

Оригинальная статья / Original article

УДК 624.131.439

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2019-42-1-41-54>

Сравнительный анализ методов определения прочностных свойств крупнообломочных грунтов Непско-Ботубинской антеклизы

© Н.Л. Кузнецов, И.И. Верхозин

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

Резюме: В статье предлагается рассмотреть сравнение прямого и расчетного методов определения прочности на примере крупнообломочных грунтов, характерных для южных и центральных районов Непско-Ботубинской антеклизы, с территорией которой связана активная разработка нефтегазоконденсатных месторождений. В данной работе приведены основные методы определения прочности крупнообломочных грунтов и факторы, определяющие характеристики прочности. Для оценки прочности крупнообломочного грунта использовались прямой – метод прямого сдвига (одноплоскостной срез) по ГОСТ 20276-2012 «Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости» – и расчетный метод – «Методика оценки прочности и сжимаемости крупнообломочных грунтов с пылеватым и глинистым заполнителем и пылеватых и глинистых грунтов с крупнообломочными включениями», разработанная Дальневосточным научно-исследовательским, проектно-конструкторским и технологическим институтом по строительству (ДальНИИС). Испытания проводились для двух разновидностей элювиально-делювиального грунта: проба А – щебенистый грунт, проба В – щебенистый суглинок. В результате для типовых элювиально-делювиальных грунтов, распространенных в рассматриваемом регионе, прямым и расчетным методами получены показатели сцепления и угла внутреннего трения. Проведено сравнение полученных результатов. Для щебенистых грунтов расхождение значений сцепления и угла внутреннего трения, полученных прямым и расчетным методами, существеннее, чем для щебенистых суглинков. Приведены данные исследований характеристик прецизионности метода плоского (прямого) среза. Значение сцепления и угла внутреннего трения, вычисленные по результатам прямого метода, соответствуют теоретическим представлениям о природе прочности грунта. Расхождения результатов прямого и расчетного методов определения прочности сопоставимы с характеристиками воспроизводимости прямого метода. Методика оценки прочности и сжимаемости крупнообломочных грунтов с пылеватым и глинистым заполнителем, разработанная ДальНИИС, на данный момент является основной в нашей стране для получения параметров прочности, которые используются для окончательных расчетов прочности массивов крупнообломочных грунтов оснований зданий и сооружений II и III классов.

Ключевые слова: Непско-Ботубинская антеклиза, крупнообломочные грунты, характеристики прочности грунта

Информация о статье: Дата поступления 10 декабря 2018 г.; дата принятия к печати 20 февраля 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 марта 2019 г.

Для цитирования: Кузнецов Н.Л., Верхозин И.И. Сравнительный анализ методов определения прочностных свойств крупнообломочных грунтов Непско-Ботубинской антеклизы. *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых*. 2019. Т. 42, № 1. С. 41–54. DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-1-41-54.

Comparative analysis of determination methods of Nepa-Botuoba antecline coarse soil strength properties

© Nikita L. Kuznetsov, Ivan I. Verkhosin

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

ABSTRACT: The article compares direct and computational methods of strength determination on example of coarse soil characteristic of the southern and central areas of the Nepa-Botuoba antecline, the territory of which is

associated with the active development of oil and gas condensate fields. The paper presents the main methods for coarse soil strength estimation as well as the factors that determine strength characteristics. The method of shear strength (in-plane shear) according to GOST 20276-2012 "Soils. Field methods for determining strength and compressibility characteristics" and the computational method "Methods for assessing the strength and compressibility of coarse clastic soils with silt and clay aggregate and silty and loamy soils with coarse grain inclusions" developed at the Far Eastern Research, Design and Technological Construction Institute (FERDTCI) is used to assess the strength of coarse soil. Two types of eluvial-deluvial soil were tested: sample A – silty coarse soil, sample B – coarse silty loam. Using direct and computational methods the indicators of cohesion and internal friction angle are obtained for typical eluvial-deluvial soils distributed in the region under consideration. Comparison is given to the results received. Silty coarse soils are characterized by greater divergence in the values of cohesion and internal friction angle obtained by direct and computational methods than coarse silty loams. The article provides the data on the study of the precision characteristics of the direct shear test method. The value of cohesion and internal friction angle calculated by the direct shear test correspond to the theoretical concepts of the nature of soil strength. The differences between the results of the direct and computational methods of strength determination are comparable with the reproducibility characteristics of the direct method. The methods of assessing the strength and compressibility of coarse clastic soils with silt and clay aggregate developed at FERDTCI are today the main ones in our country for obtaining the strength parameters used for final calculations of strength of coarse clastic soil massifs in the foundation of buildings and structures of II and III classes.

Keywords: Nepa-Botuoba anticline, coarse soil, strength characteristics of soil

Information about the article: Received December 10, 2018; accepted for publication February 20, 2019; available online March 28, 2019.

For citation: Kuznetsova N.L., Verhozin I.I. Comparative analysis of determination methods of Nepa-Botuoba anticline coarse soil strength properties. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektzii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopayemykh* = *Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits*, 2019, vol. 42, no. 1, pp. 41–54. (In Russ.) DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-1-41-54.

Введение

Развитие и освоение нефтегазоконденсатных месторождений Восточной Сибири предопределяет активное строительство комплекса сооружений производственной инфраструктуры. Для добычи, подготовки, транспортировки и переработки нефти и газа строятся инженерные сооружения с различными конструктивными и эксплуатационными особенностями. К ним относятся дожимные насосные и компрессорные станции, установки подготовки нефти и газа, энергоустановки, резервуары хранения сырья, трубопроводы, линии электропередач и другие объекты, без которых не сможет эффективно функционировать современный промысел углеводородного сырья. Надежность, долговечность, а также безаварийная работа любых сооружений во многом зависят не только от условий их эксплуатации, но и от качества строительных работ и проекти-

рования, которые базируются на инженерно-геологической информации. Материалы инженерных изысканий (инженерно-геологические разрезы, показатели физико-механических свойств грунтов площадок строительства, уровень залегания грунтовых вод) позволяют подобрать для проектируемых сооружений оптимальные виды и материалы фундаментов, глубину их заложения и конструктивные особенности. Качество инженерно-геологических изысканий определяется рационально подобранными видами и объемами инженерно-геологических работ, опробованием, оптимальным сочетанием методов полевых и лабораторных исследований и методиками их выполнения. В данной работе предлагается рассмотреть сравнение прямого и расчетного методов определения прочности крупнообломочных грунтов, характерных для южных и центральных районов Непско-Ботубинской антеклизы,

на которой расположено более двух десятков нефтегазоконденсатных месторождений [1]. Административно Непско-Ботуобинская антеклиза расположена на севере Иркутской области и в южной части республики Саха (Якутия), ее геологическое строение и строение прилегающих геологических структур описано в ряде опубликованных работ [2–4 и др.].

Крупнообломочные грунты являются одними из наиболее часто встречающихся дисперсных образований на территории Непско-Ботуобинской антеклизы. К самому распространенному генетическому типу крупнообломочных грунтов относятся элювиально-делювиальные и элювиальные щебенистые, реже дресвяные грунты и щебенистые суглинки, которые в виде маломощных покровов развиты практически на всей рассматриваемой территории. Их образование связано главным образом с процессами физического выветривания коренных пород. В пределах кор выветривания

зона перехода сильнотрещиноватых материнских пород в элювиально-делювиальные крупнообломочные грунты, как правило, плохо идентифицируется (рис. 1, а). В пределах пологих водоразделов мощность данных образований составляет первые метры, на бортах долин рек и ручьев достигает 3–8 м.

Состав и свойства элювиально-делювиальных грунтов и щебенистых суглинков главным образом определяются характеристиками подстилающих коренных пород, а также крутизной склона, где формируются рассматриваемые отложения. Слаболитифицированные алевриты и аргиллиты Чайкинской свиты Юрского возраста в результате процессов выветривания переходят в щебенистые суглинки (рис. 1, б), прочные песчаники Усть-Кутской свиты нижнего Ордовика на первых этапах выветривания разрушаются до глыбового грунта с глинистым заполнителем.



a



b

Рис. 1. Зона элювиально-делювиального грунта:

а – в разрезе пород Мангазейского яруса среднего и верхнего ордовика Макаровской свиты;

б – в разрезе пород юрского возраста Чайкинской свиты

Fig. 1. Zone of the eluvial-deluvial soil:

а – in the section of Mangaseian age rocks of the middle and upper Ordovician of the Makarovskaya suite;

б – in the section of Jurassic age rocks of Chaikinskaya suite

Методы исследования

Прочность является одной из важнейших механических характеристик грунтов и горных пород, участвующих в расчете устойчивости грунтовых массивов. Прочность – это свойство материала сопротивляться разрушению под действием напряжений, возникающих под воздействием внешних сил. Она определяется как максимальное усилие, при котором происходит разрушение материала. Общеизвестно, что для дисперсных грунтов эта характеристика зависит от сил сцепления, обусловленных водно-коллоидными и цементационными связями между частицами грунта и внутреннего трения, представляющего силы механического взаимодействия между частицами, которые возникают при приложении к объему грунта нормальных напряжений. Нормальными называются напряжения, перпендикулярные по своей направленности к разрушающей (касательной) нагрузке и вызванные напряжением грунтового массива от вышележащих толщ, сооружений и т. д. Прочность дисперсных грунтов описывается уравнением Кулона-Мора, которое имеет вид:

$$\tau = tg(\varphi)\sigma + c, \quad (1)$$

где τ – величина касательных напряжений; φ – угол внутреннего трения ($tg\varphi$ – коэффициент внутреннего трения); σ – величина нормальных напряжений; c – сцепление [2].

Прочность крупнообломочного грунта зависит от:

- гранулометрического (зернового) состава грунта;
- прочности обломков;
- степени окатанности обломков;
- степени глинистости;
- консистенции (показатель текучести) пылевато-глинистого заполнителя;
- плотности грунта [5, 6].

В отличие от других подвидов дисперсных грунтов, характеристики прочности которых определяются по результатам лабораторных исследований образцов малых размеров на стандартном испытательном оборудовании, определение прочности крупнообломочных грунтов производится на крупногабаритных образцах, размер которых должен в пять раз превышать максимальный размер обломков¹. Кроме того, отбор представительных образцов ненарушенного сложения крупнообломочных грунтов и грунтов с крупнообломочными включениями из горных выработок современными техническими средствами представляет весьма сложную задачу. Поэтому основными методами для определения прочности крупнообломочных грунтов являются [7, 8]:

– исследование сопротивления грунтов сдвигу в скважинах по методу вращательного среза [9];

– исследование сопротивления грунтов сдвигу методом выдавливания и раздавливания целиков грунта в горных выработках;

– метод плоского (прямого) сдвига для крупногабаритных образцов;

– испытание на прочность крупнообломочного грунта в условиях трехосного сжатия;

– испытания на сдвиг в скважине (Borehole Shear Tester), включающие внедрение в грунт двух противоположно расположенных штампов в стенке буровой скважины и их последующее выдергивание при помощи буровых штанг с использованием опорного устройства на поверхности грунта [10].

Кроме того, имеются научно обоснованные рекомендации по определению показателей прочности и деформируемости крупнообломочных грунтов по

¹ГОСТ 20276-2012. Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости. М.: Стандартинформ, 2013. 46 с. /

GOST 20276-2012. Soils. Field methods for determining strength and compressibility characteristics. Moscow: Standardinform Publ., 2013. 46 p.

их физическим характеристикам (гранулометрический состав, характеристика обломочного материала и заполнителя, плотность). Эти рекомендации основаны на исследованиях, проведенных в Дальневосточном научно-исследовательском, проектно-конструкторском и технологическом институте по строительству (ДальНИИС). Исследования были выполнены на модельных грунтах с использованием принципа стабилизации переменных на экспериментальных уровнях, и по их результатам установлено наличие весьма тесных связей физического эквивалента грунтов с их прочностными и деформационными параметрами. Также на сегодняшний день существуют более детальные исследования, характеризующие данные зависимости, например исследования влияния формы и размера крупнообломочного материала горных пород на характеристики их прочности, проведенные в Технологическом университете Тайюаня [11].

Ниже представлены результаты испытаний элювиально-делювиальных грунтов методом плоского (прямого) среза [12], а также сравнение этих результатов с параметрами прочности, полученными расчетным путем – с использованием «Методики оценки прочности и сжимаемости крупнообломочных грунтов с пылеватым и глинистым заполнителем и пылеватых и глинистых грунтов с крупнообломочными включениями», разработанной ДальНИИС. Нормативные характеристики грунтов, определяемые в соответствии с данной методикой, допускается использовать для предварительных и окончательных расчетов оснований зданий и сооружений II и III классов. На данный момент в практике инженерных изысканий в Российской Федерации данная методика является основной для получения характеристик прочности крупнообломочных грунтов.

Характеристики прочности определялись для валовых проб щебенистого

грунта с суглинистым заполнителем (проба А) и щебенистого суглинка (проба В). Описание исследуемого грунта представлено ниже.

1. Проба А. В естественном залегании исследуемый материал представляет собой элювиально-делювиальный щебенистый грунт красно-бурой окраски, бутовой текстуры с суглинистым заполнителем твердой консистенции до 30–35 %. Обломочный материал представлен аргиллитом и алевролитом низкой, реже пониженной прочности. Щебень имеет лещадную форму, преимущественный размер обломков составляет 40–60 мм. Физические характеристики валовой пробы грунта, использованной для испытаний, представлены в табл. 1. Кумулятивная кривая гранулометрического состава представлена на рис. 2. Коэффициент истираемости щебня составляет 0,33.

2. Проба В. В естественном залегании исследуемый материал представляет собой элювиально-делювиальный щебенистый суглинок твердой консистенции, фиолетово-серой окраски, бутовой, реже массивной текстуры. Обломочный материал представлен щебнем алевролита низкой прочности различных размеров, остроугольной, реже лещадной формы. Физические характеристики валовой пробы грунта, использованной для испытаний, представлены в табл. 1. Кумулятивная кривая гранулометрического состава представлена на рис. 2. Коэффициент истираемости щебня составляет 0,24.

Схожие по составу и свойствам элювиально-делювиальные крупнообломочные грунты имеют широкое распространение в пределах центральных и южных районов Непско-Ботуобинской антеклизы, слагая коры выветривания осадочных пород различного возраста.

Характеристики прочности для проб А и В опытным путем определялись по результатам среза подготовленного

Таблица 1

Физические характеристики исследуемого грунта

Table 1

Physical characteristics of the soil under investigation

Проба	W_L , %	W_P , %	I_p , %	$W_{общ}$, %	Плотность грунта, г/см ³			n , %	e , д.е.	S_r , д.е.
					P	P_d	P_s			
Проба А	18,2	11	7,2	7,4	2,1	1,96	2,7	27,58	0,381	0,525
Проба В	38,4	23,1	15,3	11,9	2,17	1,94	2,7	28,18	0,392	0,819

Примечание. W_L – влажность на границе текучести; W_P – влажность на границе раскатывания; I_p – число пластичности; $W_{общ}$ – природная влажность; P – природная плотность; P_d – плотность сухого грунта; P_s – плотность минеральной части грунта; n – пористость; e – коэффициент пористости; S_r – коэффициент водонасыщения.

Note. W_L – liquid limit; W_P – plasticity limit; I_p – plasticity index; $W_{общ}$ – natural moisture; P – natural soil density; P_d – dry soil density; P_s – soil solid part density; n – porosity; e – porosity ratio; S_r – water saturation ratio.

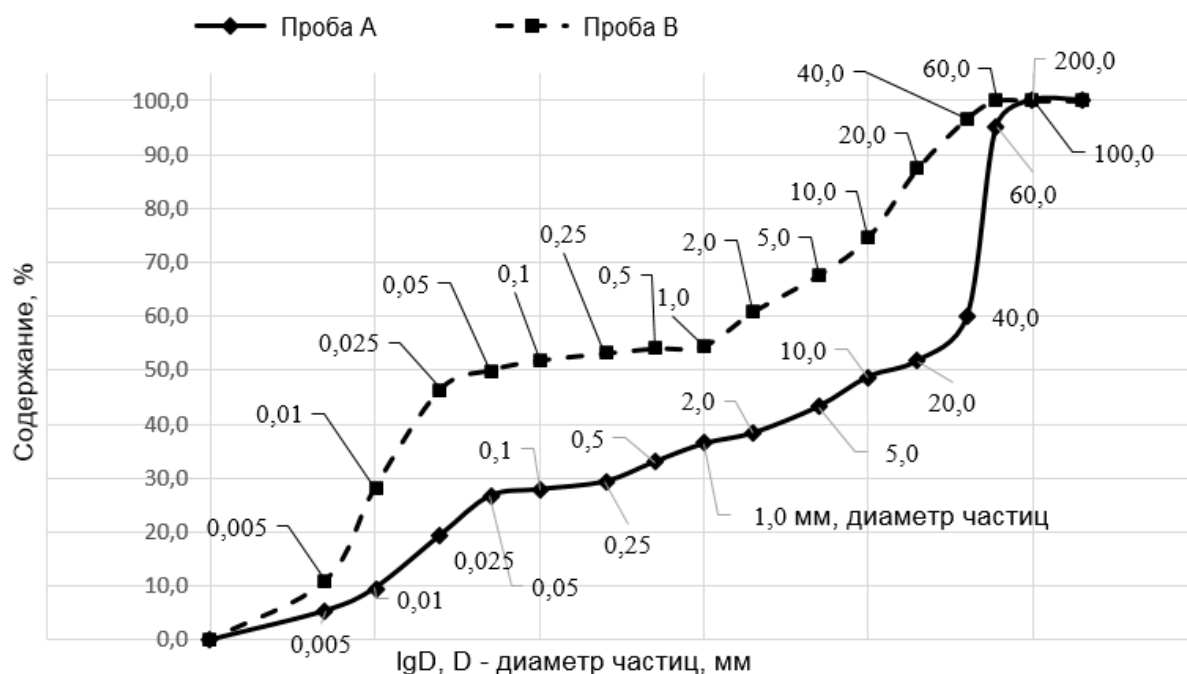


Рис. 2. Кумулятивные кривые гранулометрического состава
Fig. 2. Cumulative curves of granulometric composition

грунта по фиксированной плоскости касательной нагрузкой, при одновременном нагружении грунта нормальной уплотняющей нагрузкой. Испытания проводились в крупногабаритной срезной установке, обеспечивающей возможность передачи касательной и нормальной нагрузки на грунт с измерением деформаций уплотнения и среза.

Сопротивление грунта срезу (сдвигу) определялось как предельное

среднее касательное напряжение, при котором целик грунта срезается по фиксированной плоскости при заданном нормальном давлении. Для определения значений сцепления и угла внутреннего трения для проб А и В проводилась серия из восемнадцати испытаний подготовленных целиков грунта с заданными плотностью и природной влажностью при шести различных значениях нормального уплотняющего давления.

Опытные испытания проводились по схеме консолидировано-дренированного среза со статическим режимом нагружения в соответствии с методикой, приведенной в ГОСТ 20276-2012 «Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости».

В состав установки для испытания грунта на срез входит:

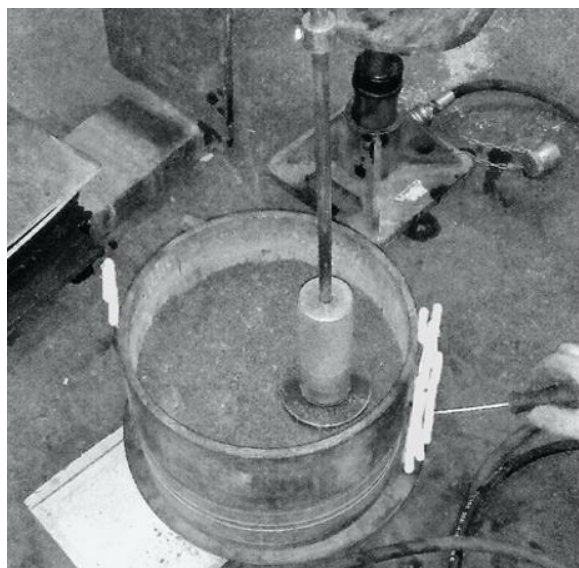
- срезная коробка диаметром 300 мм и высотой 220 мм;
- жесткий штамп диаметром 280 мм и высотой 15 мм;
- гидравлическая система создания и измерения срезной и нормальной нагрузки;
- система измерения деформаций уплотнения и деформаций среза (сдвига).

Формирование образцов для испытаний проводилось методом послойного

уплотнения грунта естественной влажности в срезной коробке прибора (рис 3, а), при этом щебень ориентировался в соответствии с природным сложением в массиве (рис. 3, б) и достигалась плотность, соответствующая природной.

Нормальное давление передавалось на подготовленный целик грунта последовательно ступенями Δp по 0,1 Мпа. Каждая ступень давления при предварительном уплотнении выдерживалась в течение 5 мин, конечная ступень выдерживалась до условной стабилизации деформации сжатия грунта.

После предварительного уплотнения в сдвиговой коробке срезного прибора устанавливался зазор в 3 см, по которому проходила плоскость среза, на подвижное кольцо обоймы устанавливались устройства для измерения деформаций среза.



а



б

Рис. 3. Элювиально-делювиальный грунт:

- а – формирование целика из валовой пробы в срезной коробке;
б – обнажение щебенистого элювиально-делювиального грунта
Усть-Кутский район, правый берег р. Лены

Fig. 3. Eluvial-deluvial soil:

- а – solid formation from the bulk sample in a shear box;
б – exposure of the silty coarse eluvial-deluvial soil
Ust-Kut region, right bank of the Lena river

Результаты

1. Прямой метод – метод одноплоскостного среза. Лабораторные испытания проводились при следующих значениях нормального уплотняющего давления: 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6 МПа. Предельные средние касательные напряжения для каждого значения нормальной уплотняющей нагрузки представлены в табл. 2, графическое отображение результатов испытаний представлено на рис. 4.

По результатам испытания получены следующие параметры прочности

элювиально-делювиальных грунтов:

– проба А: сцепление c – $0,0140 \pm 0,0099$ МПа; угол внутреннего трения φ – $36,0 \pm 2,1^\circ$;

– проба В: сцепление c – $0,0489 \pm 0,0104$ Мпа; угол внутреннего трения φ – $24,2 \pm 1,9^\circ$.

2. Расчетный метод – в соответствии с «Методикой оценки прочности и сжимаемости крупнообломочных грунтов с пылеватым и глинистым заполнителем и глинистых грунтов с крупнообломочными включениями». Метод ДальНИИС.

Таблица 2

Результаты серии испытаний элювиально-делювиального грунта на плоский (прямой) сдвиг

Table 2

Results of series of direct shear stress tests for eluvial-deluvial soil

Нормальное уплотняющее давление, при котором прикладывалась касательная нагрузка, МПа	Предельное среднее касательное напряжение, при котором произошел срез (сдвиг), МПа	
	Проба А	Проба В
0,1	0,07	0,09
	0,09	0,09
	0,095	0,095
	0,09	0,1
	0,08	0,105
0,2	0,15	0,136
		0,13
		0,14
		0,134
		0,148
		0,138
0,3	0,22	0,18
	0,235	0,19
	0,25	0,18
	0,235	0,196
		0,185
0,4	0,32	0,226
	0,31	0,222
0,5	0,34	–
	0,405	–
	0,37	–
	0,4	–
	0,36	–
0,6	0,44	–

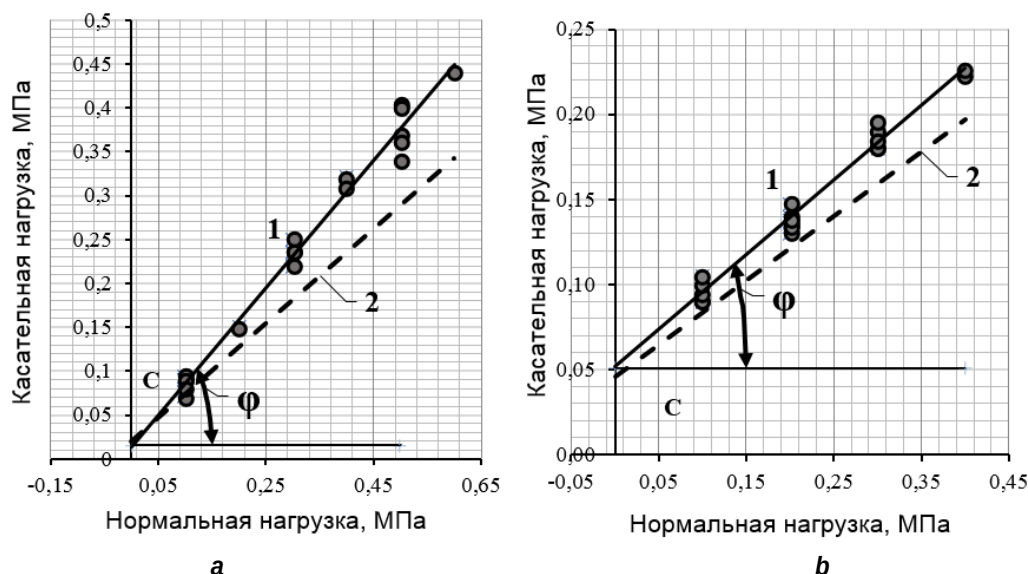


Рис. 4. Характеристики прочности элювиально-делювиального грунта

a – проба А; b – проба В

c – удельное сцепление; φ – угол внутреннего трения;

1 – прямой метод (сдвиг); 2 – расчетный метод

Fig. 4. Strength characteristics of eluvial-deluvial soil:

a – sample A; b – sample B

c – specific cohesion; φ – internal friction angle;

1 – direct method (shear); 2 – calculation method

Нормативные значения углов внутреннего трения крупнообломочных грунтов с пылеватым и глинистым заполнителем применительно к схеме консолидированного среза определяются по формуле (2):

$$\varphi = k_1 k_\varphi 46(0,3)^{M\tau}, \quad (2)$$

где k_1 – коэффициент на окатанность крупных обломков для угла внутреннего трения; k_φ – коэффициент, учитывающий прочность крупных обломков, зависящий от коэффициента истираемости; $M\tau$ – физический эквивалент грунта, определяемый по формуле (3):

$$M\tau = \frac{p_1}{p_2} I_p (1 + I_L), \quad (3)$$

где p_1 – содержание заполнителя в гранулометрическом составе грунта (частиц менее 2 мм), %; p_2 – содержание заполнителя в гранулометрическом составе грунта (крупных обломков – частиц крупнее 2 мм), %; I_p – число пластичности заполнителя, д.е.; I_L – показатель текучести заполнителя.

Нормативное значение удельного сцепления крупнообломочных грунтов с пылеватым и глинистым заполнителем применительно к схеме консолидированного среза определяется по формуле (4):

$$c = k_2 k_p 79 M\tau^{0.32} / (1 + I_L)^{3.62}, \quad (4)$$

где k_2 – коэффициент на окатанность крупных обломков для определения удельного сцепления; k_p – коэффициент, учитывающий плотность грунта, а также отличие фактического значения плотности грунта от его нормированного значения.

По результатам расчетов, проведенных по методике оценки прочности и сжимаемости крупнообломочных грунтов с пылеватым и глинистым заполнителем, разработанной ДальНИИС, получены следующие параметры прочности элювиально-делювиального грунта:

– проба А: сцепление c – 0,0198 МПа; угол внутреннего трения φ – 28,3°;
– проба В: сцепление c – 0,046 МПа; угол внутреннего трения φ – 20,7°.

Таким образом, параметры прочности элювиально-делювиального грунта, полученные в результате испытаний на плоский срез (прямой метод), и параметры, рассчитанные с использованием зависимости механических и физических характеристик (метод ДальНИИС), имеют ряд отличий (табл. 3).

Для пробы А значения удельного сцепления и угла внутреннего трения, определенные различными методами, имеют схожие относительные отличия – 29,2 и 27,2 % соответственно. Однако, если рассматривать показатели сцепления, то полученные различными методами значения можно считать сопоставимыми, так как они входят в границы погрешности ее определения. Расхождение между показателями, полученными прямым и расчетным методами, составляет 0,0058 МПа, и оно входит в границы погрешности результатов испытаний, полученных прямым методом ($\pm 0,0099$ МПа). Различие в значениях угла внутреннего трения на 27,2 % является весьма существенным: так, значения прочности грунта при нормальной уплотняющей нагрузке 0,2 МПа, рассчитанные с использованием параметров прочности, определенных различными методами,

будут составлять 0,159 МПа для прямого метода и 0,127 МПа – для расчетного. Это, в свою очередь, может оказать весомое влияние при расчете устойчивости массива грунтов.

Для пробы В расхождения значений характеристик прочности, полученных прямым и расчетным методами, менее существенно и составляет: для удельного сцепления – 6,3 %, для угла внутреннего трения – 16,9 %. Здесь, как и для пробы А, значение удельного сцепления, полученное расчетным методом, входит в границы погрешности значения, полученного прямым методом: 0,046 и $0,0489 \pm 0,0104$ МПа соответственно. Различие в значениях угла внутреннего трения на 16,9 % не является весьма существенным для данного грунта: так, значения прочности при нормальной уплотняющей нагрузке 0,2 МПа, полученные прямым и расчетным методами, составляют 0,139 и 0,122 МПа соответственно.

Кроме того, стоит отметить, что, сравнивая результаты, полученные разными методами, необходимо также упомянуть о характеристиках прецизионности этих методов. В соответствии с «Методикой оценки прочности и сжимаемости крупнообломочных грунтов с пылеватым

Таблица 3

**Сравнение параметров прочности,
полученных прямым и расчетным методами**

Table 3

**Comparison of strength parameters obtained
by direct and computational methods**

Проба	Характеристика прочности	Прямой метод	Расчетный метод	Отличие	
				Абсолютное	Относительное, %
Проба А	Удельное сцепление c , МПа	0,014	0,0198	0,0058	29,2
	Угол внутреннего трения ϕ , град.	36	28,3	7,7	27,2
Проба В	Удельное сцепление c , МПа	0,0489	0,046	0,0029	6,3
	Угол внутреннего трения ϕ , град.	24,2	20,7	3,5	16,9

и глинистым заполнителем и пылеватых и глинистых грунтов с крупнообломочными включениями», разработанной ДальНИИС, характеристики прочности рассчитываются по значениям физических характеристик грунта. Следовательно, прецизионность данной методики зависит от характеристик прецизионности методов определения физических характеристик. На данном этапе многие грунтовые лаборатории занимаются оценкой характеристик прецизионности отдельных методов определения физических характеристик в условиях повторяемости и воспроизводимости, однако данные по характеристикам прецизионности параметров прочности, полученные с использованием методики ДальНИИС, пока отсутствуют.

В нормативных документах, регламентирующих проведения одноплоскостного (прямого) среза, также не приведены характеристики прецизионности метода, однако есть ряд исследований, посвященных данному вопросу. Например, для оценки повторяемости и воспроизводимости метода прямого сдвига (в соответствии с ASTM D 3080 и AASHTO T 236) группой исследователей из Висконсинского университета в Мадисоне был запланирован эксперимент, включающий серию испытаний проб плохо отсортированного песка для определения угла внутреннего трения методом прямого среза [13]. Для оценки прецизионности в условиях повторяемости в одной лаборатории одним оператором на одном и том же испытательном оборудовании была проведена серия из пяти испытаний. Внутрिलाбораторные испытания показали, что метод одноплоскостного среза имеет достаточно высокую повторяемость, разница между максимальным ($41,8^\circ$) и минимальным ($41,5^\circ$) значениями угла внутреннего трения составила всего $0,3^\circ$.

В эксперименте по оценке воспроизводимости метода прямого среза

принимали участие десять лабораторий. Разными операторами на испытательном оборудовании различной конструкции для плохо отсортированного песка были определены значения угла внутреннего трения. Данные межлабораторных испытаний показали, что значения угла внутреннего трения могут колебаться на $18,2^\circ$: от $24,5^\circ$ до $42,7^\circ$, что говорит о низкой воспроизводимости данного метода. Стандартное отклонение для межлабораторного эксперимента составило $8,8^\circ$ (27 %). Авторы данного эксперимента полагают, что высокое значение вариативности связано с рядом факторов, влияющих на результаты испытаний. Например, есть исследования, посвященные влиянию размера и конструкции срезной коробки испытательного оборудования на характеристики прочности [14].

Заключение

Испытания на прочность были проведены для двух валовых проб элювиально-делювиальных грунтов: щебенистого грунта (проба А) и щебенистого суглинка (проба В). В ходе испытаний на плоский (прямой) срез получены следующие параметры прочности: для пробы А удельное сцепление составило $0,0140 \pm 0,0099$ МПа, угол внутреннего трения – $36,0 \pm 2,1^\circ$, для пробы В удельное сцепление – $0,0489 \pm 0,0104$ МПа, угол внутреннего трения – $24,2 \pm 1,9^\circ$. Данные результаты соответствуют теоретическим представлениям о природе прочности грунта. Удельное сцепление, характеризующее главным образом водно-коллоидные связи, возникающие между частицами малых размеров (мелкая пыль, глинистые частицы), для пробы А имеет весьма небольшое значение – $0,0140$ МПа, что обусловлено небольшим содержанием в рассматриваемом грунте таких частиц – 10,0 %. Для пробы В показатель сцепления выше и составляет $0,0489$ МПа, выше и содержание обуславливающих этот показатель частиц – около 30 %. Угол внутреннего трения, характеризую-

щий силы механического взаимодействия между частицами, возникающего при приложении к материалу нормальной к плоскости сдвига нагрузки, для пробы А имеет достаточно высокое значение и составляет 36° . Это обусловлено высоким содержанием в грунте крупных частиц (размера песка, дресвы, щебня) – свыше 70 %, для пробы В этот показатель ниже и составляет $24,2^\circ$, содержание частиц размером крупнее 0,1 мм в данной пробе – менее 50 %.

Параметры прочности, рассчитанные с использованием «Методики оценки прочности и сжимаемости крупнообломочных грунтов с пылеватым и глинистым заполнителем и пылеватых и глинистых грунтов с крупнообломочными включениями», разработанной ДальНИИС, отличаются от параметров прочности, полученных по результатам прямого среза (см. табл. 3). Это говорит о том, что к использованию в расчетных схемах

прочностных характеристик, рассчитанных по физическим свойствам грунта, следует относиться с осторожностью. Однако данные отдельных исследований характеристик воспроизводимости методики прямого среза свидетельствуют о том, что при определении угла внутреннего трения по данному методу в разных лабораториях на испытательном оборудовании с отличающейся конструкцией разброс полученных значений может составлять 27 %

Методика, разработанная ДальНИИС, на данный момент является основной в Российской Федерации для получения характеристик сцепления и угла внутреннего трения. По нашим рекомендациям при инженерных изысканиях для крупнообломочных грунтов даже там, где допустимо использование расчетных значений характеристик прочности, следует дополнять их характеристиками, полученными по методу прямого среза.

Библиографический список

1. Рапацкая Л.А., Буглов Н.А., Хао Дунхэн. Нефтегазоносные комплексы восточных регионов России и Китая: монография. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2013. 316 с.
2. Конторович А.Э., Сурков В.С., Трофимук А.А., Шемин Г.Г., Бакин В.Е., Воробьев В.Н., Ларищев А.И., Леонтович В.Б., Мандельбаум М.М., Матвеев В.Д., Микуленко К.И., Мигурский А.В., Моисеев С.А., Рыбьяков Б.Л., Ситников В.С., Соколов П.Н., Старосельцев В.С., Топешко В.А., Фрадкин Г.С., Чеканов В.И. Нефтегазоносные бассейны и регионы Сибири. Вып. 7. Непско-Ботубинский регион. Новосибирск: Изд-во СНИИГ-ГиМС, 1994. 76 с.
3. Конторович А.Э., Сурков В.С., Трофимук А.А. Геология нефти и газа Сибирской платформы. М.: Недра, 1981. 552 с.
4. Судаков В.В., Иванчик А.В., Куницина И.В. Геологическое строение Предпатомского прогиба // Нефтяное хозяйство. 2011. № 4. С. 46–47.
5. Методика оценки прочности и сжимаемости крупнообломочных грунтов с пылеватым и глинистым заполнителем и пылеватых и глинистых грунтов с крупнообломочными включениями / ред. М.А. Жарикова. М.: Стройиздат, 1989. 24 с.
6. Лысенко М.П. Состав и физико-механические свойства грунтов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Недра, 1980. 272 с.
7. Болдырев Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса. Пенза: Изд-во ПГУАС, 2008. 696 с.
8. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Специальная инженерная геология. Л.: Недра, 1978. 496 с.
9. Sabatini P.J., Bachus R.C., Mayne P.W., Schneider J.A., Zettler T.E. Geotechnical Engineering Circular. № 5. Evaluation of Soil and Rock Properties. 2002. 385 p.
10. Handy R L., Fox N.W. Soil Bore-Hole Direct-Shear Test Device // Highway Research News. 1967. № 27. P. 42–51.
11. Yanrong Li. Effects of particle shape and size distribution on the shear strength behavior of composite soils // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2013. Vol. 72, № 3-4. P. 371–381.
12. ASTM D 3080. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soil Under Consolidated Drained Conditions // Annual Book of Standards. Vol. 04.08. Soil and Rock. ASTM, 2004.

13. Bareither C.A., Benson C.H., Edil T.B. Reproducibility of Direct Shear Tests Conducted on Granular Backfill Materials // Geotechnical Testing Journal. 2008. Vol. 31, № 1. P. 1–11.

14. Wen-Xi Fu, Feng Dai. Scale dependence of shear strength for a coarse granular soil using a superimposition-nest type of direct shear apparatus // Arabian Journal of Geosciences. 2015. Vol. 8. Iss. 12. P. 10301–10312.

References

1. Rapatskaya L.A., Buglov N.A., Khao Dunkhen. *Neftegazonosnye komplekсы vostochnykh regionov Rossii i Kitaya: monografiya* [Oil and gas complexes of Eastern regions of Russia and China]. Irkutsk: Irkutsk State Technical University Publ., 2013, 316 p. (In Russ.).

2. Kontorovich A.E., Surkov V.S., Trofimuk A.A., Shemin G.G., Bakin V.E., Vorobev V.N., Larichev A.I., Leontovich V.B., Mandelbaum M.M., Matveev V.D., Mikulenko K.I., Migurskij A.V., Moiseev S.A., Rybyakov B.L., Sitnikov V.S., Sobolev P.N., Staroselcev V.S., Topeshko V.A., Fradkin G.S., Chekanov V.I. *Neftegazonosnye basseiny i regiony Sibiri* [Oil and gas basins and regions of Siberia]. Iss. 7. *Nepko-Botuobinskii region* [Nepa-Botuoba region]. Novosibirsk: Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources Publ., 1994, 76 p. (In Russ.).

3. Kontorovich A.E., Surkov V.S., Trofimuk A.A. *Geologiya nefti i gaza Sibirskoi platformy* [Oil and gas geology of the Siberian platform]. Moscow: Nedra Publ., 1981, 552 p. (In Russ.).

4. Sudakov V.V., Ivanchik A.V., Kunitsina I.V. Geologic structure of Predpatomsky trough according to seismic data. *Neftyanoe khozyaistvo* [Oil Industry], 2011, no. 4, pp. 46–47. (In Russ.).

5. Zharikova M.A. *Metodika otsenki prochnosti i szhimaemosti krupnooblomochnykh gruntov s pylevatym i glinistym zapolnitelem i pylevatykh i glinistyykh gruntov s krupnooblomochnymi vklyucheniymi* [Methods of assessing the strength and compressibility of large-block soils with silty and clay filler, and silty and clay soils with coarse-grained inclusions]. Moscow: Stroiizdat Publ., 1989, 24 p. (In Russ.).

6. Lysenko M.P. *Sostav i fiziko-mekhanicheskie svoystva gruntov* [Composition and physico-

mechanical properties of soils]. Moscow: Nedra Publ., 1980, 272 p. (In Russ.).

7. Boldyrev G.G. *Metody opredeleniya mekhanicheskikh svoystv gruntov. Sostoyanie voprosa* [Methods for determining mechanical properties of soils. The state of the problem]. Penza: Penza State University of Architecture and Construction Publ., 2008, 696 p. (In Russ.).

8. Lomtadze V.D. *Inzhenernaya geologiya. Special'naya inzhenernaya geologiya* [Engineering geology. Special engineering geology]. Leningrad: Nedra Publ., 1978, 496 p. (In Russ.).

9. Sabatini P.J., Bachus R.C., Mayne P.W., Schneider J.A., Zettler T.E. Geotechnical Engineering Circular. No. 5. Evaluation of Soil and Rock Properties, 2002, 385 p.

10. Handy R.L., Fox N.W. Soil Bore-Hole Direct-Shear Test Device. Highway Research News, 1967, no. 27, pp. 42–51.

11. Yanrong Li. Effects of particle shape and size distribution on the shear strength behavior of composite soils. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2013, vol. 72, no. 3-4, pp. 371–381.

12. ASTM D 3080. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soil Under Consolidated Drained Conditions. Annual Book of Standards. Vol. 04.08. Soil and Rock. ASTM, 2004.

13. Bareither C.A., Benson C.H., Edil T.B. Reproducibility of Direct Shear Tests Conducted on Granular Backfill Materials. Geotechnical Testing Journal, 2008, vol. 31, no. 1, pp. 1–11.

14. Wen-Xi Fu, Feng Dai. Scale dependence of shear strength for a coarse granular soil using a superimposition-nest type of direct shear apparatus. Arabian Journal of Geosciences, 2015, vol. 8, iss. 12, pp. 10301–10312.

Критерии авторства

Кузнецов Н.Л., Верхоzin И.И. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Nikita L. Kuznetsov, Ivan I. Verkhosin have written the article, have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Информация об авторах

Кузнецов Никита Леонидович, аспирант Института недропользования Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Российская Федерация; *e-mail: kuzn_nikita@mail.ru*

Верхозин Иван Иванович, кандидат геолого-минералогических наук, профессор кафедры прикладной геологии Института недропользования Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Российская Федерация; *e-mail: iverhozin@istu.edu*

Information about the authors

Nikita L. Kuznetsov, Postgraduate Student of the Institute of Subsoil Use of Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation; *e-mail: kuzn_nikita@mail.ru*

Ivan I. Verkhosin, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor of the Department of Applied Geology of the Institute of Subsoil Use of Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation; *e-mail: iverhozin@istu.edu*