

Лагоша Д.В., Галкин С.Ю., Волков Н.Г., Соколов И.С.

ООО «ГЕОИНЖСЕРВИС», г. Москва, dvl@fugro.ru, gsy@fugro.ru, ngv@fugro.ru, ssi@fugro.ru

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ НЕДРЕНИРОВАННОМУ СДВИГУ ГРУНТОВ РАЗЛИЧНЫМИ ПОЛЕВЫМИ МЕТОДАМИ

Аннотация. Рассматриваются результаты полевых испытаний слабых глинистых грунтов методами статического зондирования, дилатометра и крыльчатки. В ненарушенном грунтовом массиве в непосредственной близости друг от друга проведены три различных вида полевых испытаний. По результатам испытаний выделены и подтверждены инженерно-геологические элементы, представленные суглинком тяжелым, песчанистым, мягкопластичной и тугопластичной консистенции. На основе полученных данных рассчитана характеристика грунта – недренированная прочность. Сопоставляются результаты расчета по эмпирическим зависимостям каждого из методов. Показана близость получившихся значений.

Ключевые слова: статическое зондирование; дилатометр; крыльчатка; глинистые грунты; сопротивление недренированному сдвигу; недренированная прочность; прочностные свойства грунтов; полевые методы.

Актуальность

Недренированная прочность характеризуется соответствующим параметром C_u , который определяется различными полевыми и лабораторными методами испытаний. Этот показатель характеризует прочность слабых водонасыщенных глинистых грунтов. Это, как правило, мягкопластичные и текучепластичные глинистые грунты с незавершенным процессом естественной консолидации. Данный параметр используется при проектировании насыпей, оснований зданий и сооружений при быстрых темпах возведения и при отсутствии возможности дренирования для расчета осадок и несущей способности фундаментов [1].

Сравнение результатов определений сопротивления недренированному сдвигу различными методами: как полевыми, так и лабораторными – важная и не теряющая своей актуальности тема исследований. В зарубежной литературе многие специалисты с конца XX в. изучали вопрос корреляции полученных значений прочности разными методами [8–18].

В частности, на основании сопоставления результатов по данным статического зондирования и дилатометра, статического зондирования и лопастного среза (крыльчатки), а также проведенных лабораторных испытаний, были выведены эмпирические уравнения для определения C_u , некоторые из которых широко используется в изыскательской практике.

В отечественной литературе, однако, таких работ с сопоставлением результатов полевых методов практически нет, т.к. расчет недренированной прочности рассматривается как преимущественно лабораторный метод.

Однако, без сопоставления данных лабораторных и полевых испытаний в проводимых исследованиях, полученные зависимости можно использовать только как оценочные.

Таким образом, для определения и верификации результатов определения прочностных и деформационных характеристик грунтов необходимо использовать различные методы испытаний, в т.ч. и их комбинации.

Площадка и грунты исследования

Площадка исследования расположена в центральной части Западно-Сибирской равнины, в юго-восточной части Ханты-Мансийского автономного округа. Исследуемые грунты представлены глинистыми отложениями аллювиального генезиса. По данным бурения и статического зондирования они были разделены на 2 расчетных геологических элемента (РГЭ):

1. РГЭ-1: суглинок тяжелый, песчанистый, мягкопластичной консистенции, с примесью органического вещества, с тонкими прослоями песка мелкого.

2. РГЭ-2: суглинок тяжелый, песчанистый, тугопластичной консистенции, с примесью органического вещества, с тонкими прослоями песка мелкого.

Метод, методика и оборудование

На площадке исследований испытания проводились тремя полевыми методами статическим зондированием с измерением порового давления (СРТУ), дилатометром (DMT) и крыльчаткой – вращательным срезом (VST).

Статическое зондирование – погружение зонда в грунт под действием статической вдавливающей нагрузки с непрерывным измерением следующих показателей:

- лобовое сопротивление вдавливанию зонда q_c , МПа;
- боковое трение грунта по муфте f_s , МПа;
- поровое давление в грунте u_2 , МПа;
- угол отклонения зонда от вертикали i , град.;
- глубина внедрения зонда z , м.

Дилатометр – прибор для измерений размеров тела, вызванных воздействием давления, температуры и др. При инженерно-геологических изысканиях с его помощью изучают модуль деформации грунтов на разных глубинах. Использовался дилатометр Маркетти, представляющий собой плоский короб в виде узкой лопаты, в боковой стенке которой имеется выдвижная мембрана диаметром 6 мм. Дилатометр вдавливался в грунт на заданную глубину установкой статического зондирования, где с использованием давления воздуха на мембрану измеряется начальное горизонтальное давление грунта. Затем под давлением воздуха из компрессора, поступающего по гибкому шлангу, мембрана вдавливается на 1,1 мм, и замеряется давление вдавливания. Зная

деформацию вдавливания и разность давлений вдавливания и начального, можно оценить деформационные и прочностные свойства грунта. Испытание производилось с регистрацией следующих показателей каждые 25 см:

- начальное давление A , кПа;
- конечное давление B , кПа;
- глубина внедрения дилатометра z , м.

Крыльчатка – прибор для изучения сопротивления сдвигу слабых глинистых грунтов. С ее помощью измеряют максимальный крутящий момент M (Н·м), необходимый для вращения крыльчатки. Она представляет собой четырехлопастной прибор, задавливаемый в грунт по цилиндрической поверхности. Глубины испытаний методом вращательного среза определялись по данным статического зондирования.

Следует отметить, что испытания выполнялись не в одной и той же точке ввиду физической невозможности испытать ненарушенный грунтовый массив в одной и той же точке несколько раз, но на минимальном расстоянии друг от друга (3–4 м) для снижения влияния фактора грунтовой неоднородности.

Характеристика

Сопротивление грунта сдвигу – способность грунта противодействовать сдвигающим напряжениям, возникающим при приложении к грунту нагрузки. Сдвиг происходит в результате смещения грунта по одной или нескольким поверхностям или зонам ослабления. Подразделяется на кратковременное (условно-мгновенное) и длительное.

Зависимость сопротивления сдвигу τ от нормального напряжения σ аппроксимируется для песков зависимостью $\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi$, для глинистых грунтов при σ до 1,0–1,5 МПа $\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi + C$, где $\operatorname{tg} \varphi$, C – параметры линейности, называемые коэффициентом внутреннего трения и сцеплением соответственно. Сопротивление глинистых грунтов зависит от прочности структурных связей, гранулометрического и минерального составов, структурно-текстурных особенностей, плотности, влажности, консистенции, состава и концентрации электролитов порового раствора [4].

Сопротивление грунта сдвигу изучается как лабораторными, так и полевыми методами. В лаборатории опыты проводятся в одноплоскостных приборах и стабилometрах; для качественной оценки используется лабораторная крыльчатка. В полевых условиях его определяют путем сдвигов штампов и целиков, с помощью обрушения массивов грунта, а в слабых глинистых грунтах – лопастным прибором. Данные испытания позволяют рассчитать значения прочностных характеристик грунта φ и C .

При проведении испытаний авторами особое внимание было уделено получению показателя сопротивления недренированному сдвигу C_u .

Результаты

Расчет прочности на недренированный сдвиг по данным CPTU, DMT и VST проведен на основе зависимостей, применяемых как в отечественной, так и в зарубежной практике.

Таблица 1

Формулы для расчета C_u различными полевыми методами

Описание	Формула
Расчет по данным статического зондирования (T. Lunne, et al. [11])	
Сопротивление недренированному сдвигу C_u , кПа	$C_{u\text{ CPTU}} = 1000 \left(\frac{q_t - \sigma_{v0}}{N_{kt}} \right)$, где σ_{v0} – вертикальное бытовое давление, кПа; N_{kt} – эмпирический коэффициент
Скорректированное лобовое сопротивление q_t , МПа	$q_t = q_c + (1 - a)u_2$, где a – коэффициент площади основания конуса зонда; u_2 – измеренное поровое давление, МПа
Расчет по данным испытаний дилатометром (https://www.marchetti-dmt.it)	
Сопротивление недренированному сдвигу C_u , кПа	$C_{u\text{ DMT}} = 0,22 \sigma'_{v0} (0,5 K_D)^{1,25}$, где σ'_{v0} – эффективное вертикальное бытовое давление, кПа
Дилатометрический коэффициент бокового давления K_D , д.ед.	$K_D = (P_0 - U_0) / \sigma'_{v0}$, где U_0 – гидростатическое поровое давление, кПа.
Скорректированное начальное давление P_0	$P_0 = 1,05 (A + \Delta A) - 0,05 (B - \Delta B)$, где ΔA и ΔB – калибровочные значения начальных и конечных давлений A и B , кПа
Расчет по данным испытаний крыльчаткой (ГОСТ 20276.5-2020 [2])	
Сопротивление недренированному сдвигу грунта C_u , кПа	$C_{u\text{ VST}} = \frac{M_{\max}}{B}$, где $M_{\max}$ – максимальный крутящий момент, Н·м
Постоянная крыльчатки B	$B = \frac{\pi d^2}{2} \left(h + \frac{d}{3} \right)$, где d и h – диаметр и высота крыльчатки, мм

Сопротивление недренированному сдвигу было рассчитано по полевым данным в количестве:

№ точки	Полевой метод испытаний			Кол-во полученных значений C_u
	CPTU	DMT	VST	
1	597	49	5	
2	740	57	7	
3	666	55	6	
4	659	54	6	
5	663	52	6	
6	612	55	8	
Всего	3937	322	38	

Можно отметить различную дискретность результатов у методов. Метод вращательного среза считается прямым методом, однако он дает наименьшую выборку в виде «точечных» результатов по разрезу. Статическое зондирование в связи с непрерывной регистрацией данных частотой 2 Гц дает наибольшую выборку данных с возможностью рассчитать характеристики всей испытанной грунтовой толщи. Дилатометрическое испытание является промежуточным по дискретности: достаточно «короткий» шаг между регистрацией данных (25 см), но производится «точечный» замер.

По результатам расчетов были построены графики сопоставления результатов в каждой из точек испытаний. Они представлены на рис. 1, где результаты по полевым методам сопоставляются в каждой точке по отдельности.

Следует заметить, что результаты показывают достаточно близкие друг к другу значения.

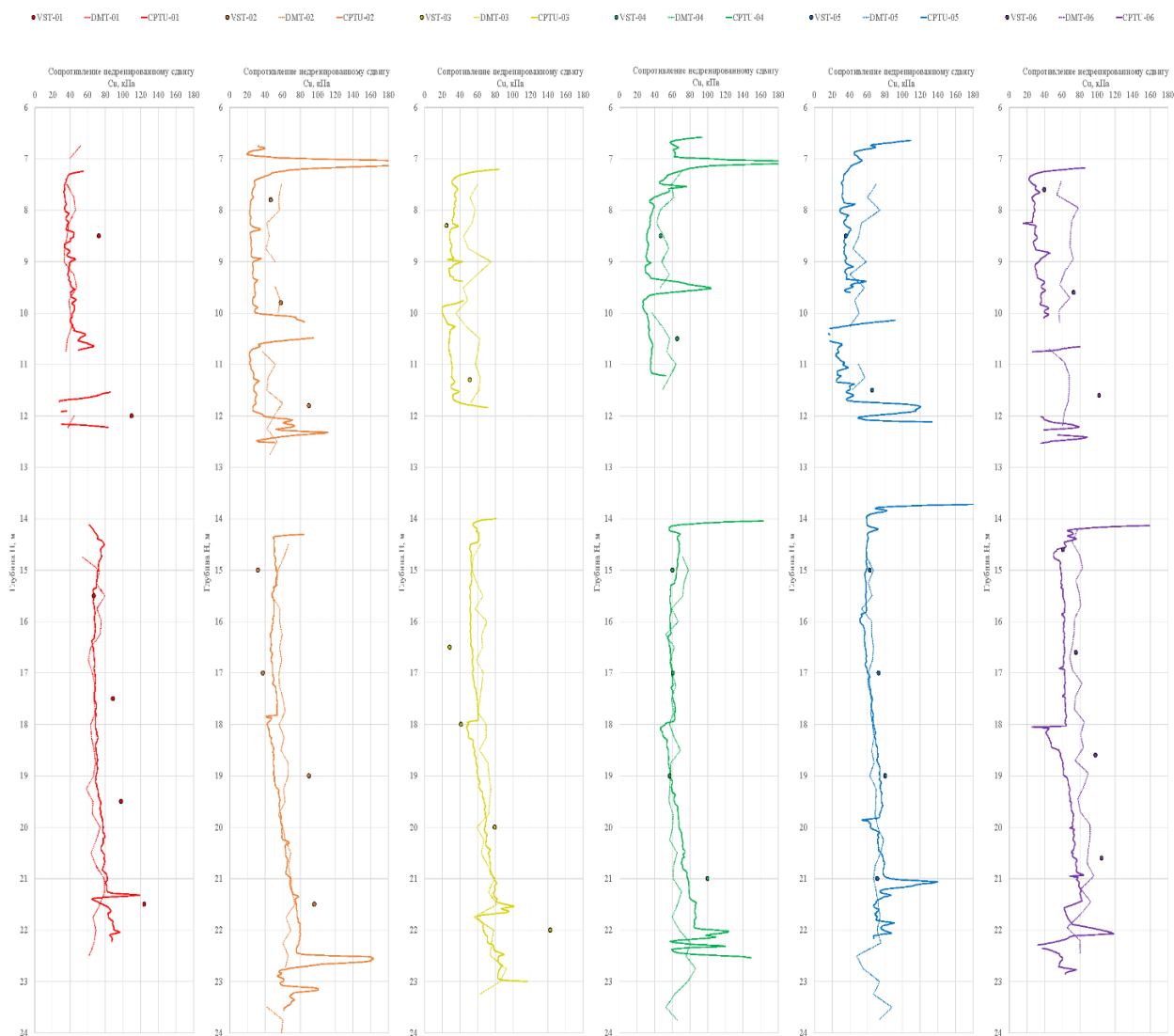


Рис. 1. Графики сопоставления результатов определения C_u различными полевыми методами в точках исследований

На рис. 2 представлены результаты в виде единого «облака» точек со всех испытаний. Необходимо отметить, что даже при наложении всех результатов на один график, разброс значений достаточно низкий.

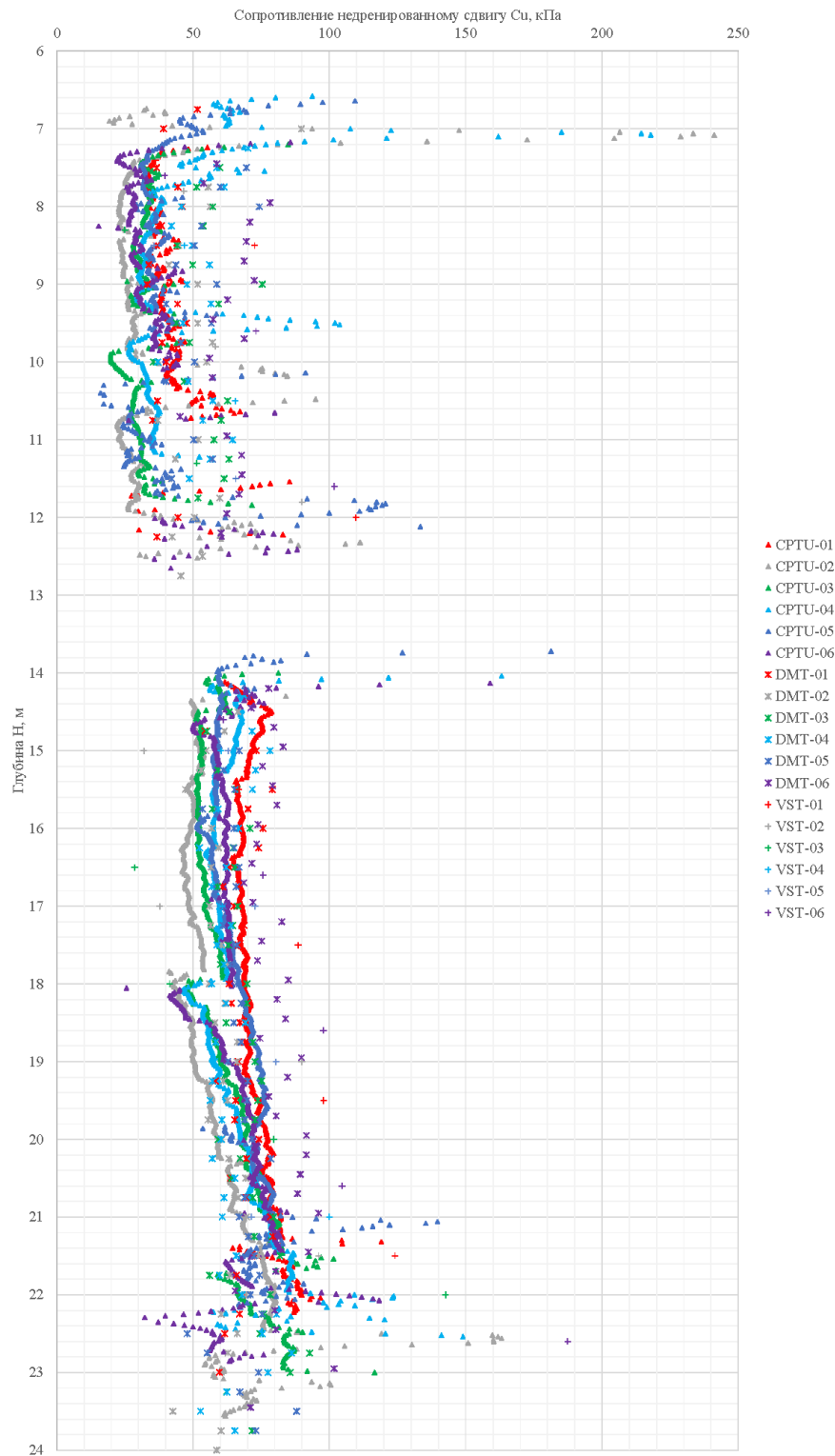


Рис. 2. Графики сопоставления результатов определения C_u различными полевыми методами в едином «облаке»

В табл. 2 представлены результаты в численном виде: средние значения недренированной прочности у РГЭ в каждой из точек.

Таблица 2

Полученные результаты по недренированной прочности

№ точки	РГЭ-1			РГЭ-2		
	C_u CPTU	C_u DMT	C_u VST	C_u CPTU	C_u DMT	C_u VST
1	40,8	39,6	72,6	73,1	68,2	94,4
2	39,0	50,1	64,9	59,7	61,5	64,0
3	31,6	53,5	38,2	63,6	68,0	73,0
4	41,0	52,2	56,2	66,4	64,4	69,5
5	42,2	53,6	50,7	68,2	66,2	71,9
6	48,8	63,1	71,5	65,8	80,3	105,3
Общее	40,6	52,0	59,0	66,2	68,1	79,7

В соответствии с исследованиями специалистов и нормативными техническими документами по данной характеристике можно оценить не только прочность, но и консистенцию глинистого грунта. Различные классификации представлены в табл. 3.

Таблица 3

Сводная классификация глинистых грунтов в зависимости от сопротивления сдвигу

Недренированная прочность грунта		Консистенция грунта			Сопротив- ление недрениро- ванному сдвигу C_u , кПа в массиве грунта
ГОСТ 25100- 2020 [3]	EN ISO 14688-2 [6]	BS 8004:1986 [5]	P.K. Rober- tson [17]	Консистен- ция по EN ISO 22476-9 [7]	
Чрезвы- чайно низкой прочности	Чрезвычайно низкой прочности	Very soft	Very soft	Текучие	0–10
Очень низкой прочности	Очень низкой прочности			Текучеплас- тичные	10–20
Низкой прочности	Низкой прочности	Soft	Soft	Мягкоплас- тичные	20–40
Средней	Средней	Soft to firm	Firm		Тугоплас- тичные
		Firm		50–75	
Высокой	Высокой	Firm to stiff	Stiff		75–100
		Stiff			100–150

Недренированная прочность грунта		Консистенция грунта			Сопротивление недренированному сдвигу C_u , кПа в массиве грунта
ГОСТ 25100-2020 [3]	EN ISO 14688-2 [6]	BS 8004:1986 [5]	P.K. Robertson [17]	Консистенция по EN ISO 22476-9 [7]	
Очень высокой прочности	Очень высокой прочности	Very stiff or hard	Very stiff	Твердые и полутвердые	150–300
Чрезвычайно высокой прочности	Чрезвычайно высокой прочности		Hard		> 300

Необходимо отметить, что практически все полученные значения недренированной прочности попадают в диапазон от мягко- до тугопластичной консистенции (20–75 кПа), что соответствует исходному описанию грунтов. Также на рис. 2 наблюдается, что значения по РГЭ-1 в среднем меньше значений у РГЭ-2, что позволяет говорить о верном разделении элементов по консистенции.

Таким образом, можно отметить, что значения недренированной прочности, полученные тремя различными полевыми методами при испытаниях в непосредственной близости друг от друга, достаточно близки друг к другу. Вследствие этого можно сделать вывод, что и статическое зондирование, и дилатометр, и лопастной срез (крыльчатку) можно успешно применять в инженерно-геологических исследованиях для получения первичных данных и дальнейшего расчета данной характеристики, а также для верификации результатов ее определения между методами.

Список литературы

1. Болдырев Г.Г. Полевые методы испытаний грунтов (в вопросах и ответах). Саратов: ПАТА, 2013. 356 с.
2. ГОСТ 20276.5-2020 Грунты. Метод вращательного среза.
3. ГОСТ 25100-2020 Грунты. Классификация.
4. Пашкин Е.М., Каган А.А., Кривоногова Н.Ф. Терминологический словарь-справочник по инженерной геологии / Под ред. Е.М. Пашкина. М.: КДУ, 2011. 952 с.
5. BS 8004:1986 Code of practice for foundations.
6. EN ISO 14688-2:2004 Geotechnical investigation and testing. Identification and classification of soil. Part 2. Principles for a classification.
7. EN ISO 22476-9:2020 Geotechnical investigation and testing. Field testing. Part 9. Field vane test (FVT and FVT-F).

8. Hong S.J., Lee M.J., Kim J.J., Lee W.J. Evaluation of undrained shear strength of Busan clay using CPT // *Proceedings of the 2nd International Symposium on cone penetration testing*. Huntington Beach, CA, USA, 2010. P. 1–8.
9. Karakouzian M., Avar B.B., Hudyma N., Moss J.A. Field measurements of shear strength of an underconsolidated marine clay // *Engineering Geology*. 2003. No. 67. P. 233–242. [http://dx.doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00182-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00182-6).
10. Larsson R., Ahnberg H. On the evaluation of undrained shear strength and preconsolidation pressure from common field tests in clay // *Canadian Geotechnical Journal*. 2011. Vol. 42. No. 4. P. 1221–1231. <https://doi.org/10.1139/t05-031>.
11. Lunne T., Robertson P.K., Powell J.J.M. *Cone penetration testing in geotechnical practice*. London, UK: Chapman-Hall Publishers, 1997. 312 p.
12. Marchetti S., Monaco P., Totani G., Calabrese M. The flat dilatometer test (DMT) in soil investigations // *A report by the ISSMGE Committee TC 16. Proceedings of the International Conference on in-situ measurement of soil properties and case histories*. Bali, Indonesia, 2001. P. 95–131.
13. Mayne P.W. Interrelationships of DMT and CPT readings in soft clays // *Proceedings of the 2nd International flat dilatometer Conference*. Washington, DC, USA, 2006. P. 231–236.
14. Mayne P.W. Evaluating effective stress parameters and undrained shear strength of soft-firm clays from CPT and DMT // *Australian Geomechanics Journal*. 2016. Vol. 51. No. 4. P. 27–55.
15. Mayne P.W., Peuchen J. Undrained shear strength of clays from piezocone tests: a database approach // *Proceedings of the 5th International Symposium on cone penetration testing (CPT'22)*. Bologna, Italy: CRC Press Bologna, 2022. P. 546–551.
16. Młynarek Z., Wierzbicki J., Stefaniak K. Interrelationship between undrained shear strength from DMT and CPTU tests for soils of different origin // *Geotechnical Testing Journal*. 2018. Vol. 41. No. 5. P. 890–901. <https://doi.org/10.1520/GTJ20170365>.
17. Robertson P.K. Interpretation of cone penetration tests: a unified approach // *Canadian Geotechnical Journal*. 2009. Vol. 46. No. 11. P. 1337–1355. <https://doi.org/10.1139/T09-065>.
18. Schaeffers J., Weemee I. Comparison of in-situ shear strength measurement techniques of soft clays // *Soft ground engineering: Proceedings of the 20th Vancouver geotechnical society Symposium*. Vancouver, BC, Canada, 2012.

D.V. Lagosha, S.Y. Galkin, N.G. Volkov, I.S. Sokolov

GEOINGSERVICE LLC, Moscow, dvl@fugro.ru, gsy@fugro.ru, ngv@fugro.ru, ssi@fugro.ru

COMPARISON OF THE RESULTS OF DETERMINING THE SOIL UNDRAINED SHEAR STRENGTH BY DIFFERENT FIELD METHODS

Abstract. The field test results of cone penetration testing, dilatometer testing and vane shear testing on soft clays are considered. Three different types of field tests were carried out in an undisturbed soil mass in high precision to each other. According to the test results, engineering-geological elements, represented by soft to firm silty clay were identified and confirmed. On the basis of the data obtained, the undrained strength of the soil is estimated. The results of the estimation based on the empirical equations of each of the methods are compared. The precision of the resulting values is shown.

Key words: cone penetration testing; dilatometer testing; vane shear test; clay; undrained shear strength; soil strength; field methods.