

УДК 624.154.1

А.Б. Пономарев, Е.Н. Сычкина
ФГБОУ ВПО ПНИПУ

СОПОСТАВЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АРГИЛЛИТОВ РАННЕПЕРМСКОГО ВОЗРАСТА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПОЛЕВЫХ И ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Статья посвящена проблеме выбора параметров механических свойств аргиллитов при проектировании фундаментов в г. Перми. Авторами проанализированы механические характеристики аргиллитов, полученные различными методами. Основное внимание уделено результатам статического зондирования, прессиометрических испытаний и лабораторных исследований.

Ключевые слова: аргиллит, модуль деформации, компрессионный модуль деформации, удельное сцепление, угол внутреннего трения.

Актуальность исследования. В связи с инвестиционной привлекательностью в центральных районах г. Перми активно ведется высотное строительство, при этом возрастают нагрузки на грунтовое основание и увеличивается глубина заложения фундаментов. В настоящее время существует целый ряд научных работ А.Б. Пономарева, Д.Н. Сурсанова, А.В. Захарова [1], посвященных строительству в инженерно-геологических условиях г. Перми, однако вопросы выбора прочностных и деформационных характеристик при проектировании оснований, сложенных пермскими аргиллитами, освещены крайне слабо.

Объектом данного исследования являлись аргиллиты. Аргиллит представляет собой полускальный грунт глинистого состава, образовавшийся в результате окаменения дисперсных глинистых грунтов при уплотнении, дегидратации и кристаллизации коллоидов [2]. Аргиллиты легко выветриваются, обладают значительной влагоемкостью и способностью размягчаться в воде. Затронутые выветриванием аргиллиты характеризуются повышенной пористостью, низкими значениями показателей механических свойств. В рамках данного исследования рассматривались аргиллиты шешминского горизонта уфимского яруса нижнего отдела пермской системы, которые в пределах г. Перми используются в качестве основания для фундаментов глубокого заложения. Предметом исследования являлись их механические свойства: модуль деформации E (МПа), удельное сцепление c (МПа), угол внутреннего трения φ (град).

Ряд авторов отмечает, что прочностные и деформативные свойства любого грунта определяются практически одними и теми же факторами – пористостью, влажностью, структурой, минеральным составом и т.д. Весь комплекс таких факторов отражает условия и историю формирования грунта [3]. Результаты экспериментальных исследований, проведенных Пономаревым А.Б., Сычкиной Е.Н. [4], сопоставленные с архивными данными ВерхнекамГИСИЗ [5], свидетельствуют том, что физические свойства аргиллитов шешминского горизонта пермской системы, отобранных в пределах различных строительных площадок города Перми, существенно не отличаются. Также было отмечено закономерное изменение физических свойств аргиллитов с глубиной: возрастание значений плотности, уменьшение коэффициента пористости. Данные наблюдения позволили авторам выдвинуть предположение, что механические свойства аргиллитов, имеющих одинаковый генезис и геологический возраст, в пределах города Перми также не должны существенно отличаться, и изменение механических

свойств будет, главным образом, связано с изменением глубины залегания аргиллитов. Поэтому целью данного исследования являлось сопоставление значений механических свойств аргиллитов, полученных различными методами на различных экспериментальных площадках г. Перми. Для достижения поставленной цели в ходе исследования были решены следующие задачи:

1. Дана инженерно-геологическая характеристика двух экспериментальных площадок г. Перми, где проводились исследования механических свойств аргиллитов;
2. На основании действующих нормативных документов разработана методика определения прочностных и деформативных свойств аргиллитов, а также методика обработки полученных результатов;
3. Выполнена серия экспериментов по определению механических свойств аргиллитов в лабораторных и полевых условиях;
4. Проанализированы и сопоставлены полученные результаты;
5. Даны выводы и рекомендации по оценке механических свойств кровли аргиллитов г.Перми.

Инженерно-геологическая характеристика экспериментальных площадок г. Перми.

1. Статическое зондирование и бурение скважин с отбором проб грунта для лабораторных исследований проводилось на экспериментальной площадке в пределах делювиального склона IV левобережной надпойменной террасы долины р. Камы. В административном отношении участок исследований расположен северо-восточнее пересечения улиц Нефтяников и Комбайнеров Индустриального района г. Перми. На исследуемом участке грунты шешминского горизонта уфимского яруса пермской системы перекрыты чехлом четвертичных аллювиальных глинистых грунтов. С поверхности повсеместно залегают техногенные насыпные грунты. В пределах указанной площадки аргиллиты залегают на глубинах 9,6-13,0 м. Аргиллиты сильнотрещиноватые, обводненные по трещинам, неравномерно выветрелые. Физические характеристики аргиллита приводятся по данным ВерхнекамГИСИЗ [5] в таблице 1.

Табл. 1. Показатели физических свойств аргиллита

Характеристики грунта	Единицы измерения	Среднее значение
Природная влажность	%	18,60
Плотность	г/см ³	2,05
Плотность частиц грунта	г/см ³	2,75
Плотность сухого грунта	г/см ³	1,73
Пористость	%	37,22
Коэффициент пористости	д. ед.	0,60
Коэффициент водонасыщения	д. ед.	0,86

По архивным данным на исследуемом участке были зафиксированы подземные воды типа верховодка, а также трещинно-грунтовые воды в кровле аргиллитов и порово-грунтовые воды в четвертичных отложениях.

2. Прессиометрические испытания выполнялись на второй экспериментальной площадке, расположенной в пределах II правобережной надпойменной террасы р. Камы. В административном отношении участок исследований расположен по ул. Кировградской г. Перми. На исследуемом участке аргиллиты пермской системы перекрыты чехлом четвертичных аллювиальных песчаных грунтов. Аргиллиты выветрелые, обводненные по трещинам, были встречены на глубине 16,0 м. Грунтовые воды в пределах изучаемой площадки характеризуются как трещинно-грунтовые в кровле аргиллитов и порово-грунтовые в аллювиальных грунтах.

Методика полевых исследований. Метод статического зондирования. Статическое зондирование проводилось в 4 точках мобильной малогабаритной установкой LWC-100XS, фирмы “Geomil Equipment”, с механической системой вдавливания зонда, в соответствии с ГОСТ 19912 «Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием». Тип применяемого зонда - II. Параметры зонда следующие: диаметр основания конуса – 35,7 мм, угол при вершине конуса – 60 градусов, площадь конуса 10 см², наружный диаметр штанг – 36 мм, длина штанги – 1 м. Вдавливание зонда производилось с одновременным измерением сопротивления грунта под наконечником зонда (q_c) и сопротивления грунта на боковой поверхности зонда (f_c) с автоматизированной фиксацией контролируемых параметров. Максимальная глубина проведенных испытаний составила 14,6 м.

Расчет механических характеристик аргиллитов производился согласно выражениям, приведенным Захаровым М.С. [6]:

- модуль деформации, МПа:

$$E = 7 \cdot q_c \quad (1)$$

где q_c – сопротивление грунта под наконечником зонда (лобовое сопротивление конуса)

- угол внутреннего трения, град:

$$\varphi = 18,571 \cdot q_c^{0,207} \quad (2)$$

- удельное сцепление, кПа:

$$c = 6 \cdot q_c + 11 \quad (3)$$

Далее результаты полевых испытаний были обработаны с использованием методов математической статистики согласно ГОСТ 20522 «Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний».

Прессиометрический метод. Испытания производились в скважине радиальным электровоздушным прессиометром ПЭВ-89МК (Рис.3), в соответствии с ГОСТ 20276-99 «Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости». Опыты проводились по быстрой схеме в 2 точках. Глубина прессиометрических испытаний составила 16,5 м и 17,7 м. Обработка полученной информации производилась при помощи программы PRESSPW.MA.v1.01.

Модуль деформации грунта E , МПа, вычислялся для линейного участка графика $\Delta r=f(p)$ по формуле

$$E = K_r r_0 \frac{\Delta p}{\Delta r}, \quad (4)$$

где K_r —корректирующий коэффициент; r_0 — радиус скважины, равный $r_{pr} + \Delta r_0$; r_{pr} — радиус прессиометра, см; r_0 — приращение радиуса прессиометра, соответствующее p_0 , см; Δp — приращение давления на стенку скважины между двумя точками, взятыми на осредняющей прямой, МПа; Δr — приращение перемещения стенки скважины (по радиусу), соответствующее Δp , см.

По результатам двух прессиометрических опытов было определено среднее значение модуля деформации.

Методика лабораторных исследований.

Компрессионные испытания. Лабораторные испытания полускальных грунтов проводились в компрессионном приборе ГТ 1.1.4-01. Нагружение образцов производилось ступенями от 25 кПа до 400 кПа, с учетом бытового давления и предполагаемого давления от сооружения (до 300 кПа), согласно ГОСТ 12248-96 «Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости».

Испытания образцов проводились по двум схемам: при естественной влажности ($Sr < 1,0$) и при полном водонасыщении ($Sr > 0,9$). По каждой схеме было проведено 6 опытов.

Модуль деформации (E_k) по данным компрессионных испытаний для глинистых грунтов рассчитан в интервале нагрузок 0,2-0,4 МПа, по формуле:

$$E_k = \frac{1 - e_i}{m_0} \cdot \beta, \quad (5)$$

где e_i – значение коэффициента пористости, соответствующее нагрузкам 0,2; 0,4 МПа; m_0 – коэффициент сжимаемости, соответствующий интервалу давления 0,2-0,4 МПа; β – коэффициент, учитывающий отсутствие поперечного расширения грунта в компрессионном приборе. При расчете компрессионного модуля деформации коэффициент β принимался равным 1.

Полученные результаты были обработаны с использованием методов математической статистики согласно ГОСТ 20522 «Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний».

Метод одноплоскостного среза. Испытания по определению прочностных свойств образцов аргиллита проводились методом одноплоскостного среза, согласно ГОСТ «Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости». Опыты проводились по консолидировано-недренированной и консолидировано-дренированной схеме. Водонасыщение образцов аргиллитов производилось в вакуумной камере ГТ 4.0.6. Значения нормальных давлений в опытах составляли 300 кПа, 400 кПа, 500 кПа, 600 кПа (с учетом бытового давления). Общее количество опытов на срез – 14.

Угол внутреннего трения φ и удельное сцепление c , кПа, вычислялись по формулам:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{n \sum \tau_i \sigma_i - \sum \tau_i \sum \sigma_i}{n \sum (\sigma_i)^2 - (\sum \sigma_i)^2}; \quad (6)$$

$$c = \frac{\sum \tau_i \sum \sigma_i^2 - \sum \sigma_i \sum \tau_i \sigma_i}{n \sum (\sigma_i)^2 - (\sum \sigma_i)^2}, \quad (7)$$

где τ_i – опытные значения сопротивления срезу (кПа), определенные при различных значениях вертикального напряжения σ_i , кПа, n – число испытаний.

Полученные результаты.

Параметры механических свойств аргиллитов по результатам статического зондирования. По данным статического зондирования на экспериментальной площадке были получены следующие результаты:

- значения модуля деформации аргиллитов изменялись от 9,73 МПа до 78,11 МПа. Наблюдалось возрастание значений модуля деформации аргиллита с увеличением глубины погружения зонда. Нормативное значение модуля деформации составило 39,36 МПа (см. таблицу 2).

- значения угла внутреннего трения изменялись от 18,69° до 30,60°. Наименьшие значения были зафиксированы для кровли аргиллитов. С увеличением глубины залегания аргиллита отмечалось возрастание значений угла внутреннего трения. Нормативное значение угла внутреннего трения составило 25,74° (см. таблицу 2).

- значения удельного сцепления изменялись от 22,69 кПа до 77,95 кПа. Наименьшие значения также были зафиксированы для кровли аргиллитов. С увеличением глубины залегания аргиллита отмечалось возрастание значений удельного сцепления. Нормативное значение удельного сцепления составило 45,38 кПа (см. таблицу 2).

Полевые испытания статическим зондированием показали завышенные значения E , c , φ по отношению к нормативным значениям E , c , φ , приведенным в СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений».

Параметры механических свойств аргиллитов по результатам прессиометрических испытаний. В кровле толщи аргиллитов (глубина испытания 16,5 м) значения модуля деформации составили 34,6 МПа. При испытании, проведенном на глубине 17,7 м, значения модуля деформации составили 78,2 МПа. Таким образом, для кровли аргиллитов наблюдаются пониженные значения модуля деформации. Вероятно, это связано с тем, что кровля аргиллитов – это наиболее выветрелая, трещиноватая и обводненная часть толщи аргиллитов. В целом можно отметить, что результаты прессиометрических опытов показывают схожие величины модуля деформации с результатами статического зондирования установкой, оснащенной зондом II типа (см. таблицу 2).

Параметры механических свойств аргиллитов по результатам лабораторных испытаний. Нормативное значение компрессионного модуля деформации в интервале давлений 0,2 - 0,4 МПа без водонасыщения составило 5,93 МПа. Нормативное значение компрессионного модуля деформации в интервале давлений 0,2 - 0,4 МПа при полном водонасыщении образца составило 5,75 МПа. Таким образом, наблюдалось снижение значения компрессионного модуля при водонасыщении.

Табл. 2. Прочностные и деформативные свойства аргиллитов, полученные на экспериментальных площадках г. Перми

Обозначение характеристик грунта	Результаты, полученные различными методами				Нормативные значения, согласно СП 22.13330.2011
	Прессиометрические испытания	Статическое зондирование	Лабораторные опыты		
			Без водонасыщения	В водонасыщенном состоянии	
C , кПа	-	45,4	100,6	212,7	44
φ , град.	-	25,7	24,3	7,1	22,5
E , МПа	56,4	39,4	5,9	5,8	19

Нормативные значения угла внутреннего трения и удельного сцепления приведены в таблице 3. Водонасыщение вызвало увеличение значений удельного сцепления более чем в 2 раза, в то время как значения угла внутреннего трения снизились в 3 раза.

В целом, результаты лабораторных испытаний пермских аргиллитов оказались заниженными по отношению к результатам полевых испытаний и к нормативным значениям, приведенным в СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений», за исключением значений удельного сцепления грунта.

Параметры механических свойств аргиллитов, приведенные в СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений». Нормативные значения удельного сцепления C_n , кПа, угла внутреннего трения φ_n , град., и модуля деформации E , МПа, элювиальных глинистых грунтов осадочных аргиллито-алевролитовых пород были приняты для коэффициента пористости $e = 0,6$ и приведены в таблице 2. Можно отметить, что значения прочностных характеристик, приведенные в СП, сопоставимы с результатами статического зондирования в кровле аргиллитов г.Перми. Однако нормативные значения модуля деформации занижены в 2 раза по сравнению с результатами статического зондирования.

Выводы по статье. Проведенное исследование показало существенное влияние выбора метода испытаний на получаемые значения прочностных и деформативных свойств аргиллитов.

1. Максимальные значения модуля деформации были зафиксированы при испытаниях радиальным прессиометром ($E=56,4$ МПа) и установкой статического зондирования ($E=39,4$ МПа). По мнению авторов, использование характеристик, получаемых в результате полевых испытаний статическим зондированием ($E = 39,4$ МПа, $c = 45,38$ кПа, $\varphi = 25,74^\circ$), позволит принять более экономичные решения при проектировании фундаментов, однако в этом случае мы не учитываем возможную активизацию такого опасного геологического процесса, как подтопление подземными водами. Результаты исследований, выполненных Пономаревым А.Б., Сычкиной Е.Н., Ощепковой И.А., Акбуляковым М.А. [7], свидетельствуют о том, что аргиллиты г. Перми крайне неустойчивы к воздействию воды, и согласно ГОСТ 25100-95 «Грунты. Классификация» являются грунтами низкой прочности, обладающими высокой степенью размягчаемости в воде.

2. Значения прочностных характеристик, приведенные в СП, сопоставимы с результатами статического зондирования в кровле аргиллитов ($E = 19$ МПа, $c = 44$ кПа, $\varphi = 22,5^\circ$). Однако значения модуля деформации оказываются заниженными в 2 раза по сравнению с результатами статического зондирования.

3. Использование в расчетах значений прочностных и деформационных характеристик грунтов, полученных в результате лабораторных опытов водонасыщенных образцов ($E_k=5,8$ МПа, $c=212,7$, $\varphi=7,1^\circ$), позволит исключить непредвиденные осадки зданий и сооружений, опирающихся на данные грунты. Своевременный учет специфики поведения аргиллитов при водонасыщении на стадии инженерно-геологических изысканий, разработки проектной и рабочей документации позволит исключить затраты на специальные мероприятия по восстановлению прочностных и деформационных свойств оснований фундаментов. Однако в этом случае мы принимаем менее экономичные решения при проектировании фундаментов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пономарев А.Б. К вопросу использования верхнепермских отложений в качестве грунтовых оснований / А. Б. Пономарев, А. В. Захаров, Д. Н. Сурсанов // Вестник ПГТУ. Урбанистика. 2011 . № 1 . С. 74-80.
2. Трофимов В.Т., Королев В.А., Вознесенский Е.А., Зиангиров Р.С. Грунтоведение. 6-е изд., переработ. и доп. М.: Изд-во МГУ, 2005. 1024 с.
3. Рыжков И.Б., Исаев О.Н. Статическое зондирование грунтов. Монография. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2010. 496 с.
4. Ощепкова И.А., Сычкина Е.Н. Анализ влияния степени водонасыщенности на деформационные характеристики полускальных грунтов. Вестник ПНИПУ Урбанистика №2, г. Пермь, изд-во ПНИПУ, 2012 г. с. 8-16.
5. Отчет об инженерно-геологических изысканиях на объекте «Жилой комплекс с помещениями общественного назначения, многофункциональным зданием по ул. Мира, 41 в Индустриальном районе г. Перми» (2 очередь). Договор №1108/1, ВерхнекамГИСИЗ. Пермь. 2012 г.
6. Захаров М.С. Статическое зондирование в инженерных изысканиях: учеб. пособие / СПб. гос. архит.-строит. ун-т. СПб., 2007. 72 с.
7. Акбуляков М.А., Сычкина Е.Н., Пономарев А.Б. Методика определения предела прочности на одноосное сжатие полускальных грунтов (на примере аргиллитов г.

Перми). Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении: материалы всеросс. научно-техн. конференции, г. Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2012. 532 с.

© Пономарев А.Б., Сычкина Е.Н. 2012