

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Механические и абразивные свойства горных пород / под ред. Л.А. Шрейнера. — М.: Изд-во Гостоптехиздат, 1958. — 202 с.
2. Евсеев В.Д., Мавлютов М.Р. Механизм разрушения горных пород при вдавливании штампа и развитие методики определения их механических свойств // Известия вузов. Горный журнал. — 1998. — № 11–12. — С. 5–8.
3. Евсеев В.Д. Механизмы влияния жидкости на разрушение горных пород при вдавливании индентора // Геологическое и гор-

- ное образование. Геология нефти и газа: Матер. Междунар. научно-техн. конф. — Томск, 2001. — С. 86–88.
4. Евсеев В.Д. О причине невозможности использования эффекта П.А. Ребиндера при бурении скважин // Бурение и нефть. — 2010. — Вып. 9. — С. 10–12.

Поступила 27.10.2010 г.

УДК 624.131

РАСШИРЕННАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ КОМПРЕССИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ ГРУНТОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Л.А. Строкова

Томский политехнический университет
E-mail: geyer@tpu.ru

Анализ российских и зарубежных норм по обработке данных компрессионных испытаний грунтов показал, что параметры предельно напряженного состояния грунтов фактически не используются отечественными компаниями в расчетах оснований инженерных сооружений, но повсеместно присутствуют в программной продукции, выпускаемой ведущими западными разработчиками. Представлены результаты определения дополнительных параметров по компрессионным испытаниям, необходимых для численного моделирования поведения грунтов.

Ключевые слова:

Численное моделирование, упруго-пластическая модель с упрочнением, дополнительные параметры модели, механические свойства, степень переуплотнения, давление предуплотнения.

Key words:

Numerical simulations, elasto-plastic model with hardening, advanced model parameters mechanical properties, overconsolidation ratio, preconsolidation pressure.

Комплексное изучение и оценка инженерно-геологических условий предполагаемой площадки строительства любого типа инженерных сооружений, а также прогноз их изменения в процессе эксплуатации базируются на результатах инженерных изысканий. Основными задачами изысканий являются: расчленение геологического разреза; определение состава, состояния и характеристик грунтов (физических, прочностных, деформационных, фильтрационных и теплофизических) в условиях естественного залегания; оценка пространственной изменчивости свойств грунтов; инженерно-геологическая схематизация основания для обоснования основных параметров проекта таких, как тип основания; конструкции, материал и размеры фундаментов на основе предполагаемых предельных состояний.

Инженерно-геологические изыскания, специальные лабораторные и полевые исследования грунтов для проектирования сооружений, как по российским, так и по зарубежным стандартам должны обеспечить получение следующих характеристик грунтов:

- влажности, плотности, плотности частиц грунта, гранулометрического состава, пределов пластичности для связных грунтов, коэффициента

пористости и степени плотности для несвязных грунтов;

- прочности в полных напряжениях (в нестабилизированном состоянии) φ и c и/или сопротивления недренированному сдвигу s_u ;
- прочности в эффективных напряжениях (в стабилизированном состоянии) φ' и c' ;
- деформируемости грунтов при статических нагрузках (модуль деформации E первичный и вторичный, а также коэффициент Пуассона ν);
- водопроницаемости k_f и консолидации c_v .

Кроме того, в западной практике проектирования базовыми характеристиками основания являются также показатели природного напряженного состояния грунтов: давление предуплотнения σ'_p (*preconsolidation pressure*), степень переуплотнения OCR (*overconsolidation ratio*) и коэффициент бокового давления в массиве грунта K_0 . Российскими нормами определение показателей природного напряженно-деформированного состояния грунтов рекомендуется, но состав таких характеристик и методы их определения не регламентируются [1]. В настоящее время предложен проект стандарта для определения характеристик деформируемости грунтов в условиях компрессионного сжатия и давления предуплотнения [2].

Параметры деформируемости грунтов определяются как в России, так и за рубежом по результатам компрессионных и трехосных консолидированно-дренированных испытаний. Методики проведения начала компрессионных опытов практически идентичны, но затем наблюдаются различия: западные нормы предусматривают этапы разгрузки и повторного нагружения образца.

Результаты опытов представляются в виде графиков зависимости относительной деформации ε или коэффициента пористости e от эффективного напряжения σ' (в российских нормах — давления, p), а также от времени $\lg T$ или T . Однако состав последующих оценок несколько различается. Согласно российскому ГОСТ 12248-96 по результатам компрессионных опытов определяются коэффициент сжимаемости m_0 , модуль деформации E , структурная прочность на сжатие p_{str} , а также коэффициенты фильтрационной и вторичной консолидации c_v и c_α [3]. Согласно CEN ISO/TS 17892-5 вычисляются коэффициенты: фильтрационной и вторичной консолидации c_v и c_α ; объемного сжатия m_v ; сжатия (*compression index*), набухания (*swelling index*), повторного нагружения (*reloading index*), а также давление предуплотнения σ'_p по методу Казагранде и компрессионный модуль E_{ocd} [4].

Прочностные свойства грунтов являются определяющими при оценке несущей способности грунтового основания, местной прочности, напряженно-деформированного состояния грунтового массива и т. п. В настоящее время основным методом определения прочности грунтов, как в зарубежной, так и в российской практике является метод трехосного сжатия. К сожалению, при разработке российского ГОСТа трехосные испытания

рассматривались как аналог НН (неконсолидированно-недренированной схемы), КН (консолидированно-недренированной) и КД (консолидированно-дренированной схемы) опытов в срезных приборах, что привело к ряду неоправданных ограничений и неточностей, снижающих ценность трехосных испытаний [1]. Следует отметить, что на определяемые экспериментально величины параметров прочности в нестабилизированном состоянии существенное влияние оказывают начальное напряженное состояние образца грунта, его пористость и степень водонасыщения.

Предварительное уплотнение грунтов в геологическое время играет важную роль в оценке современного напряженно-деформированного состояния грунтового массива. Не учет этого фактора может сказаться отрицательным образом на прогнозные значения величины перемещений и деформаций [5, 6].

Так как в российской учебной и нормативной литературе этот вопрос не рассматривается, остановимся на понятии и методах определения давления предконсолидации.

Максимальное давление, которое испытал грунт при предыдущем нагружении, называется *историческим* или давлением предварительного уплотнения σ'_p (*Preconsolidation stress*). Давление, испытываемое в данный момент времени грунтом на некоторой глубине от собственного веса, называется *природным* или бытовым давлением σ' . Характеристика напряжений в грунтах, испытавших преднапряжение, представлена на рис. 1.

Под степенью переуплотнения пород (OCR) понимается отношение максимального давления, которое испытал грунт при предыдущем нагруже-

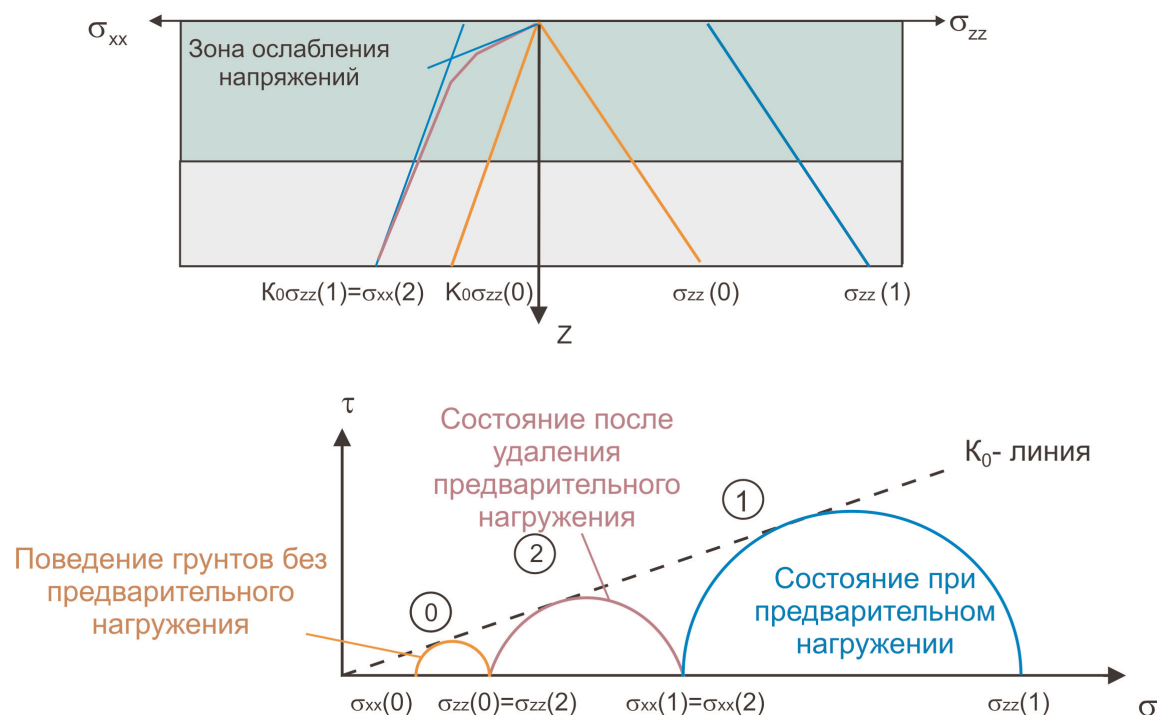


Рис. 1. Напряжения в грунтах, испытавших преднапряжение [7]

нии, к давлению, испытываемому в данный момент времени:

$$OCR = \frac{\text{Максимальное историческое}}{\text{Аktуальное бытовое давление}} = \frac{\sigma'_p}{\sigma'}$$

Для определения исторического давления σ'_p существуют разные методы. Впервые *графический метод определения σ'_p* по данным компрессионных испытаний был предложен А. Казагранде в 1936 г. [8]. Метод хорошо зарекомендовал себя для большинства пылевато-глинистых грунтов.

Процедура определения σ'_p по методу Казагранде включает следующие этапы [8]:

1. Построить касательную линию к самой крутой части кривой консолидации $e-\log \sigma'_v$.

2. Определить местонахождение точки перегиба компрессионной кривой. Построить горизонтальную линию из этой точки максимального искривления.

3. Построить касательную к компрессионной кривой в точке перегиба.

4. Построить линию, которая делит пополам угол между горизонтальной линией, построенной на этапе 2 и касательной, построенной на этапе 3. Пункт пересечения биссектрисы (этап 4) и первой касательной линии (этап 1) и есть значение давления предконсолидации (рис. 2).

Для слабых грунтов, набухающих грунтов, образцов, нарушенного сложения предложен альтернативный метод, так называемый *Strain-Energy*

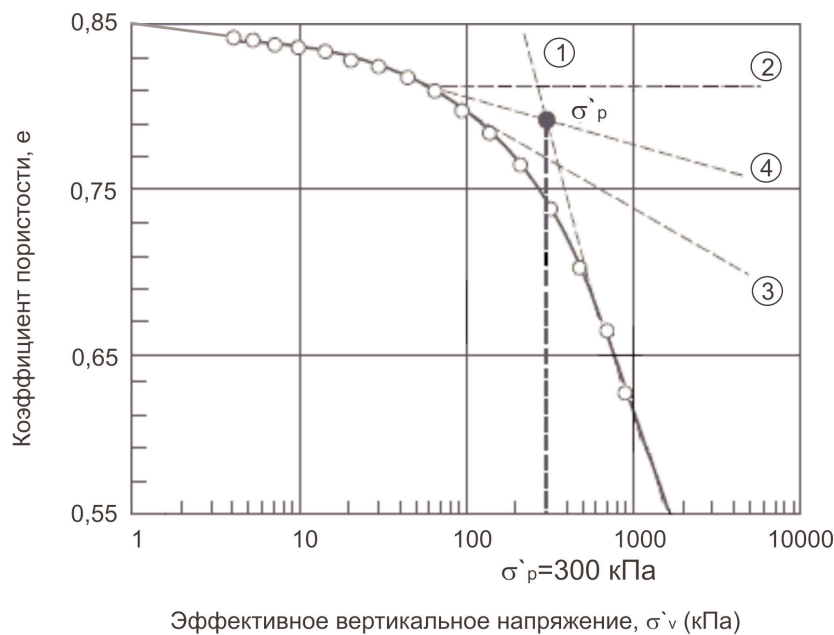


Рис. 2. Иллюстрация метода А. Казагранде [8] для определения исторического давления

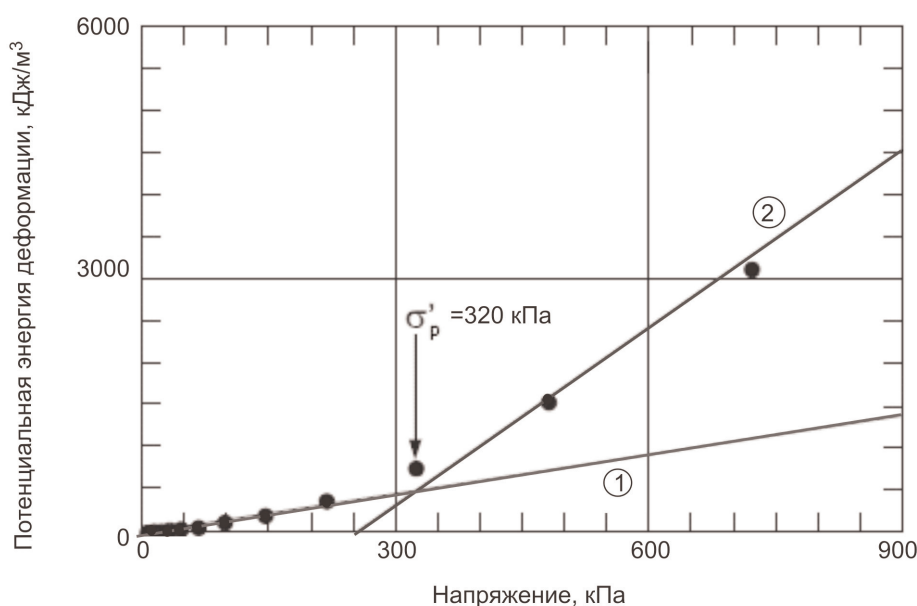


Рис. 3. Иллюстрация энергетического метода расчета деформации для определения исторического давления

Method [9]. Энергетический метод расчета деформации включает построение кривой накопления потенциальной энергии деформации при изменении нагрузки в ходе компрессионных испытаний (рис. 3). Точка, где кривая энергии деформации показывает наибольшее приращение, представляет напряжение предконсолидации.

Давление предконсолидации σ'_p рекомендуется определять по этому методу в следующей последовательности.

1. Рассчитать изменение энергии деформации единичного объема для каждого приращения деформации: $\Delta W = \frac{(\sigma'_i + \sigma'_f)}{2}(\varepsilon_f - \varepsilon_i)$, где ΔW –

изменение энергии деформации для единичного объема, кПа/м³; σ'_i и σ'_f – напряжения в начальный и конечный моменты приращения деформаций, кПа; ε_i и ε_f – деформации в начале и в конце изменения напряжений.

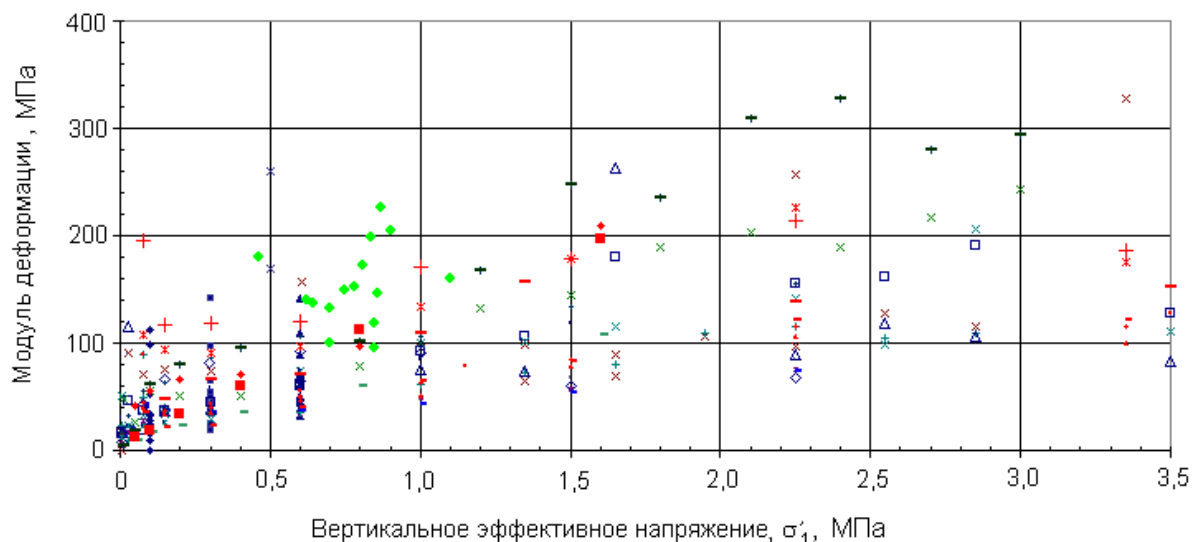


Рис. 4. Разброс значений модуля деформации миоценовой молассовой глины по данным компрессионных, K_0 -трехосных и полевых испытаний (дилатометром)

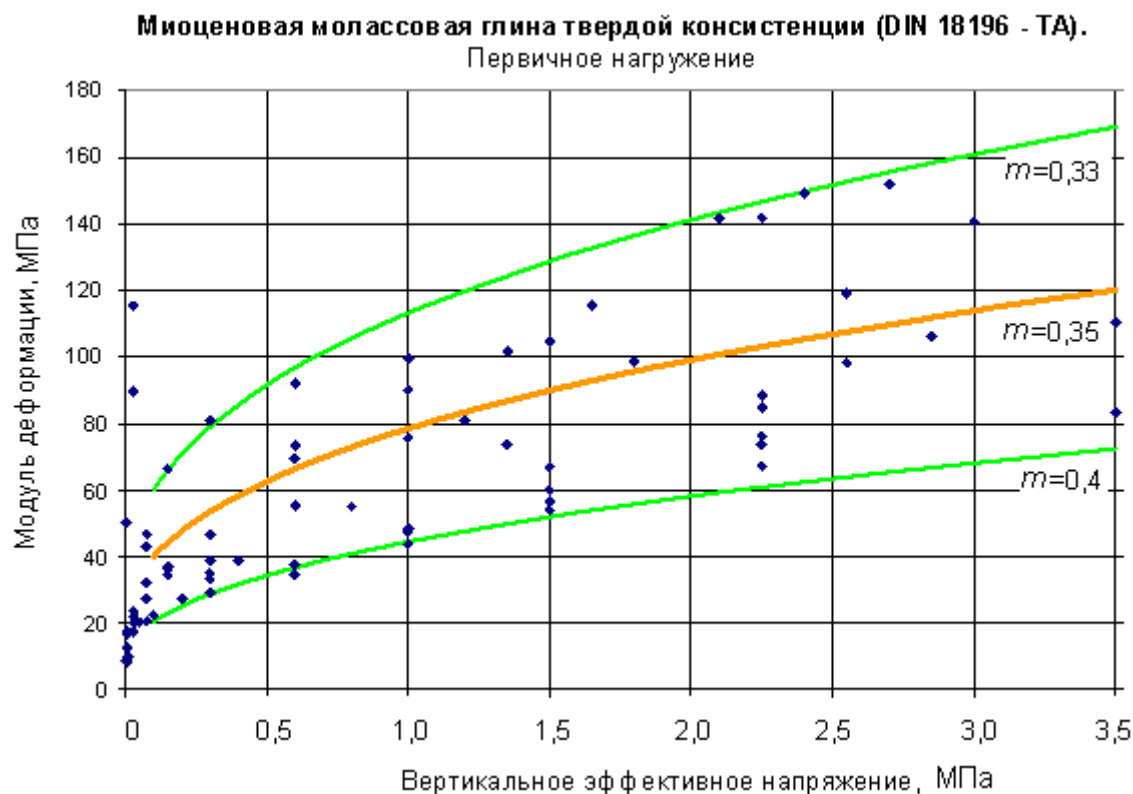


Рис. 5. Определение параметра m для твердой глины

2. Построить график зависимости напряжений в зависимости от накопленной энергии деформации для каждого приращения напряжений.
3. Для двух ветвей кривой строятся линии тренда: 1 – с меньшим наклоном для точек в зоне повторного нагружения и 2 – с крутым наклоном для точек в зоне первоначального нагружения.
4. Точка пересечения этих двух вспомогательных линий 1 и 2 указывает на величину давления предконсолидации.

В [9] приводится сравнительная оценка этих методов определения исторического давления. В зависимости от степени нарушенности сложения образца, давление предконсолидации по методу Казагранде составляет 75...90 % от давления предконсолидации, определенному по энергетическому методу расчета деформации. Несовпадение значений σ'_p , полученных полевыми и лабораторными методами, объясняется изменениями в сложении грунта при отборе грунта, изготовлении образца и т. д. Эти изменения отражаются в напряженно-деформированном состоянии грунта.

В [10] даны рекомендации по выявлению предконсолидации по косвенным признакам, например, по геологическим картам, пределам пластичности, лабораторным испытаниям на срез и сжатие.

Для численного моделирования поведения грунтов с использованием сложных расчетных моделей, например, упругопластической модели с изотропным упрочнением, требуется задание 10 параметров, часть из которых можно установить

при расширенной обработке компрессионных испытаний. Технология установления параметров модулей упругости, коэффициента бокового давления грунта, угла дилатансии рассмотрена в [11, 12].

Таблица 1. Определение параметра m по кривым $E=f(\sigma)$

Миоценовые грунты	Значение m	По ветви первичного нагружения	При разгрузке	По ветви повторного нагружения
Глины и суглинки	Минимальное	0,73	0,30	0,15
	Среднее	0,88	0,30	0,15
	Максимальное	1,10	0,30	0,40
Пески	Минимальное	0,75	0,05	0,20
	Среднее	0,82	0,05	0,30
	Максимальное	1,00	0,30	0,50

Для оценки параметра m , учитывающего нелинейность компрессионной кривой [13] и параметра OCR, была проведена расширенная обработка данных лабораторных и полевых определений деформируемости глинистых грунтов миоценовой континентальной молассы (табл. 1, рис. 4) по проекту строительства второго транспортного коридора в г. Мюнхен.

На рис. 5 представлен пример определения параметра m для твердой тяжелой глины с единичными включениями дресвы карбонатов.

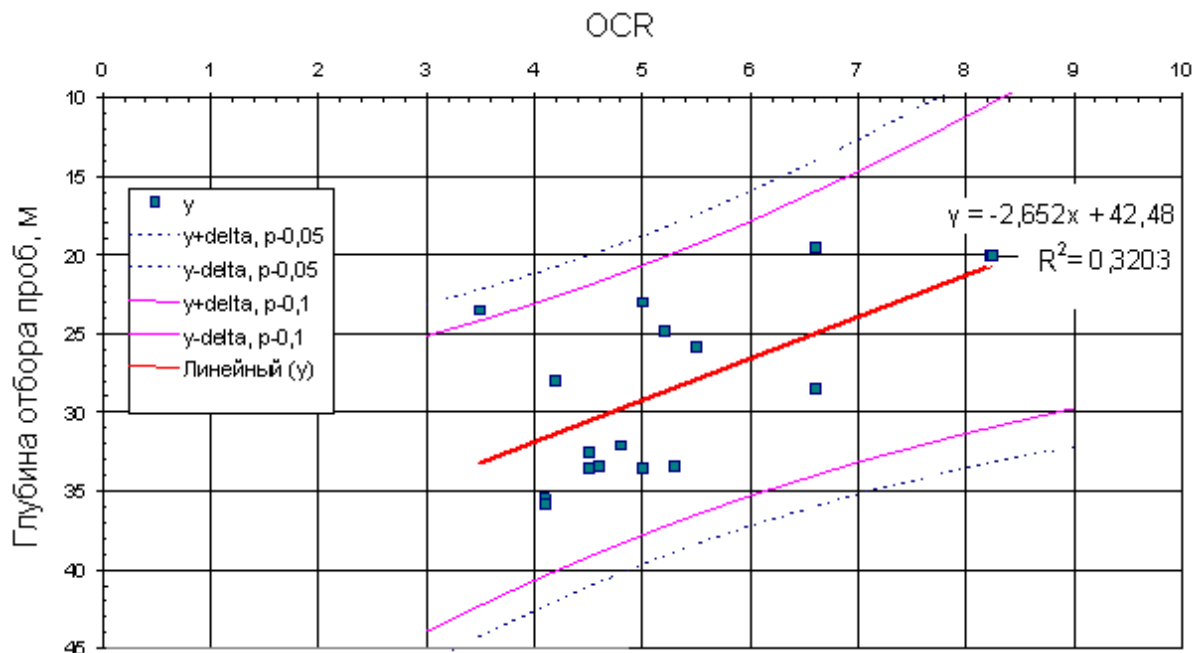


Рис. 6. Доверительная область изменения OCR по глубине с доверительными уровнями, равными 90 и 95 %

Таблица 2. Определение OCR по данным компрессионных испытаний (метод Казагранде)

Номер пробы	Глубина отбора проб, м	σ'_z , кН/м ²	σ'_{vm} , кН/м ²	OCR	Предполагаемая отметка поверхности, м
1	24,8	356,8	1850	5,2	124
2	28,0	392,0	1675	4,2	107
3	32,6	442,6	2000	4,5	130
4	33,4	451,4	2075	4,6	135
5	33,4	451,4	2375	5,3	160
6	35,5	474,5	1925	4,1	121
7	23,5	342,5	1200	3,5	71
8	32,1	437,1	2100	4,8	139
9	35,8	478,4	1975	4,1	125
10	28,5	356,7	2325	6,6	166
11	19,5	250,5	1650	6,6	117
12	25,8	319,8	1750	5,5	119
13	20,0	292,0	2400	8,2	179
14	33,6	411,6	1850	4,5	120
15	33,6	411,6	2075	5,0	139
16	23,0	373,0	1875	5,0	125

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беллендир Е.Н. Научное обоснование проектирования гравитационных опорных блоков морских ледостойких платформ и их сопряжения с грунтовым основанием: дис. ... д-ра техн. наук. – СПб., 2006. – 284 с.
- Болдырев Г.Г. и др. Проект: Грунты. Метод компрессионного сжатия с заданной скоростью деформации / Soils. Standart test method for oedometer consolidation using controlled strain deformation. – Пенза: ООО НПП «Геотек», 2010. – 31 с.
- ГОСТ 12248-96. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2005. – 110 с.
- CEN ISO/TS 17892-5. Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil. – Part 5: Incremental loading oedometer test (ISO/TS 17892–5:2004). – European Committee for Standardization (CEN). – 2004. – 28 p.
- Строкова Л.А. Учет ледникового переуплотнения грунтов при численном расчете оседания земной поверхности при сооружении туннелей // Разведка и охрана недр. – 2010. – № 2. – С. 35–37.
- Строкова Л.А. Учет ледникового переуплотнения грунтов при расчете гибкой консольной подпорной стенки // Известия Тульского государственного университета. Серия: Естественные науки. – 2009. – Вып. 2. – С. 281–289.
- Vogt N. Erddruck: Skript der Lehrstuhl für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik TUM. – München, 2008. – 40 S.
- Casagrande A. The determination of the pre-consolidation load and its practical significance // Proc. of the 1st Intern. Soil Mechanics

В табл. 2 и на рис. 6 приведена оценка параметра OCR для миоценовой молассовой глины по данным компрессионных испытаний.

Приведенные в табл. 2 данные подтверждают данные геологов об эрозии третичных отложений в четвертичный период по данным восстановления палеорельефа в регионе.

Использование в проектировании инженерных сооружений современных программных комплексов на базе метода конечных элементов способствует улучшению качества проектирования в целом, повышению точности конструктивных решений, однако требует определения дополнительных параметров. Представленные в работе результаты, выполненные по западноевропейским нормам, могут служить основой для разработки отечественных нормативных документов по расширенной обработке данных лабораторных испытаний деформационных свойств грунтов.

Автор признательна Г. Пельцу, инженеру Центра Геотехники Технического университета Мюнхена, за консультации в процессе нахождения параметров и их использовании при численном моделировании напряженно-деформированного состояния грунтов.

- and Foundation Engineering Conference, Cambridge, Mass., 22–26 June 1936. Ed. by A. Casagrande. Graduate School of Engineering, Harvard University, Cambridge, Mass. – 1936. – V. 3. – P. 60–64.
- Sabatini P.J., Bachus R.C., Mayne P.W., Schneider J.A., Zettler T.E. Manual on Evaluating Soil & Rock Properties // Geotechnical Engineering Circular № 5, Report № FHWA-IF-02–034, Federal Highway Administration, Washington, D.C. – 2002. – 385 p.
- Soils and Geology Procedures for Foundation Design of Buildings and Other Structures (Except Hydraulic Structures) // Unified Facilities Criteria (UFC) 3–220–03FA / Technical Manual No. 5–818–1/AFM 88–3, Chapter 7. Joint Departments of the Army and Air Force, USA. – 2004. – 207 p.
- Строкова Л.А. Технология установления параметров для численного моделирования поведения грунтов // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 313. – № 1. – С. 64–68.
- Строкова Л.А. Калибровка модулей упругости для упругопластической модели путем моделирования лабораторных испытаний // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 1. – С. 87–92.
- Ohde J. Zur Theorie der Druckverteilung im Baugrund // Der Bauingenieur. – 1939. – № 20. – H. 33/34. – S. 451–459.

Поступила 26.04.2010 г.