

**Иовлев Григорий Алексеевич**

аспирант

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет»

г. Санкт-Петербург

**ПОЛУЧЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДЛЯ МОДЕЛИ ФИЗИЧЕСКИ  
НЕЛИНЕЙНОГО ТЕЛА ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ  
ПРОТЕРОЗОЙСКИХ ГЛИН**

*Аннотация:* целью работы является определение параметров наиболее используемых моделей физически нелинейного тела для последующей разработки метода прогноза напряженного состояния подземных сооружений города Санкт-Петербурга. Приведены экспериментальные исследования деформирования на прессовом оборудовании образцов протерозойских глин в условиях объемных напряженных состояний. Предложено использование обобщенных экспериментальных зависимостей связи максимального касательного напряжения и наибольшего сдвига для глин вне зависимости от направления приложения нагрузки и величины бокового давления

**Ключевые слова:** грунтовый массив, напряжение, деформация, физическая нелинейность, подземные сооружения.

При проектировании подземных сооружений, одной из ключевых задач является комплексное геомеханическое обоснование строительства подземных сооружений в заданных инженерно-геологических условиях. При ведении строительных работ необходим достоверный прогноз геомеханических процессов. Данный прогноз в большинстве случаев должен включать следующие моменты: представления о инженерно-геологических и гидрогеологических условиях строительства, о механическом поведении породного массива и пород, а также принятой технологии ведения проходческих работ, момента ввода обделки в работу и т. д. При чём детальность изучения данных процессов разнообразна. Например, для прогноза нагрузок, действующих на обделку подземного соору-

жения, в основном используется хорошо себя зарекомендовавший в практике метод Протодьяконова и его развитие, для выполнения расчетов по данному методу достаточно обладать базовыми показателями, получаемые на основании стандартных инженерно-геологических изысканиях, а технология строительства в целом не учитывается. В то же время данный метод имеет и ряд ограничений. Для учёта этих ограничений, и создания достоверного прогноза основных геомеханических процессов в механики подземных сооружений, сформировалось несколько научных направлений.

Первое из них связано с детальным изучением прочностных, деформационных и структурных свойств неоднородных грунтов и горных пород на прессовом оборудовании при различных условиях и режимах нагружения, целью которых является получение новых физических уравнений их состояния, как нелинейных гетерогенных сред.

Второе научное направление развития механики связано с крупномасштабными натуральными экспериментами и мониторингом подземных сооружений, обделок, геомеханических процессов в массивах и осадок земной поверхности.

Третье направление развития механики подземных сооружений связано с созданием новых методов расчета конструкций подземных сооружений и прогноза геомеханических процессов в окружающем массиве с учетом результатов лабораторных и натуральных исследований.

Анализ результатов многочисленных исследований показывает, что в условиях объемных напряженных состояний все горные породы склонны к проявлению пластических свойств. Аналогичные результаты экспериментальных исследований горных пород получены в зарубежных исследованиях [3; 4].

При этом, в настоящее время на практике при геомеханических расчетах в основном используется модель упруго-пластического тела. Причём данную модель разумно применять, когда между напряжениями и деформациями, до предела прочности имеется линейная зависимость. Данная модель может быть использована для описания процессов деформирования прочных пород с высокими

пределами прочности на одноосное сжатие. При малых значениях предела прочности зависимость между напряжениями и деформациями в допредельной области будет нелинейной.

Протерозойские глины относятся к материалам, которые по своему характеру механической работы находятся между горными породами и грунтами, и многие особенности их поведения до сих пор слабо изучены.

Комплексное изучение механического поведения протерозойских глин в лабораторных условиях позволило изучить деформирование протерозойской глины в широком диапазоне достигнутых величин деформаций и напряжений. Так, в диапазоне малых деформаций прослеживается нелинейный характер деформирования глин. Нелинейное деформирование наблюдается как в направлении перпендикулярно, так и параллельно слоистости.

Исследователи отмечают, что слоистая структура протерозойской глины оказывает влияние на все ее механические свойства. Наибольшее анизотропия как прочностных, так и деформационных свойств проявляется при малых значениях минимальных главных напряжений и по мере их роста влияния структуры заметно снижается.

Определение стандартных показателей механических свойств протерозойской глины в направлении перпендикулярно (таблица 1) и параллельно (таблица 2) слоистости сведены в таблицы.

Таблица 1

Механические свойства протерозойской глины в направлении  
перпендикулярно слоистости

№ образца	Боковое давление, МПа	Механические свойства							
		$E_0$ , МПа	$E_{50}$ , МПа	$E_q$ , МПа	$E_y$ , МПа	$\nu_0$	$\sigma_{сж}$ , МПа	$q$ , МПа	$p$ , МПа
12	0.5	540	380	450	560	0.14	7.7	7.2	2.9
17	0.5	510	470	500	810	0.15	7.8	7.3	2.9
8	2.5	670	880	960	1080	0.065	13.5	11.0	6.2
15	2.5	840	980	1180	1200	0.021	13.1	10.6	6.0
2	5.0	915	305	295	840	0.151	8.4	3.4	6.1

4	5.0	—	—	—	—	—	—	—	—
5	5.0	1110	650	460	1110	0.182	11.6	6.6	7.2
9	5.0	1310	1310	780	—	0.098	16.8	11.8	8.9
10	10.0	1450	1390	660	—	0.068	23.4	13.4	14.5

Примечание:  $E_0$  – начальное значение модуля деформации;  $E_{50}$  – значение модуля деформации соответствующего напряжениям равным 0.5 от предела прочности;  $E_y$  – модуль упругости;  $\nu_0$  – коэффициент поперечной деформации;  $\sigma_{ск}$  – предельное значение нормальных сжимающих напряжений;  $q$  – предельное значение девиатора напряжений;  $q$  – величина средних напряжений при достижении предела прочности.

Таблица 2

### Механические свойства протерозойской глины в направлении параллельно слоистости

№ образца	Боковое давление, МПа	Механические свойства					
		$E_0$ , МПа	$E_{50}$ , МПа	$E_q$ , МПа	$E_y$ , МПа	$\nu_0$	$\sigma_{ск}$ , МПа
11	0.5	1460	1120	820	1770	0.07	6.5
16	0.5	1180	1070	750	1550	0.17	5.7
13	2.5	1440	1150	620	2160	—	9.5
14	2.5	1530	1300	830	2180	—	10.7
3	5.0	1500	1380	890	2332	0.12	15.5
6	5.0	—	—	—	—	—	—
7	5.0	1800	1630	1300	—	—	15.7
							10.7

Исследования деформирования протерозойской глины в условиях одноосного и объемного сжатия, проведенные по методике, приведенной в работе [2] позволили установить влияния минимальных главных напряжений на ее деформационные свойства. Так увеличение минимальных главных напряжений приводит к увеличению значения модуля деформации и модуля упругости протерозойской глины. При этом данный эффект отмечен как на начальной стадии деформирования протерозойской глины, так и с ростом величины достигнутой деформации.

Авторы исследований [1] отметили, что в процессе испытания образцов протерозойской глины, их разрушение зачастую происходило в виде раскалывания образца за счет формирования продольных поверхностей разрыва. Однако, формирование продольных поверхностей разрыва не приводило к достижению предела прочности породы и дальнейшее рост напряжений внутри образца продолжался. Это эффект хорошо виден по росту поперечных деформаций, скорость которых начиная с определенного момента резко возрастала и увеличивался объем образца. Такое резкое увеличение объема нельзя объяснить только дилатационными процессами, а в основном это связано с формированием трещин отрыва и разделения образца на части.

На рисунке 1 приведена экспериментальная зависимость для протерозойской глины параллельно и перпендикулярно слоистости. Для других испытанных типов характер деформирования аналогичный.

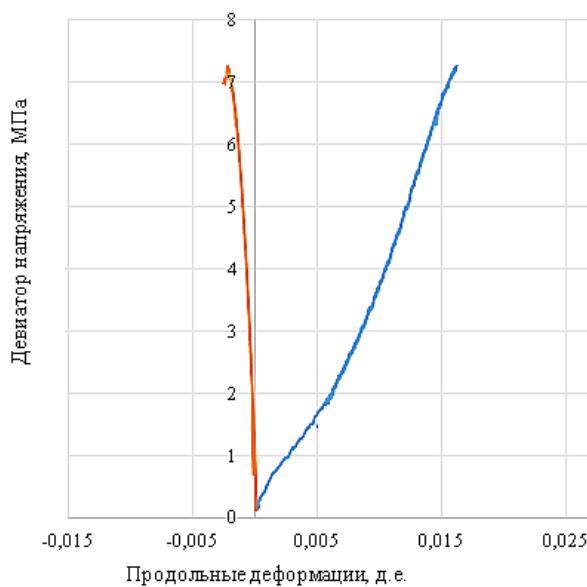


Рис. 1. Экспериментальная зависимость между напряжениями и деформациями протерозойской глины

В результате обработки экспериментальных данных получены зависимости между наибольшим сдвигом и наибольшим касательным напряжением, представленные на рисунке 2. Рассмотрены образцы параллельно и перпендикулярно слоистости при разных величинах минимальных главных напряжений. Представления выборка демонстрирует наиболее характерную

форму зависимости. Следует отметить, что при одноосном режиме нагружения, при котором отсутствуют минимальные напряжения и величина нелинейности в зоне малых деформаций максимальна – зависимость будет обладать совершенно иной формой. Данную зависимость автор предполагает рассмотреть в последующих работах.

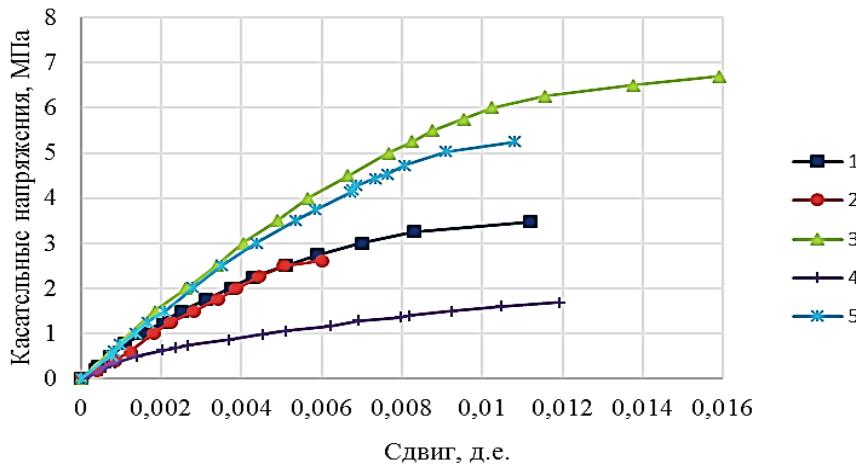


Рис. 2. Экспериментальные зависимости между наибольшим сдвигом и наибольшим касательным напряжением. 1 – образец 13, 2 – образец 16, 3 – образец 10, 4 – образец 2, 5 – образец 3.

Рассмотрим получившую широкое распространение модель поведения среды, которая позволяет описать поведение грунта в диапазоне от весьма малых до малых деформаций. Это модель Рамберга-Огуда, которая предлагает описывать зависимость между сдвигом и касательными напряжениями используя три переменные, получаемые экспериментально.

$$\gamma = \frac{\tau}{G_0} \left( 1 + a \left| \frac{\tau}{\tau_y} \right|^{r-1} \right),$$

где  $G_0$  – начальный модуль сдвига породы,  $\gamma$  – сдвиговая деформация,  $\tau$  – максимальные касательные напряжения,  $\tau_y$  – задаваемые касательные напряжения,  $a$ ,  $r$  – постоянные определяемые из экспериментальных данных, в зависимости от материала.

Данная модель и обратная ей модель Хардина и Дреневича [6], отражающая зависимость  $\tau$  от  $\gamma$ , нашли широкое практическое применение в программных

комплексах для численного моделирования геомеханических процессов и дают намного более достоверный прогноз напряженно деформируемого состояния, чем билинейная модель, которая в основном используется при проектировании (рисунок 3).

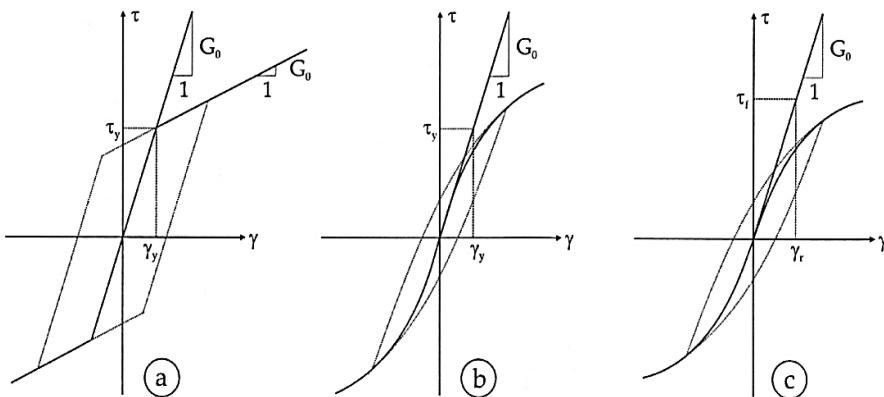


Рис. 3. Виды моделей. а – билинейная, б – Рамберга-Осгуда, с – Хардина-Дреневича

Для рассмотренных образцов были получены коэффициенты  $a$ ,  $r$ , сведенные в таблицу 3.

Таблица 3  
Механические свойства протерозойской глины в направлении параллельно слоистости

№ образца	Направление приложения нагрузки	Боковое давление, МПа	$a$	$r$
13	Параллельно	2,5	1,95	2,70
16	Параллельно	0,5	0,4	2,20
10	Перпендикулярно	10	0,015	11
2	Параллельно	0,5	1,54	3,00
3	Параллельно	5	1,1	2,7
Среднее значение:			1,00	4,32

### Выходы

Сейчас все чаще в практике проектирования подземных сооружений используются численные методы анализа, они позволяют не только выполнять рас-

четы с учетом пространственного расположения подземных сооружений и учетом последовательности их строительства, но и учитывать различные особенности механического поведения пород, которые до этого не учитывались вовсе. В данной статье, по результатам проведенных лабораторных испытаний, были получены коэффициенты  $a$ ,  $r$  для слабых аргилитоподобных протерозойских глин города Санкт-Петербурга. Данные коэффициенты применимы для описания поведения глин при численном моделировании.

### ***Список литературы***

1. Протосеня А.Г., Каравеев М.А., Петров Д.Н., Поспехов Г.Б. Результаты определения физико-механических свойств протерозойских глин для выполнения геотехнических расчетов при разработке рабочей документации по объекту: «Строительство Фрунзенского радиуса за станцию «Международная» до станции «Южная», включая проектирование (стадия РД). «Горный» Университет / А.Г. Протосеня, М.А. Каравеев, Д.Н. Петров, Г.Б. Поспехов. – 2015. – С. 60.
2. Atkinson J.H., Sallfors G. Experemental determination of soil properties. In Proc. 10th ECSMFE. General report to Session 1. – Florence, 1991. – Vol. 3. – P. 915–956.
3. Tshibangu J.-P., Descamps F. The GPMs (UMons-Belgium) device for investigating the mechanical behavior pf meterials subjected to true triaxial compression. Geomechanics Research Series. – Volume 4. True triaxial testing of rocks. Editors: CRC Press/Balkema, Taylor&Francis Group. – 2012. – P. 51–60.
4. True triaxial testing of rocks. Editors: CRC Press/Balkema, Taylor&Francis Group. – 2012. – P. 51–60.
5. Mogi K. Haw I developed a true triaxial rock testing mashine. Geomechanics Research Series Volume 4. True triaxial testing of rocks. Editors: CRC Press/Balkema, Taylor&Francis Group. – 2012. – P. 139–157.
6. Hardin B.O., Drnevich V.P. Shear modulus and damping in soils: Design equations and curves. Proc. ASCE: Journal of Soil Mechanics and Foundations Division. – 1972. – №98 (SM7). – P. 667–692.