru

Приведены результаты моделирования поведения грунтов при устройстве котлована с ограждающей стенкой. При моделировании использована модель *Hardening Soil*, реализованная в программном комплексе PLAXIS. Сформулирован критерий оценки чувствительности и выполнен анализ чувствительности параметров напряженно-деформированного состояния системы грунто-вый массив – подпорная стенка.

Ключевые слова:

Численное моделирование, анализ чувствительности, входные и выходные параметры.

Для выявления параметров грунта, имеющих значение в оценке напряженно-деформированного состояния, рекомендуется выполнять анализ чувствительности [1–3]. Такой анализ был проведен для устройства котлована с применением ограждающей заанкерной стенки. Математический эксперимент проводился с параметрами: коэффициент бокового давления грунта в состоянии покоя K_0 , число Пуассона, жесткость стенки. Для расчетов применялась модель PLAXIS *Hardening Soil* [4].

Расчеты проводились по двум вариантам. Для первого варианта, разрез представлен гравием (верхние 3 м), подстилаемый трехслойной толщей песка с различной степенью сложенности, общей мощностью 37 м. Для второго варианта, верхний слой песка, мощностью 17 м, в эксперименте был заменен глиной. Показатели физико-механических свойств грунтов приведены в табл. 1, изменяемые параметры помечены в таблице заливкой ячеек. Модули упругости и прочностные показатели грунтов определялись по изложенным выше методикам. Уровень грунтовых вод расположен на 20 м ниже поверхности земли. Распределение порового давления гидростатическое.

Свойства других материалов, соприкасающихся с грунтом, представлены в табл. 2. Для задания свойств анкеров необходимы два набора данных: один для типа *Anchor* (анкер), и второй – для типа *Geogrid* (георешетка). Набор данных *Anchor* задает свойства анкерной тяги, а *Geogrid* – свойства обла-

сти цементного раствора. Варьируемые показатели – нормальная и изгибная жесткость стены помечены в таблице заливкой ячеек.

Таблица 1. Основные характеристики грунтов

Название	Обозначение в PLAXIS	Гра-вий	Гли-на	Песок			Ед. изм.
				Верх-ний	Сред-ний	Ни-жний	
Модель поведения	Hardening soil	Упруго-пластический материал с упрочнением					–
Тип поведения	Drained	Дренажированный					–
Удельный вес грунта	γ_{unsat}	22	20	21	21	21	кН/м ³
Удельный вес водонасыщенного грунта	γ_{sat}	23	20	21	22	21	кН/м ³
Модуль Юнга при первичном нагружении	$E_{50}=E_{oed}$	90	60	90	100	120	МН/м ²
Модуль Юнга при разгрузке – повторном нагружении	E_{ur}	180	120	180	200	240	МН/м ²
Показатель степени	m	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	–
Коэффициент Пуассона	ν	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	–
	ν^*	0,3	0,275	0,3	0,3	0,3	–
Сцепление	c_{ref}	0,5	25	0,5	0,5	0,5	кН/м ²
Угол трения	φ	37,5	25	35	35	35	град.
Угол дилатансии	ψ	0	0	5	5	5	град.
Давление	p_{ref}	100	100	100	100	100	кН/м ²
Коэффициент бокового давления грунта в состоянии покоя	K_0^{NC}	0,391	0,577	0,426	0,426	0,426	–
	K_0^{OC1}	0,391	0,7	0,6	0,426	0,426	–
	K_0^{OC2}	0,391	0,9	0,8	0,426	0,426	–

Таблица 2. Свойства других материалов, соприкасающихся с грунтом

Параметр	Обозначение в PLAXIS	Стена Larssen 43	Geogrid цементный раствор	Анкер	Ед. изм.
Тип поведения	Material type	Elastic	Elastic	Elastic	–
Нормальная жесткость	EA^0	$4,45 \cdot 10^5$	$4,92 \cdot 10^5$	$2,87 \cdot 10^5$	кН/м
	EA^1	$4,45 \cdot 10^6$			
	EA^2	$4,45 \cdot 10^7$			
Изгибная жесткость	EI^0	$7,33 \cdot 10^4$	–	–	кНм ² /м
	EI^1	$7,33 \cdot 10^5$			
	EI^2	$7,33 \cdot 10^6$			
Эквивалентная толщина	d	1,406	–	–	м
Вес	w	1,66	–	–	кН/м/м
Коэффициент Пуассона	ν	0,150	–	–	–
Шаг анкеров	L_s	–	–	1	м

Геометрическая модель и сетка конечных элементов представлена на рис. 1. В области стенки и предполагаемой выемки грунта, т. е. в местах максимальной концентрации напряжений и значительных перемещений, сетка конечных элементов более мелкая.

Классическое устройство котлована с ограждающей стенкой в данном случае упрощается, т. к. уровень залегания грунтовых вод находится на глубине 20 м и не требуется проведение водопонизительных мероприятий. Остальные строительные операции в виде шагов расчета *step-by-step* приведены в табл. 3.

Таблица 3. Фазы моделирования

Шаг	Описание фазы
1	Первоначальное напряженно-деформированное состояние. Активирование распределенной системы нагрузки AA, имитирующей плотность застройки.
2	Изготовление стены в грунте. Активация стены.
3	Выемка грунта до глубины 1 м.
4	Выемка грунта до глубины 3 м.
5	Устройство анкера (<i>Node-to-node anchor</i>), с силой предварительного напряжения 500 кН/м.
6	Выемка грунта до глубины 4 м.
7	Выемка грунта до глубины 6 м.
8	Выемка грунта до глубины 8 м.
9	Последняя выемка грунта до глубины 10 м.

После составления базовой расчетной схемы для первого типа разреза, представленного гравием и песком, была создана аналогичная схема для второго типа разреза, представленного гравием, глиной, песком. После этого, для каждого типа разреза было создано по три расчетных схемы, отличающихся коэффициентом бокового давления слоя грунта, залегающего в интервале 3...20 м, т. к. предварительными исследованиями установлено, что грунты испытали в ледниковый период большее напряжение, чем существует сейчас. Для песка вариации коэффициента K_0 приняты следующими 0,426; 0,6 и 0,8; для глины – 0,576; 0,7 и 0,9. Далее из шести вариантов расчетных схем было создано еще две серии расчетных схем. Одна серия расчетных схем (обозначение W_1) отличалась от первоначальной W_0 увеличением начальной и изгибной жесткости стены в 10 раз, вторая серия рас-

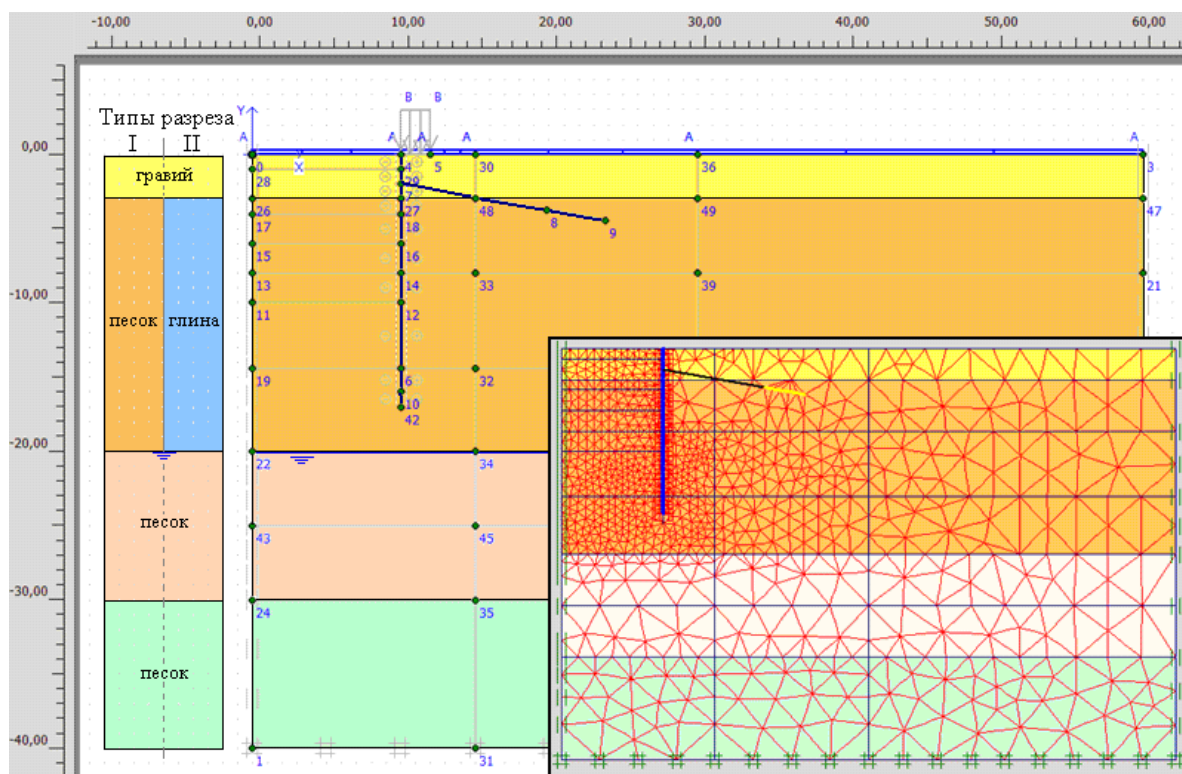


Рис. 1. Геометрическая модель участка и сетка конечных элементов

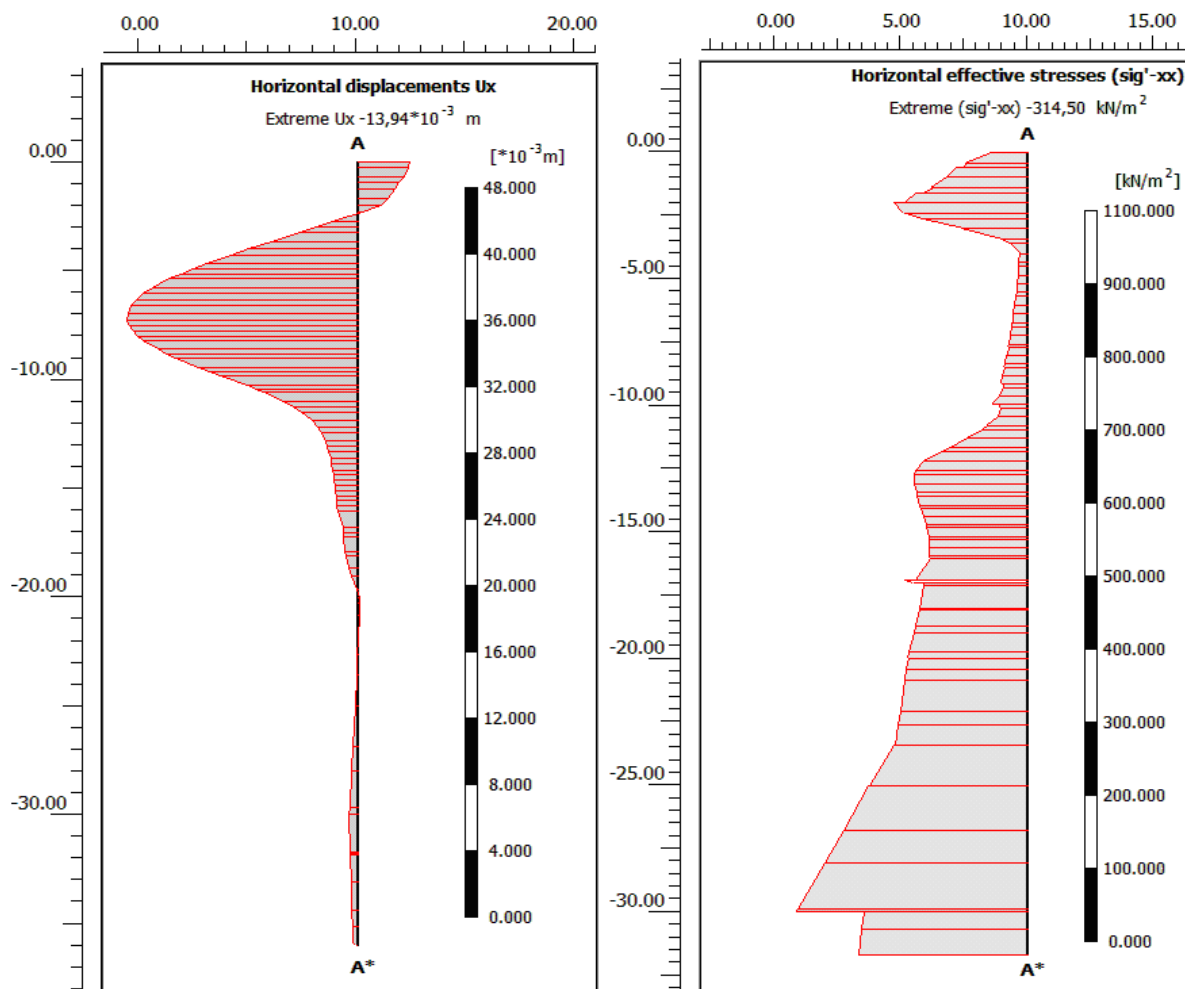


Рис. 2. Выходные параметры расчетов в PLAXIS

четных схем (обозначение W_2) отличалась от первоначальной увеличением начальной и изгибной жесткости стены в 100 раз. Итого было создано 18 расчетных схем, отличающихся только двумя параметрами. Дополнительно для II типа разреза создано три расчетных схемы с изменением числа Пуассона для глины (обозначение II*). Далее выполнены расчеты.

Выходными параметрами расчетов являются эффективные горизонтальные напряжения в грунтовом массиве позади стенки и горизонтальные смещения стенки (рис. 2).

Данные по напряжениям и перемещениям из окна вывода программы PLAXIS копируются в программу Microsoft Excel для выполнения последующего анализа данных и визуализации данных моделирования. Результаты эксперимента представлены на рис. 3, 4.

Примем в качестве эталонов расчеты, выполненные для I и II типов геологического разреза в условиях нормальной консолидации (K_0^{NC}) и первоначальной жесткости стены (W_0). Для сравнения положения линий на графиках зависимостей горизонтальных перемещений по глубине и эффектив-

ных горизонтальных напряжений по глубине подсчитываем суммарные площади фигур под этими кривыми до глубины 16 м (табл. 4). Эталонные расчеты отмечены в таблице заливкой ячеек.

Таблица 4. Оценка выходных параметров по площади под графиками

Выходной параметр	Горизонтальное перемещение стенки U_x				Горизонтальные напряжения позади стенки σ'_{xx}			
	K_0	W_0	W_1	W_2	K_0	W_0	W_1	W_2
I тип разреза	K_0^{NC}	0,094	0,047	0,025	K_0^{NC}	1252	1300	1320
	K_0^{OC1}	0,094	0,047	0,024	K_0^{OC1}	1396	1467	1515
	K_0^{OC2}	0,106	0,059	0,043	K_0^{OC2}	1663	1726	1802
II тип разреза	K_0^{NC}	0,114	0,077	0,044	K_0^{NC}	1548	1551	1608
	K_0^{OC1}	0,131	0,091	0,061	K_0^{OC1}	1621	1661	1739
	K_0^{OC2}	0,178	0,136	0,110	K_0^{OC2}	1809	1821	1913
II* тип	K_0^{NC}	0,113			K_0^{NC}	1492		
	K_0^{OC1}	0,120			K_0^{OC1}	1603		
	K_0^{OC2}	0,150			K_0^{OC2}	1796		

Определяем чувствительность выходных параметров к изменению входного параметра по каждому варианту расчета. В качестве общего критерия оцен-

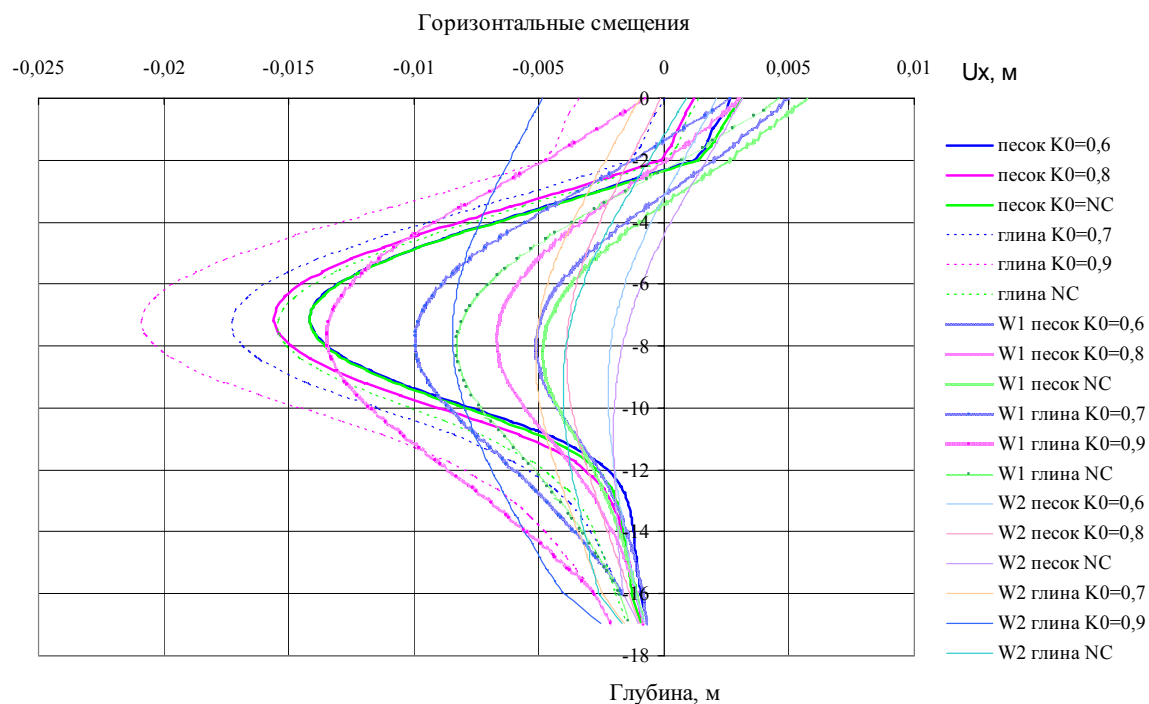


Рис. 3. Горизонтальные смещения стенки

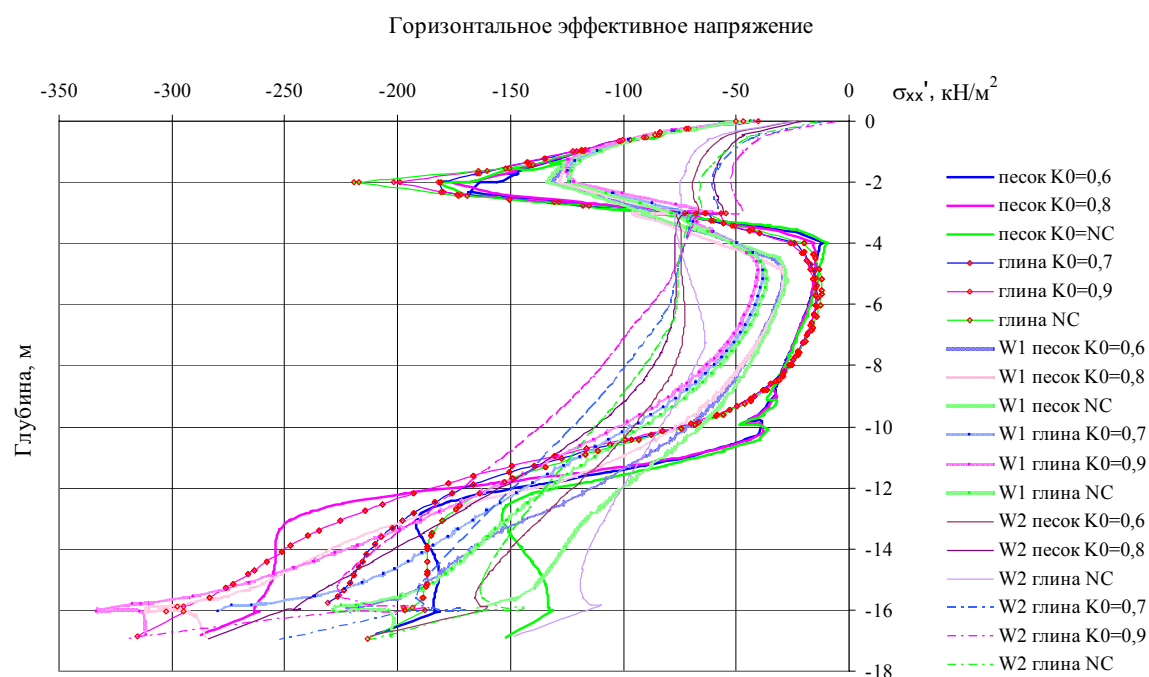


Рис. 4. Горизонтальное эффективное напряжение позади стенки

ки выбираем отклонение выходного параметра от эталонного (в %). Считаем, что чем больше разница, тем выше чувствительность этого параметра. Находим вариант с наибольшим отклонением выходных параметров. Результаты анализа чувствительности представлены в табл. 5. Примем, изменения параметров, сопровождающиеся увеличением выходных параметров (>100 %) – как отрицательное, и наоборот, изменения с уменьшением выходных параметров (<100 %) – как положительное влияние.

Результаты исследования однозначно подтверждают наибольшую чувствительность смещений для I-го типа разреза к увеличению жесткости стены на 1 и 2 порядка, смещения сократились в 2 и 4 раза соответственно, аналогично выглядят результаты и для II-го типа разреза, но с меньшей амплитудой. Для II-го типа разреза критическим оказалось увеличение коэффициента бокового давления грунта – смещения возросли в полтора раза. Увеличение числа Пуассона для глины имеет меньшую чувствительность.

Таблица 5. Оценка чувствительности выходных параметров в %

Выходной параметр		Горизонтальное перемещение стенки U_s			Горизонтальные напряжения позади стенки σ'_{xx}		
Варьируемый параметр		Тип разреза			Тип разреза		
		I	II	II* (ν)	I	II	II* (ν)
K_0	$K_0^{nc} (W_0)$	100	100	99	100	100	96
	K_0^{oc1}	100	114	105	111	105	104
	K_0^{oc2}	113	156	131	133	117	116
EA, EI	W_1	50	67		104	100	
	W_2	27	39		105	104	

По второму выходному параметру – горизонтальным эффективным напряжениям – наиболее чувствительным оказалось изменение коэффициента бокового давления грунтов для I-го типа разреза, менее чувствительно – это отразилось для II-го типа разреза, наименьшая чувствительность σ'_{xx} к изменению жесткости стенки.

Из вышеперечисленных результатов следует, что наиболее чувствительным параметром грунта при моделировании является коэффициент бокового давления в состоянии покоя, менее чувствительным число Пуассона. Как показано в ходе ком-

пьютерного моделирования, эти параметры играют важную роль в поведении грунта и не могут приниматься только по литературным данным. Все параметры, принимаемые по умолчанию, должны быть откорректированы с учетом специальных лабораторных и полевых исследований. Сам перечень стандартных определений прочностных и деформационных характеристик грунтов необходимо расширить с включением числа Пуассона, коэффициента бокового давления грунта в состоянии покоя, угла дилатансии. Время, когда результаты расчетов априори считались достоверными лишь потому, что были получены с использованием вычислительной техники, безвозвратно прошло. Сейчас на первое место выходят вопросы оценки качества расчетов, возможность эффективного контроля их достоверности, что невозможно без создания соответствующих методик, регламентов и норм. Анализ чувствительности параметров, предложенный в статье, является полезным инструментом для тестирования расчетных моделей. Простая оценка площади графиков напряжений и деформаций способна обнаружить влияние входных параметров на результаты расчета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. De Vos M., Whenham V. Innovative design methods in geotechnical engineering. – Belgium, 2006. – 90 p. <http://www.geotechnet.org/wp3>.
2. Refsgaard J.C., Van der Sluijs J.P., Hojberg A.L., Vanrolleghem P. HarmoniCa Guidance Uncertainty Analysis / Report commissioned by European Commission. – Brussels, 2005. – 46 p. <http://www.chem.uu.nl/nws/www/publica/Publicaties2005/E2005-22.pdf>.
3. Van der Sluijs J.P. Integrated Assessment Models and the Management of Uncertainties, IIASA working paper no. WP 96-119. – Laxenburg, 1996. – 80 p.
4. Brinkgreve R.B.J. et al. PLAXIS, 2D Version 8. – Balkema, 1997. – 200 p. <http://www.plaxis.nl/index.php?cat=manuals&mouse=Plaxis%20V8>.

Поступила 17.04.2008 г.